

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МОРСКАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ. БЕЗОПАСНОСТЬ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ»

VIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE "MARINE TECHNOLOGY AND ENGINEERING. SAFETY OF THE MARINE INDUSTRY"

СЕКЦИЯ «НАВИГАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ВЕДЕНИЯ ПРОМЫСЛА»

SECTION "NAVIGATION AND FISHING SAFETY"

<i>Данилов Ю.А., Рагулина И.Р.</i> Исследование стесненных условий навигационных аварий – поиск численных решений.....	4
<i>Ермаков С.В.</i> Методика формирования рейтинга навигационного оборудования морских судов.....	9
<i>Ермаков С.В., Морозова С.Ю.</i> Метод оценки поперечной метацентрической высоты судна с использованием спутникового компаса	17
<i>Мойсеенко С.С.</i> Правовые аспекты определения «морского риска».....	23
<i>Тимофеев В.К., Бураковский П.Е., Гуральник Б.С., Иконописцев И.И.</i> Определение степени риска экипажа рыбопромыслового судна при работе в потенциально опасных районах Мирового океана.....	28
<i>Якута И.В.</i> Обеспечение сохранности мореходных качеств лесовоза при затоплении машинного отделения	35

СЕКЦИЯ «ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПОСТРОЙКИ И РЕМОНТА СУДОВ»

SECTION "INOVATIVE METHODS IN SHIP DESIGN, CONSTRUCTION AND REPAIR"

<i>Бураковский Е.П., Бураковский П.Е., Дмитровский В.А.</i> Опыт использования технологии SPH для определения внешних сил, действующих на носовую оконечность судна в условиях ее захвата волной	43
<i>Бураковский П.Е.</i> Применение кусочно-аналитических решений при исследовании поведения бортовых перекрытий судовых корпусов за пределом упругости	48
<i>Веровкин В.И., Игушев В.Ф., Веровкин С.В.</i> Технологические меры повышения стойкости стальных корпусов судов к электрохимической коррозии.....	54
<i>Веровкин В.И., Игушев В.Ф., Терюшева С.А.</i> Влияние содержания кремния в стальных обшивках судов на их коррозионную стойкость.....	64
<i>Дектярев А.В., Гришин П.Р., Морозов В.Н.</i> Вопросы применения биоразлагаемых материалов в судостроении на примере полилактида.....	71
<i>Притыкин А.И., Лаврова А.С.</i> Влияние перфорации на несущую способность балок корпусов судов.....	80

СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ»

SECTION "ELECTRICAL SYSTEMS OF THE MARINE INDUSTRY OBJECTS"

<i>Белей В.Ф., Брижак Р.О., Харитонов М.С.</i> Некоторые результаты исследования показателей качества электрической энергии на ряде судов флота рыбной промышленности.....	87
<i>Кажекин И.Е., Благинин В.А., Рагозин С.Н., Вольский В.А.</i> Защитные устройства для безопасности учебных парусных судов «Крузенштерн» и «Седов».....	94
<i>Качесов В.Е., Финашин Р.А.</i> Импульсное резистивное заземление в судовых и портовых электросетях	102
<i>Никишин А.Ю., Харитонов М.С., Никитакос Н.</i> Перспективы использования возобновляемой энергетики в рамках концепции нулевого выброса порта Калининград	110
<i>Новоселов К.А.</i> Комплексная система контроля и управления на судах с колесным движительно-рулевым комплексом.....	118
<i>Павликов С.А.</i> Система управления пневматической муфтой	122
<i>Савенко А.А., Геллер Б.Л.</i> Анализ решений по разработке береговой зарядной станции для электрического парама.....	127
<i>Харитонов М.С., Кажекин И.Е., Кугучева Д.К.</i> Методика сбора информации об однофазных повреждениях изоляции в судовом электрооборудовании.....	135
<i>Чижда С.Н., Молчанов С.В., Матюнин П.А.</i> Перспективы использования судовых синхронных электрических машин с постоянными магнитами	140
<i>Шабалин Л.Д., Савенко А.Е., Савенко П.С.</i> Исследование качества электроэнергии на судах района Керченской паромной переправы	151

СЕКЦИЯ «СУДОВЫЕ И СТАЦИОНАРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ»

SECTION "SHIP AND STATIONARY POWER PLANTS"

<i>Архипов М.И., Филонов А.Г.</i> Результаты испытаний путевого жалюзийного сепаратора пара для производственных и отопительных котельных	157
<i>Глазков Д.Ю.</i> Величина эмиссии сажи с отработавшими газами судовых дизелей в зависимости от действующих факторов при объёмно-плёночном смесеобразовании.....	162
<i>Дорош К.С., Волкова Л.Ю.</i> Численный расчет параметров топливной аппаратуры судового двухтактного двигателя внутреннего сгорания MAN B&W серии MC.....	173
<i>Закиров С.З., Волкова Л.Ю.</i> Особенности конструктивного исполнения топливных насосов высокого давления судовых дизелей.....	179
<i>Кошелев С.В., Сластихин Ю.Н.</i> Расчётно-экспериментальное определение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи воздухоохладителя с тиснёными рёбрами.....	184
<i>Никифоров А.С., Приходько Е.В., Кинжибекова А.К., Карманов А.Е.</i> Исследование процесса охлаждения футеровки ВТУ при выводе из эксплуатации	193
<i>Селин В.В., Юрков С.В., Беркова Е.А.</i> Исследование возможностей повышения эффективности работы теплофикационной установки, утилизирующей древесные отходы.....	198
<i>Толмачёв А.В.</i> Рациональная регулировка дизельного двигателя.....	203

СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО»

SECTION "COMMERCIAL FISHING"

<i>Капчанов А.С., Суконнов А.В., Суконнова Т.Е.</i> Экспериментальные исследования по оценке влияния факторов эксплуатации трала на форму его устья	212
<i>Коновалова К.В.</i> Прогнозирование изгибной и поперечной жесткостей рыболовных крученых изделий.....	218
<i>Лесникова Е.Г., Журавлева А.Д.</i> Некоторые аспекты эффективности промысла трески в Балтийском море.....	229
<i>Мартынов А.Н., Недоступ А.А.</i> Анализ методов расчета неводовыборочных комплексов.....	234
<i>Насенков П.В.</i> Исследования разрывного усилия и относительного удлинения рыболовных крученых материалов	241
<i>Недоступ А.А., Коновалова К.В., Ражев А.О., Насенков П.В.</i> О гипотезе динамического подобия «время-температура» для исследования длительной прочности канатно-веревочных изделий.....	250
<i>Недоступ А.А., Макаров В.В.</i> Аппроксимация экспериментальных данных по выборке стяжного троса модели кошелькового невода.....	255
<i>Недоступ А.А., Ражев А.О., Насенков П.В., Коновалова К.В.</i> Теоретические исследования физико-механических свойств канатно-веревочных изделий.....	259
<i>Пашеева Т.Ю., Чечурина М.Н., Кузьменко А.В., Тамбовцев А.А.</i> Рыбопромышленный комплекс Мурманского региона как гарант безопасности страны.....	264
<i>Помогаева Т.В.</i> Особенности распределения промысловых скоплений килек в Среднем Каспии у дагестанского побережья в осенний период	271
<i>Суконнов А.В., Суконнова Т.Е., Скуратов Н.А., Быков А.А.</i> Экспериментальное определение зависимости усилия подъема траловых мешков с уловом от тягово-скоростных параметров промысловой лебёдки	277

СЕКЦИЯ «ПРИКЛАДНАЯ РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

SECTION "APPLIED RADIOPHYSICS, RADIO ENGINEERING AND INFORMATION SECURITY"

<i>Власова К.В., Пахотин В.А., Симонов Р.В., Бессонов В.А.</i> Обнаружение совокупности сигналов методом максимального правдоподобия	283
<i>Волхонская Е.В., Коротей Е.В., Власова К.В.</i> Модельные исследования направленных свойств двухдиапазонных логопериодических облучателей больших зеркальных антенн в среде MATHCAD.....	289
<i>Куделка Д.В.</i> Определение наилучшей модели машинного обучения в задачах обнаружения сетевых атак	295
<i>Петров С.В., Пахотин В.А., Молостова С.В., Коротей Е.В.</i> Неортогональные системы связи..	301
<i>Подтопельный В.В.</i> Сравнительный анализ технологий аудита информационной безопасности сетевой инфраструктуры диспетчерского уровня АСУТП	306
<i>Холоденин Д.В.</i> Определение параметров рыбных скоплений по эхограмме в графической среде моделирования LabView	312

СЕКЦИЯ «НАВИГАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ВЕДЕНИЯ ПРОМЫСЛА»

SECTION "NAVIGATION AND FISHING SAFETY"

УДК 656.61.052

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЙ НАВИГАЦИОННЫХ АВАРИЙ – ПОИСК ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ

Данилов Юрий Аронович, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры судовождения
Рагулина Изумруд Рамазановна, канд. геогр. наук, доцент кафедры безопасности морепла-
вания

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: yureydanilov@yandex.ru

На ограниченных глубинах влияние комплекса условий резко снижает управляемость судна. Ухудшение управляемости судна пытаются компенсировать увеличением скорости, но при этом увеличивается осадка судна. В результате осадка и скорость судна не соответствуют ситуации.

Статистика условий навигационных аварий судов на ограниченных глубинах в узкостях показывает, что значительная часть аварий происходит в сравнительно безопасных условиях. Анализ сопряженных факторов [1] по тем же авариям показывает значительное взаимодействие условий, что резко снижает угловую скорость судна и увеличивает радиус циркуляции. Вероятно, проявляется естественное стремление судоводителя к повышению скорости. Следовательно, возможная причина некоторых аварий в некорректной оценке условий – роль судоводителя, или в рекомендованных режимах движения судна – роль администрации акватории и научно-методического обеспечения.

Проверим скоростной режим судов участников столкновений именно тех аварий, условия которых исследовали в информационно-логическом анализе [2].

В наших исследованиях рассмотрены следующие объективные и субъективные условия. Глубина места аварии H , длина судна L , скорость судна V , осадка судна T , расчетная величина динамическая осадка $T_{\text{дин}}$ с учетом скорости и отношения глубины места к средней осадке судна и расчетная глубина определения маневренных характеристик судна $H_{\text{ман}}$, исключая влияние глубины на движение судна [1, 3, 4, 5].

Для сравнения и анализа в исследовании использовали следующие относительные (безразмерные) характеристики условий аварий: критерии Фруда по глубине места и по длине судна; отношение глубины места к длине судна; отношение динамической осадки судна к глубине места; отношение глубины места к глубине оценки маневренных характеристик судна [1-5].

Совместное рассмотрение двух относительных характеристик позволяет рассмотреть отношение динамической осадки к глубине оценки маневренных характеристик судна $T_{\text{дин}}/H_{\text{ман}}$, отношение динамической осадки к длине судна $T_{\text{дин}}/L$, отношение глубины места к глубине оценки маневренных характеристик судна $H/H_{\text{ман}}$. Две из последних трёх характеристик $T_{\text{дин}}/L$ и $H/H_{\text{ман}}$ обладают изменчивостью и приемлемы для оценки информационных связей, а отношение $T_{\text{дин}}/H_{\text{ман}}$ показывает преобладающую величину $T_{\text{дин}}/H_{\text{ман}} \approx 0,24 \mp 0,02$.

$T_{\text{дин}}$ рассчитана с учетом скорости и средней осадки судна T_c , вероятно осадки при $V=0$. $H_{\text{ман}}$ также рассчитано по скорости и средней осадке судна T_c [6, 7, 8]. Отношение средней осадки судна к расчётной глубине оценки маневренных характеристик судна $T_c/H_{\text{ман}}$ представлено в таблице 1 (по формуле 1). Для каждого сочетания осадки судна и скорости характерно определенное отношение, превышение этой величины показывает завышение допустимой скорости или осадки судна

Отношение средней осадки судна к расчётной глубине оценки манёвренных характеристик судна $T_{дин}/H_{ман}$

осадка	Скорость, м/с								
	1	2	3	4	5	6	7	8	10
1	0,231	0,191	0,147	0,111	0,085	0,065	0,050	0,042	0,029
2	0,241	0,216	0,185	0,154	0,127	0,104	0,084	0,072	0,051
3	0,243	0,293	0,203	0,177	0,152	0,120	0,105	0,94	0,070
4	0,245	0,232	0,213	0,19	0,168	0,147	0,125	0,112	0,085
5	0,246	0,235	0,219	0,20	0,180	0,160	0,139	0,125	0,098
6	0,247	0,237	0,224	0,21	0,189	0,171	0,150	0,137	0,109
7	0,247	0,239	0,227	0,212	0,196	0,179	0,159	0,196	0,118
8	0,248	0,241	0,230	0,22	0,201	0,185	0,167	0,154	0,127
9	0,248	0,242	0,232	0,220	0,206	0,191	0,173	0,161	0,131
10	0,248	0,242	0,233	0,223	0,209	0,195	0,179	0,167	0,135
11	0,248	0,243	0,234	0,225	0,213	0,200	0,184	0,179	0,147
12	0,248	0,244	0,235	0,237	0,215	0,203	0,188	0,177	0,152
13	0,248	0,244	0,237	0,228	0,218	0,206	0,191	0,181	0,157
14	0,248	0,245	0,238	0,229	0,220	0,208	0,195	0,185	0,161
15	0,248	0,245	0,239	0,23	0,221	0,211	0,198	0,188	0,169
16	0,248	0,245	0,240	0,232	0,223	0,219	0,200	0,191	0,168
18	0,248	0,246	0,241	0,234	0,226	0,216	0,205	0,196	0,175
20	0,249	0,246	0,242	0,235	0,228	0,219	0,208	0,200	0,180

На скоростях судна до 3,0 м/с отношение $T_C/H_{ман} \geq 0,24$ практически для любой осадки соответствует увеличению осадки от превышения скорости. На скоростях судна более 3,0 м/с отношение $T_C/H_{ман}$ в зависимости от осадки и скорости варьирует в диапазоне от 0,029 до 0,235, поэтому для любого сочетания осадки и скорости необходим индивидуальный расчет. $T_{дин}/H_{ман}$ предпочтительно определять для каждого конкретного случая для оценки завышения скорости и динамической осадки.

Динамическая осадка судна, глубина оценки маневренных характеристик судна и допустимая скорость на определенной глубине взаимосвязаны и позволяют рассчитать скорость судна, соответствующую условиям движения судна.

Глубина места для определения маневренных характеристик судна [7]

$$H = 4T_C + \frac{3V^2}{g}, \quad (1)$$

Преобладающее отношение динамической осадки к глубине определения маневренных характеристик судна до 3,0 м/с $T_{дин}/H_{ман} \approx 0,22 \div 26$.

Учитывая преобладающие в авариях значения, получаем

$$T_{дин} \approx 0,25H_{ман} \quad \text{или}$$

$$T_{дин} \approx 0,25(4T_C + \frac{3V^2}{g}), \quad (2)$$

$$0,75V^2 = g(T_{дин} - T_C)$$

и окончательно для расчета скорости судна, соответствующей аварии $V = \sqrt{13(T_{дин} - T)}$ или

$$V = \sqrt{13\Delta T_{дин}} \quad (3)$$

Если отношение $T_{дин}/H_{ман} \approx 0,24$, то только на скорости менее 3 м/с нет значительного превышения скорости и, соответственно динамической осадки. В таблице 3 приведены исходные и расчетные условия 60 судов участников столкновений, расчет выполнен для всех судов. Превышения скорости не допустили 7 судов (11,7%). Превышение скорости не более 0,5 м/с допустили

14 судов - 23,3% участников. Превышение скорости 0,51 ÷ 1,0 м/с допустили 20 судов - 33,3% участников. Превышение скорости более 1,0 м/с допустили 10 судов - 16,7% участников. Недостаточно данных – два судна. Нет превышения скорости – 7 судов.

Таблица 2

Оценка условий судов-участников столкновений

№	L м	T _с м	H _ф м	V м/с	H _м м	T _{дин} м	T _{дин} /H _{ман}	ΔT м	V _{расч} м/с	ΔV
1.1	26,1	3,0	3,5	2,83	14,4	3,46	0,24	0,46	2,44	0,39
1.2	79,9	3,2	3,5	6,06	24	5,34	0,22	2,14	5,27	0,99
2.1	26,2	2,3	20,0	5,40	17,6	4,05	0,24	1,75	4,77	0,63
2.2	142,3	9,1	20,0	6,42	48	11,67	0,24	2,57	5,29	0,61
3.1	177,0	13,1	24,0	5,91	62,5	15,37	0,25	2,27	5,43	0,48
3.2	175,0	14,5	24,0	2,06	59,3	16,97	0,29	2,47	5,63	нет
4.1	15,5	2,5	31,0	4,11	15,2	3,48	0,23	0,98	3,57	0,54
4.2	145,5	9,5	31,0	6,42	50,0	12,09	0,24	3,59	6,82	нет
5.1	225,8	13,2	28,0	7,20	66,6	16,20	0,25	3,00	6,24	0,96
5.2	15,1	1,6	28,0	3,60	10,4	2,35	0,23	0,75	3,12	0,48
6.1	255,0	12,5	15	6,68	64,0	15,41	0,241	2,91	6,15	0,53
6.2	41,9	2,4	15,0	7,71	27,8	5,86	0,21	3,46	6,71	1,00
7.1	62,7	3,50	20	4,63	19,2	4,83	0,25	1,33	4,16	0,47
7.2	6,3	0,6	20,0	2,57	4,4	0,98	0,22	0,35	2,1	0,47
8.1	12,9	1,4	4,5	11,31	44,7	5,85	0,13	?		
8.2	29,1	4,1	4,5	2,31	21,7	4,48	0,23	0,38	2,22	0,09
9.1	58,3	2,40	5,0	4,63	16,1	2,72	0,17	0,32	2,04	2,59
9.2	73,8	4,60	5,0	5,31	53,3	5,35	0,09	0,75	3,12	1,99
10.1	149,9	9,2	15	10,28	69,1	13,82	0,20	4,62	7,75	4,53
10.2	117,6	6,9	15	6,32	40,0	9,46	0,23	2,56	5,77	0,59
11.1	99,4	6,2	113	6,73	38,7	10,72	0,28	4,52	7,67	нет
11.2	37,9	3,8	113	4,11	20,4	Нет ограничения глубин				
12.1	195,9	15,6	20,0	7,97	81,5	19,51	0,24	4,09	7,29	+0,68
12.2	17,4	2,7	20	5,14	18,9	4,24	0,22	1,54	4,47	0,67
13.1	104,9	6,5	24	6,42	32,6	9,06	0,28	4,56	7,70	нет
13.2	242,6	8,2	24	9,00	42,6	12,85	0,28	4,65	7,78	1,22
14.1	22,1	3,2	11,3	4,11	18,0	4,18	0,23	0,98	3,57	0,54
14.2	36,3	3,9	11,3	5,14	23,7	5,51	0,23	1,61	4,57	0,54
15.1	11,6	1,4	10,5	4,37	11,4	2,51	0,22	1,11	3,80	0,57
15.2	77,0	8,0	10,5	5,65	41,8	9,97	0,24	1,97	5,06	0,60
16.1	43,7	3,8	11,5	3,60	19,2	4,66	0,24	0,86	3,34	0,24
16.2	161,4	7,5	18,4	5,14	38,1	9,20	0,24	1,70	4,70	0,44
17.1	88,6	2,5	20,0	2,06	11,3	Нет ограничения глубин				
17.2	23,1	3,3	20	4,12	18,4	Нет ограничения глубин				
18.1	170,9	6,9	20	5,65	32,8	8,93	0,27	2,03	5,14	0,51
18.2	22,5	2,1	20	5,50	17,6	Нет ограничения глубин				
19.1	88,0	4,8	21,0	8,53	41,4	10,08	0,24	5,28	8,28	0,37
19.2	141,9	4,5	21	6,01	29,1	4,66	0,16	0,16	6,60	0,59
20.1	99,0	2,6	25	4,63	17,0	3,87	0,23	1,27	4,06	нет
20.2	16,5	2,6	25	4,63	17,0	Нет ограничения глубин				
21.1	65,8	3,5	24,0	3,23	17,2	3,65	0,21	0,15	1,4	2,10
21.2	117,6	6,9	24,	6,32	40,2	9,46	0,24	2,56	5,77	нет
22.1	77,1	8,0	110	8,1	37,3	9,07	0,24	1,07	3,61	4,49
22.2	70,1	2,4	11,0	2,7	11,9	2,51	0,21	0,11	1,21	нет
23.1	320,6	14,0	21,5	5,96	66,9	16,44	0,24	2,44	5,63	0,33
23.2	333,0	11,0	21,5	3,91	49,7	12,49	0,26	1,49	4,40	нет
24.1	210,1	10,8	14,4	7,20	59,0	14,09	0,24	3,28	6,53	0,67
24.2	81,0	5,9	14,4	6,42	36,2	8,43	0,23	2,53	5,73	0,69
25.1	77,0	4,0	28,5	4,63	22,5	5,36	0,24	1,36	4,21	0,42
25.2	21,3	2,1	12,9	3,85	12,9	Нет ограничения глубин				
26.1	227,3	7,1	80,0	6,5	25,8	8,10	0,31	1,60	4,56	1,94
26.2	14,5		80,0	0,7	Нет данных					

№	L м	T _с м	H _ф м	V м/с	H _м м	T _{дин} м	T _{дин} /H _{ман}	ΔT м	V _{расч} м/с	ΔV
27.1	63,0	3,6	11,0	5,0	16,4	4,07	0,25	0,47	2,47	2,53
27.2	157,0	8,0	11,0	4,0	33,3	8,44	0,25	0,44	2,39	1,61
28.1	89,3	4,8	11,0	3,60	23,2	5,66	0,24	0,66	2,93	0,67
28.2	98,7	5,0	11,0	4,11	25,2	6,11	0,24	1,11	3,80	0,31
29.1	280,0	14,0	14,6	6,42	68,6	16,74	0,24	2,74	5,97	0,45
29.2	101,1	6,6	14,6	7,97	45,8	10,45	0,23	3,85	7,08	0,89
30.1	15,4	2,1	14,1	3,60	12,4	Нет ограничения глубин				
30.2	183,2	10,5	14,4	5,40	43,0	11,96	0,28	1,46	4,36	1,04

На скоростях судна более 2 м/с отношение $T_{дин}/H_{ман}$ (для упрощения записи и дальнейших расчетов это отношение обозначим символом «к») может принимать значение от 0,029 до 0,24. Поэтому расчет допустимой скорости $V_{доп}$ корректнее выполнять с учётом расчетного отношения $T_{дин}/H_{ман}$. Расчетное выражение примет вид:

$$V = \sqrt{\frac{T_{дин} - 4k_{дин} T_c}{0,31 k_{дин}}} \quad (4)$$

В таблице 3 представлены результаты расчетов допустимой скорости 16 судов (случайная выборка больших, средних и малых судов) по формуле (4) для тех же судов, что в таблице 2, у которых отношение $T_{дин}/H_{ман}$ значительно отличалось от 0,25.

Превышения скорости не допустили 5 судов. Превышение скорости не более 0,5 м/с допустили 4 судна. Превышение скорости 0,51 ÷ 1,0 м/с – 4 судна. Превышение скорости более 1,0 м/с 2 судна. Динамическая осадка больше глубины одно судно.

Таблица 3

Оценка превышения скорости судов-участников столкновений на ограниченных глубинах

№	L	T _с	V _{ав}	T _{дин}	k _{ст}	k _{дин}	V _{расч}	ΔV
1.2	79,9	3,2	6,06	5,34	0,22		5,88	0,18
2.2	142,3	9,1	6,12	11,67	0,24		6,29	нет
3.1	177,0	13,1	5,91	15,37	0,25		6,29	1,54
3.2	175,0	14,5	2,06	16,97	0,29		1,29	0,77
4.2	145,0	9,5	6,42	12,09	0,25		5,69	0,73
5.1	225,0	13,2	7,20	16,50	0,25		6,42	0,78
6.1	255	12,5	6,68	15,41	0,24		6,77	нет
7.1	62,7	3,5	4,62	4,83	0,25		4,23	нет
9.1	57,3	2,40	4,63	2,72	0,17		4,53	0,10
9.2	73,8	4,60	5,31	5,35	$T_{дин} > H_{ф}$			
11.1	99,4	6,2	6,73	10,72	0,28		7,79	нет
13.2	242,6	8,2	9,0	12,85	0,28		6,50	2,0
22.2	70,1	2,4	2,7	2,51	0,21		2,7	нет
23.1	320,6	14,0	5,96	16,44	0,245		5,75	0,41
23.2	333	11,0	3,91	12,49	0,26		3,60	0,31
29.1	280	14,9	6,42	16,74	0,24		5,73	0,69

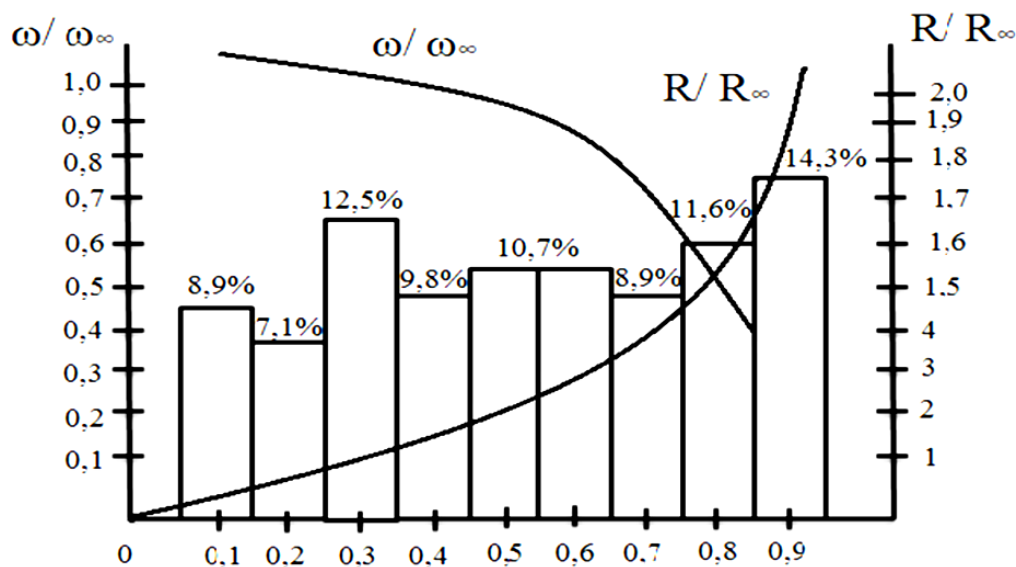


Рис. 1. Зависимость относительного радиуса циркуляции судна и относительной угловой скорости от относительной глубины и распределение навигационных аварий столкновений судов

На рис. 1 показана статистика навигационных аварий по критерию относительной глубины $T_{дин}/H_{ф}$. Соотношение суммы процентов аварий на заданной относительной глубине и меньших – неблагоприятные исходы и благоприятных исходов позволяет получить оценку риска.

Учитывая современные тенденции развития без экипажного и беспилотного транспорта, необходима разработка методики, обеспечивающей надёжную оценку условий плавания, как в ручном, так и в автоматизированном режиме, и в соответствии с требованиями Конвенции ПДНВ 1978 года, с поправками и МППСС-72.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов Ю.А., Гаврильченко Г.Н. Объединенная модель посадок судов на грунт и столкновений в узкостях на ограниченных глубинах. // IV Балтийский морской форум: материалы международного морского форума, 22-28 мая 2016 г., – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. – С. 76-84.
2. Отчет о выполнении инициативной научно-исследовательской работы по теме: Исследование условий посадки на грунт и столкновений судов в узкости на ограниченных глубинах Руководитель темы: Данилов Ю.А. Рег. № 115040910018, 2015. – 76 с.
3. Данилов Ю.А., Гаврильченко Г.Н. Посадки на грунт и столкновения судов на ограниченных глубинах в узкостях как натурный эксперимент. // Тезисы докладов XI международного форума «Балтийский Морской форум», 28-31 мая 2013 г. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2013. – С. 303- 305.
4. Данилов Ю.А, Гаврильченко Г.Н. Связи длины судна и условий посадки судна на грунт. // II Балтийский морской форум: материалы международного морского форума, 26-30 мая 2014 г., – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2014. - С. 35- 40.
5. Данилов Ю.А., Гаврильченко Г.Н. Связи длины судна и условий столкновения судов на ограниченных глубинах в узкости. // III Балтийский морской форум. Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии»: тезисы докладов. I том. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. – С. 145-150
6. Дёмин С.И., Жуков Е.И., Кубачёв Н.А. Управление судном. Учебник для вузов. /Под редакцией В.И. Снопкова. – М.: Транспорт, 1991. - 359 с.
7. Дмитриев В.И., Григорян В.Л., Катенин В.А. Навигация и лоция. Учебник для вузов. /Под ред. В.И. Дмитриева. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 471 с.
8. Баранов Ю.К., Гаврюк М.И., Логиновский В.А., Песков Ю.А. Учебник по навигации. СПб: «Лань», 1997. – 510 с.
9. Данилов Ю.А., Гаврильченко Г.Н., Хехнёв А.Д. Оценка маневренных качеств судна на основе информационно-логического анализа условий аварий столкновений судов. // VII Междуна-

родный Балтийский форум [Электронный ресурс]: материалы форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2019. – С. 23-29/

10. Данилов Ю.А., Гаврильченко Г.Н., Ясюк М.В. Оценка маневренных качеств судна на основе информационно-логического анализа условий аварий посадок судов на грунт. // VII Международный Балтийский форум [Электронный ресурс]: материалы форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2019. – С.29-34.

STUDY OF CONSTRAINED CONDITIONS NAVIGATION CRASH - SEARCH NUMERICAL SOLUTIONS

Danilov Yuri Aronovich, including academic degree and position

Ragulina Izumrud Ramazanovna, including academic degree and position

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: yureydanilov@yandex.ru

At limited depths, the effect of a complex of conditions sharply reduces the ship's controllability. An attempt is made to compensate for the deterioration of the ship's controllability by increasing the speed, but at the same time the ship's draft increases. As a result, the draft and speed of the vessel do not correspond to the situation.

УДК 656.61.052

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ РЕЙТИНГА НАВИГАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ МОРСКИХ СУДОВ

Ермаков Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры судовождения

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: sv.ermakov@bgarf.ru

В работе приведено обоснование методики формирования инженерно-эксплуатационного рейтинга современного навигационного оборудования морских судов. Эта методика среди прочего включает в себя определение подлежащих учёту критериев из числа характеристик и свойств оборудования и веса этих критериев. Использование этой методики позволит оптимизировать процедуру комплектования морских судов навигационным оборудованием.

Введение

В современном мореплавании особая роль в обеспечении безопасности отводится средствам навигационного оборудования, с помощью которого судоводители получают различную информацию о положении судна относительно земных координатных плоскостей, направлении и скорости движения относительно воды и морского дна, угловой скорости поворота и т.д. Большинство из этих средств в соответствии с требованиями главы V Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 года (Конвенции СОЛАС) [1] являются так называемым конвенционным оборудованием, установка которого на судах является обязательной [2].

В настоящее время к установке и использованию на современных судах предлагается большое множество магнитных компасов, гирокомпасов, лагов и иного конвенционного навигационного оборудования. Причем какой-либо комплексной системы критериев и методики вычисления рейтинга для определения оптимального образца конкретного вида оборудования не суще-

ствуется. Однако есть ряд причин, делающих необходимым сравнение различных образцов одного вида.

Во-первых, нередко на судах устанавливаются два и более технических средства одного вида (в частности, гирокомпаса), и каждый судоводитель лично для себя и, опираясь только на свой опыт и интуицию, расставляет приоритеты в использовании этих технических средств.

Во-вторых, при переоборудовании судов навигационной техникой судовладелец принимает решение, основываясь в числе прочего и на экспертном мнении представителей штурманского состава своих судов. Поэтому объективный рейтинг может понадобиться как судоводителям, которые высказывают это мнение, так и самим судовладельцам.

В-третьих, при формировании лабораторного практикума по дисциплине «Технические средства судовождения» в морских высших и средних учебных заведениях необходимо делать акцент на лучших образцах.

В большинстве случаев при комплектовании судна навигационным оборудованием выбор того или иного образца определяется финансовыми возможностями судоходной компании, т.е. таким экономическим критерием, как цена. Однако это противоречит основным принципам безопасности мореплавания, в соответствии с которыми эффективность мероприятий определяется не их стоимостью, а минимизацией рисков вследствие их реализации. Следовательно, для тех же гирокомпасов важна не цена, а, например, точность, время приведения в меридиан, размеры, граничные условия применения и другие инженерно-эксплуатационные характеристики.

Таким образом, целью настоящей работы является обоснование методики составления инженерно-эксплуатационного рейтинга современных средств навигационного оборудования морских судов.

Общие принципы формирования рейтинга

В целях настоящего исследования рейтингом будем называть перечень средств навигационного оборудования одного вида, ранжированный по комплексному показателю, которые определяется совокупностью критериев.

Подобное ранжирование является необходимым условием для принятия решения (осуществления корректного выбора) в случаях наличия как неполной, так и избыточной информации. Недостаток последней может привести к ошибке, связанной с игнорированием важных характеристик навигационного оборудования. В свою очередь, избыточность влечёт за собой проблемы обобщения и структурирования информации.

В настоящее время не существует какого-либо универсального и не зависящего от свойств объекта свода правил, следуя которому можно построить оптимальный рейтинг. Вместе с тем, соответствующая методология достаточно хорошо развита, и ее основы должны приниматься во внимание как составителями, так и пользователями рейтинга. Для первых знание базовых принципов формирования рейтинга необходимо в целях предупреждения появления многих ошибок, а вторым это знание поможет при оценке достоверности рейтинга.

Процесс формирования рейтинга включает в себя несколько обязательных этапов, представленных в виде схемы на рис. 1.1.

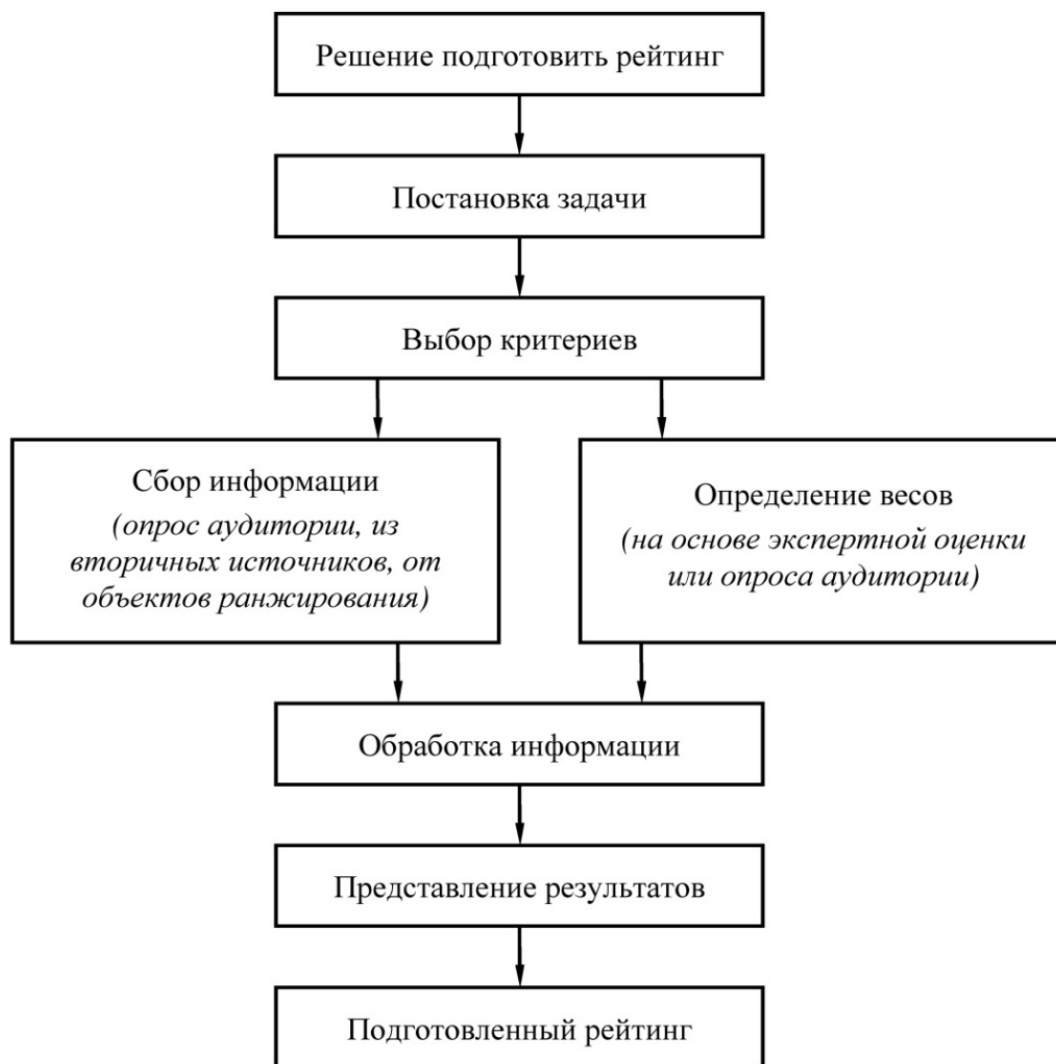


Рис. 1. Основные этапы составления рейтингов

Перед началом непосредственной работы по составлению рейтинга необходимо определиться не только с объектами, в отношении которых будет проведено ранжирование, но и с целями дальнейшего использования рейтинга. При выборе методики формирования рейтинга большое значение имеет то, кем и для решения каких задач будут приниматься во внимание результаты ранжирования.

На следующем этапе необходимо выделить комплекс характеризующих объект параметров. В частном случае может быть использован только один параметр, и такой рейтинг, называемый однофакторным, можно будет считать достаточно объективным, т.к. точность ранжирования определяется исключительно достоверностью исходной информации. Однако в практике ранжирования более распространен рейтинг многофакторный, в основе которого лежит комплекс параметров. При составлении такого рейтинга возникает промежуточная задача определения оптимального количества подлежащих оценке параметров объекта (критериев). Недостаточное количество параметров приведет к снижению достоверности рейтинга, т.к. могут быть упущены значимые для объекта и его описания характеристики. Избыточное же количество параметров влечёт за собой появление некоторых трудно решаемых процедурных проблем, связанных со сбором и анализом большого количества информации, и, как следствие, уменьшение объективности рейтинга.

Для решения задачи определения оптимального количества критериев (параметров) следует провести специальное исследование. Все множеством способов, посредством которых можно собрать необходимую для принятия решения информацию, можно разделить на две группы – экспертные оценки и опрос целевой аудитории. Под целевой аудиторией здесь необходимо понимать

непосредственных пользователей объектов, в отношении которых производится ранжирование (в нашем случае – случае судоводителей, эксплуатирующих навигационное оборудование).

Метод экспертной оценки характеризуется в этом случае меньшей ресурсоемкостью (в отношении как времени, затрачиваемого на решение задачи, так и финансов), т.к. нередко составители рейтинга одновременно являются и экспертами. Вместе с тем, формирование экспертной группы исключительно из разработчиков рейтинга (малочисленность состава которых очевидна) приведет к субъективизму результатов ранжирования.

В свою очередь, опрос целевой аудитории, наоборот, является ресурсоёмким, но более объективным.

Очевидно, что выбранные в целях построения рейтинга критерии неоднородны по своей значимости. Учет этой неоднородности в процедуре ранжирования осуществляется при помощи веса – относительной количественной характеристики значимости параметра. Оценка весов критериев – это ответственный и творческий процесс, требующий квалифицированных исполнителей. Решение задачи определения весов критериев может решаться одним из двух упомянутых выше способов – либо при помощи экспертной оценки, либо посредством опроса целевой аудитории. В первом случае результативный вес каждого параметра определяется простым усреднением весов, назначенных каждым из экспертов. Крайне нежелательно, чтобы веса назначали сами составители рейтинга без привлечения внешних квалифицированных экспертов.

Принимаемые в качестве критериев характеристики объекта, как правило, измеряются в различных шкалах с использованием различных единиц измерения, и по этой причине использование значений этих характеристик в исходном виде при составлении многофакторного рейтинга, подразумевающего сложение оценок, не представляется возможным. Здесь следует переходить к некоторым безразмерным единицам и к унифицированной (одинаковой для всех критериев) шкале.

После того, как сформирован комплекс критериев для оценки объектов, и каждому критерию назначен свой вес, следует перейти к созданию информационной базы – наиболее ответственному этапу формирования рейтинга, т.к. адекватность результатов ранжирования определяется в первую очередь полнотой и достоверностью используемой информации. Следует учесть, что процедура формирования информационной базы включает в себя не только сбор информации, но и её систематизацию.

Далее необходимо, используя назначенные каждому критерию веса, произвести суммирование значений критериев по каждому из объектов. Полученная сумма и будет определять место конкретного объекта в рейтинге.

На заключительном этапе формирования рейтинга следует произвести оценку результатов и определить форму их представления.

Форма представления результатов должна давать потребителю рейтинга понимание того, что лежало в основе выбора критериев и назначения весов, и содержать сведения об источниках информации. Желательно представить результаты оценки каждого параметра, принятого за критерий (оптимально – в виде однофакторных рейтингов). Это даст возможность оценить слабые и сильные стороны конкретного объекта. Наконец, форма представления результатов должна включать непосредственно многофакторный рейтинг с указанием результатов суммирования значений критериев.

Иногда форма представления результатов ранжирования содержит не все перечисленные элементы – это позволяет составителям рейтинга «спрятать» некоторые моменты, которые могут поставить под сомнение адекватность результатов. Так, в случае, если рейтинг представляет собой только перечень ранжированных объектов без указания их рейтинговых количественных характеристик, то вполне возможно, что «разрешающая способность» рейтинга ничтожно мала, и небольшая разность между числами не позволяет считать результаты ранжирования достоверными.

Случается, что информация надежна только в отношении лидеров рейтинга, а для остальных объектов однозначного вывода о надёжности сделать нельзя. В итоге в качестве результата ранжирования составители рейтинга представляют только его верхнюю часть.

Вместе с тем, следует заметить, что низкая достоверность рейтинга не всегда является следствием недостаточной квалификации составителей или методических погрешностей. Даже относительно совершенная методика, применяемая профессионалами, может привести в итоге к

неудовлетворительному результату. Однако игнорировать подобный результат также не стоит. В частности, можно представить объектами группой (или группами), без указания мест внутри группы [3].

Нередко формированию точного рейтинга препятствует множество различных объективных причин. В любом случае пользователи должны быть информированы о том, насколько тот или иной рейтинг точный, и можно ли брать его за основу при принятии решения.

Однажды сформированный рейтинг спустя некоторое время теряет свою актуальность и требует обновления. Оптимальная периодичность обновления рейтинга зависит от того, какими темпами развиваются объекты одного вида. Не имеет смысла обновлять рейтинг слишком часто, поскольку в этом случае затраты на работу возрастают непропорционально пользе, приносимой исследованиями. Более того, очень частое обновление периодического рейтинга может иметь даже негативные последствия, поскольку повышается вероятность того, что будут отслежены не характерные тенденции, а локальные флуктуации. Необходимо также иметь в виду, что большинство рейтингов нужны для принятия решений, поэтому период обновления рейтингового продукта должен быть сопоставим со временем, требующимся для того, чтобы сделать выбор и реализовать задуманное. С другой стороны, рейтинг, обновляемый реже, чем необходимо, не позволит отследить направленность изменений и выявить характер тенденций [3].

При составлении периодического рейтинга, необходимо сохранять методику, в противном случае нельзя утверждать, что новые места объектов – результат объективного изменения конъюнктуры. В этом случае отследить какие-либо тенденции будет нельзя [3].

Обоснование критериев и их шкал

Для того, чтобы определиться с перечнем критериев, которые будут лежать в основе рейтинга того или иного вида навигационного оборудования, следует проанализировать учебную и научную литературу, структуру рынка этого оборудования (т.е. составить перечень используемых на современном флоте образцов) и провести анализ эксплуатационной документации на предмет выявления значимых параметров и особенностей оцениваемого вида оборудования.

Следует заметить, что критерии могут быть как количественными (например, массово-габаритные характеристики), так и качественными (например, наличие какой-либо функции). В любом случае качественные характеристики должны быть заменены количественными (рекомендуется использовать двухбалльную шкалу 0-1, или, иными словами, принять, что ответ «Нет» будет равен 0, а ответ «Да» будет равен 1, или наоборот). Также рекомендуется обозначить каждый из критериев буквой.

Далее следует обобщить (свести в таблицу) значения всех критериев для каждого из образцов рассматриваемого оборудования, определить для каждого критерия его максимальное и минимальное значение и составить формулы для перевода этих значений к десятибалльной системе. При составлении формул следует исходить из следующих принципов:

-наилучшему из значений критериев присваивается оценка 9, наихудшему – 4, так как во всем множестве образцов, используемых на морском флоте, встречаются образцы с худшими характеристиками, а могут появиться в ближайшем будущем с лучшими;

-строчные буквы обозначают критерии в случае, когда они выражаются в общепринятых единицах измерения (т.е. так, как они приведены в эксплуатационной документации); прописные буквы обозначают значение критериев по десятибалльной шкале (далее будут использованы обозначения K и k);

-численное значение критерия по десятибалльной шкале линейно зависит от значения самой характеристики:

$$K = \alpha \cdot k + \beta. \quad (1)$$

Коэффициенты α и β определяются из системы:

$$\begin{cases} K_{min} = \alpha \cdot k_{худш} + \beta = 4; \\ K_{max} = \alpha \cdot k_{лучш} + \beta = 9. \end{cases} \quad (2)$$

Лучшим значением $k_{лучш}$ параметра может быть как максимальное его значение, так и минимальное. В первом случае, очевидно, что $\alpha > 0$ и, наоборот, во втором $\alpha < 0$.

Решение системы (2) имеет вид:

$$\begin{cases} \alpha = 5 / (k_{лучш} - k_{худш}) K_{min}; \\ \beta = (4k_{лучш} - 9k_{худш}) / (k_{лучш} - k_{худш}). \end{cases} \quad (3)$$

С использованием формул (3) значения критериев приводятся к десятибалльной шкале.

Если для какого-либо образца будет получено значение критерия меньше 0, то принимается ноль, если больше десяти, то принимается 10.

Определение весов критериев и составление рейтинга

Как было сказано ранее, каждый из используемых при составлении рейтинга критериев, имеет свою индивидуальную значимость при определении того, какой образец навигационного оборудования лучше. Для оценки степени этой значимости при обосновании методики составления рейтинга использовано понятие «вес».

В целях определения весов критериев предлагается проводить экспертную оценку, где в качестве экспертов могут выступать как практикующие судоводители, так и научно-педагогические работники. Допускается при экспертном оценивании указывать двум или более критериям одинаковую оценку.

Среднее значение всех оценок по одному критерию и представляет собой вес критерия.

Для получения итогового значения рейтинговой оценки (рейтинга) необходимо суммировать произведения оценок критериев по десятибалльной шкале на веса этих критериев:

$$R = \sum_{i=1}^n K_i p_i. \quad (4)$$

Для упрощения процедуры расчёта рейтинга достаточно умножить на вес не рассчитанные по десятибалльной шкале оценки критериев, а формулы приведения:

$$K_p = p(\alpha \cdot k + \beta). \quad (5)$$

Кроме непосредственно подсчитанного рейтинга рекомендуется также рассчитывать его значение, выраженное в процентах по отношению к максимально возможной величине R . Она, в свою очередь, равна сумме всех весов, умноженной на 10:

$$R_{\%} = R / 10 \sum_{i=1}^n p_i = \sum_{i=1}^n K_i p_i / 10 \sum_{i=1}^n p_i. \quad (6)$$

Примеры практического использования методики

В настоящий момент обоснованная выше методика уже реализована в отношении лагов (табл. 1), магнитных компасов (табл. 2), гироскопических компасов (табл. 3) и систем контроля дееспособности вахтенного помощника капитана (табл. 4).

Таблица 1

Рейтинг лагов

№	Наименование лага	Критерии											R	%
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L		
1	JRC JLN-550	94,0	72,0	33,2	0	89,1	74,7	40,6	28,0	63,0	48,8	54,9	598,3	74,3
2	Skipper DL-850	94,0	72,0	33,2	0	39,6	33,2	29,0	63,0	28,0	34,8	37,2	464,0	57,6
3	Naviknot 350E	0	0	74,7	0	89,1	74,7	29,0	54,6	63,0	42,7	24,4	452,2	56,2
4	Furuno DS-80	0	0	74,7	27,0	89,1	74,7	52,2	28,0	28,0	28,7	25,6	428,0	53,2
5	Consilium SAL R1	0	0	33,2	54,0	89,1	74,7	23,2	28,0	56,0	36,6	31,7	426,5	53,0
6	Ben Marine Blind Anthea	94,0	0	74,7	0	39,6	33,2	29,0	28,0	63,0	24,4	31,7	417,6	51,9
7	Yokogawa EML 500	0	0	33,2	0	64,4	74,7	40,6	28,0	63,0	54,9	24,4	383,2	47,6

Критерии: количество измеряемых компонент (А); наличие возможности измерять скорость судна относительно грунта (двухрежимность) (В); минимальная глубина измерения относительной скорости (С); возможность компенсации погрешности за изменение скорости звука в воде (D); погрешность скорости (Е); погрешность расстояния (F); количество способов электроснабжения (G); устойчивость системы энергоснабжения к перепадам (H); допустимые крен и дифферент (I); количество выходов интерфейса (J); рабочая площадь дисплея (L)

Таблица 2

Рейтинг магнитных компасов

№	Наименование магнитного компаса	Критерий								R	%
		A	B	C	D	E	F	G	H		
1	KM-145	30,7	34,0	23,0	87,0	80,3	47,9	69,8	63,0	435,7	70,7
2	Jupiter	69,0	63,8	23,0	43,1	69,1	43,4	31,0	45,5	387,9	63,0
3	Reflecta 1	69,0	76,5	51,8	38,7	35,7	34,4	31,0	28,0	365,0	59,3
4	SH-165A1	52,6	55,3	37,4	38,7	35,7	57,0	56,8	28,0	361,4	58,7

Критерии: диаметр катушки (А); магнитный момент датчика курса (В); максимальная погрешность измерения компасного курса на неподвижном судне (инструментальная погрешность) (С); максимальная погрешность измерения компасного курса на движущемся судне (инструментальная погрешность) (D); пределы компенсации полукруговой девиации (Е); пределы компенсации четвертной девиации (F); пределы компенсации креновой девиации (G); пределы компенсации широтной девиации (H)

Таблица 3

Рейтинг гирокомпасов

№	Наименование гирокомпаса	Критерии												R	%	
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M			N
1	Standard 22	57,5	86,3	50,3	53,8	15,8	35,3	33,8	75,8	53,3	54,8	31,5	28,8	63,8	640,4	80
2	Standard 20	48,2	86,3	86,3	48,4	9,8	35,3	15,0	75,8	43,4	54,8	26,6	25,4	62,7	617,7	77
3	Meridian	66,8	86,3	62,3	75,8	7,0	35,3	33,8	33,7	43,4	54,8	27,3	28,8	47,1	616,9	77
4	Navigat X	34,3	86,3	50,3	53,8	15,8	35,3	33,8	33,7	43,4	54,8	14,0	45,8	48,1	549,1	68
5	TG-8000	34,3	71,5	38,3	53,8	7,0	35,3	33,8	33,7	43,4	54,8	16,8	37,3	58,1	518,0	64
6	Yokogawa CMZ 900	29,7	38,3	68,3	38,5	15,8	35,3	33,8	33,7	53,3	54,8	31,5	28,8	47,1	508,6	63
7	Standard 14	48,2	82,6	80,3	33,7	9,8	15,7	15,0	33,7	23,7	39,5	29,4	25,4	62,0	498,9	62
8	Yokogawa CMZ 700	29,7	38,3	68,3	38,5	15,8	35,3	33,8	33,7	53,3	54,8	31,5	20,3	28,3	481,4	60

Критерии: время приведения в меридиан (А); статическая погрешность (В); динамическая погрешность (С); скорость отработки следящей системы (D); потребляемая мощность в режиме запуска (Е); максимальная температура эксплуатации (F); минимальная температура эксплуатации (G); допустимая бортовая и килевая качка (H); количество выходов интерфейса (I); сигнализация (J); масса системы (L); назначенный ресурс (M); объём, занимаемый основным прибором (произведение его трёх измерений) (N)

Рейтинг систем контроля дееспособности вахтенного помощника капитана

№	Наименование СКДВП	Критерий						R	%
		A	B	C	D	E	F		
1	Hyundai OPU-10	43,7	31	63,6	45	67,5	67,5	318,2	50,5
2	Ami Marine KW810	38	36	63,6	45	67,5	67,5	317,6	61
3	Furuno-BR500	54,4	31	78	45	67,5	30	305,9	68,5
4	Samyung BNW-50	65,1	31	49,1	45	67,5	30	287,7	75,6
5	NSR NBW-1000	80	16	34,7	45	67,5	30	273,2	60,4
6	JRC JCX-161	58,7	31	49,1	20	67,5	30	256,3	65
7	Boeing AHD-WAOP	85,5	16	34,7	20	67,5	30	253,7	53,3
8	BW-707	50,6	21	34,7	20	67,5	30	223,8	72,8
9	Alpha BNWAS	81,3	16	34,7	20	30	30	211,9	75,8

Критерии: цена в тысячах рублей (A); точность измерения времени в секундах (B); количество возможных подключаемых устройств (C); наличие датчика движения (D); наличие дисплея (E); наличие сенсорного дисплея (F)

Представленные рейтинги были составлены в рамках дипломного проектирования курсантов специальности «Судовождение» и носят строго учебный характер. Кроме того, следует заметить, что вопреки сказанному выше при формировании рейтинга СКДВП был использован коммерческий критерий, т.е. цена системы.

Заключение

В настоящее время производством навигационного оборудования для морских судов занимается большое количество приборостроительных компаний во многих странах мира. Представленная в работе методика позволит как судоводителю, так и судовладельцу, а также другим заинтересованным лицам, сориентироваться во всем множестве технических средств.

Обоснованная методика составления (формирования) эксплуатационно-технического рейтинга включает в себя определение перечня подлежащих учёту критериев и определения при помощи экспертной оценки веса каждого из них. В итоге расчёт величины рейтинга характеризуется минимальным набором арифметических операций.

Необходимо заметить, что подсчитанная величина рейтинга не имеет какого-либо физического смысла, а подлежит к использованию только для сравнения двух и более образцов конкретного вида навигационного оборудования.

Таким образом, результатом настоящего исследования является методика расчёта инженерно-эксплуатационного рейтинга современных образцов навигационного оборудования, основанная на его характеристиках.

Практическая значимость результата работы заключается в оптимизации процедуры комплектования судов навигационным оборудованием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года (СОЛАС-74). (Консолидированный текст, измененный Протоколом 1988 года к ней, с поправками), – СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2010. – 992 с.

2. Ермаков С.В. Влияние движения судна на величину периода незатухающих колебаний гирокомпаса с непосредственным управлением и связанные с ними величины // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2018. – Т. 4. – № 1. – С. 128-139. Режим доступа URL: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2018/01/2018-N1-Ermakov.pdf> (дата обращения 07.09.2020).

3. Готовац С., Денисова М., Бобров А. Технологии рейтингов // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://md-consulting.ru/articles/?show=print&id=19> (дата обращения 07.09.2020).

SEA VESSELS NAVIGATION EQUIPMENT RATING DEVELOPMENT TECHNIQUE

Ermakov Sergey Vladimirovich, PhD, associate professor of navigation department

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: sv.ermakov@bgarf.ru

The paper provides a substantiation of the technique for the formation of an engineering and operational rating of modern navigation equipment for sea vessels. This technique includes, among other things, determining the criteria to be taken into account from among the characteristics and properties of the equipment and using expert judgment on the weight of these criteria. The use of this technique will optimize the procedure for manning sea vessels with navigation equipment.

УДК 656.61.052

МЕТОД ОЦЕНКИ ПОПЕРЕЧНОЙ МЕТАЦЕНТРИЧЕСКОЙ ВЫСОТЫ СУДНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОГО КОМПАСА

Ермаков Сергей Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры судовождения
Морозова Светлана Юрьевна, ст. преподаватель кафедры судовождения

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: sv.ermakov@bgarf.ru; morozova_su@bga.gazinter.net

В работе на концептуальном уровне приведено обоснование метода автоматизированной оценки поперечной метацентрической высоты судна в процессе его эксплуатации. В основе метода лежит использование информации об угле крена, которая практически непрерывно вырабатывается спутниковым компасом, обработка этой информации для получения значения периода бортовой качки и вычисление метацентрической высоты по «капитанской формуле».

Введение

Одним из важных мореходных качеств судна, оказывающим большое влияние на безопасность мореплавания, является остойчивость. Аварии судов от потери остойчивости до сих пор являются нередким событием. Опрокидывания судов происходят стремительно и длятся не более одной четверти периода собственной бортовой качки. Времени на адекватную оценку ситуации практически нет. Из-за стремительного характера опрокидывания экипаж не успевает среагировать и в последствие гибнет в полном составе. Одной из основных величин, по которой мы можем судить о состоянии остойчивости, является метацентрическая высота [1].

Способы определения метацентрической высоты можно разделить на две основные группы: расчётные и экспериментальные.

Расчётные способы основываются на данных, находящихся в «Информации об остойчивости для капитана», а также на знании массы и положения центра тяжести груза. На практике определение точных значений как одной, так и другой величины не представляется возможным и влечёт за собой неизбежное возникновение погрешностей в итоговом значении метацентрической высоты. Так же одним из существенных недостатков данного способа является его ресурсоёмкость в части, касающейся времени.

Экспериментальный метод заключается в нахождении периода бортовой качки судна с применением «капитанской формулы» [1, 2].

«Капитанская формула» используется в мореплавании уже давно и повсеместно. Однако в данный момент штурман должен замерять все необходимые данные для расчётов вручную, что несколько усложняет и растягивает процесс, а также отвлекает от непосредственной работы, т.е. от несения ходовой навигационной вахты.

Использование информации о пространственной ориентации судна от трёхантенного спутникового компаса может решить данную проблему посредством автоматизации процесса измерений.

Следовательно, обоснование способа определения бортовой качки по информации от спутникового компаса с последующим расчётом поперечной метацентрической высоты является актуальным исследованием.

Таким образом, целью настоящей работы является обоснование метода приближенной оценки поперечной метацентрической высоты судна, основанного на совместном использовании капитанской формулы и информации о динамике изменения угла крена, полученной с трёхантенного спутникового компаса.

Анализ капитанской формулы как инструмента оценки остойчивости судна

Экспериментальный способ нахождения метацентрической высоты, получивший наибольшее распространение и являющийся наиболее точным, – это кренование судна. Однако данный способ является трудоёмким, продолжительным и требует от штурмана специализированных знаний. К тому же проведение опыта кренования в эксплуатационных условиях (т.е. при непосредственном выполнении судном рейсового задания) представляется практически невозможным. Поэтому, используется «упрощённый» способ – раскачивание судна и определение периода его бортовой качки для последующего нахождения метацентрической высоты. Данный способ основан на использовании упомянутой выше «капитанской формулы», который имеет следующий вид [1, 2]:

$$T = CB/\sqrt{h}, \quad (1)$$

где C – эмпирический коэффициент, который выбирается в зависимости от типа судна; B – ширина судна, м; h – поперечная метацентрическая высота, м.

Выполнив преобразования формулы (1) можно получить формулу для нахождения поперечной метацентрической высоты:

$$h = (CB/T)^2. \quad (2)$$

Стоит внимательно рассмотреть упомянутый в формулах (1) и (2) эмпирический коэффициент. Его значение можно получить несколькими способами: кренованием, расчётом по ряду эмпирических зависимостей от основных характеристик формы и размеров судна или выбором из заранее аппроксимированных значений для типовых видов загрузки судна.

Простейшим способом является выбор заранее подсчитанного значения:

- судно каботажного плавания (кроме танкеров) в балласте – 0,88;
- промысловое судно с полными запасами для открытого моря – 0,80;
- промысловое судно с полными запасами для прибрежного лова – 0,95;
- промысловое судно с полными запасами и с танками для живой рыбы – 0,60;
- транспортное судно (кроме танкеров и газовозов) в грузу – 0,62 ÷ 1,00.

Конечно, выбор коэффициента из усреднённых значений для всех судов не даёт объективной оценки остойчивости для данного конкретного судна и может повлечь за собой возникновение погрешностей в расчёте поперечной метацентрической высоты.

Одним из наиболее точных методов определения коэффициента является его расчёт с использованием эмпирических зависимостей, одна из которых выглядит следующим образом:

$$C = a\sqrt{[1 + (H/B)^2](b + \delta)}, \quad (3)$$

где B – ширина борта, м; H – высота борта, м; δ – коэффициент общей полноты; a – безразмерный коэффициент: $a = 0,412$ – для судна без скуловых килей, $a = 0,459$ – для судна с скуловыми килями; b – безразмерный коэффициент: $b = 2,0$ – для судна без скуловых килей, $b = 1,6$ – для судна с скуловыми килями.

Кроме того, можно использовать следующие формулы, определяющие коэффициент капитанской формулы через среднюю осадку и главные размерения корпуса:

$$C = 0,7487 + 0,0456 \cdot B/d_{\text{ср}} - 0,000864L, \quad (4)$$

где B – наибольшая ширина судна, м; L – наибольшая длина судна, м; $d_{\text{ср}}$ – средняя осадка судна, м.

Нахождение коэффициента методом кренования осуществляется следующим образом:

- находится поперечная метацентрическая высота методом кренования;
- груз, использованный для кренования судна, перемещается в ДП;
- вызывается бортовая качка величиной $5-6^\circ$;
- по секундомеру фиксируется время, необходимое для 8-10 бортовых колебаний, и подсчитывается период качки;
- процедуру замера времени следует повторить не менее трёх раз, и затем найти среднее значение периода качки;
- подсчитывается коэффициент по выражению, полученному на основе формулы (1):

$$C = T\sqrt{h}/B. \quad (5)$$

Капитанская формула использует для расчёта период свободных колебаний, что на практике, практически невыполнимо, так как в море колебания зачастую вынужденные. Чтобы разрешить эту проблему необходимо использовать спектр качки.

Методика определения периода бортовой качки по информации от спутникового компаса

Период качки – время между двумя последовательными наклонениями или время, в течение которого судно совершает полный цикл колебаний, возвращаясь к тому положению, при котором начался отсчёт [3].

Спутниковый компас, в частности РК-2306 «Фарватер» [4] (рис .1) предоставляет судоводителю информацию исключительно о текущем значении угла крена (рис. 2), но не о периоде качки. Вместе с тем, эти значения дают возможность определить искомый период как временной промежуток между двумя последовательными наклонениями судна и возвращением его в исходное положение.



Рис. 1. Спутниковый компас РК-2306 «Фарватер»

После этого по представленным эмпирическим зависимостям (3) и (4) следует найти коэффициент «капитанской формулы» C .

Заключительным этапом является непосредственный расчёт поперечной метацентрической высоты по формуле (2).

Для обоснования метода в процессе исследования было проведено моделирование поступающей со спутникового компаса информации о крене судна. Для примера расчёта метацентрической высоты использовались размерения реального судна - балкера: длина наибольшая 108 м, ширина наибольшая 18 м, среднее значение осадки 7,3 м.



Рис. 2. Изображение формуляра РК-2306 «Фарватер» с информацией об угле крена

С целью моделирования была построена табл. 1 для двух несколько отличающихся средних периодов качки 9,7 и 13,2 секунды соответственно (знак минус – судно наклонено на левый борт), при этом в показания компаса вводилась искусственно некоторая погрешность. Выделенные в табл. 1 значения являются амплитудными.

На основе табл. 1 построен график (рис. 3).

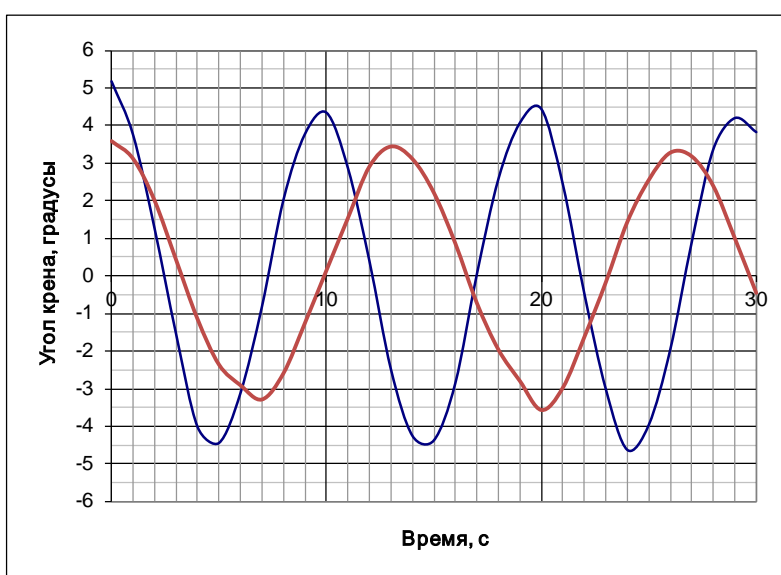


Рис. 3. Результат моделирования

Информация о крене, поступающая со спутникового компаса

Время	Угол крена, градусы (период 9,7 с)	Угол крена, градусы (период 13,2 с)
0	5,17	3,58
1	3,76	3,12
2	1,27	2,01
3	-1,53	0,43
4	-4,01	-1,15
5	-4,44	-2,36
6	-3,12	-2,91
7	-0,82	-3,29
8	2,02	-2,59
9	3,77	-1,25
10	4,34	0,15
11	2,87	1,54
12	0,40	2,91
13	-2,48	3,44
14	-4,25	3,11
15	-4,37	2,21
16	-2,85	0,86
17	0,05	-0,72
18	2,57	-1,96
19	4,07	-2,79
20	4,44	-3,57
21	2,44	-2,98
22	-0,47	-1,63
23	-3,01	-0,17
24	-4,63	1,43
25	-3,96	2,55
26	-1,96	3,28
27	0,90	3,18
28	3,36	2,39
29	4,20	1,00
30	3,82	-0,45

По амплитудным значениям угла крена спутниковый компас определяет значение полупериодов и, осредняя их, получает значение периода:

$$T_1 = (5 + 5 + 5 + 5 + 4 + 5)/3 = 9,67 \text{ с},$$

$$T_2 = (7 + 6 + 7 + 6)/2 = 13,0 \text{ с}.$$

Далее, используя эмпирическую формулу (4), рассчитывается коэффициент C :

$$C = 0,7487 + 0,0456 \cdot 18/7,3 - 0,000864 \cdot 108 = 0,768.$$

И, наконец, вычисляется поперечная метацентрическая высота:

$$h_1 = (0,768 \cdot 18/9,67)^2 = 2,04 \text{ м},$$

$$h_2 = (0,768 \cdot 18/13)^2 = 1,13 \text{ м.}$$

Очевидно, что указанные расчёты производятся не штурманом вручную, а при помощи специального программного обеспечения, при этом время осреднения (а, точнее, сглаживания) должно быть в общем случае, иным, чем 30 с (следует провести научное обоснование этого времени).

Заключение

Контроль устойчивости – один из основных аспектов работы судоводителя, заключающийся среди прочего в необходимости постоянного мониторинга поперечной метацентрической высоты. В настоящей работе на концептуальном уровне представлен метод оценки этой величины с использованием информации о крене судна, получаемой от спутникового компаса.

В целях продолжения и завершения обоснования представленного метода и получения результата, который может быть использован на современных морских судах, можно сформулировать следующий перечень задач:

- обоснование времени (периода) сглаживания;
- оценка точности метода;
- разработка программного обеспечения для обработки информации об угле крена, определения периода качки и расчёта поперечной метацентрической высоты;
- создание лабораторной установки, физически моделирующей изменение угловой ориентации спутникового компаса в пространстве;
- разработка новых формуляров для спутникового компаса, в которых будет отображаться текущее значение поперечной метацентрической высоты, её динамика, а также оценка устойчивости судна;
- создание дополнительного интерфейса для электронной картографической навигационно-информационной системы (ЭКНИС) для отображения информации о поперечной метацентрической высоте.

Таким образом, предложенный в работе метод даст возможность автоматизировать процедуру контроля устойчивости в процессе эксплуатации судна.

Новизна результата состоит в использовании для оценки устойчивости судового оборудования ГНСС, а его практическая значимость заключается в совершенствовании текущей процедуры контроля за устойчивости судна (что особенно важно в условиях обледенения судна).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антоненко С.В. Практическая оценка устойчивости в открытом море по капитанской формуле // Мореходство и морские науки-2009: избранные доклады Второй Сахалинской региональной морской научно-технической конференции (23 сентября 2009 г.) / Под ред. В.Н. Храмушина. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2010. – С. 21-28.
2. Шарлай Г.Н. Обеспечение устойчивости, прочности корпуса и непотопляемости морского судна. Режим доступа URL: <https://studfile.net/preview/433780/> (дата обращения: 10.09.2020).
3. Мореходные качества судов. Часть 2. Режим доступа URL: <https://flot.com/publications/books/shelf/chainikov/16.htm> (дата обращения: 10.09.2020).
4. Устройство дистанционной передачи курса на базе глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS «Фарватер» РК-2306. Руководство по эксплуатации. РК.461513.003 РЭ. – М.: ООО «Радиокомплекс», 2008. – 141 с.

METHOD FOR ESTIMATING THE TRANSVERSE METACENTRIC HEIGHT OF A VESSEL USING A SATELLITE COMPASS

Ermakov Sergey Vladimirovich, PhD, associate professor of navigation department
Morozova Svetlana Yurievna, senior lecturer of navigation department

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: sv.ermakov@bgarf.ru; morozova_su@bga.gazinter.net

At the conceptual level, the article provides a substantiation of the method for automated assessment of the transverse metacentric height of a ship during its operation. The method is based on the use of information about the roll angle, which is almost continuously generated by a satellite compass, processing of this information to obtain the value of the rolling period and calculating the metacentric height according to the "captain's formula".

УДК 656.614.3

ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ «МОРСКОГО РИСКА»

Мойсеенко Сергей Сергеевич, д-р пед. наук, канд. техн. наук, профессор,
профессор кафедры организации перевозок

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: moiseenkoss@rambler.ru

В статье рассматриваются актуальные вопросы определения понятия «морской риск» в судебной и арбитражной практике. Приводится определение понятия «перевозчик», его статус и его правовое положение в части претензий и исков в морских перевозках. Показано, что вопрос о морском риске связан с проявлением должной заботливости о приведении судна в мореходное состояние для конкретного рейса. Бремя доказательства морского риска, как и любого другого исключения, лежит на перевозчике. Перевозчик должен доказать, что погодные условия, с которыми судно столкнулось в рейсе, являются причиной повреждения груза и носили такой характер, что возникшая из-за них опасность повреждения груза не могла быть предсказана или предотвращена как один из вероятных инцидентов рейса. Рассматривается вопрос исследования причинной связи между риском и ущербом. Важно доказать, что именно морской риск явился причиной ущерба.

Рисками моря являются аварии или события в море, которые имеют случайный характер. Иными словами, эти риски тесно связаны с понятием случайности [1, 2, 3, 4]. Однако, некоторые события, которые, в сущности, не имеют случайного характера, в силу своего наступления могут быть признанными случайными. Морские явления, такие как штормы, являются случайными по своей природе, однако сила шторма может быть предсказуемой и это имеет большое значение в судебной практике, связанной с рассмотрением претензий в случаях причинения ущерба при грузоперевозках.

В английском праве морские риски толкуются довольно широко и включают риски от следующих явлений [3]:

- Опасности морей, рек, озёр или других пригодных для плавания вод;
- Пожар и взрыв;
- Насильственная кража, совершенная лицами, не являющимися членами экипажа судна;
- Выброс груза за борт с целью спасения при угрозе гибели судна;
- Пиратство;

- Соприкосновение с наземным транспортом, причалом, портовым оборудованием или оружием;
- Землетрясение, вулканическое извержение или молния;
- Аварийные случаи при погрузке, выгрузке или смещении груза, топлива, запасов или их частей.

«Морские риски» являются наиболее распространенной защитой перевозчика. Если перевозчик сможет доказать, что ущерб был причинен грузу вследствие морского риска, то он, в соответствии с Гаагскими правилами [5], не будет нести ответственность за этот ущерб. В этой связи определение понятия «морской риск» как основы доказательной базы при защите перевозчика, является актуальной задачей. Понятие «перевозчик» в соответствии с Гаагскими правилами [2, 4] включает собственника судна или фрахтователя, являющихся стороной в договоре морской перевозки. Данное понятие определяет правовое положение перевозчика. Перевозчик является одной из двух сторон договора международной морской перевозки груза. Другой стороной договора обозначен грузоотправитель.

Морские перевозки осуществляются в различных географических районах мирового океана, в различные периоды года, в различных гидрометеорологических и климатических условиях. В течение рейса морское судно может встретить различной силы штормы, ураганы, тропические циклоны. Прокладывая маршрут перехода из порта в порт, капитан судна стремится выбрать наиболее безопасные маршруты. Однако, как правило, нельзя исключить вероятность встречи со штормовой погодой. Поэтому капитан судна должен принять комплекс упреждающих мероприятий для: 1) минимизации вероятности морского риска; 2) приведения судна в мореходное состояние с учетом районов плавания и вероятности встречи штормов и ураганов [2, 3, 5, 6].

Рассмотрим такой вопрос – представляет ли шторм морскую опасность или нет. Прежде всего, надо рассмотреть район плавания, время года и силу шторма. Например, выбирая маршрут плавания из Калининграда в порты Канады, капитан судна рассматривает два варианта. Первый – через пролив Ла-Манш (южный путь) и далее на Канаду; второй вариант – огибая Англию севера (северный путь) следовать в Канаду. В первом случае длина пути будет значительно больше, чем путь севернее Англии. Анализируя погодные условия, которые судно встретит, следуя северным путем, мы приходим к выводу, что вероятность встречи штормов (особенно в осенне-зимний период) значительно выше, чем при следовании южным путем, причем, штормы на севере могут быть разрушительной силы.

Кроме того, при плавании в Канаду северным путем судно встретит встречное течение, что также снизит скорость судна.

Из рассмотренных вариантов можно сделать вывод, что при плавании северным путем в осенне-зимний период из Калининграда в Канаду реально существует морской риск, в то время как при плавании южным путем, даже в условиях штормовой погоды доказать существование морского риска будет проблематично. На основе анализа судебной практики американских, английских, европейских судов [1, 3] морской риск можно определить как катастрофическое явление, ожидать которое нет оснований в районе плавания судна в это время года и последствий которого нельзя избежать путем принятия разумных мер.

Очевидно, что вопрос о морском риске связан с проявлением должной заботливости о приведении судна в мореходное состояние для конкретного рейса. С позиций судов, рассматривающих дела о морских происшествиях и, в частности, ущерба судну и грузу, проверка мореходного состояния судна имеет целью удостовериться в том, что судно в разумной степени оборудовано для перевозки груза, который оно обязалось перевезти, с учетом времени года и районов плавания. Например, люки грузовых трюмов должны быть герметичны, а груз тщательно уложен с учетом, что рейс судна будет осуществляться, например, зимой в Северной Атлантике, где велика вероятность встречи с жестокими штормами. С позиций судебной практики, если в этих условиях в трюм через люковые закрытия просочится вода или груз сместится, то можно будет сделать вывод о том, что судно не было приведено в мореходное состояние и по этим основаниям суд не признает наличие морского риска.

По иному вопрос мореходного состояния будет рассматриваться судом, если перед выходом судна в рейс груз был осмотрен сюрвейером и признан уложенным и закрепленным должным образом (в соответствии с правилами и рекомендациями ИМО), а люковые закрытия проверены на

герметичность, что подтверждается специальным актом сюрвейера. Такой подход к закреплению доказательств о мореходном состоянии судна и о проявлении должной заботливости, по сути, является упреждающим действием и хорошей морской практикой.

Бремя доказательства морского риска, как и любого другого исключения, лежит на перевозчике [5, 6, 7]. Перевозчик должен доказать, что погодные условия, с которыми судно столкнулось в рейсе, являются причиной повреждения груза и носили такой характер, что возникшая из-за них опасность повреждения груза не могла быть предсказана или предотвращена как один из вероятных инцидентов рейса.

Например, судно mv «SMART» перевозил на палубе портативные танки, которые были уложены и закреплены в соответствии с технологией и чертежами, одобренными Регистром. В районе мыса Доброй надежды судно попало в жестокий шторм. Ударом волн крепления одного из портативных танков было частично разрушено и танк смыло в океан.

В результате рассмотрение этого инцидента было признано, что присутствовал морской риск, так как перевозчик проявил должную заботливость о приведении судна в мореходное состояние, а основной причиной ущерба действие непреодолимых сил природы. Следует заметить, что в случае отсутствия утвержденной Регистром документации на оборудование места складирования танка и его крепления доказать присутствие морского риска было бы проблематично.

Таким образом, перевозчик должен доказать присутствие морского риска, как причины причиненного ущерба. На основе анализа практики рассмотрения дел о причинении ущерба по причине морского риска [1, 2] можно рекомендовать следующий порядок доказывания:

- перевозчик должен доказать причину ущерба, например, вода проникла в трюм и подмочила груз через поврежденное люковое закрытие вследствие его деформации в результате удара волн и избыточных изгибающих моментов (действовали на люковые закрытия);

- перевозчик должен доказать проявление им должной заботливости о приведении судна перед рейсом в мореходное состояние. Так, например, в отношении причиненного ущерба, было проверено, что люк трюма, в который проникла вода, был закрыт герметично, все винтовые зажимы были в рабочем состоянии и зажаты должным образом, уплотнительная резина люковых закрытий находилась в рабочем состоянии;

- перевозчик должен доказать наличие морского риска, например, шторм имел такой характер, что ему невозможно было противостоять, возможности уйти в укрытие не было.

Истец после этого будет пытаться представить доказательства, опровергающие доказательства ответчика в отношении причины ущерба или проявления должной заботливости, или самого мореходного состояния судна, или наличия морской опасности, или пытаться доказать отсутствие проявления заботы о грузе. Пытаясь опровергнуть доказательства перевозчика, истец может, например, представить официальные извещения о погоде или извещения о погоде, полученные от других судов.

Однако, если данные о прогнозе погоды и фактическим состоянием погоды, представленные перевозчиком будут отличаться от данных, представленных истцом, то это не сложно проверить, обратившись за справкой в гидрометеорологический центр, обслуживающий этот район. С другой стороны истец может оспорить данные о силе ветра, записанные в судовой журнал перевозчика, на исследуемый момент. Так, например, в судовом журнале перевозчика внесена запись о силе ветра 12 баллов, но эксперты дали заключение, что при обычном характере шторма в рассматриваемом районе в это время года, ветры никогда не достигают такой большой силы. Кроме того, по данным, полученным с других судов, проходивших рассматриваемый район в это время, сила ветра была не более 7- 8 баллов.

Истец может опровергать доказательства перевозчика, основываясь на данных прогноза погоды/штормового предупреждения. Так, если перевозчик получил штормовое предупреждение (сила ветра 10-12 баллов), то почему судно не изменило курс и не ушло в укрытие. Перевозчик, в свою очередь, должен доказать, что штормовое предупреждение было получено в момент времени, когда достигаемых укрытий уже не было, а первоначальный прогноз погоды был - 7-8 баллов, что для данного судна угрозы не представляло.

Из приведенных примеров видно, что капитану судна мало проявить должную заботливость о мореходном состоянии судна, но это надо оформить в судовом журнале. Кроме того, как нами было отмечено выше, желательно иметь заключение сюрвейера о том, что все люковые за-

крытия были проверены на герметичность, а груз, например, палубный уложен и закреплен в соответствии с Правилами перевозки ... и рекомендациями ИМО. Особое внимание капитан должен уделять мониторингу погоды, данным прогноза и штормовым предупреждениям, динамика этих данных должна быть отражена в судовом журнале, а факсимильные карты погоды и штормовые предупреждения рекомендуется храниться на судне совместно с судовыми и машинными журналами.

В случае штормовой погоды, когда существует вероятность причинению ущерба судну и грузу капитану судна рекомендуется получить информацию о судах находящихся в этом районе, что может потребоваться как на случай оказания помощи, так и для свидетельских показаний, если это потребуется. Например, при расследовании случая причинения ущерба (потеря портативного танка), перевозимого *mv «Smart»*, в районе мыса Доброй надежды, сюрвейеры страховщиков собрали все данные о погоде, зафиксированные в судовом журнале судна, а также судов-свидетелей и береговых метеостанций. В результате данные, представленные судном в части жестокого шторма, а также о предпринятой экипажем должной заботливости о мореходном состоянии судна, нашли свое подтверждение, что явилось основанием для признания морского риска.

Одним из важных указаний на наличие морского риска является факт того, что само судно получает серьезные повреждения. Однако суд может не считать это морским риском, если судно могло бы избежать этих повреждений, если бы капитан изменил курс, снизил скорость и «перешел» в режим «штормования» носом на волну или по ветру. Но он (капитан) намеренно следовал через район шторма, с тем, чтобы избежать задержки судна и значительных расходов перевозчика, полагая, что ущерб судну будет не значительный по сравнению с расходами, связанными с задержкой судна/груза.

Термин «морской риск» имеет одинаковое значение при его употреблении в страховых полисах, чартерах или коносаментх [2, 4, 5, 6, 7]. Тем не менее, имеется опасность в использовании определений морского риска, данных в страховом полисе или чартере при рассмотрении дел в соответствии с Гаагскими и гамбургскими правилами, потому что может оказаться различие в подходе к бремени доказывания и различие в стандартах, предъявляемых к мореходному состоянию судна или условиям его обеспечения.

Представляет интерес исследование причинной связи между риском и ущербом. После того как доказано наличие морского риска, необходимо доказать, что этот риск причинил ущерб. Ответчик, ссылаясь на морской риск. Однако для того, чтобы этот довод был принят, ответчик должен доказать, что ущерб явился естественным и необходимым следствием морского риска [2, 5, 6, 7]. Доказательство состоит в том, что в течение нескольких дней начального периода рейса судно встретилось с плохой погодой, хотя и не носившей какого-либо исключительного характера, принимая во внимание время года и место нахождения судна. Однако в какой то момент главная палуба судна была накрыта одиночной волной высотой более 15 метров. В результате удара волны были разрушены закрытия вентиляционных колодцев трюмов и вода проникла через вентиляционные колодцы в трюм с грузом зерна, что явилось причиной порчи груза. При рассмотрении данного случая страховщики прошли к выводу, что появление «гигантской» волны имело случайный характер, а причиненный судну и грузу ущерб явился естественным и необходимым следствием морского риска.

Выводы

1. Морской риск можно определить как катастрофическое явление, ожидать которое в районе плавания судна в это время года нет оснований. При этом последствий этого явления нельзя избежать путем принятия разумных мер.

2. «Морские риски» являются наиболее распространенной защитой перевозчика. Если перевозчик сможет доказать, что ущерб был причинен грузу вследствие морского риска, то он, в соответствии с Гаагскими правилами [4], не будет нести ответственность за этот ущерб. В этой связи определение понятия «морской риск» как основы доказательной базы при защите перевозчика, является актуальной задачей.

3. Термин «морской риск» имеет одинаковое значение при его употреблении в страховых полисах, чартерах или коносаментх

4. Вопрос о морском риске связан с проявлением должной заботливости о приведении судна в мореходное состояние для конкретного рейса.

5. Важным для доказательства наличия морского риска является исследование причинной связи между риском и ущербом. После того как доказано наличие морского риска, необходимо доказать, что этот риск причинил ущерб, т.е. ответчик должен доказать, что ущерб явился естественным и необходимым следствием морского риска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутакова Н.А. Актуальные проблемы регулирования международных морских перевозок грузов на основе Роттердамских правил // Юрист. 2014. № 10. С. 30–34.

2. В. Темлей. Претензии и иски при перевозке грузов морем. (перевод с английского В.А. Жернова). – Москва: «Транспорт», 1983. – 351 с.

3. Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации. - Москва: Рид Групп, 2011.-175 с..

4. Классификация рисков [Электронный ресурс]: https://zakon.ru/blog/2015/8/6/klassifikaciya_morskix_risikov_v_anglijskom_prave_morskogo_strahovaniya (Дата обращения 01.07.2020)

5. Гаагские правила [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://studwood.ru/662833/pravo/gaagskie_pravila (дата обращения 01.07.2020)

6. Электронный ресурс: Гамбургские правила - Международные морские перевозки [Электронный ресурс]. Режим доступа: studbooks.net/2331188/tehnika/gamburgskie_pravila (дата обращения 02.07.2020)

7. Конвенция ООН | Сфера действия Роттердамских правил [Электронный ресурс]. Режим доступа: law-journal.hse.ru/data/2012/06/25/1256190785/4-2010-8.pdf 2008. (дата обращения 02.07.2020).

LEGAL ASPECTS OF DEFINING "MOSCOW RISK"

Moiseenko Sergey Sergeevich, Doctor of Pedagogical Sciences, Ph.D., Professor

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: moiseenkoss@rambler.ru

The article discusses current issues of the definition of the concept of "marine risk" in judicial and arbitration practice. A definition of the term "carrier" is given, its status and its legal status regarding claims and claims in shipping. It has been shown that the issue of marine risk is associated with the manifestation of due care for bringing the vessel to a seaworthy state for a particular voyage. The burden of proof of marine risk, like any other exception, lies with the carrier. The carrier must prove that the weather conditions encountered by the vessel during the voyage are the cause of the cargo damage and were of such a nature that the danger of cargo damage arising from them could not be predicted or prevented as one of the probable incidents of the voyage. The issue of studying the causal relationship between risk and damage is considered. It is important to prove that it was marine risk that caused the damage.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ РИСКА ЭКИПАЖА РЫБОПРОМЫСЛОВОГО СУДНА ПРИ РАБОТЕ В ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ РАЙОНАХ МИРОВОГО ОКЕАНА

¹Тимофеев Владимир Константинович, д-р воен. наук, профессор
заведующий кафедрой безопасности мореплавания

¹Бураковский Павел Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент

¹Гуральник Борис Самуилович, канд. техн. наук, доцент

²Иконописцев Иван Игоревич, аспирант кафедры безопасности мореплавания.

¹Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: kaf_bm@bga.gazinter.net; paul_b@mail.ru; boris.guralnik@mail.ru

²ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: Parktronic65@gmail.com

С целью разработки плана охраны судна, исследуются факторы риска различных типов морских судов. Приведены результаты расчета вероятности наступления неблагоприятных событий для экипажа судна. Предложена методика расчета степени экономических рисков для судов, работающих в потенциально опасных районах Мирового океана.

Система управления безопасности для рыбопромысловых судов

Международные кодексы: «По управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения» (МКУБ – 94) и «Охраны судов и портовых средств» (ОСПС – 2002), а также статьями 5,9 ФЗ РФ «О транспортной безопасности» от 09.02.2007 №16ФЗ на каждом морском судне должен быть план охраны, который определяет действия экипажа в различных условиях плавания (переход, стоянка в порту/на якоре, погрузка/разгрузка и т.п.). Плановые мероприятия должны в первую очередь исключить/минимизировать возможные риски нарушения безопасности судна и его экипажа [1,2,3].

В Международных нормативно-правовых актах: МКУБ, ОСПС и др. для оценки безопасности судна применяется понятие – **риск**. В Российских – **уязвимость судна**.

Под **риском** для морского судна понимается – вероятность наступления факторов, которые влияют на безопасность судна, экипажа, груза и состояние окружающей среды. Чтобы оценить риск, необходимо определить факторы риска [4]. Классификация факторов рисков, краткое описание рисков и их возможные последствия для экипажа и судов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Классификация факторов рисков с пояснениями в торговом мореплавании

Факторы рисков	Пояснение	Последствия для людей и судна
1	2	3
Природно-климатические	Кораблекрушение, уничтожение груза, потеря фрахта. Смерть и травмирование членов экипажа.	Тяжкие повреждения здоровья людей на судне (смерть). Нарушение конструкций суда и его механизмов. Не возможность его восстановления. Полная потеря груза.
1	2	3
Техногенные	Не надежная работа механизмов судна, полный отказ. Пожар, водотечность корпуса. Нарушение мореходных качеств судна. Вылив за борт нефтесодержащих, вредных веществ.	Эвакуация людей с судна, возможные ожоги и травмы членов экипажа (смерть). Уничтожение, приведение в нерабочее состояние механизмов судна. Деформация части набора. Выбрасывание судна на мелководье или берег. Невозможность продолжения плавания.

1	2	3
Эксплуатационные	Не получение запланированной прибыли от рейса по причинам нарушения правил и инструкций по эксплуатации судна.	Начисления демереджа, возможное уменьшение заработной платы экипажу. Нарушение условий договора перевозки груза (сталийного и контрсталийного времени). Повреждение/порча груза. Не выполнение планового задания на рейс.
Профессиональные (человеческий фактор)	Грубые ошибки и просчёты руководства компаний или капитана судна.	Возникновение инцидентов и аварийных ситуаций. Штрафные санкции к судну др.
Экономические	Снижение эффективности бизнеса морского предприятия. Вероятность отказа контрагентов от сотрудничества и т.п.	Финансовые и экономические потери
Рыболовные риски	Ошибки в поиске скопления косяков рыб, по району и глубине. Повреждение орудий лова (столкновение, зацепы за грунт и др.). Травмирование/гибель людей.	Рыбопромысловое судно не может заниматься промыслом рыбы или её переработкой. Крупные финансовые потери.
Социальные	Снижение жизненного уровня членов экипажа. Госпитализация, инвалидность.	Не выполнение руководством социальных обязанностей перед членами экипажа. Социальная напряженность.

Из всех факторов риска в статье рассматриваются те, которые влияют на безопасность эксплуатации рыбопромыслового судна и его экипажа в районах промысла расположенных в потенциально опасных от пиратов районах.

Концептуальная модель управления рисками в мореплавании представлена на рисунке 1.

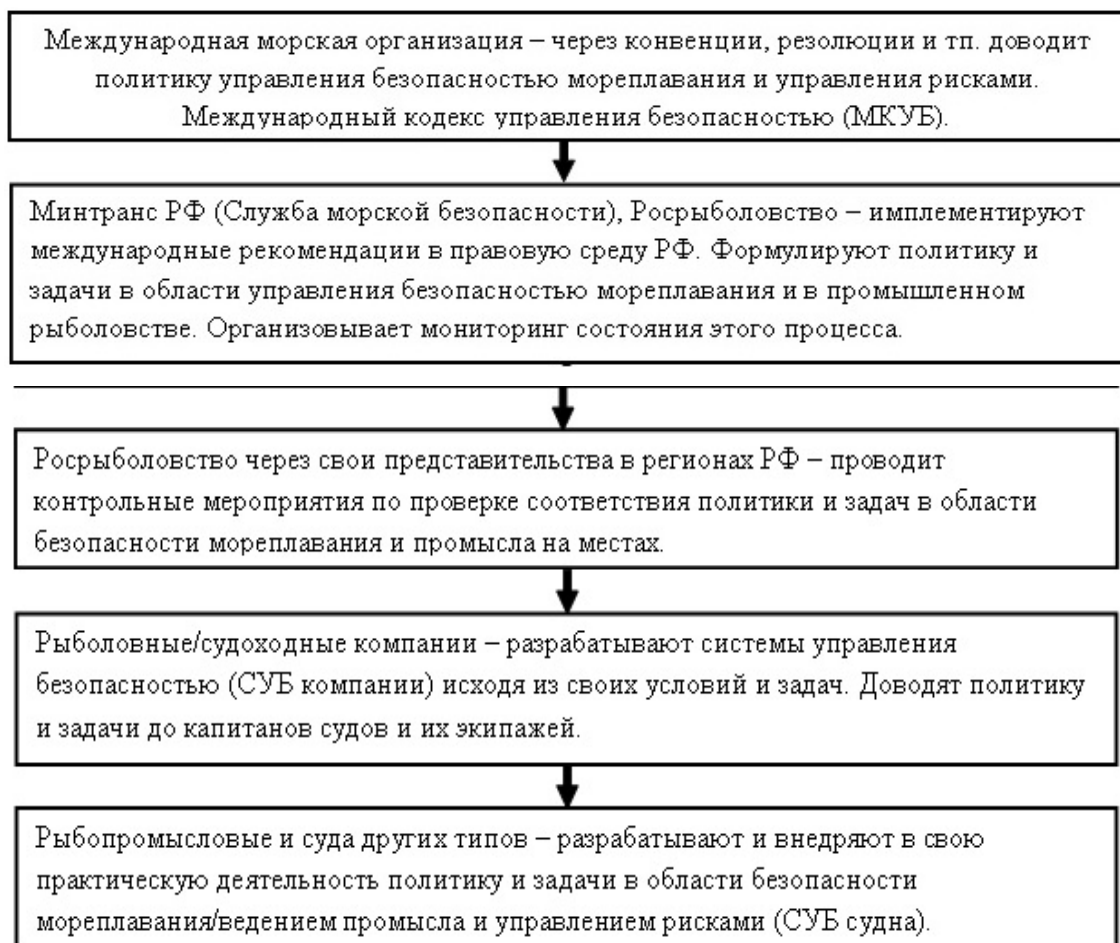


Рис.1. Управление безопасностью и управления рисками в торговом мореплавании

Под оценкой **уязвимости** объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств понимается **«определение степени защищенности объектов** транспортной инфраструктуры и судов, в отношении которых применяются правила торгового мореплавания и требования в области охраны судов и портовых средств, установленные международными договорами РФ, а также судов ледокольного флота, используемых для проводки по морским путям, от угроз совершения актов незаконного вмешательства» [5].

Оценка уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и судов производится в соответствии с Приказом Министерства транспорта РФ от 12.04.2010 г. №87 «О порядке проведения оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств».

Таким образом: понятия риск и уязвимость судна, имеют разный смысл. На основании оценки рисков составляется план охраны судна, в соответствии со ст.9 МК ОСПС, для трёх уровней охраны.

1-й уровень охраны – «при котором постоянно должны поддерживаться минимальные соответствующие меры по обеспечению охраны», повседневный (жёлтый) уровень.

2-й уровень охраны – «при котором из-за повышенного риска происшествия, в течении некоторого времени должны поддерживаться соответствующие дополнительные меры по обеспечению охраны», повышенный (оранжевый) уровень.

3-й уровень охраны – «при котором в некотором ограниченном промежутке времени, в течении которого происшествие вероятно или неминуемо, должны поддерживаться дальнейшие особые меры по обеспечению охраны, хотя иногда невозможно определить конкретную цель нападения», высокий (красный) уровень.

Определение уровней охраны даются в соответствии п.п.2.9, 2.10, 2.11 МК ОСПС.

Так как, в соответствии с п. 3.1, ст.3 положения МК ОСПС не распространяются на рыбопромысловые суда, то эта категория морских судов руководствуется ФЗ «О транспортной безопасности», что не совсем логично, особенно когда судно находится в международном плавании.

Факторы риска для рыбопромыслового судна, при работе в потенциально опасном районе.

Рыбопромысловое судно находится в районах промысла обычно до 4-х месяцев. Судно может совершать переход к месту сдачи добытой рыбной продукции или в другой район. Находится в районе с поставленными рыболовными снастями (постановка, выборка, обработка выловленного улова).

При прохождении через потенциально опасный район факторы риска приведены в таблице 2.

Таблица 2

Факторы риска при переходе судна через опасный район

Факторы риска	Риски	Последствия
Безопасность экипажа	Высадка пиратов на судно	Захват судна. Члены экипажа становятся заложниками. Судно выходит из-под контроля экипажа.
Наличие на борту хорошо оборудованного убежища (цитадели)	Если военные не получают сообщение, что весь экипаж в убежище, они не предпримут штурм захваченного судна	Если военные получили достоверную информацию, что весь экипаж в убежище. В скором времени состоится штурм захваченного судна. С вертолёта открывается огонь на поражение по всем, кто находится на судне. Высаживается десант. Экипаж освобождается.
Высота надводного борта	При высоте 8 метров и более от уровня моря, шанс высадится на судно, у пиратов не велик	Необходимо принять меры по дополнительной защите участков палубы, где высота надводного борта менее 8 метров.
Скорость судна	При скорости 18 и более узлов, высадка пиратов на судно проблематична	Судно на большой скорости начинает маневрировать и не дает пиратским лодкам подойти к борту и высадиться на судно.
Состояние моря	При волнении моря 3 и более баллов, использовать быстроходные пиратские лодки «скифы» становится труднее	Пираты могут отойти к своим плавучим базам, но время будет потеряно и они скорее всего, откажутся от атаки.

При движении судна с тралом (постановке, выборке снастей и улова) к вышеперечисленным рискам добавляется – вероятность не обнаружить идущие в атаку пиратские лодки, так как

большая часть экипажа занята производственной деятельностью и на ходовой вахте может быть 1 человек. Факторы риска при этой деятельности судна показаны в таблице 3.

По опыту пиратские лодки, идущие в атаку, можно обнаружить с дистанции 1 миля (1852 метра) [6]. Если на борту имеются представители частной морской охранной компании (ЧМОК) с оружием, то для минимизации риска быть захваченными пиратами необходимо предпринимать действия, как показано на рисунке 2. Если же вооруженная охрана отсутствует, необходимо принять энергичные и быстрые действия по эвакуации всего экипажа в цитадель и передачи радиодонесений в центры связи, по установленной форме и каналам. Важно учитывать время на реакцию экипажа. Если скорость нападающей лодки 25 узлов (узел - миля в час), то за минуту лодка проходит расстояние $25/6 = 4,17$ кабельтов (771,7 метров). 1 морская миля равна 1852 метра, состоит из 10 кабельтовых (кбт). На рисунке 2 показано время подхода лодки к судну в секундах (с).

Таблица 3

Факторы риска при работе рыбопромыслового судна в районе промысла

Факторы риска	Риски	Последствия
Все факторы рисков приведенных в таблице 2 и дополнительно.		
Расстояние обнаружения атакующих лодок	Экипаж не успеет собраться в убежище. Капитан не передаст сообщение о пиратской атаке. Рулевое устройство и машина не будут заблокированы.	Часть экипажа окажется в заложниках, военные не предпримут штурма судна. Пираты угонят судно с людьми.

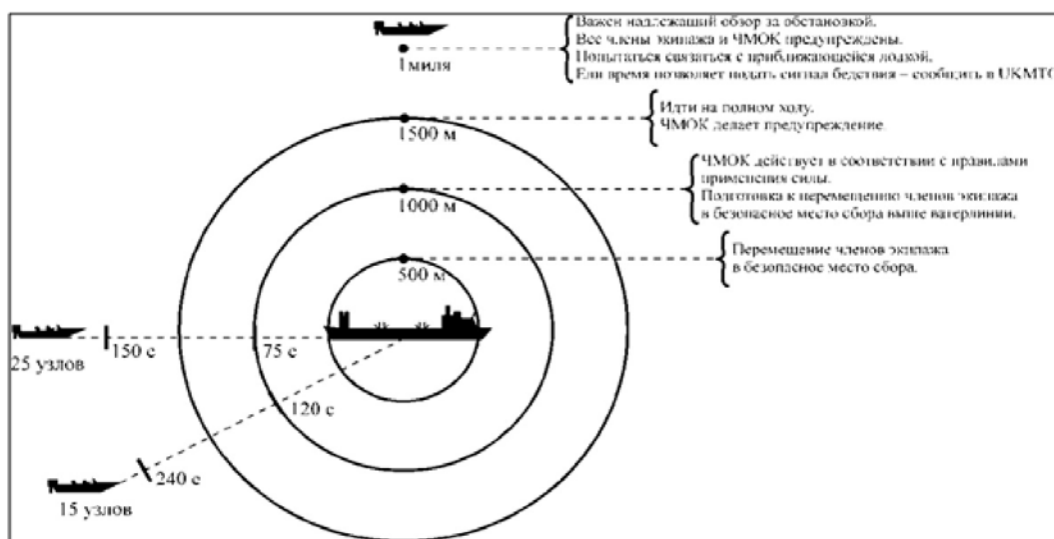


Рис. 2. – Пример возможного времени реакции

Где:

- УКМТО – основной пункт для связи при нападении пиратов, штаб-квартира организации «Морские торговые операции Великобритании» (г. Дубай, ОАЭ);
- ЧМОК – частная морская охранная компания.

Оценка факторов риска

В зависимости от сферы применения существуют различные толкования термина «безопасность». Так в торговом мореплавании под безопасностью подразумевается комплекс мер, направленных на избежание каких-либо происшествий с судами во время плавания [7,8]. Если же безопасность определять рисками (см. формулу 1) «безопасность - это отсутствие недопустимого риска, связанного с возможностью эффективной эксплуатацией судна как плавучего самоходного или несамоходного инженерного сооружения предназначенного для целей торгового мореплавания.

$$P_+ = 1 - P_- \quad (1)$$

где P_- - вероятность событий, уменьшающих безопасность судна (риски);

R_+ - вероятность безопасности эксплуатации судна.

Формальная оценка безопасности судна производится в следующей последовательности:

1. В результате анализа: отказов работы механизмов, человеческого фактора, причин аварийных ситуаций, инцидентов устанавливаются места, которые могут создать условия понижения безопасности экипажа, судна, груза, окружающей среды. Эти уязвимые места ранжируются по степени тяжести последствий, идентифицируются.

2. Определяется степень риска идентифицированных объектов (опасностей). Для этого определяют частоту аварийных случаев на объектах (1 раз в год/месяц и т.п.) в результате получают уровень рисков (недопустимый, практически приемлемый, незначительный).

3. Разрабатывается механизм управления рисками, который должен быть направлен на: сохранения жизни/здоровья людей; способствовать развитию бизнеса; защищать окружающую среду.

4. Анализируются ожидаемые затраты и полученная польза.

5. Составляются рекомендации по исключению или минимизации идентифицированного риска.

При плавании в потенциально опасном районе мирового океана необходимо определится с количественной оценкой частоты нападения на судно пиратов в водах прибрежных государств [9]. Анализ проведен по статистическим данным Международного морского бюро (ММБ) за период с 1 января 2015 г. по 31 декабря 2019 г.

Таблица 4

Места нападений на морские суда

№ п/п	страны	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	всего
		Кол-во нападений на суда					
1	Индонезия	108	49	43	36	25	261
2	Нигерия	14	36	33	48	35	166
3	Филиппины	11	10	22	10	5	58
4	Малайзия	13	7	7	11	11	49
5	Вьетнам	27	9	2	4	2	44
6	Индия	13	14	4	6	4	41
7	Бангладеш	11	3	11	12	-	37
8	Венесуэла	1	5	12	11	6	35
9	Сингапур	9	2	4	3	12	30
10	Перу	-	11	2	4	10	27
11	Конго	5	6	1	6	3	21
12	Гана	2	3	1	10	3	19

Следовательно, средняя частота падений на морские суда в год: - Индонезия – 52,5; Нигерия – 33,2; Филиппины – 11,6; Малайзия – 9,8; Вьетнам – 8,8; Индия – 8,2; Бангладеш – 7,4; Венесуэла – 7; Сингапур – 6; Перу – 5,4; Конго – 4,2; Гана – 3,8. В Сомали всего за 5 лет отмечено – 8 нападений. Центр опасности переместился в Индонезию и Нигерию. В 2019 г. самыми рискованными водами были: Нигерия – 35 нападений, Индонезии – 25, Сингапура – 12, Малайзии – 11, Перу – 10.

За этот период было взято в заложники: 2015 г. – 271 человек; 2016 г – 151; 2017г. – 91; 2018г. – 141; 2019г. – 59. Всего – 713 человек.

Получили ранения разной степени тяжести: 2015г. – 14 человек; 2016 г – 8; 2017г. – 6; 2018г. – 8; 2019г. – 7. Всего – 43 человека.

Было убито: 2015 г. – 1 моряк, 2017г. – 3; 2019г. – 1. Всего – 5 моряков.

Имея объективные статистические данные, можно рассчитать величины риска нападения на судно пиратов/гибели членов экипажа, финансовых потерь по формуле 2.

$$R = \lambda \times Y \quad (2)$$

где R - величина риска, 1/год или руб./год;

λ - частота инцидентов с нападением пиратов;

Y - ущерб от инцидента.

При определении риска гибели людей применяется размерность 1/год. При расчете убытков - руб./год.

С учётом общего количества нападений на суда за период 2015-2019г.г. – 980, при средней численности экипажа – 20 человек, получится, что 19600 моряков рисковали своей жизнью, погибло 5 человек.

При оценки риска гибели человека, принято говорить об индивидуальном риске, в мировой практике индивидуальный риск считается не допустимым, если он больше 10^{-4} 1/год (в течении года от инцидентов погиб 1 человек на 10000).

Риск гибели людей от пиратских атак в период 2015-2018 гг. – $5/19600 = 0,000255$ или $2,55 \cdot 10^{-4}$, что является допустимой величиной. За 2019г. было совершено 162 нападения (3240 человек), погиб 1 моряк, вероятность риска летального исхода составила 0,0003 или $3 \cdot 10^{-4}$. В экономически развитых странах приемлемым считается риск 10^{-6} (1 летальный исход на 1000000 человек).

При расчёте риска экономических затрат, необходимо определить вероятность атаки пиратов на суда (P_i) по формуле 3.

$$P_i = N_i \div \sum n_i \quad (3)$$

где N_i – количество судов атакованных пиратами в год, в 2019г. – 162 судна;

$\sum n_i$ - количество судов водоизмещением 500 и более в мире, по данным ИМО примерно 12000 единиц.

Полученная вероятность равна 0,014. Ущерб или убытки будут определяться функцией от различных их видов – $F(X_i)$, формула 4.

$$F_{(X_i)} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_i \quad (4)$$

где S_1 – стоимость выкупа за захваченных людей, судно, достигает 10 млн. дол. США;

S_2 – эксплуатационный ущерб, в среднем 25 тыс. дол. США в сутки;

S_3 – ущерб фрахта, от 12 до 29 тыс. дол. США на 1 тонну груза;

S_4 – ущерб по оценке ремонта судна после пиратского нападения;

S_i – другие виды ущерба.

Риск экономических затрат без упущенной выгоды (R), определится по формуле 5

$$R = \sum P_i \times [F_{(X_i)}] \quad (5)$$

Торговое мореплавание осуществляется в агрессивной морской среде. Капитану судна, в определенных обстоятельствах, приходится принимать решение – идти на риск, оправдан ли он, или отказаться от рискованных решений, но принести бизнесу большие потери. В этом случае необходимо иметь ввиду, что суммарные убытки представляют из себя сумму прямых, косвенных убытков и упущенную выгоду. В практике мореплавания принято, что если прибыль значительно превосходит ожидаемый риск, то риск будем оправдан, при условии:

1. Цель мореплавания нельзя достигнуть, не рискуя и риск, соответствует цели морского предприятия.

2. Были приняты все меры по предотвращению ущерба и объект риска не связан с жизнью и здоровьем людей.

Заключение

1. Нет однозначного решения по вопросу - каким нормативно-правовым актом необходимо руководствоваться рыбопромысловым судам РФ при определении и анализе рисков при составлении плана охраны компании/судна [10]. Сложилась практика, что рыбопромысловые суда, вероятно, из-за экономических затрат, не хотят выполнять руководства/рекомендации международных правил по охране судов. Ссылаясь, что в ОСПС есть ссылка, что его положения не распространяются на рыболовные суда. Здесь мы опять возвращаемся к давней проблеме – определение понятия рыбопромыслового и рыболовного судна.

2. Чем бы не закончился этот дискуссионный вопрос, главное - обеспечить безопасность людей на судне (экипажа). Создание на судне цитадели должно стать на промышленную основу, настало время переходить от «самодельных» убежищ к спроектированным и построенным в заводских условиях помещениям, где экипаж будет чувствовать себя в безопасности в ожидании оказания помощи.

3. Представленные в статье методологические основы определения и расчета факторов риска рыбопромысловых судов, при их работе в потенциально опасных районах мирового океана могут быть использованы при составлении системы управления безопасности компаний и судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года с поправками (СОЛАС - 1974 с дополнениями и поправками).
2. Международный кодекс по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения (МКУБ - 1994 с дополнениями и поправками).
3. Международный кодекс охраны судов и портовых средств (ОСПС – 2002 с дополнениями и поправками).
4. Мойсеенко С.С., Мейлер Л.Е. Управление рисками в мореплавании и промышленном рыболовстве: учебное пособие. – М.: МОРКНИГА, 2017. – 385 с.
5. Федеральный закон «О транспортной безопасности» от 09.02.2007 N 16-ФЗ
6. Тимофеев В.К. Морской терроризм и пиратство: учебное пособие /В.К. Тимофеев. - Калининград: Изд-во БГАРФ, 2012. – 204с.
7. Тимофеев В.К. Маневрирование и управление рыбопромысловым судном: учебное пособие /В.К. Тимофеев, Сирота А.К., Киценко В.Н.; под общей редакцией В.К. Тимофеева/. - Калининград: Издательство БГАРФ. 2018.- 167с.
8. Тимофеев В.К., Сухорук А.И., Сергиенко И.М. Использование средств автоматической радиолокационной прокладки (САРП) для повышения безопасности рыбопромысловых судов на промысле в чрезвычайной ситуации связанной с нападением пиратов. VI Международный Балтийский морской форум – 2018. - материалы Международного морского форума.- Том 2. VI Международная научная конференция «Морская техника и технология. Безопасность морской индустрии». - Калининград: Изд-во БГАРФ ФГОБУ ВО «КГТУ» - С.61-67. № гос. регистрации 0321900150.
9. Тимофеев В.К., Хирамагомедов М.М., Сергиенко И.М. Особенности построения системы охраны рыбопромысловых судов на промысле. Журнал «Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций» № 2 2019, С. 110-115.
10. Тимофеев В.К., Бураковский П.Е., Хирамагомедов М.М. Повышение безопасности рыбопромысловых судов эксплуатируемых в потенциально опасных районах. Журнал «Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций» № 5 2018, С. 44-51.

DETERMINING THE RISK LEVEL OF THE CREWFISHING VESSEL OPERATING IN POTENTIALLY DANGEROUS AREAS WORLD OCEAN

Timofeev Vladimir Konstantinich, Dr. (Militari)
Burakovskiy Pavel Yevgenyevich, Ph.D. (Tech)
Guraluik Boris Samuilovich, Ph.D. (Tech)
Ikonopistcev Ivan Igorevich, graduate student

¹Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: kaf_bm@bga.gazinter.net; paul_b@mail.ru; boris.guraluik@mail.ru

²FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russia, e-mail: Parktronic65@gmail.com

In order to develop a vessel security plan, the risk factors of different types of marine vessels are examined. The results of calculating the probability of occurrence of adverse incidents for the vessel crew are presented. A methodology for calculating the degree of economic risks for vessels operating in potentially dangerous areas of the world oceans is proposed.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОХРАННОСТИ МОРЕХОДНЫХ КАЧЕСТВ ЛЕСОВОЗА ПРИ ЗАТОПЛЕНИИ МАШИННОГО ОТДЕЛЕНИЯ

Якута Ирина Владимировна, канд. техн. наук, доцент кафедры безопасности мореплавания

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: kaf. bm@bga.gazinter.net

В статье произведен анализ причин и последствий аварийного случая с лесовозом т/х «Daroja». В результате исследования была произведена оценка характеристик плавучести и остойчивости неаварийного судна и при различной степени затопления машинного отделения. Произведенные расчеты параметров плавучести и остойчивости судна показали, что у исследуемого судна т/х «Daroja» при затоплении машинного отделения уменьшается запас плавучести, критерии остойчивости не удовлетворяют нормам остойчивости. Разработаны эксплуатационные ограничения по условию обеспечения сохранности мореходных качеств лесовоза при затоплении машинного отделения. Выработаны рекомендации по организации борьбы за живучесть судна в чрезвычайной ситуации.

Прежде, чем приступить к описанию произошедшей на лесовозе «Daroja» чрезвычайной ситуации (ЧС), остановимся на самом определении «чрезвычайной ситуации». Терминологические исследования, касающиеся чрезвычайных ситуаций, привели к появлению множества определений этого понятия. В настоящее время, действующее официальное определение содержится в Федеральном законе «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [1], а также в государственном стандарте Российской Федерации «Безопасность в чрезвычайных ситуациях» [2]. Формулируется это определение следующим образом: «чрезвычайная ситуация – обстановка на определенной территории или акватории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей».

Государственный стандарт Российской Федерации «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Чрезвычайные ситуации на акваториях. Термины и определения» [3] дает схожее, но прикладное для водной акватории и мореплавания определение чрезвычайной ситуации, под которым в указанном ГОСТ понимается «...состояние, при котором в результате возникновения источника чрезвычайной ситуации нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей и мореплавания, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу населения, морским (речным) объектам, водной флоре и (или) фауне на море или внутреннем водном бассейне».

Исходя из представленных официальных определений, сделан вывод о существовании трех признаков ЧС:

- наличие источника (аварии, природного явления и пр.);
- наличие или угроза появления его негативных последствий, т.е. вреда (ущерба);
- реальное или потенциальное нарушение нормальных условий деятельности.

Под источником чрезвычайной ситуации указывается «...опасное техногенное происшествие, авария, катастрофа, опасное природное явление, стихийное бедствие, широко распространенная болезнь людей, сельскохозяйственных животных и растений, в результате чего произошла или может возникнуть чрезвычайная ситуация» [2]. Перечень источников ЧС, перечисленный в [3] входит не просто авария, а «авария на морском (речном) объекте» (морские суда являются морскими объектами), т.е. «опасное техногенное происшествие на морском (речном) объекте, представляющее угрозу жизни и здоровью людей, приводящее к повреждению корпуса морского (речного) объекта или его оборудования, к потере мореходности или к повреждению морским речным объектом берегового сооружения и загрязнению окружающей природной среды, для ликвидации

или локализации которой требуется помощь поисково-спасательных и других спасательных сил и средств».

Чрезвычайную ситуацию можно и нужно считать таковой, если только причиненный возникновением источника вред (имущественный или неимущественный) является существенным, значительным, а угроза его возникновения явной, реальной и осуществимой в ближайшее время. Так же значительным должно быть и нарушение нормальных условий деятельности, но основным критерием наличия этого признака все-таки необходимо считать продолжительность его существования.

В статье рассматривается реально произошедший случай с т/х «Daroja» 6 февраля 2019 года, когда через открытые аварийные люки в машинное отделение хлынула вода, судно получило значительный крен, что могло привести к гибели судна.

4 февраля 2019 года лесовоз «Daroja» вышел из порта Pasajes (Испания) с грузом леса (брёвна длиной 2,5 м) массой 4155 тонн в трюмах № 2 и 3. Лесовоз направлялся в порт Figueira Da Foz (Португалия). Судно «Daroja» является универсальным грузовым судном, технико-эксплуатационные характеристики представлены в таблице 1. Судно было исправно и полностью готово к данному рейсу. Время перехода заняло 23 часа. Внешний вид судна и маршрут перехода показан на рис. 1.



Рис. 1. – Внешний вид т/х «Daroja»

Таблица 1

Технико-эксплуатационные характеристики судна

Тип судна:	Многофункциональное контейнерное судно для перевозки генеральных грузов. Одновинтовое, однопалубное, трехтрюмное с центральными грузовыми люками, с кормовым расположением машинного отделения и надстройки
Флаг:	Кипр
Порт приписки:	LIMASSOL
Позывной:	R3MF7
№ ИМО:	9148221
Длина наибольшая (LOA):	90,95 м
Длина между перпендикулярами (LBP):	84,80 м
Ширина наибольшая (BM):	15,40 м
Высота борта от киля до гл.палубы	7,35 м
Максимальная осадка (летняя):	5,65 м (зимняя: 5,00 м)
Надводный борт (летний):	1,70 м
Поправка на пресную воду (FWA):	126 мм

Чистая вместимость судна (NRT):	1677
Валовая вместимость судна (GRT):	3266
Вес судна порожнем:	1669 тонн
Дедвейт (DWT):	4155 тонн
Объемное водоизмещение:	5666,2 м ³
Дата постройки:	октябрь 1996
Судовая верфь:	PATTJE SHIPYARD, NETHERLANDS
Классификационное общество:	LLOYDS REGISTER OF SHIPPING
Класс СЭУ:	AUT-UMS; Ice class IA
Класс корпуса:	C general cargo ship – double skin - equipped for carriage of containers; unrestricted navigation
Главный двигатель:	МАК 8 М 32, 3520 kW
Скорость (в грузу / в балласте):	12,5 / 13,5 узлов, дневной расход: 13,0 тонн (HFO)
Винт:	ВРШ, правого вращения, материал: бронза
Носовое подруливающее устройство:	400 kW, Jastrum BU 60F E
Район плавания:	Неограниченный
Количество трюмов:	3 / гидравлическая, складывающаяся система крышек MacGregor
Размеры трюмов:	Трюм 1: 6,40 x 10,56 x 2,90 м Трюм 2: 25,50 x 13,20 x 5,68 м Трюм 3: 38,40 x 13,20 x 8,56 м
Объем грузовых трюмов:	Трюм 1: 372 м ³ Трюм 2: 2804 м ³ Трюм 3: 4352 м ³
Контейнерная вместимость:	446 TEU – 156 TEU в трюма, 290 TEU на палубу 197 FEU – 73 FEU в трюма, 124 FEU на палубу
Запасы:	Тяжелое топливо – 418,3 м ³ Дизельное топливо (MGO) – 60,3 м ³ Масло – 16,8 м ³ Пресная вода – 59,2 м ³ Замазочные воды – 24,4 м ³
Балласт:	2738,8 м ³
Автономность плавания:	30 суток
Экипаж:	11 человек

5 февраля 2019 года лесовоз «Daroja» стоял на рейде порта Figueira Da Foz в ожидании начала для выгрузки груза. По прогнозу погоды ожидалось усиление западных ветров до 8 баллов по шкале Бофорта, при этом более сильный ветер прогнозировался в северных районах Атлантического океана (S Utsire, Skaggerak, N Fisher). Так как вследствие сильного ветра и крупного волнения подход к пристани был опасен, то судно осталось на рейде в ожидании улучшения погоды. 6 февраля при стихшем ветре судно готовилось перейти к пристани, чтобы начать выгрузку груза, но в этот момент внезапно налетел с запада шквал ураганной силы. Несмотря на работу машины, судно дрейфовало к берегу со скоростью 5 узлов.

Тем временем, вахтенный помощник капитана сдал вахту старшему помощнику, предварительно в конце вахты отправив боцмана с палубной командой проверить лес и дотянуть цепи. Спустя час произошло обесточивание судна. Весь экипаж был немедленно собран на мостике, проинструктирован, второй помощник был отправлен в машинное отделение для выяснения ситуации и причины обесточивания. Зайдя в машинное отделение, он увидел наличие воды, высотой 1,5 метра, и она продолжала прибывать. Причиной затопления машинного отделения стали незакрытые аварийные люки. Вследствие чего после удара волны вода начала поступать через люки в машинное отделение. В то время, когда судно потеряло ход относительно воды, его накрыло 8-ми метровой волной, которая опрокинула лес на палубе и сместила его, вследствие чего судно получило крен более 4 градусов. Лесовоз продолжал принимать воду.

Второй помощник по приказу капитана начал готовить средства спасения: аварийный радиобуй, спасательные плоты, шлюпку. Это происшествие случилось на дневной вахте второго помощника, на мостике находился капитан. Все произошло на глазах вахты, были приняты незамедлительные действия: ход сбавлен до самого малого, курс взят на волну, объявлена «Общесудовая тревога».

Через непродолжительное время к месту затопления была отправлена аварийная партия в количестве трех человек, во главе со старшим помощником капитана. Аварийная партия была соответственно экипирована: были одеты гидротермокостюмы, страховочные пояса, через карабины которых был пропущен фалинь, таким образом, что люди получались в единой «связке» с дистанцией между ними по 3 метра. Старший помощник имел водонепроницаемую радиостанцию. С мостика велось постоянное наблюдение за аварийной партией и поддерживалась радиосвязь.

Когда шторм утих, экипаж произвел осмотр повреждений. Вода в трюме № 1 была только в двух кормовых колодцах – по $0,12 \text{ м}^3$ в каждом. Для дальнейшего продолжения рейса были сделаны следующие действия: откачали воду из трюма, провели полную инспекцию машинного отделения, проверили аварийные крышки на герметизацию, протестировали главную машину (полный ход вперед, полный ход назад), проверили аварийное перо руля и спасательные средства в соответствии с конвенцией СОЛАС. Судно продолжило рейс и закончило его без каких-либо происшествий.

Сначала были рассчитаны посадка и остойчивость т/х «Daroja» перед началом рейса из порта Pasajes (Испания) в порт Figueira Da Foz (Португалия) с грузом леса (брёвна длиной 2,5 м) в трюмах № 2 и 3 и на палубе.

Все гидростатические данные взяты из «Информации об остойчивости для капитана» и гидростатических таблиц. Высоты z_p центров тяжести балласта, топлива, масла, воды и груза в трюмах, над основной плоскостью, определяются по высоте цистерн, танков и грузовых трюмов на чертеже общего расположения судна или на схеме продольного разреза судна в Информации об остойчивости. Момент инерции свободных поверхностей балластных, топливных танков, танков пресной воды, масляных цистерн взяты из таблиц Информации об остойчивости.

Запасы топлива размещаются в расходных и отстойных цистернах и танках, расположенных в районе машинно-котельного отделения (МКО) и танках двойного дна. Балластные танки, как правило, заполняются полностью, чтобы исключить влияние свободной поверхности жидких грузов на остойчивость.

Координаты центра тяжести судна в данном варианте загрузки рассчитаны в соответствии с [4]: $x_g = -1,54 \text{ м}$; $z_g = 5,98 \text{ м}$; $M_{f.s} = 1068 \text{ т}$. Средняя осадка: $T_{cp} = 5,42 \text{ м}$.

Поперечная метацентрическая высота с учетом влияния жидких грузов $h = 0,79 \text{ м}$. Построена диаграмма статической остойчивости (рис. 2) и по ней определены $\theta_{max} = 40^\circ \geq 30^\circ$; $\theta_{zak} \geq 60^\circ$.

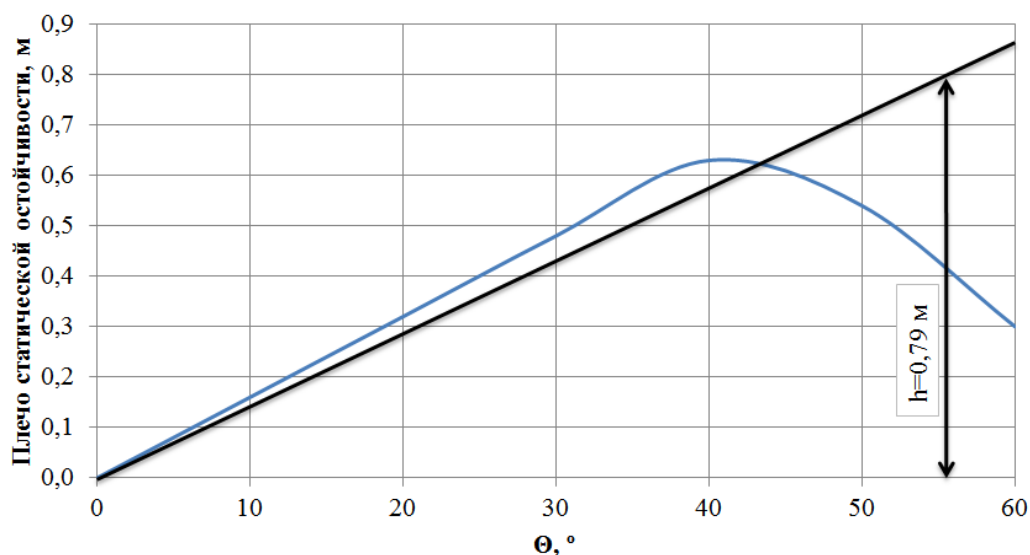


Рис.2. Метацентрическая высота до момента затопления отсека

С использованием диаграммы статической остойчивости построена диаграмма воздействия ветра и бортовой качки для нахождения критерия погоды (рис.3) [5,6].

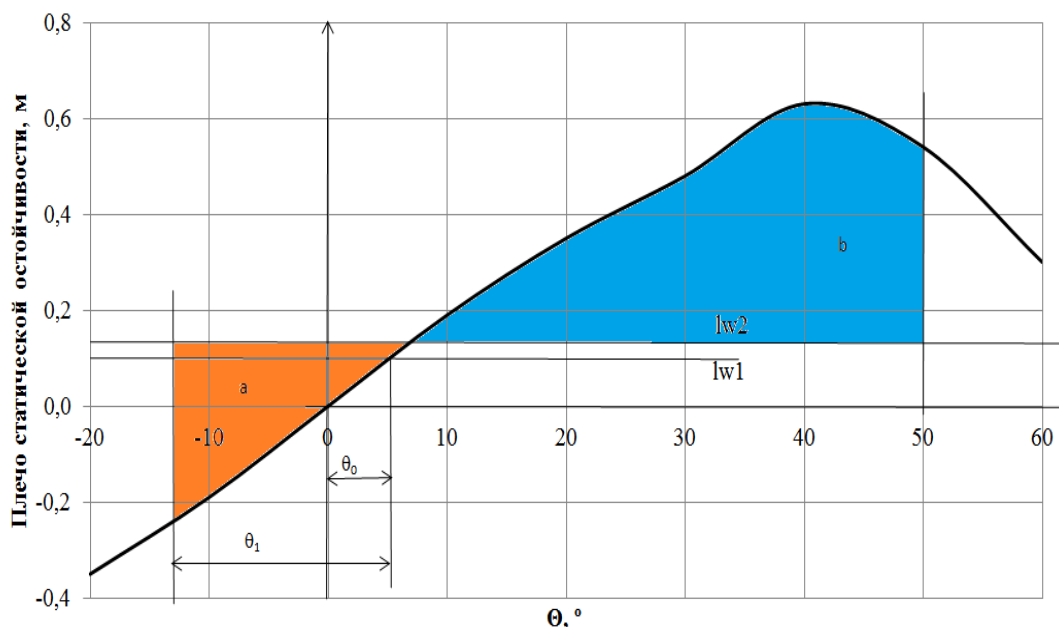


Рис. 3. Диаграмма воздействия ветра и бортовой качки для определения критерия погоды до аварии

По рис. 3 определяем следующие параметры ДСО и их соответствие нормам остойчивости:
 $\theta_0 = 5^\circ$ – угол крена от действия постоянного ветра; $\theta_1 = 19,3^\circ$ – угол крена в наветренную сторону от действия волн; $\theta_2 = 50^\circ$ – угол заливания.

Критерии остойчивости:

Площадь под диаграммой статической остойчивости:

$0^0 - 30^\circ = 0,126 \text{ м} \cdot \text{рад} \geq 0,055 \text{ м} \cdot \text{рад}$ – удовлетворяет.

$0^0 - 40^\circ = 0,22 \text{ м} \cdot \text{рад} \geq 0,09 \text{ м} \cdot \text{рад}$ – удовлетворяет.

$40^\circ - 30^\circ = 0,094 \text{ м} \cdot \text{рад} \geq 0,03 \text{ м} \cdot \text{рад}$ – удовлетворяет.

Плечо восстанавливающего момента при угле крена, равном или больше 30° :

$l = 0,48 \text{ м} \geq 0,2 \text{ м}$ – удовлетворяет.

Максимальное плечо восстанавливающего момента: $l_{max} = 0,63 \text{ м}$; l_{max} при $40^\circ \geq 25^\circ$ – удовлетворяет.

Начальная метацентрическая высота: $h_0 = 0,79 \text{ м} \geq 0,15 \text{ м}$ – удовлетворяет.

Критерии погоды $b/a \geq 1$: $b/a = 3,4 \geq 1$ – удовлетворяет.

$\theta_0 = 5^\circ \leq 16^\circ$ – удовлетворяет.

Все критерии остойчивости выполнены. Судно в данном варианте загрузки до аварийной ситуации остойчиво.

Далее рассчитали посадку и остойчивость т/х «Daroja» в момент чрезвычайной ситуации с грузом леса (брёвна длиной 2,5 м) в трюмах и на палубе при затоплении машинного отделения [4-7].

Рассчитали, сколько воды влилось в машинное отделение при затоплении на 0,2 м, 0,5 и 1,0 и 1,5 м. Соответственно, объем воды, влившейся в помещении при затоплении на 0,2 м равен $v_T = 43,7 \text{ м}^3$; на 0,5 м – $v_T = 109,3 \text{ м}^3$; на 1 м – $v_T = 218,7 \text{ м}^3$ и на 1,5 м – $v_T = 328,0 \text{ м}^3$.

Масса влившейся воды при разных уровнях воды: $m_{e,0,2} = 38,10 \text{ т}$; $m_{e,0,5} = 95,22 \text{ т}$; $m_{e,1,0} = 190,54 \text{ т}$; $m_{e,1,5} = 285,77 \text{ т}$.

Наиболее опасным считается начальный момент затопления отсека, когда воды еще мало, а влияние свободной поверхности большое. Поэтому оценим изменение остойчивости при уровне воды в отсеке равном 0,5 м, хотя судя по поведению судна в момент чрезвычайной ситуации, становится ясно, что при уровне воды 0,2 м судно уже было не остойчиво.

Находим новое значение абсциссы, ординаты и аппликаты ЦТ судна при затоплении машинного отделения на 0,5 м: $x_g = -2,09 \text{ м}$; $y_g = 0,00 \text{ м}$; $z_g = 5,91 \text{ м}$; $M_{f.s} = 1068 \text{ тм}$.

Средняя осадка: $T_{cp} = 5,55 \text{ м} \leq 5,65 \text{ м}$ удовлетворяет. Высота надводного борта уменьшилась на 0,122 м.

Оценим, будет ли судно удовлетворять нормам плавучести при уровне воды 1 м. Средняя осадка: $T_{cp} = 5,58 \text{ м} \leq 5,65 \text{ м}$ удовлетворяет. Высота надводного борта уменьшилась на 0,163 м.

При уровне воды в машинном отделении 1,5 м: средняя осадка: $T_{cp} = 5,643 \text{ м} \leq 5,65 \text{ м}$ удовлетворяет. Высота надводного борта уменьшилась на 0,244 м. Из произведенных расчетов элементов плавучести видно, что при заданных уровнях воды в машинном отделении судно не теряет плавучести. Однако видно, что при увеличении массы воды это произойдет.

Исправленное значение метацентрической высоты на влияние попавшей в машинное отделение воды равно: $h = 0,08 \text{ м}$.

Построена диаграмма статической остойчивости (рис.4) и по ней определены $\theta_{max} = 40^\circ \geq 30^\circ$; $\theta_{зак} \geq 60^\circ$.

С использованием диаграммы статической остойчивости построена диаграмма воздействия ветра и бортовой качки для нахождения критерия погоды (рис.5) при затоплении машинного отделения водой.

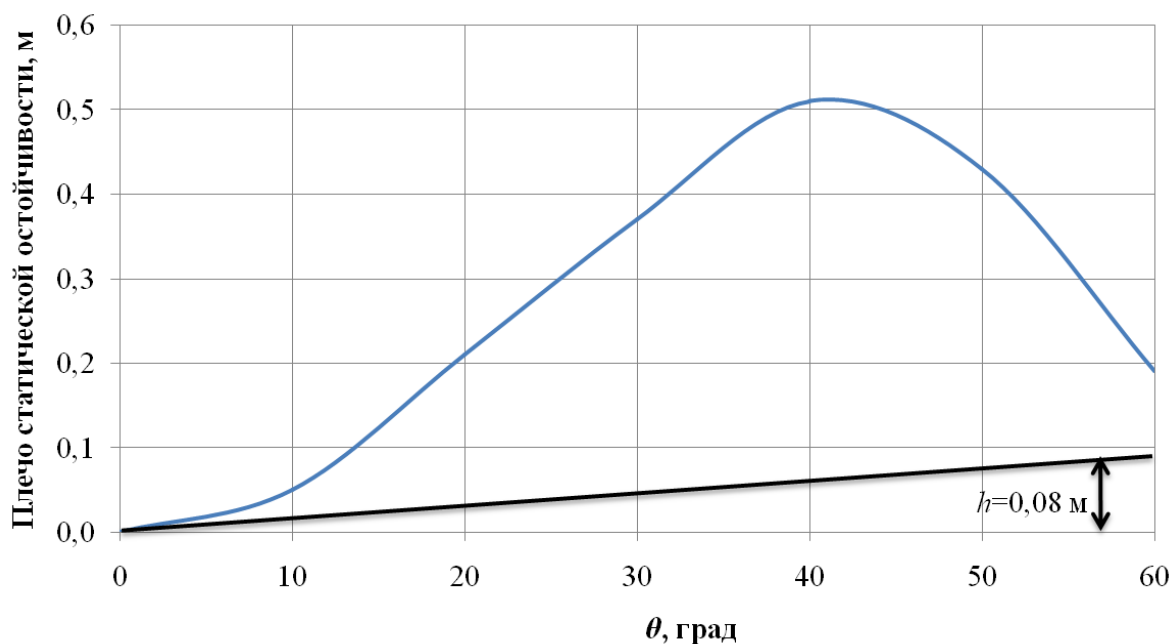


Рис.4. Метацентрическая высота после затопления отсека

По рис. 5 определяем параметры ДСО и их соответствие нормам остойчивости:

$\theta_0 = 10^\circ$ – угол крена от действия постоянного ветра; $\theta_1 = 15,4^\circ$ – угол крена в наветренную сторону от действия волн; $\theta_2 = 50^\circ$ – угол заливания.

Критерии остойчивости:

Площадь под диаграммой статической остойчивости:

$0^\circ - 30^\circ = 0,097 \text{ м} \cdot \text{рад} \geq 0,055 \text{ м} \cdot \text{рад}$ – удовлетворяет.

$0^\circ - 40^\circ = 0,18 \text{ м} \cdot \text{рад} \geq 0,09 \text{ м} \cdot \text{рад}$ – удовлетворяет.

$40^\circ - 30^\circ = 0,081 \text{ м} \cdot \text{рад} \geq 0,03 \text{ м} \cdot \text{рад}$ – удовлетворяет.

Плечо восстанавливающего момента при угле крена, равном или больше 30° :

$l = 0,37 \text{ м} \geq 0,2 \text{ м}$ – удовлетворяет.

Максимальное плечо восстанавливающего момента: $l_{max} = 0,51 \text{ м}$; l_{max} при $40^\circ \geq 25^\circ$ – удовлетворяет.

Начальная метацентрическая высота: $h_0 = 0,08 \text{ м} \leq 0,15 \text{ м}$ – не удовлетворяет.

Критерии погоды $b/a \geq 1$:

$b/a = 7,5 \geq 1$ – удовлетворяет.

$\theta_0 = 10^\circ \leq 16^\circ$ – удовлетворяет.

Не все критерии остойчивости выполнены. Судно при затоплении машинного отделения через открытые аварийные люки – не остойчиво.

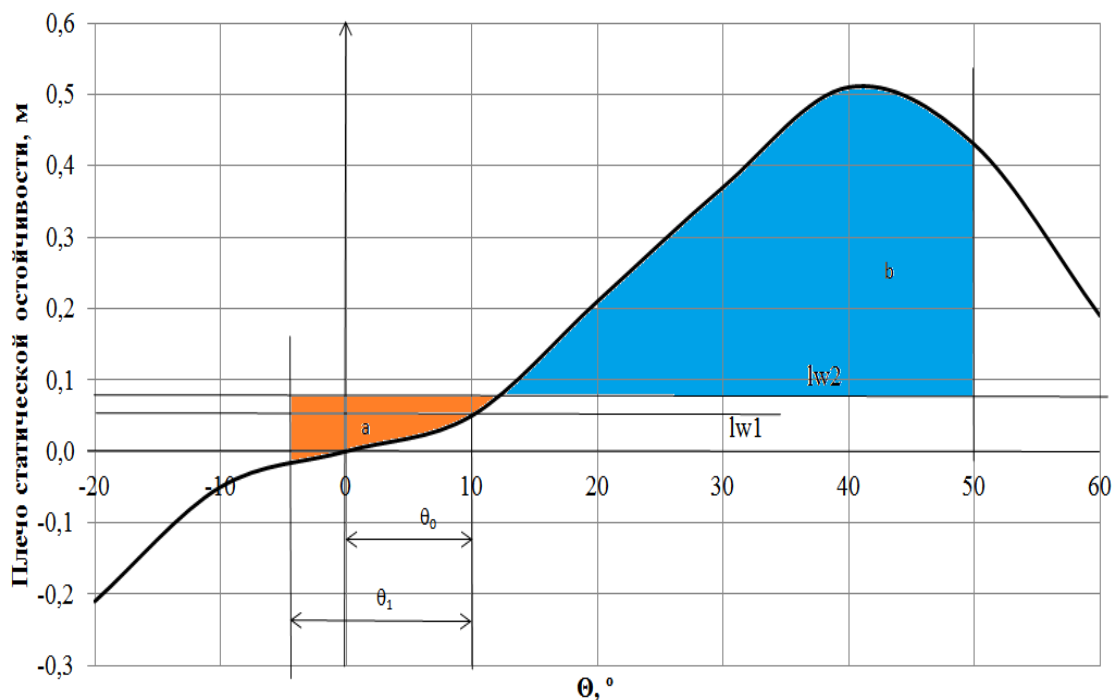


Рис.5. Диаграмма воздействия ветра и бортовой качки для определения критерия погоды

Как видно из расчетов мореходных качеств судна, при затоплении машинного отделения уменьшается надводный борт и как следствие, уменьшается запас плавучести. Так, при уровне воды в машинном отделении 0,5 м высота надводного борта уменьшилась на 0,122 м, а при уровне воды 1,5 м – на 0,244 м. При дальнейшем поступлении воды судно потеряло бы плавучесть.

Остойчивость судна изменяется при затоплении машинного отделения. В начале рейса метацентрическая высота с учетом влияния жидких грузов, была равна 0,79 м. Все параметры ДСО удовлетворяли нормам остойчивости в соответствии с [5-7]. В момент аварии при уровне воды 0,5 м метацентрическая высота уменьшилась и стала равна 0,08 м, что не удовлетворяет нормам остойчивости.

Остойчивость судна резко падает в первоначальный момент затопления. Это происходит из-за наличия в отсеке большой свободной поверхности и малого количества воды. Потеря остойчивости будет тем больше, чем шире судно и длиннее отсек. Повышения уровня воды в отсеке второй категории улучшает остойчивость судна, так как с увеличением веса вливающейся воды растёт её положительное воздействие на остойчивость судна. Площадь свободной поверхности при этом увеличивается незначительно из-за сравнительно небольшого развала бортов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 21.12.1994 № 68-ФЗ (ред. от 23.06.2016) «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» // «Собрание законодательства РФ», 26.12.1994, № 35, ст. 3648.
2. ГОСТ Р 22.0.02-2016. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения основных понятий. – Введ. 01.01.2017. – М.: Стандартинформ, 2016. – 8 с.
3. ГОСТ Р 22.0.09-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Чрезвычайные ситуации на акваториях. Термины и определения. – Введ. 01.07.96. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2000. – 7 с.
4. Маков Ю.Л. Остойчивость... Что это такое? (Диалог с капитаном) – СПб.: Судостроение, 2005. – 320 с.
5. Международный кодекс остойчивости судов в неповрежденном состоянии 2008 года (Кодекс ОНС 2008 г.) (Одобен Резолюцией MSC.267(85) (с изменениями на 5 июня 2015 года) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/499028808>. Дата обращения 05.05.19.

6. Правила классификации и постройки морских судов (Российский Морской Регистр Судоходства, 2018) [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.rs-class.org/upload/iblock/dda/2-020101-082\(T1\).pdf](http://www.rs-class.org/upload/iblock/dda/2-020101-082(T1).pdf). Дата обращения 04.05.2019.

7. Кодекс безопасной практики 2011 года для судов, перевозящих палубные, лесные грузы (Кодекс ПЛГ) (Резолюция А.1048(27)). Code of safe practice for ship carrying timber deck cargoes, 2011 (2011 NDC code) (Resolution a.1048(27)). СПб.: ЦНИИМФ, 2012.

ENSURING THE SAFETY OF THE SEAFLOADER'S SEA QUALITY IN THE FLOODING OF THE ENGINEERING

Irina Vladimirovna Yakuta, candidate of technical sciences,
associate professor of safety of navigation

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: bm@bga.gazinter.net

The causes and consequences of the accident with the timber carrier m/v "Daroja" have been reviewed in this work. An assessment of the characteristics of floatability and stability of a non-emergency ship at various degrees of flooding of the engine room was made by this research. The calculations of the parameters of floatability and stability of the m/v "Daroja", when the engine room is flooded, the floatability margin decreases and the stability criteria do not satisfy the stability standards. The operational restrictions on the conditions for ensuring the safety of the seaworthiness of the timber carrier during the flooding of the engine room have been developed. Recommendations have been developed for organizing the emergency damage control of the vessel.

СЕКЦИЯ «ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПОСТРОЙКИ И РЕМОНТА СУДОВ»

SECTION "INOVATIVE METHODS IN SHIP DESIGN, CONSTRUCTION AND REPAIR"

УДК 629.5.015.2

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ SPH ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНЕШНИХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА НОСОВУЮ ОКОНЕЧНОСТЬ СУДНА В УСЛОВИЯХ ЕЕ ЗАХВАТА ВОЛНОЙ

¹Бураковский Евгений Петрович, д-р техн. наук, профессор

²Бураковский Павел Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент

³Дмитровский Владимир Алексеевич, канд. физ.-мат. наук, доцент

¹ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия им. адмирала Н.Г. Кузнецова»

(филиал в г. Калининграде), Калининград, Россия, e-mail: e_burakovsky@mail.ru

²Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: paul_b@mail.ru

³ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: vdmitsrovsky@mail.ru

В статье приводится краткая характеристика истории развития метода сглаженных частиц (SPH), показано место этого метода в современной вычислительной гидродинамике. Путем сопоставления результатов математического моделирования и экспериментальных исследований подтверждена возможность применения метода SPH для оценки величины гидродинамических усилий, действующих на палубу судна при захвате его носовой оконечности волной.

1. Общие сведения

Последние 20 лет в области вычислительной механики сплошных сред характеризуются всё более широким применением так называемых бессеточных методов моделирования, среди которых основную роль играет метод сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH). Несмотря на название, метод применим не только к гидродинамическим, но и к моделям других разделов механики сплошных сред и её приложений, в частности:

1. Теоретической астрофизике: моделирование

– образования и столкновения звёзд и галактик,

– вспышки сверхновых звёзд,

– ударное воздействие метеоритов, и т.д.;

2. Физике твёрдого тела: моделирование

– термодинамики твёрдого тела с учётом температурного расширения,

– распространения ударных волн в твёрдых телах,

– больших упругих и пластических деформаций под действием сил разной природы,

– образование трещин, растрескивания и фрагментации твёрдых тел и т.д.;

3. Биологии и медицине: моделирование тока жидкостей в организме, в основном – крови в сердечно-сосудистой системе, патологий сердечно-сосудистой системы и многих других явлений.

Более того, именно в работах в области астрофизики впервые был сформулирован сам термин "SPH" и принципы, лежащие в основе метода.

Поэтому мы будем применять термин "метод", а не "гидродинамика сглаженных частиц", используя также исходную английскую аббревиатуру "SPH", безотносительно к области его применения.

Непосредственно в гидродинамике метод позволяет эффективно моделировать такие, не поддающиеся классическим сеточным методам, явления как

- формирование и динамика свободной поверхности жидкости под действием сил разной природы (волнообразование),
- динамика тел, плавающих на поверхности взволнованной жидкости,
- динамика тел, падающих на поверхность жидкости, в частности – слеминг,
- динамика волн прибоев и взаимодействие их с прибрежными сооружениями, и многие другие.

Однако, несмотря на растущую популярность метода в научной среде, его применение в области судостроения, как в теоретической, так и в практической его части, остаётся невостребованным. Причины имеют двусторонний характер.

С одной стороны, учёные, работающие в области SPH, опасаясь сложности задач моделирования нагрузок на корпуса судов, ограничиваются проблемами визуализации поведения объектов, плавающих на поверхности воды. Несмотря на их видимое правдоподобие (вплоть до "барашков" пены на гребне волн), такие модели не дают никакой информации о гидродинамических нагрузках. И это – на фоне изобилия достаточно серьёзных работ, посвящённых волновым нагрузкам на стационарные прибрежные сооружения.

С другой стороны, инженеры-судостроители, не найдя в этой области моделей, готовых к использованию на практике, теряют интерес к методам SPH после первого знакомства с ними.

2. Краткие исторические сведения

Как уже говорилось выше, впервые метод SPH был сформулирован и описан независимо в работах Lucy [1], и Gingold и Monaghan [2], посвящённых проблемам астрофизики, в 1977 году. По словам одного из авторов: "Мы нуждались в методе, с которым было бы легко работать и который обладал бы приемлемой точностью. Метод SPH удовлетворял этим требованиям. В качестве бонуса мы обнаружили, что SPH был стабилен, давал разумные ответы в трудных ситуациях, и без особых проблем мог быть применён к усложнённым физическим моделям" (Monaghan [3]).

Следующее десятилетие метод постепенно развивается, в основном, силами его авторов и их коллег. Количество статей на эту тему исчисляется одной-двумя в год. Второе десятилетие отмечено постепенным нарастанием числа публикаций, метод находит применение и в других областях прикладной механики, в частности – в вычислительной гидродинамике и физике твёрдого тела. Этот прогресс продолжается в третьем десятилетии. И, наконец, в четвёртом десятилетии с момента рождения метода имеет место буквально взрывообразный рост его популярности, статьи начинают исчисляться десятками в год.

Такое развитие метода SPH очень легко объясняется уровнем развития средств вычислительной техники на рубеже XX-XXI веков. Решаемые задачи были очень требовательны к вычислительным ресурсам. Для получения результатов расчётов в разумное время требовались суперкомпьютеры, позволить себе которые могли лишь немногие исследовательские институты и крупные университеты. Но даже с их помощью вычислительные эксперименты занимали недели. Дороговизна рабочего времени суперкомпьютеров завершала общую картину, на фоне которой разворачивался прогресс в этой области. Такая требовательность к ресурсам – вина не метода SPH, а природы стоящих перед ним задач. Никакие другие методы не позволяли их решать. Платой за его мощь и была высокая стоимость вычислительных экспериментов.

Но в конце нулевых годов нашего века в области компьютерной техники происходит маленькая революция. Началась она незаметно с растущей популярности видеокарт – устройств, ускоряющих отображение сложной, особенно многомерной, информации на экранах. Основным их назначением являлось ускорение видеоигр. Казалось, это не имеет никакого отношения к науке. Но учёные быстро заметили, что вычислительные возможности видеокарт можно с успехом использовать для решения тяжёлых расчётных задач. Стали появляться статьи, посвящён-

ные этой тематике. Производители отреагировали немедленно расширением номенклатуры выпускаемых видеокарт, основным назначением которых являлись уже именно сложные вычисления, проблемы же отображения информации на экранах отошли на второй план. Некоторые такие "видеокарты" вообще не имели вывода на экран. Учёные же получили возможность за приемлемую цену приобрести "домашний суперкомпьютер". Это и обеспечило феноменальный скачок в развитии SPH.

3. Место метода SPH в современной вычислительной гидродинамике

Как уже было сказано в самом начале, метод SPH относится к так называемым бессеточным методам (meshless, mesh-free methods).

Все классические методы моделирования сплошных сред предполагают предварительную дискретизацию пространства, в котором разворачивается изучаемое явление, в виде сети узлов, для которых в процессе моделирования вычисляются все интересующие учёных характеристики явления. Сама такая сеть предполагается неизменной в процессе моделирования. Такой подход позволяет, с одной стороны, резко снизить потребность методов в вычислительных ресурсах, с другой – жёстко привязывает изучаемый процесс к первоначально выбранной сети узлов, что сильно ограничивает круг задач, решаемых классическими методами. Например, решение термодинамических задач без учёта температурного расширения в модели (ограниченный диапазон температур или специальные материалы, обладающие малым коэффициентом температурного расширения) не допускает моделирование явлений, в которых пренебречь температурным расширением невозможно.

Решение проблемы кажется очевидным – надо допустить изменение геометрии первоначально выбранной сети дискретизации пространства в соответствии с изменяющимися в процессе моделирования характеристиками явления (адаптивная дискретизация). Однако, это сразу качественно повышает потребности таких методов в вычислительных ресурсах, сводя на нет основное преимущество классических методов – дешевизну расчётных экспериментов. К тому же, не всегда очевидно, как меняется геометрия изучаемого явления в процессе его развития (например, форма свободной поверхности жидкости под действием ветровых нагрузок).

В бессеточных методах производится дискретизация не всего пространства явления, а отдельных объектов, участвующих в нём. При этом сами объекты представляются в виде совокупности тесно взаимосвязанных частиц, которые могут перемещаться в пространстве в соответствии с логикой модели. Такое представление моделей сразу снимает все ограничения классических методов, но переводит их решение в другую "ценовую категорию". Но другого пути не существует.

С точки зрения учёных указанный подход знаменует переход от эйлерова описания сплошных сред к более интуитивно очевидному лагранжеву. Если узлы сети воспринимаются ими как точки в координатном пространстве, то указанные частицы – как частицы среды, движущиеся в соответствии с законами механики. С точки зрения же программиста новый подход не столь революционен – просто к задаче вычисления характеристик явления в заданных узлах добавляется задача вычисления координат самих узлов.

В настоящее время существует и продолжает появляться очень большое количество бессеточных методов. Перечислять их в рамках краткого обзора нет ни возможности, ни необходимости. Простой поиск в сети по ключевым словам "бессеточные методы" даст обильную информацию по этому вопросу. Важно понимать, что все они различаются двумя аспектами:

- как определить характеристику в заданной точке, и
- как определить перемещение заданной точки.

Для любой практической задачи её решение является компромиссом между ценой и качеством. Любой из бессеточных методов – это отдельный случай такого компромисса. Выбор метода – вопрос здравого смысла/интуиции/удачи каждого исследователя.

Сам метод SPH в процессе развития претерпевал настолько многочисленные корректировки, что впору говорить не о методе, а о методах. В первоначальном виде, в котором он был сформулирован авторами в 1977 году, метод не применяется из-за многочисленных недостатков его в изначальном виде. К ним относятся трудности с формулировкой граничных условий, неустойчивость при условиях несжимаемости и отсутствия вязкости среды и некоторые другие.

4. Применение метода SPH для оценки гидродинамических нагрузок при обтекании палубы судна

Представляется интересным проверить возможность применения метода SPH для определения величины гидродинамических нагрузок, действующих на палубу судна при захвате волной носовой оконечности. С использованием программы DualSPHysics было выполнено моделирование процесса обтекания носовой оконечности судна потоком жидкости. При этом трехмерная модель носовой оконечности помещалась в канал, в котором моделировалось течение жидкости с заданной скоростью. Визуализация полученных результатов осуществлялась с использованием программы ParaView (рис. 1).

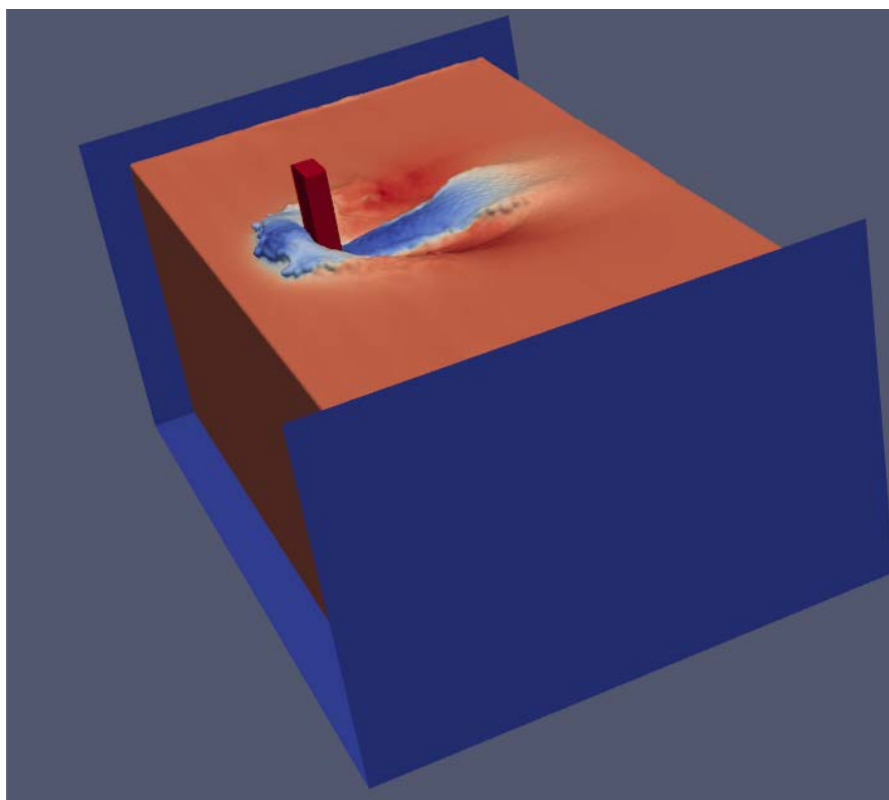


Рис. 1. Моделирование обтекания носовой оконечности с использованием метода SPH

По результатам моделирования проводилось определение трех компонентов усилий: сил, действующих в направлении движения жидкости (P_z) и перпендикулярно направлению движения (P_y), а также крутящего момента относительно вертикальной оси ($M_{кр}$).

Результаты математического моделирования сопоставлялись с данными экспериментальных исследований, которые проводились на модели носовой оконечности танкера в опытовом бассейне Научно-исследовательского центра судостроения ФГБОУ ВО «КГТУ» (рис. 2). В рамках этих исследований были осуществлены буксировочные испытания модели носовой оконечности для оценки величины гидродинамических сил, действующих на носовую оконечность судна в условиях ее захвата волной [4]. При этом варьировалась как скорость буксировки, так и угол разворота палубы относительно направления буксировки, и определялись те же компоненты усилий (в направлении движения модели P_z , перпендикулярно этому направлению P_y и крутящий момент $M_{кр}$).



Рис. 2. Носовая оконечность судна в процессе испытаний

Результаты замера усилий P_z представлены на рис. 3, где v – скорость обтекания модели, D – весовое водоизмещение судна, носовая оконечность которого была испытана. Там же приведены результаты расчета с использованием программы DualSPHysics, реализующей метод SPH.

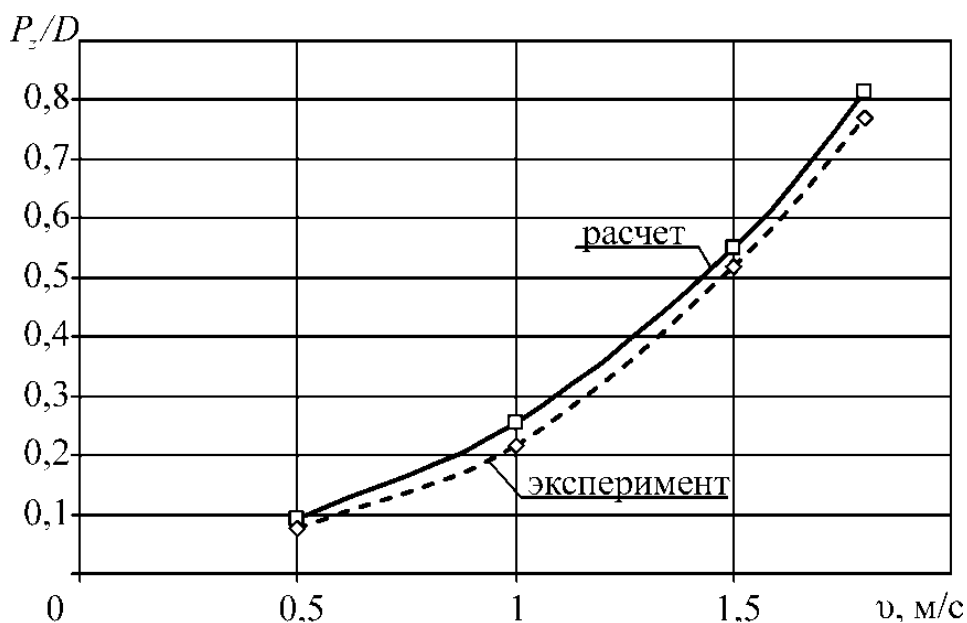


Рис. 3. Результаты замеров и расчета гидродинамических усилий, действующих на палубу судна

Как показывает рисунок, результаты расчета и эксперимента согласуются удовлетворительно, что свидетельствует о возможности применения данного программного пакета и метода SPH в целом для оценки величины гидродинамических усилий, действующих на палубу судна в условиях захвата его носовой оконечности волной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lucy, L. B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis / L. B. Lucy // The Astronomical J. – 1977. – № 82. – P. 1013–1024.
2. Gingold, R. A. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars / R. A. Gingold, J. J. Monaghan // MNRAS. – 1977. – № 181. – P. 375–389.
3. Monaghan, J. J. Smoothed particle hydrodynamics / J. J. Monaghan // Annual Reviews of Astronomy & Astrophysics. – 1992. – № 30. – P. 543–574.
4. Бураковский, П.Е. Экспериментальное исследование гидродинамических сил, действующих на носовую оконечность судна в процессе захвата ее волной / П.Е. Бураковский // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019.– Специальный выпуск 1. – С. 146–152.

EXPERIENCE IN USING THE SPH TECHNOLOGY FOR DETERMINING THE EXTERNAL FORCES ACTING ON THE BOW OF A VESSEL IN THE CONDITIONS OF ITS CAPTURE BY A WAVE

¹Burakovskiy Evgeny Petrovich, Dr. hab., professor

²Burakovskiy Pavel Evgenievich, Ph. D., assistant professor

³Dmitrovskiy Vladimir Alekseevich, Ph. D., assistant professor

¹Admiral N. G. Kuznetsov Naval Academy (Branch Kaliningrad), Kaliningrad, Russia, e-mail: e_burakovsky@mail.ru

² Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia, e-mail: paul_b@mail.ru

³ FSBEI HE "Kaliningrad state technical university", Kaliningrad, Russia, e-mail: vdmitrovsky@mail.ru

This article provides a brief description of the history of the development of the smoothed particle method (SPH). The place of this method in modern computational fluid dynamics is shown. By comparing the results of mathematical modeling and experimental studies, the possibility of using the SPH method for assessing the magnitude of hydrodynamic forces acting on the deck of a ship when its bow is captured by a wave is confirmed.

УДК 629.5.015.4

ПРИМЕНЕНИЕ КУСОЧНО-АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОВЕДЕНИЯ БОРТОВЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ СУДОВЫХ КОРПУСОВ ЗА ПРЕДЕЛОМ УПРУГОСТИ

Бураковский Павел Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: paul_b@mail.ru

В статье рассматриваются проблемы расчета судовых корпусных конструкций с учетом геометрической и физической нелинейности. Приведены важные особенности поведения балок судовых перекрытий при возникновении развитых прогибов под действием эксплуатационных локально распределенных нагрузок. Показана целесообразность применения кусочно-аналитических решений при изучении работы судовых корпусных конструкций за пределом упругости как при

разработке бортовых интеллектуальных систем контроля прочности, так и при оценке технического состояния и ремонте корпусов.

1. Введение

Эксплуатация судов флота рыбной промышленности сопряжена с возникновением ряда экстремальных ситуаций, что связано, в частности, с необходимостью проведения швартовых операций в открытом море, работой с тралом, заходом в битый лед и т.д. Промысловым судам нередко приходится работать в северных широтах, где при определенных погодных условиях происходит их интенсивное обледенение. При этом резкое нарастание масс льда выше ватерлинии приводит к падению метацентрической высоты и, нередко, к опрокидыванию. Как правило, если погодные условия позволяют, единственным средством борьбы с обледенением является скалывание льда, в штормовых же условиях эта операция практически невозможна. В таких условиях, если порты-убежища далеко, единственным вариантом спасения судна и экипажа является заход судна в районы с битым льдом, либо в районы со сплошными ледяными полями, даже при отсутствии соответствующих ледовых усилений. Однако при этом возникает опасность разрушения бортовых конструкций корпуса.

Высокая аварийность судов флота рыбной промышленности характерна не только для нашей страны, но и для стран дальнего зарубежья, поэтому промышленное рыболовство считается одним из наиболее опасных видов деятельности. Одним из путей снижения рисков при эксплуатации судов флота рыбной промышленности является разработка и внедрение бортовых интеллектуальных систем поддержки принятия решений, которые позволят повысить безопасность судов (рис. 1). Такие системы должны обеспечивать контроль всех характеристик судна, влияющих на его безопасность, в частности, его прочности и остойчивости.

2. Проблема контроля прочности судна в бортовых интеллектуальных системах

При решении задач контроля прочности судовых корпусных конструкций приходится сталкиваться с необходимостью изучения их работы за пределом упругости. К настоящему времени широкое распространение получили численные методы решения задач упруго-пластического деформирования судовых корпусных конструкций, существуют специализированные пакеты программ, в которых реализованы эти методы. Однако их использование сопряжено со значительными затратами вычислительных мощностей, так как в процессе расчета происходит определение большого количества неизвестных. Но для обеспечения эффективной работы блока контроля прочности бортовой интеллектуальной системы следует использовать математический аппарат, который позволяет моделировать поведение корпусных конструкций за пределом упругости в режиме реального времени. То есть за то время, в течение которого происходит воздействие внешней эксплуатационной нагрузки (а оно может составлять доли секунды), должна быть осуществлена обработка сигнала и проведено моделирование процесса деформирования судовых корпусных конструкций. Поэтому в бортовых интеллектуальных системах контроля эксплуатационной прочности должны использоваться такие методы расчета, которые при ограничении числа неизвестных могут обеспечить достаточно высокую точность получаемых результатов.

Такой математический аппарат, основанный на кусочно-аналитических решениях, разработан в [1] и является наиболее подходящим для использования в бортовых интеллектуальных системах [2], так как позволяет определять величины прогибов в режиме реального времени, что связано с малыми вычислительными затратами вследствие небольшого числа подлежащих определению неизвестных. Обеспечение режима реального времени при контроле эксплуатационной прочности судна в экстремальных условиях эксплуатации с использованием бортовой интеллектуальной системы необходимо, например, при движении судна в битом льду для своевременной корректировки его скорости и курса. В противном случае повышается риск возникновения повреждений в виде остаточных деформаций корпусных конструкций, а также их разрушения.



Рис. 1. Концептуальная модель бортовой интеллектуальной системы контроля эксплуатационной прочности

Для повышения эффективности контроля должен использоваться аппарат прогнозирования ледовой обстановки, а также прогнозирования стрелок прогиба элементов корпусных конструкций [1]. К тому же, важной проблемой является определение внешних сил по остаточным деформациям корпусных конструкций, что также может быть реализовано в бортовой интеллектуальной системе. При этом должна определяться не только суммарная величина внешней нагрузки, форма и площадь пятна контакта, но и его ориентация на корпусе судна.

3. Учет физической и геометрической нелинейности

Сложность решения подобных задач упруго-пластического деформирования элементов судовых конструкций при развитых прогибах, связана с учетом физической и геометрической нелинейности.

Физическая нелинейность обусловлена непрерывным изменением механических характеристик материала в зонах пластических деформаций. Учитывая, что пластические деформации развиваются в ограниченной зоне, при исследовании больших деформаций конструкций целесообразно заменять их пластическим шарниром, что существенно упрощает решение. Идея пластического шарнира была впервые предложена Г. Казинци [3] при расчете жестко-пластических балок, она оказалась весьма плодотворной и в дальнейшем была использована многими исследователями, однако авторы, как правило, ограничивались статическими пластическими шарнирами.

Анализ деформирования упруго-пластических балок, лежащих на упруго-пластических основаниях, показал, что в подобных задачах помимо статических пластических шарниров возникают и нестационарные пластические шарниры, которые непрерывно изменяют свое положение по мере увеличения внешней нагрузки. Это обстоятельство до сих пор не рассматривается в задачах статического упруго-пластического деформирования балок.

Проблема учета геометрической нелинейности имеет ряд аспектов. Так, любые дифференциальные уравнения изгиба балок получены в предположении, что выполняется условие:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2w(x)}{dx^2}, \quad (1)$$

поэтому

$$\frac{d^2w(x)}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI}, \quad (2)$$

где ρ – радиус кривизны упругой линии $w(x)$ в точке, которая определяется рассматриваемым значением координаты x ;

$M(x)$ – изгибающий момент в сечении, положение которого определяется тем же значением координаты x ;

EI – жесткость балки при изгибе.

Допущение (1) можно применять лишь при малых значениях прогибов, в противном случае необходимо использовать более точное соотношение

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2w(x)}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dw}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}, \quad (3)$$

что делает дифференциальное уравнение изгиба нелинейным.

В судостроении же приходится иметь дело с прогибами, в несколько раз превышающими условно малые прогибы. Так, если обратиться к нормативной базе по дефектации пластин и балок набора [4] то можно увидеть, что прогибы, с которыми приходится иметь дело в практике судостроения существенно превышают условно малые прогибы. Непосредственно учет знаменателя в правой части уравнения (3) при получении уравнения изгиба приводит к необходимости рассмотрения нелинейных членов, что существенно усложнит решение. Это лишь один аспект проблемы учета нелинейности.

Другой аспект заключается в том, что изгиб многих элементов корпусных конструкций можно свести к расчету сложного изгиба балок, лежащих на упругом основании, где зависимости между прогибом и реакцией основания традиционно описываются линейной функцией. Так, в [5] рассматривается изгиб балок переменного сечения, лежащих на упругом основании переменной жесткости, при этом дифференциальное уравнение изгиба имеет вид:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left[EI(x) \frac{d^2w(x)}{dx^2} \right] + k(x) \cdot w(x) = q(x), \quad (4)$$

где $q(x)$ – интенсивность распределенной нагрузки;

$k(x)$ – коэффициент жесткости упругого основания.

Это линейное дифференциальное уравнение с функциональными коэффициентами, однако даже его интегрирование в аналитических функциях возможно далеко не всегда [5].

В случае рассмотрения развитого упруго-пластического деформирования зависимость между реакцией основания и его прогибом практически всегда нелинейна, т.е. использование дифференциального уравнения изгиба балок на упругом основании становится в принципе невозможным. Так, почти все балки судового корпуса при деформировании взаимодействуют с пластинами, которые в пластической стадии выполняют роль нелинейного упруго-пластического основания, что создает дополнительные трудности при разработке расчетных методов решения подобных задач.

В случае нелинейного упруго-пластического основания дифференциальное уравнение изгиба балки постоянного сечения можно записать следующим образом:

$$EI \frac{d^4w(x)}{dx^4} + k(w(x)) \cdot w(x) = q(x). \quad (5)$$

Данное дифференциальное уравнение является нелинейным, при этом вид функции $k(w(x))$ будет различным в зависимости от решаемой задачи (взаимодействие балки с обшивкой, перекрестной связи с балками, балки с подкрепляющими элементами). Для решения данного уравнения могут быть использованы как численные методы (в частности, метод Рунге-Кутты), так и предложенные в [1] подходы, основанные на применении классической теории изгиба балок на сплошном упругом основании. Последние позволяют получить кусочно-аналитические решения, которые являются наиболее подходящими для использования в бортовых интеллектуальных системах, так как на порядки увеличивается скорость счета за счет ограничения числа неизвестных.

Для геометрически нелинейных задач характерно и то, что исследование равновесия конструкции выполняется применительно к ее деформированному состоянию, что приводит к появлению в уравнениях равновесия членов, содержащих перемещения. На это обстоятельство обращал

внимание профессор Л.М. Беленький [6]. Кроме того, из-за значительной величины перемещений в уравнениях, связывающих их с деформациями, должны удерживаться нелинейные члены [6]. Этим обусловлена сложность решения подобных задач, особенно если одновременно с геометрической нелинейностью учитывается и физическая нелинейность.

Дополнительные трудности обусловлены необходимостью учета постоянного изменения действующих в балке продольных усилий, причем после образования кинематически изменяемого механизма происходит непрерывное изменение зоны обрушения балки вследствие движения внешних нестационарных пластических шарниров к месту нагружения.

4. Сопоставление кусочно-аналитических и численных решений

Рассмотрим деформирование локально загруженного шпангоута с учетом его взаимодействия с бортовой обшивкой (рис. 2).

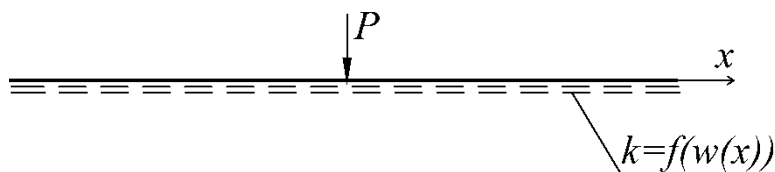


Рис. 2. Расчетная схема локально загруженного шпангоута

Такой шпангоут может рассматриваться как балка, лежащая на нелинейном упруго-пластическом основании, и его деформирование до момента образования кинематически изменяемого механизма можно описать дифференциальным уравнением (5).

Кусочно-аналитические решения данного уравнения могут быть получены согласно [1] в рамках гипотезы «о мгновенном изменении параметров изгиба». При этом балка шпангоута будет лежать на основании с последовательным включением жесткостей, а процесс деформирования распадается на ряд стадий, переход между которыми осуществляется при достижении соответствующими параметрами изгиба предельного значения.

Результаты расчета с использованием кусочно-аналитических решений, а также с использованием метода Рунге-Кутты представлены на рис. 3, где P_2 – нагрузка, при которой шпангоут превращается в кинематически изменяемый механизм; a – шпация перекрытия. Видно, что оба подхода дают близкие результаты, однако при использовании кусочно-аналитических решений значительно сокращаются затраты времени на вычисление.

К тому же, учитывая простоту использования разработанных кусочно-аналитических решений, полученных в рамках классических уравнений строительной механики корабля, целесообразно их использование при оценке технического состояния и ремонте корпусных конструкций судов. Это особенно актуально для судов флота рыбной промышленности, у которых в экстремальных условиях эксплуатации под действием интенсивных локально распределенных нагрузок повреждаются не только пластинчатые элементы корпусных конструкций, но и стержневые элементы, что нередко приводит к необходимости выполнения большого объема ремонтных работ, направленных на восстановление надежности. При этом в ряде случаев на судоремонтных предприятиях при выборе схем подкрепления поврежденных конструкций приходится сталкиваться с проблемой определения размеров подкрепляющих связей на основе оценки внешних нагрузок по величине остаточных деформаций конструкций.

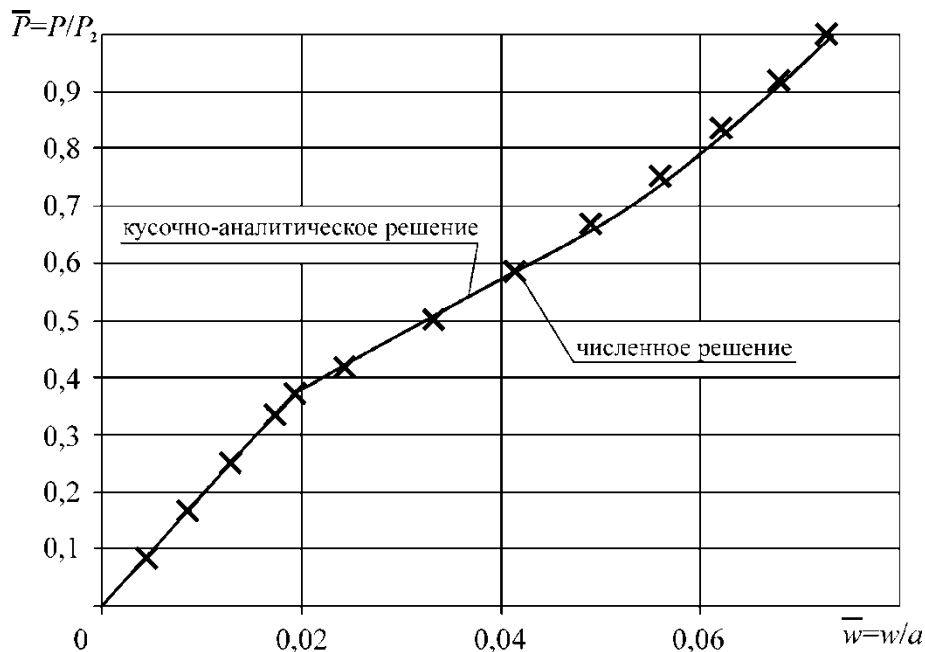


Рис. 3. Зависимости сила–прогиб для локально загруженного упруго-пластического шпангоута, полученные на основании кусочно-аналитических решений и численных методов

Для решения подобных задач могут быть использованы численные методы расчета, широко применяемые при проектировании судов и хорошо себя зарекомендовавшие. Однако значительное число судоремонтных предприятий не располагает соответствующими пакетами программ, а в их штате отсутствуют специалисты по численным методам расчета. В таких условиях более целесообразным является применение инженерных методов расчета судовых корпусных конструкций в упруго-пластической стадии, основанных на ряде упрощающих допущений [1].

5. Выводы

Математический аппарат, разработанный в [1] на базе классических уравнений строительной механики корабля, позволяет оценивать величины развитых упруго-пластических прогибов элементов судовых конструкций с минимальными затратами времени и вычислительных мощностей. Также он дает возможность получить зависимости для оценки риска разрушения упруго-пластических балочных конструкций, лежащих на нелинейных основаниях. Применение данного аппарата позволяет оценить степень опасности эксплуатационных дефектов типа вмятин и расчетом обосновать эффективность конструктивных решений, применяемых при ремонте корпусов судов. Разработанные методы расчета корпусных конструкций [1] могут быть использованы при создании бортовых интеллектуальных систем контроля эксплуатационной прочности. При применении полученных кусочно-аналитических решений значительно сокращается число подлежащих определению неизвестных по сравнению с численными методами, что позволяет ускорить решение задач моделирования поведения корпусных конструкций за пределом упругости и осуществлять его в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бураковский, Е.П. Нелинейные задачи упруго-пластического деформирования судовых корпусных конструкций: монография / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский. – Калининград: Филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия» в г. Калининграде, 2019.– 440 с.
2. Бураковский, П.Е. Практическая реализация графоаналитической системы контроля эксплуатационной прочности промысловых судов при коррозии корпуса, швартовых операциях и восприятии многократных нагрузок на основе современной теории катастроф / П.Е. Бураковский, Ю.И. Нечаев // Морские интеллектуальные технологии.– 2014.– №4(26).– Т. 2.– С. 24–31.

3. Kazinczy, G. Kísérletek befalazott tartókkal / G. Kazinczy // Betonszemle. – 1914. – 2(6).– S. 101-104.
4. Правила классификационных освидетельствований судов в эксплуатации / Российский Морской Регистр Судоходства. – СПб.: РМРС, 2014. – 350 с.
5. Папкович, П.Ф. Труды по строительной механике корабля. В 4 т. Т.1. Изгиб балок и прямолинейных рам / П.Ф. Папкович. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 576 с.
6. Беленький, Л.М. Расчет судовых конструкций в пластической стадии / Л.М. Беленький. – Л.: Судостроение, 1983. – 448 с.

APPLICATION OF PIECE-ANALYTICAL SOLUTIONS WHEN STUDYING THE BEHAVIOR OF SIDE COVERINGS OF SHIP'S HULLS OUTSIDE THE ELASTIC LIMITS

Burakovskiy Pavel Evgenievich, Ph. D., assistant professor

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: paul_b@mail.ru

This article deals with the problems of calculating ship hull structures taking into account geometric and physical nonlinearity. The main features of the behavior of the beams of ship floors in the event of developed deflections under the action of locally distributed operational loads are given. The expediency of using piecewise-analytical solutions is shown when studying the work of ship hull structures beyond the elastic limit both when developing on-board intelligent strength control systems and when assessing the technical condition and repair of hulls.

УДК: 621.74.681.3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕРЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ СТАЛЬНЫХ КОРПУСОВ СУДОВ К ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ

Веровкин Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор
Игушев Валерий Федорович, канд. техн. наук, доцент
Веровкин Сергей Валерьевич, канд. техн. наук, доцент

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: verevkinvi@mail.ru

В работе предлагаются следующие меры по повышению стойкости стальных обшивок судов к электрохимической коррозии: путем регламентирования химического состава свариваемых деталей и сварочных материалов таким образом, чтобы разность химического состава по границам каждого сварного шва была минимальной; при наличии высокого перепада содержания кремния между электродами – избегать понижения содержания кремния в одном из электродов ниже 0,25 %.

Основной причиной, побуждающей развитие самой интенсивной коррозии стальных обшивок судов – электрохимической (ЭХК) – является дестабилизация двойного электрического слоя, образующемуся на поверхности металла и препятствующего его дальнейшему разрушению [1].

При соприкосновении двух электропроводящих фаз (например, металл-жидкая электропроводная среда), когда одна из них заряжена положительно, а другая отрицательно, между ними воз-

никает разность потенциалов. Это явление связано с возникновением двойного электрического слоя (ДЭС). Заряженные частицы располагаются на границе раздела фаз.

С одной стороны, при достаточно большой энергии гидратации ионы металла могут отрываться и переходить в раствор, оставляя на поверхности эквивалентное число электронов, которые определяют ее отрицательный заряд. Отрицательно заряженная поверхность притягивает к себе катионы металла из раствора. Так на границе раздела фаз возникает двойной электрический слой. С другой стороны, на поверхности металла разряжаются катионы электролита. Это приводит к тому, что поверхность металла приобретает положительный заряд, который с анионами раствора образует двойной электрический слой.

Дестабилизация ДЭС на границе раздела фаз ведет к протеканию по нему постоянных переходных процессов с многократным увеличением скорости перехода ионов (растворения) металла в раствор и с одновременной интенсификацией процесса разрядки катионов электролита на металл.

Настоящая статья посвящена изучению и описанию механизмов дестабилизации ДЭС стальных сварных металлоконструкций (прежде всего, обшивок судов) и разработке на этой базе технологических мер их блокировки.

Основными причинами нарушения ДЭС стальных обшивок судов являются термоэлектродвижущие силы (ТЭДС), возникающие в местах сварки стальных полотнищ (карт). Разнородные стали, соединяясь вместе, образуют термопары. Можно утверждать, что стойкость стальных обшивок судов лимитируется ресурсом работы их сварных соединений [4]. ТЭДС стальных контактов элементов обшивок может превышать напряжения самых чувствительных термопар, например, хромель-копелевых (ТХК). Однако в отличие от стандартных термопар, обладающих стабильными, известными и легко воспроизводимыми материалами, термопары сварных стальных соединений остаются слабо определенными и трудно предсказуемыми.

Околошовная зона (ОШЗ) и сам сварной шов формируются путем сплавления основных и сварочных материалов. Структура и свойства шва и ОШЗ существенно непостоянны. Фактически в условиях существенного разброса химического состава внутренних областей стального шва и ОШЗ, их материалы можно установить лишь в результате разрушающего контроля.

На рис. 1 представлена схема формирования скрытой ТЭДС с нагревом сварного соединения по толщине обшивки судна.

Данная схема соответствует принципу скрытой генерации ТЭДС. При этом ТЭДС для наиболее распространенного стыкового сварного соединения формируется по линиям сплавления сварного шва с деталями. В сварном соединении образуются две термопары: первая – «сварной шов-первая деталь», вторая – «сварной шов-вторая деталь». Имеется особенность: ТЭДС наводится не классически между изолированными проволочными электродами, а скрыто внутри сплошного тела – деталей и сварного шва.

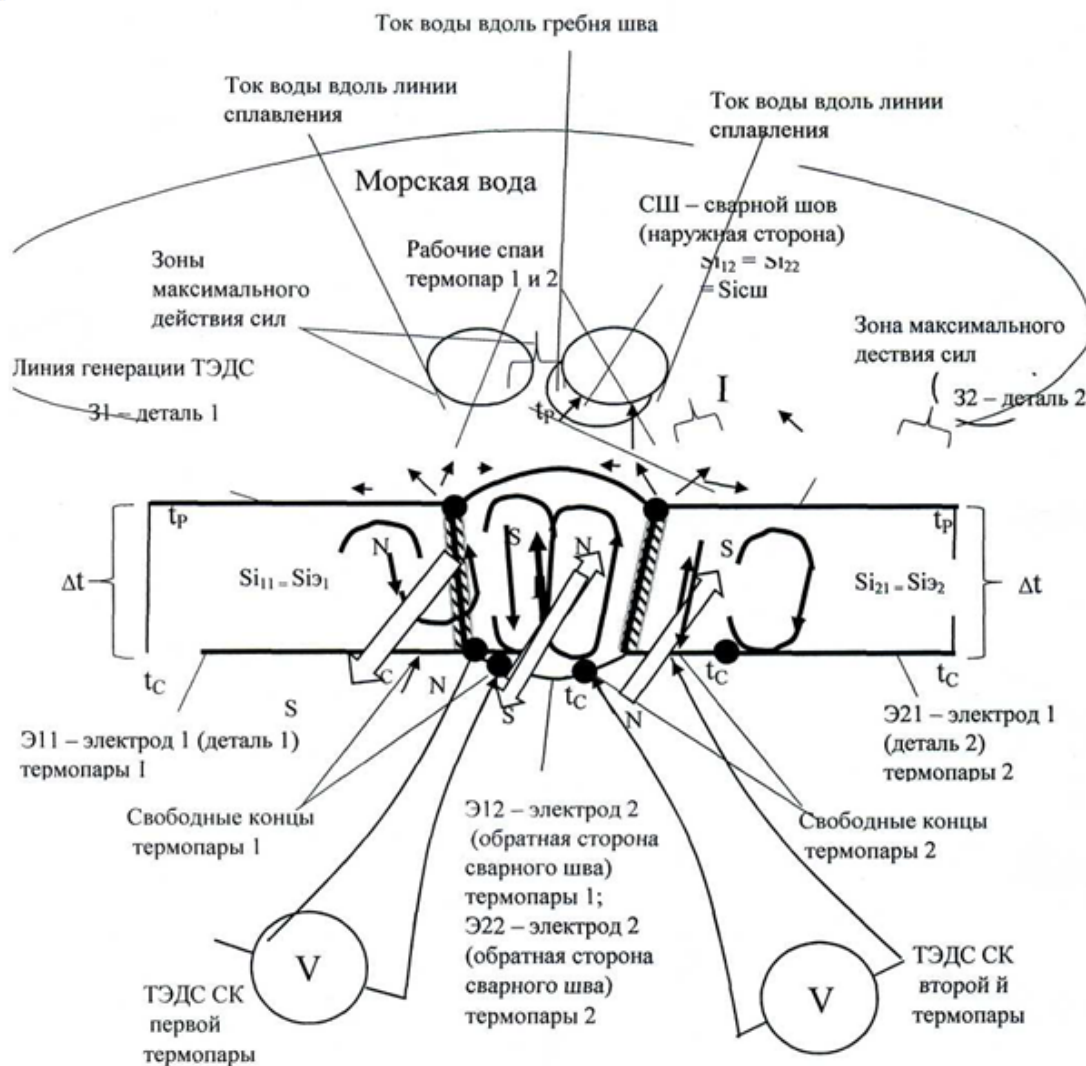


Рис. 1. Схема формирования скрытой ТЭДС с нагревом сварного соединения по толщине обшивки судна

Под действием ТЭДС в сварном шве и деталях генерируются токи. По сплошной электропроводной стальной среде происходит шунтирование источника тока. Имеет место режим гашения мощности источника тока, близкий к режиму короткого замыкания. Так как внутреннее сопротивление термопары и шунтирующей цепи чрезвычайно малы, токи – весьма значительные. В целом электрические поля в сварном соединении обуславливаются состоянием, близким к режиму контактной сварки. В режиме холостого хода (то есть, в режиме предварительной сборки – когда детали соединяются только в одной рабочей точке) формируемая ТЭДС максимальна. В сваренном состоянии режимное напряжение образованного соединения становится значительно ниже исходной ТЭДС.

По существу $U_{ЛС}$ представляет собой ТЭДС источников тока за вычетом внутренних и внешних потерь. Потери, выраженные в напряжении, составляют от 50 до 70 процентов. То есть, напряжение по области сплавления $U_{ЛС} = (0,3-0,5) U_{ТЭДС}$. Оно порождает магнитные поля внутри сплошного сварного соединения и за его пределами. Проводники с током в магнитном поле, в свою очередь, создают усилия в воде, окружающей обшивку судна.

Под действием ТЭДС, расположенным по линиям сплавления, в сварном шве возникают два, а в каждой детали – по одному генеральному замкнутому контуру тока.

По стали на границе деталей и сварного шва с водой течет ток, создавая вторичное падение напряжения: на каждой детали u_{21} и на каждой половине сварного шва u_{22} . Эти напряжения создают токи в окружающей морской воде. Как проводники с током в магнитном поле объемы воды

под током подвергаются действию силы. Именно она является основным источником потоков морской воды, дестабилизирующих ДЭС и провоцирующих ЭХК. Постоянный же срыв ДЭС порождает непрерывный переходный режим и увеличивает ЭХК.

Ток в стальном сварном шве при ТЭДС до 7 мВ лежит в пределах от 3 до 10 А. Удельная электрическая проводимость морской воды достаточно низкая – около 4,28 См/м при 15 °С и 5,30 См/м при 25 °С [2]. При этом по расчетам ток в морской воде относительно большой, и укладывается в диапазон от 3 до 10 мА, т.е., примерно в 1000 раз меньше, чем в сварном шве. Максимальное значение напряжения в режимной точке А не превышает величины $u_{срА} = 0,012 \cdot 10^{-3}$ В [3]. Как показывают измерения, реальные средние значения ТЭДС в разомкнутых (то есть, в собираемых, а не сваренных) стальных соединениях ограничиваются значениями $u_{раз} = 4-7$ мВ. В сваренных – $u_{зам} = 1,2-3,5$ мВ. От этих источников тока создаются токи, протекающие, в том числе, и по поверхности сварного шва и детали вблизи линии сплавления. На сопротивлении в объеме металла вблизи поверхности создаются падения напряжения, являющее собой вторичный источник тока для омываемой морской воды. Это вторичное напряжение составляет в среднем 0,1-0,2 ТЭДС термодпары сварного соединения: $u_{втор} = (0,1-0,2) u_{зам} = (0,12-0,7)$ мВ. При этом приложенная к воде реальная средняя мощность $P_{ср} = u_{втор} \cdot I = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-6}$ Вт = 3 мкВт. Из сравнения с ТЭДС, развиваемых стандартными термодпарами, становится понятным, что ТЭДС в сварных соединениях стальной оболочки обшивки судна, как минимум, сопоставима с ними.

Из-за скрытого характера приложения ТЭДС сварного соединения к двойному электрическому слою и низкой мощности механического перемешивания воды у поверхности сварного соединения, само течение носит ламинарный характер. Отличительной особенностью его является равенство нулю скорости движения потока жидкости по самой стенке стальной оболочки корпуса судна. Однако и такая малая мощность перемещения морской воды и опосредованный характер воздействия ламинарного потока воды на ДВС всё равно эволюционно в течение длительного периода эксплуатации способна осуществлять его непрерывную дестабилизацию, и, как результат, в среднем до 10 раз и выше увеличивает скорость электрохимической коррозии сварного соединения в стальной обшивке судна [4].

Другим источником электромеханических воздействий на ДЭС являются сами электромагнитные поля, создаваемые в стальных деталях и шве. Учитывая большие токи, создаваемые в них, поля достаточно большие. Они индуцируют в морской воде вблизи обшивки вихревые токи, дополняющие токи от вторичного напряжения. Естественно, вихревые токи создают свои электромагнитные силы, усиливающие движение воды у ДЭС.

Наряду с описанным механизмом воздействия скрытой ТЭДС на ЭХК сварных стальных соединений большой интерес вызывает и другая схема формирования ТЭДС – открытая, только с наружной стороны сварного шва – и его воздействия на ЭХК (рис. 2).

Согласно схемы Δt – это разность температур между линией сплавления с наружной стороны шва (это область рабочего спая) и температурой слоев обшивки на небольшом удалении от линии сплавления (это область свободного конца термодпары). Второй свободный конец термодпары – это середина наружной поверхности (вершина) сварного шва. Температуры двух свободных концов не совпадают! А значит, имеет место два перепада температур: Δt_1 и Δt_2 . В результате каждый собственный потенциал электрода будет определяться по своему Δt . В остальном ТЭДС также определяется как разность собственных потенциалов электродов.

На рис. 2 имеем дело с открытой ТЭДС. При этом режимная точка имеет много большее рабочее напряжение, чем для случая скрытых ТЭДС. Кроме того, исходно формируемая ТЭДС сразу (минуя стадию трансформации ТЭДС во вторичное напряжение) прикладывается к морской воде. Налицо рост напряжения источника. По анализируемой схеме ТЭДС зависит не от перепада температур между внешней и внутренней стенками оболочки судна, как в схеме рис 1, а от перепада температур вдоль внешней поверхности обшивки перпендикулярно сварному шву.

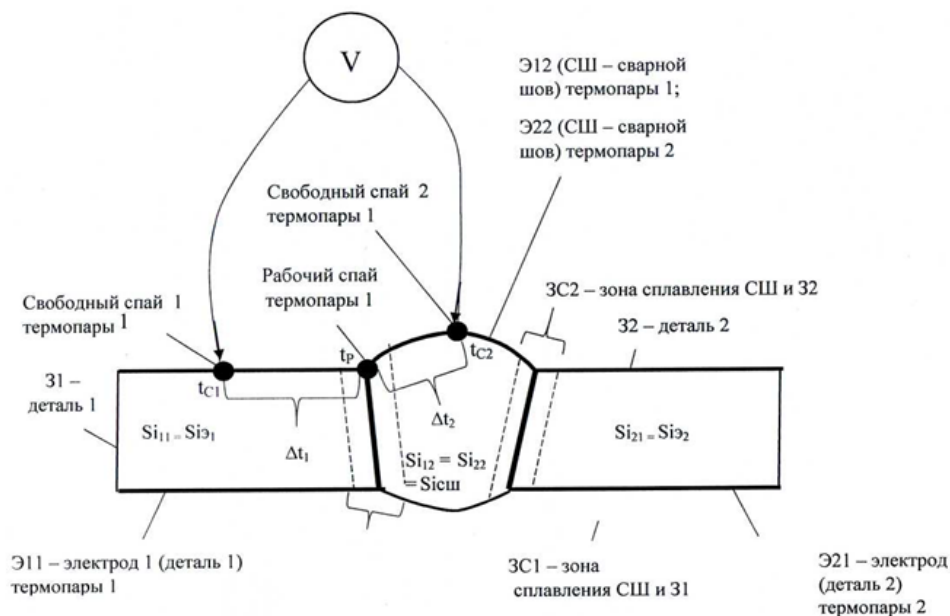


Рис.2. Схема открытого формирования ТЭДС с нагревом наружной стороны сварного соединения стальных обшивок судов поперек шва

Определенное беспокойство корабелов вызывает низкая стойкость сварных соединений обшивок судов в области ватерлинии. Стальная обшивка летом на солнце может прогреваться до 100 °С, зимой – охлаждаться ниже -50 °С. Морская же вода имеет много меньший диапазон температур: от 4 до 40 °С. За счет периодического омывания водой температура полосы омывания ватерлинии несколько усредняется.

За счет реакции растворения анодов в морской воде создают разность потенциалов, перекрывающую эффект ТЭДС. Так цинковые аноды создают защитное напряжение вблизи них порядка 300-400 мВ.

Из анализа основных источников дестабилизации ДЭС можно сделать вывод, что, во-первых, открытые источники вблизи ватерлинии порождают большие усилия на ДЭС, чем закрытые. Во-вторых, в определенных условиях Δt при открытом источнике может существенно превышать Δt для закрытого. Дополнительные источники – от растекания тока катодной защиты, электромагнитные наводки, вихревые токи в морской воде от ТЭДС сварных швов и др. дополнительно могут являться причинами корроирования до 30% от общего объема разрушенного металла.

В качестве альтернативы использования общесберегающих средств защиты (изолирующего покрытия, протекторной и катодной защиты) предложен способ долговременного малозатратного понижения склонности к ЭХК путем ограничения ТЭДС сварных соединений стальных металлоконструкций за счет подбора заготовок из взаимозаменяемых элементов [5]. Предложенный способ предварительного подбора заготовок позволяет отказаться от общесберегающих средств защиты, например, от применения расходуемых анодов. Либо, при сохранении защиты, – сократить расход анодов за счет понижения компенсируемых ТЭДС. И, наконец, снижение ТЭДС позволяет реже расставлять расходуемые аноды, что снижает их общий расход.

Если $t_{c1} > t_p > t_{c2}$ (монотонное возрастание), либо $t_{c1} < t_p < t_{c2}$ (монотонное падение) температуры воды на сварном соединении, то однополярные электроды термопары становятся разнополярными, и их собственные потенциалы в термопаре при подсчете ТЭДС складываются. Это и есть самый опасный вариант, особенно для вертикальных швов. И, в то же время, это самый распространенный вариант: ширина сварного шва небольшая, а возрастание – убывание температуры вблизи ватерлинии, как правило, носят протяженный характер. И только в случае, когда ось симметрии сварного шва совпадает с максимумом (либо минимумом) температурной кривой омываемой обшивки воды (а слева и справа сваренные детали нагреты до меньшей либо, соответственно, большей температуры, чем сам шов), то собственные потенциалы электродов совпадают по знаку и формируемая ТЭДС оказывается минимальной. Причем, если температуры свободных концов близки, ТЭДС вообще приближается к нулю.

Проведены опыты по замеру собственных потенциалов различных сталей в функции Δt , °C – перепада температур между рабочим спаем и свободными концами термопары (рис.3).

В таблице 1 приведены стали, использованные в исследовании.

Анализ представленных на рис. 3 зависимостей показывает, что у всех кривых имеется начальный участок. На нем при $\Delta t \approx 0$ собственный потенциал различных сталей близок к нулю. Далее потенциал ряда сталей отклоняется в отрицательную область, у остальных сталей наблюдается потенциальный рост.

Следующий этап характеризуется общим ростом зависимостей, после чего в диапазоне 30-40 °C, соответствующем эксплуатационным условиям обшивки судна, происходит перегиб кривых у большинства сталей. Наблюдается понижение потенциала, в том числе для части сталей – в отрицательную область.

Максимальное значение собственного потенциала характерно для сталей с низким значением кремния (менее 0,25 %). Усредненная зависимость по множеству сталей воспроизводит типовую импульсную кривую разгона: экспоненциальный разгон, соответствующий многоинерционному статическому объекту с перегибом от вогнутого участка к выпуклому, экстремум, смена направления изменения с роста на падение с постепенным снижением скорости изменения. По теории управления снятие импульсных кривых разгона заключается в краткой подаче на вход объекта большого сигнала с последующим снятием его. Возможная причина такого поведения зависимости собственного потенциала сталей от перепада температур между рабочим и свободными концами термопары при содержании Si в стали до 0,35 % заключается в интенсивном растворении Si в исходном ненасыщенном феррите (соответствует стадии подачи импульса на вход объекта).

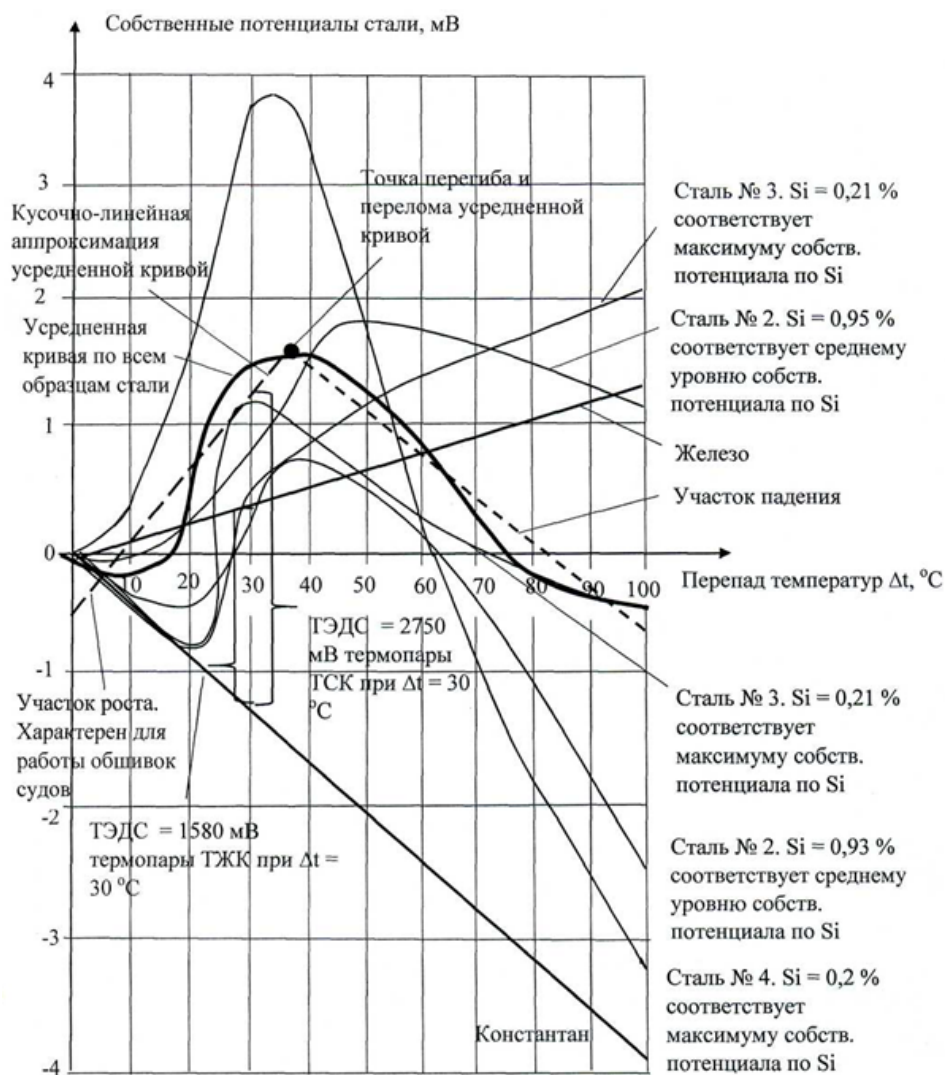


Рис. 3. Собственные потенциалы стали, мВ

**Химический состав стальных электродов судостроительных сталей,
использованных в исследовании**

№ стали	Сталь, марка	Химический состав стали, % x 100									
		Si	Cr	Ni	Cu	Mn	C	Mo	Ti	Al	V
1	D40S	95	89	52	43	79	14	-	0,7	3	0,4
2	D40S	93	87	51	42	75	12	-	1	2,6	0,3
3	E36	21	4	3	6	98	9	2	3	34	22
4	E32	20	3	3	2	121	15	<1	<5	33	<5
5	A36	24	4	2	4	91	9	2	3	29	26

Уже при небольшом росте Δt наступает насыщение феррита кремнием (процесс напоминает насыщение углеродом сплава железа с углеродом до феррита с выпадением избыточной фазы). Этот процесс соответствует стадии снятия входного импульса.

Кусочно-линейная аппроксимация усредненной кривой представляет собой треугольник с горизонтальным основанием. До 0,35 % Si идет восходящая ветвь, а после – нисходящая. Для обшивок судов наибольший интерес представляет именно восходящая ветвь.

Большинство пар электродов термопар ТСС в рабочем диапазоне температур начинаются с повышения ТЭДС до значительных величин. Затем (после максимума примерно при $\Delta t = 30-35$ °C следует падение.

На рис. 4 представлены зависимости собственного потенциала стали от содержания в ней кремния.

По склонности сварных соединений стальной металлоконструкции к электрохимической коррозии основную опасность представляет собой область левой зигзагообразной ветви зависимости собственного потенциала любого из электродов образованной термопары. Особенно при очень малых содержаниях кремния в этом электроде. В таком случае значения собственного потенциала стали возрастают до максимальных. И, согласно таблицы 2, не представляет опасности лишь технологическая ситуация с большими, но приблизительно равными потенциалами обоих электродов. При этом ТЭДС, равная разности положительных потенциалов электродов, приближенно равняется нулю.

Содержание кремния в сплаве на уровне 0,30 % известно, как предельное значение растворения кремния в феррите [6].

При $Si > 0,30$ %, из пересыщенного раствора кремния в решетке феррита излишки кремния перемещаются к границам ядра, при этом в феррите образуются зерноподобные структуры с радиальной пограничной зоной повышенной концентрации положительно заряженного кремния. Как следует из рис. 4, при этом содержании кремния в сплаве наблюдается качественное изменения в характере поведения потенциальных кривых. В этом месте за зигзагом кривые испытывают резкий перегиб: падение потенциала сменяется его стабилизацией.

В области 0,15-0,2 % Si имеет место максимум некомпенсированной ковалентной связи, ионизирующей атомы кремния и его производные, придающая им при повышенной температуре положительный потенциал. При $Si \geq 0,3$ % в стали наблюдается стабилизация, либо плавное возрастание электроположительности стали предположительно из-за стабилизации мета-фазы. Затем в районе 0,9 % для нагретых образцов вновь начинается изменение тенденции поведения исследуемой зависимости.

Собственный
потенциал стали, мВ

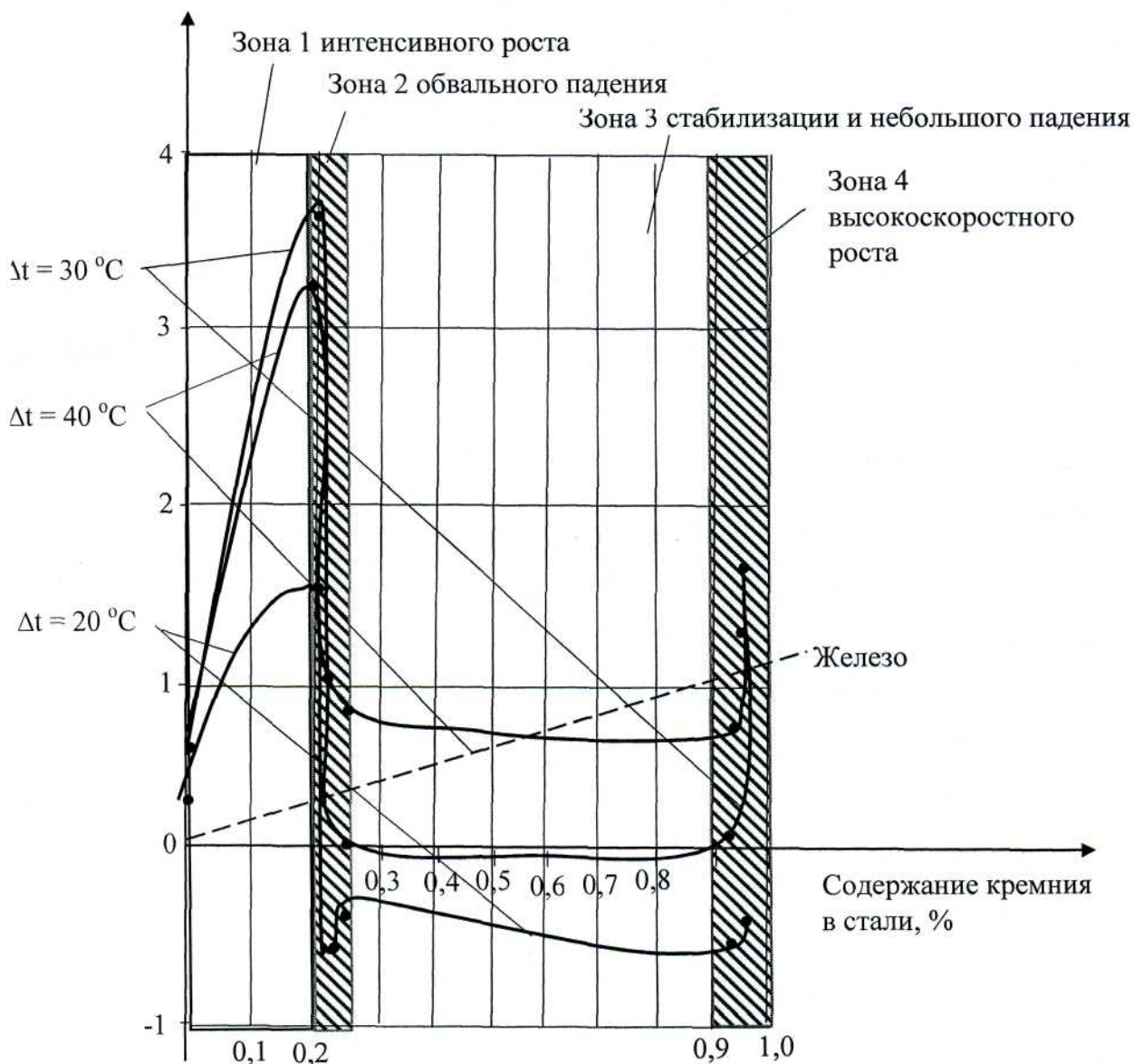


Рис. 4. Зависимость собственного потенциала стали от содержания в ней кремния при перепадах температур между рабочим и свободными концами термопары, характерных для эксплуатации обшивок судов

Рекомендации по управлению локальной защитой сварных соединений металлоконструкций от ЭХК приведены в таблице 2.

Предложено:

– повышать стойкость к коррозии судовых металлоконструкций, прежде всего, путем регламентирования химического состава свариваемых деталей и узлов (прежде всего раскислителей), а также состава сварочных материалов таким образом, чтобы разность химического состава по границам каждого сварного шва была минимальной [5];

– при наличии высокого перепада содержания кремния между электродами – избегать понижения содержания кремния в одном из электродов ниже 0,25 % [5]. Основные и сварочные материалы подбирают так, чтобы не допустить большой разности по кремнию [$\Delta\text{Si} \geq 0,30\%$], особенно при пониженном его содержании [$0,15\% \leq \text{Si} \leq 0,23\%$] в одном из материалов.

Для обеспечения гарантированной стойкости к электрохимической коррозии для ответственных металлоконструкций проводят пробные сварки образцов с контролем

Локальная защита сварных стальных соединений от ЭХК

Технол. ситуация в сварном соединении	Признаки технол. ситуации			Вторичная ТЭДС (мВ), скорость ЭХК, (мм/год)	Рекомендации по управлению состоянием сварного соединения
	Перепад содержания кремния в электродах	Кремний в низко-кремнистом электроде	Перепад температуры в сварном соединении		
(Базовая) Рядовая	$\leq 0,5 \%$ «-»	$\geq 0,25 \%$ «+»	$\leq 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ «-»	0-0,2 мВ, 0,18-0,23	Доп. локальных мер по защите от ЭХК не требуется
Тревожная	$> 0,5 \%$ «+»	$\geq 0,25 \%$ «+»	$\leq 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ «-»	0-0,3 мВ, 0,3-0,45	Равномерное распределение кремния
Опасная	$> 0,5 \%$ «+»	$< 0,25 \%$ «-»	$\leq 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ «-»	0,12-0,5, 0,8-2	Равномерное распределение кремния
Опасная	$\leq 0,5 \%$ «-»	$< 0,25 \%$ «-»	$\leq 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ «-»	0,2-0,6, 0,5-1,9	Равномерное распределение кремния
Опасная	$\leq 0,5 \%$ «-»	$\geq 0,25 \%$ «+»	$30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ «+»	0,12-0,5, 0,6-1,7	Шунтирование
Опасная	$> 0,5 \%$ «+»	$\geq 0,25 \%$ «+»	$30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ «+»	0,2-0,5, 0,7-2	Шунтирование
Очень опасная	$> 0,5 \%$ «+»	$< 0,25 \%$ «-»	$30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ «+»	0,3-0,7, 2,2-3,2	Равномерное распределение кремния и эффект. шунтирование
Очень опасная	$\leq 0,5 \%$ «-»	$< 0,25 \%$ «-»	$30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ «+»	0,2-0,7, 2,1-2,9	Равномерное распределение кремния и эффект. шунтирование

химического состава сварного шва. Это позволяет экспериментально убедиться в том, что применяемые меры обеспечили реальную разность по кремнию между материалом любой детали и сварным швом в пределах 0,30%. То есть, гарантировать предельно допустимые по модулю значения ТЭДС в местах контакта деталей при сборке металлоконструкции в пределах 0,2 мВ. Если разность по кремнию между материалом любой детали и сварным швом превысит 0,30%, то основные и сварочные материалы корректируют в сторону сближения их химических составов. Вместе с тем для снижения величины опасной ТЭДС (около 200 мкВ) делают вставки между несопрягаемыми стальными деталями в виде прокладок из материалов промежуточного состава по кремнию.

Предложено рост ТЭДС в образованных в сварных швах термopарах, вызываемых увеличением перепада температуры между электродами термopар, дополнительно снижать за счет шунтирования токов, протекающих через границы сварных швов, высокоэлектропроводными покрытиями (например, плёнками меди) [8].

В качестве мер снижения дестабилизации ДЭС также рекомендованы: широкая разделка сварного соединения, отказ от сварки в узкую разделку, электронно-лучевой сварки, применение прямой полярности тока, двухсторонней сварки с двухсторонней широкой разделкой кромок, двух- и трёхэлектродная сварка на остающейся подкладке с последовательной сдвижкой электродов по направлению сварки, сварка расщеплённым электродом, шунтирование с наружной стороны шва [10].

Какая часть сварного соединения преимущественно разъедается – шов или околошовная зона (ОШЗ)? Это зависит от того, в каком материале кремния больше: в шве или в детали. Там, где кремния больше образуется минус, где меньше – плюс. Разрушается материал под отрицательным потенциалом, т.е., с большим содержанием кремния. Однако, поскольку от второго электрода образованной сварным соединением термopары также зависит создаваемое напряжение, то чем

меньше кремния во втором электроде, тем напряжение выше, тем склонность к ЭХК первого электрода будет выше.

Так при механизированной сварке в качестве материала сварочного электрода часто используют проволоку Св-08Г2С по ГОСТ 2246-70, содержащую: С – 0,05-0,11 %, Si – 0,70-0,95 %, Mn – 1,80-2,10 %, Cr < 0,20 %, Ni < 0.025 %. При сварке в CO₂ на обратной полярности широко распространенной низкоуглеродистой конструкционной стали ВстЗсп, по ГОСТ 380-71, содержащей: С – 0,14-0,22 %, Si – 0,12-0,3 %, Mn – 0,4-0,65 %, Ni < 0,3 %, Cr < 0,3 %, содержание кремния в самом сварном шве будет лежать в пределах от 0,57 до 0,80 %. При этом потенциал сварного шва оказывается менее положительным, чем потенциал основного металла. Иначе говоря, на границе «сварной шов-околошовная зона (ОШЗ) будет приложено напряжение: минус – ко шву, плюс – к ОШЗ. В этом случае в электропроводной морской воде разрушается сам сварной шов. Величина ТЭДС, формируемой между швом и ОШЗ, при Δt = 20 °С составляет 0,12-0,5 мВ, а при Δt = 30 °С 0,3-0,7 мВ. Ожидаемая скорость разрушения материала сварного шва вследствие ЭХК очень большая: при Δt = 20 °С составляет 0,8-2 мм/год, а при Δt = 30 °С 2,2-3,2 мм/год.

Второй пример. Сталь 09Г2 содержит кремния 0,17-0,37 %. Если сталь варится проволокой Св-08ГА с 0,06% кремния, то плюс прикладывается ко шву, минус – к ОШЗ. В электропроводной морской воде разрушается ОШЗ. Величина ТЭДС при Δt = 20 °С составляет 0,2-0,6 мВ, а при Δt = 30 °С 0,2-0,6 мВ. Ожидаемая скорость разрушения сварного соединения вследствие ЭХК при Δt = 20 °С составляет 0,5-1,9 мм/год, а при Δt = 30 °С 2,1-2,9 мм/год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В.П. Аналитическая химия в 2 кн. Кн. 2. /Физико-химические методы анализа: учеб. для студ. вузов, обучающихся по химико-технол. спец. - 2-е изд., перераб. и доп./ В.П. Васильев. - М.: Изд-во Дрофа, 2002. - 384 с., ил. - 179 - 181с.

2. Гаврилкин В.Г. Результаты измерений удельной электролитической проводимости и практической солености морской воды в международном проекте scqm-p111 / В.Г. Гаврилкин, С.Н. Нагибин, А.А. Манская. - Киев: ГП «Укрметртестстандарт»: solution@ukrcsm.kiev.ua

3. Веревкин В.И. Разработка технологии шунтирующей защиты корпусов судов от коррозии/В.И. Веревкин, С.А. Терюшева, И.В. Безсмолова - Отчет по научно-исследовательской работе в рамках выполнения государственного задания. - Калининград, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, 2013. - 144 с.

4. Андреев Н.Т. Ремонт судов [Текст]: монография / Н.Т. Андреев, О.А. Борчевский, В.Г. Луговых [и др.]. - Л.: Судостроение, 1972. - 568 с.

5. Способ получения сварного соединения стальных деталей, стойкого к электрохимической коррозии [Текст]: пат. 2688023 Рос. Федерация: МПК В23К 9/23 / Веревкин В.И; заявитель и патентообладатель Калининградский государственный технический университет. - №2017138046/02; заявл. 31.10.2017; опубл. 17.05.2019, Бюл. №14. - 8 с

6. Веревкин В.И. Влияние содержания кремния и деформации сварных узлов из судостроительных сталей на их склонность к электрохимической коррозии (статья) / В.И. Веревкин, В.Ф. Игушев, С.А. Терюшева. // Морские интеллектуальные технологии. - 3 (37) Т. 1 2017. С. 56-61.

7. Веревкин В.И. Повышение стойкости к коррозии судовых металлоконструкций / В.И. Веревкин, В.Ф. Игушев, С.А. Терюшева - Морские и интеллектуальные технологии. - № 4 (38). Т.2. - 2017. С. 69-75.

8. Способ защиты от коррозии сварной металлоконструкции: пат. 2476621 Рос. Федерация: МПК С23F 13/00; С23С 4/08. / В.И. Веревкин, В.И. Лисевич, О.В. Астраух, С.А. Терюшева, Е.М. Зebroва; заявитель и патентообладатель Калининградский государственный технический университет. - №2011100923/02; заявл. 12.01.2011; опубл. 27.02.2013. Бюл. № 6. - 8 с.: ил.

9. Способ и устройство защиты от электрохимической коррозии сварной металлоконструкций [Текст]: пат. 2571293 Рос. Федерация: МПК С23F 13/00/ Веревкин В.И; заявитель и патентообладатель Калининградский государственный технический университет. - № 2014105150/02; заявл. 12.02.2014; опубл. 20.12.2015, Бюл. № 35. - 8 с.: ил.

10. Способ дуговой сварки под флюсом соединений, стойких к электрохимической коррозии [Текст]: пат. 2571294 Рос. Федерация: МПК С23F 13/00/ Веревкин В.И; заявитель и патенто-

обладатель Калининградский государственный технический университет. - № 2014105576/02; за-
явл. 14.02.2014; 20.12.2015, Бюл. № 35. - 8 с.: ил.

11. Справочник химика 21. Химия и химическая технология. Глава 7. С.147-150.

TECHNOLOGICAL MEASURES FOR INCREASING THE STEEL RESISTANCE SHIP COATING TO ELECTROCHEMICAL CORROSION

Verevkin Valery Ivanovich, Dr. Tech. sciences, professor
Igushev Valery Fedorovich, Cand. tech. Sciences, Associate Professor
Verevkin Sergey Valerievich, Cand. tech. Sciences, Associate Professor

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: verevkinvi@mail.ru

The paper proposes the following measures to increase the resistance of steel shells of ships to electrochemical corrosion: by regulating the chemical composition of the welded parts and welding consumables so that the difference in the chemical composition along the boundaries of each weld is minimal; in the presence of a high difference in the silicon content between the electrodes - avoid lowering the silicon content in one of the electrodes below 0.25%.

УДК: 621.74: 681.3

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ В СТАЛЬНЫХ ОБШИВКАХ СУДОВ НА ИХ КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ

Веревкин Валерий Иванович, д-р техн. наук, профессор;
Игушев Валерий Федорович, канд. техн. наук, доцент;
Терюшева Светлана Александровна, канд. хим. наук, доцент

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО
«КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: verevkinvi@mail.ru

Вследствие различия химического состава основного металла и сварных швов в обшивке судов возникает электрохимическая коррозия (ЭХК). Это связано с возникновением ТЭДС в сварных соединениях в процессе эксплуатации. В работе показано, что величина ТЭДС зависит от разности температур снаружи и внутри обшивки и в большей степени разности содержания кремния в различных участках обшивки. Максимальная ТЭДС имеет место при большом градиенте кремния: малом содержании кремния в электродах и, следовательно, в сварных швах и больших содержаниях кремния в материале обшивки судов.

Электрохимическая коррозия (ЭХК) является самой разрушительной формой коррозии металлоконструкций. Максимальное разрушение обшивок судов имеет место в области сварных швов. При этом скорость ЭХК сварных швов в 5-15 раз выше общей ЭХК металлоконструкции в условиях морской среды.

Основной причиной столь быстрого разрушения сварных швов в условиях высокоэлектропроводных жидких сред является необычно высокий уровень электрических напряжений, возникающих по границе сварного шва с околошовной зоной. Главная причина этого явления состоит в том, что образуемые в металлоконструкции сварные швы соединяют металлы различных химических составов. Процесс коррозии многократно усиливается при погружении такого соединения в электропроводную среду, например, в морскую воду. Так в ходе эксплуатации обшивок стальных

корпусов судов сварные соединения интенсивно разрушаются, особенно в условиях повышенной разности температур снаружи и внутри корпуса судна. Последнее связано с созданием в сварных соединениях термопар, которые генерируют термоэлектродвижущие силы (ТЭДС). В результате скорость электрохимической коррозии сварных швов обшивок судов оказывается чрезвычайно большой – достигает 1,0-3,0 мм/год [1, с. 211], в то время как скорость коррозии самих заготовок наружной обшивки в подводной части корпуса судна много ниже, и не превышает 0,19 мм/год [1, табл. 13 на с. 211]. В условиях высокой электропроводности стали возникающая значительная ТЭДС порождает сварном соединении токи, достигающие нескольких ампер.

Главная трудность защиты сварных соединений от ЭХК состоит в большой затратности традиционных общесберегающих мер торможения коррозии всей металлоконструкции. Катодная, протекторная защита, как инструменты снижения общего фона напряжения, приемлемы и для защиты сварных соединений, расположенных на защищаемой металлоконструкции. Так протекторная защита цинковыми анодами обеспечивает фон защитного напряжения обшивки судна в диапазоне 0,3-0,4 В. Этим большим напряжением подавляются анодные и катодные процессы на границе морской воды со стальной обшивкой. Такая защита дает эффект одновременно для всех элементов металлоконструкции. Однако используемые для этой цели расходуемые аноды, как и изолирующая защита лакокрасочными средствами, достаточно быстро выходят из строя и поэтому требуют периодического восстановления. В результате защита оказывается затратной, для реализации требует использования дорогостоящего оборудования (при покраске – включая сухие доки), а ремонт обшивки судна оказывается продолжителен, вызывая непроизводительный простоя судна.

Нами установлено, что основное влияние на численное значение ТЭДС металлоконструкции оказывают раскислители [3]. Среди раскислителей основное влияние на ЭХК оказывает кремний. Далее с большим отрывом следует углерод, алюминий и марганец. Кроме того, понижение содержания кремния в одном из электродов ниже 0,2 %, при наличии высокого перепада содержания кремния между электродами, приводит к резкому возрастанию скорости ЭХК. Показано, что на собственные потенциалы электродов образующихся в металлоконструкции термопар большое влияние оказывает межэлектродная разность температур [3].

В настоящей работе проанализированы конструкционно-технологические ситуации, возникающие в сварных соединениях стальных металлоконструкций, прежде всего обшивок судов. Среди них выявлены наиболее экстремальные и опасные по склонности к коррозии. Предложен способ долговременной защиты обшивок судов от электрохимической коррозии.

На рис. 1 представлены зависимости ТЭДС наиболее чувствительных термопар от небольшого приращения Δt температуры рабочего спая по отношению к температуре свободных концов, характерного для эксплуатации обшивок судов. Там же приведена максимально чувствительная зависимость ТЭДС от Δt и содержания кремния для термопар со сталью. На рисунке обозначены: сталесодержащие термопары: ТСС – «сталь-сталь», ТСК – «сталь-константан», железосодержащая термопара ТЖК – «железо-константан», и наиболее чувствительная – ТХК – «хромель-копель». В узловых точках указаны составляющие ТЭДС представленных термопар – собственные потенциалы каждого электрода и доли в %, приходящихся в ТЭДС на каждый собственный потенциал. Наряду с нашими исследованиями, были использованы справочные материалы по значениям собственных потенциалов электродов приведенных термопар, заимствованные в других источниках: [5-8].

Сравнивая представленные зависимости, можно сделать вывод, что в интересующем диапазоне температур ТЖК обеспечивает высокочувствительное преобразование температуры в напряжение, уступая лишь ТХК. Основная причина высокой чувствительности ТЖК и особенно ТХК состоит в разнополярности собственных потенциалов их электродов. ТЭДС каждой термопары равна разности свободных потенциалов входящих электродов. При разнополярности электродов разность превращается в сумму. В ТСС же, при $\Delta t \leq 20$ оС, оба электрода, чаще всего, положительные. Поэтому их средневыворочная ТЭДС оказывается ниже, чем ТЖК и ТХК. Образующиеся в металлоконструкции сварные швы развивают в контакте свариваемых заготовок ТЭДС, в несколько раз выше значений ТЭДС самых чувствительных стандартных термопар (в том числе – ТХК). Поэтому имеет место очень большая электрохимическая коррозия в местах сварки стальных металлоконструкций.

Зависимости ТЭДС термопар от приращения температуры ограничены температурой традиционной эксплуатации обшивки судна (с рабочей температурой – до 30 оС). Рассмотренные термопары при 0 оС имеют ТЭДС ≈ 0 мкВ.

Минимальную ТЭДС ТСС развивает при одинаковом значении содержания кремния в обоих электродах термопары и отсутствии перепада температур между рабочим и свободными концами. Максимальную ТЭДС ТСС развивает при большом градиенте кремния, малых значениях содержания кремния в стальных электродах и большом перепаде температур Δt . При следах углерода, кремния и других легирующих в стали одного из электродов термопары её состав приближается к техническому железу. При этом ТСС превращается в ТЖС. Собственный потенциал железа при данном перепаде температур Δt соответствует кривой железа [5]. Для стали – это далеко не предел. Из этого значения вычитается собственный потенциал стали другого электрода. Чем ближе содержание кремния во втором электроде к экстремальному (0,2 %), тем выше получаемая ТЭДС термопары.

На рис. 2 представлены кривые изменения собственных потенциалов кремнийсодержащих электродов от содержания в них кремния и пример нахождения ТЭДС термопары ТСС («сталь-сталь»). ТЭДС левого зигзагообразного участка кривой при малом кремнии достигает больших значений. В районе 0,2 % Si парабола имеет максимум, перегиб. За этим следует обвальное падение собственного потенциала кремнийсодержащей стали. Правая возрастающая ветвь зависимости достаточно пологая и не достигает больших значений ТЭДС. При этом перепад температур Δt значительно влияет именно на предельные значения ТЭДС на зигзагообразном участке. Из приведенного примера нахождения ТЭДС термопары ТСС видно, что при известном Δt результат легко находится как разность положительных собственных потенциалов обоих электродов.

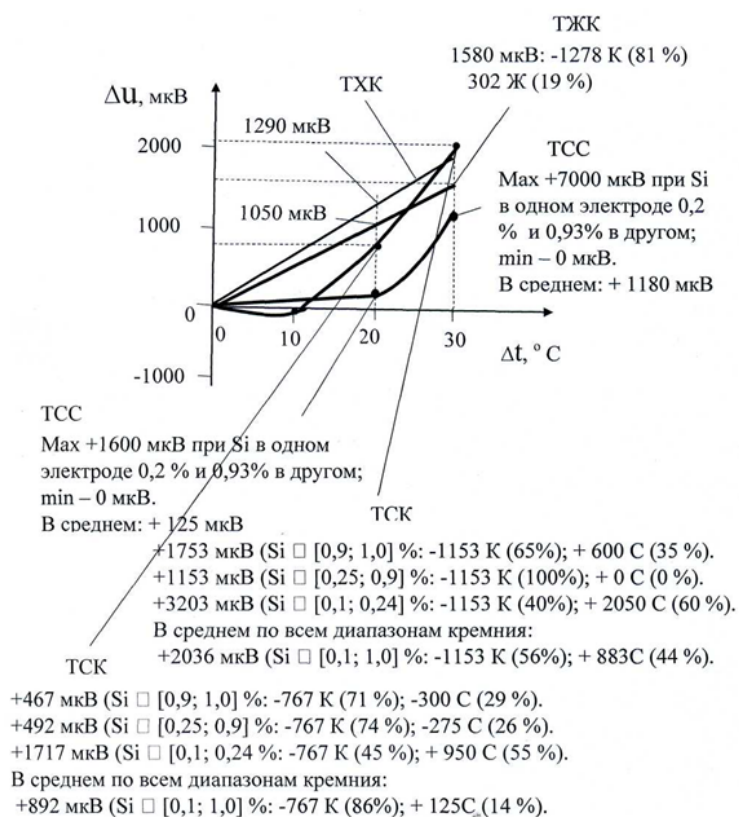


Рис. 1. Зависимость ТЭДС термопар от приращения температур рабочего спая по отношению к температуре свободных концов

На рис. 2 обозначено: Э1– первый, Э2 – второй стальной электрод термопары; Δt – перепад температур между рабочим и свободными концами термопары.

Как следует из представленного рисунка, левая сторона кривой изменения собственного потенциал стального электрода в функции содержания в нем кремния носит зигзагообразный, суще-

ственно нелинейный характер. Причем правая часть зависимости приближается к гиперболической.

В таблице 1 приведена зависимость склонности к электрохимической коррозии сварного соединения сталей от содержания кремния в электродах образованной термопары.

В зависимости от соотношения кремния в электродах по склонности сварного соединения к электрохимической коррозии в таблице выделено 9 технологических ситуаций. Учитывая явно нелинейный характер зависимости собственного потенциала стали от содержания кремния, предложено разбить её на 2 участка: растущий (до содержания кремния в точке перегиба $Si = 0,2 \%$) и падающий с большим значением кремния. Этот прием позволил выделить однозначные

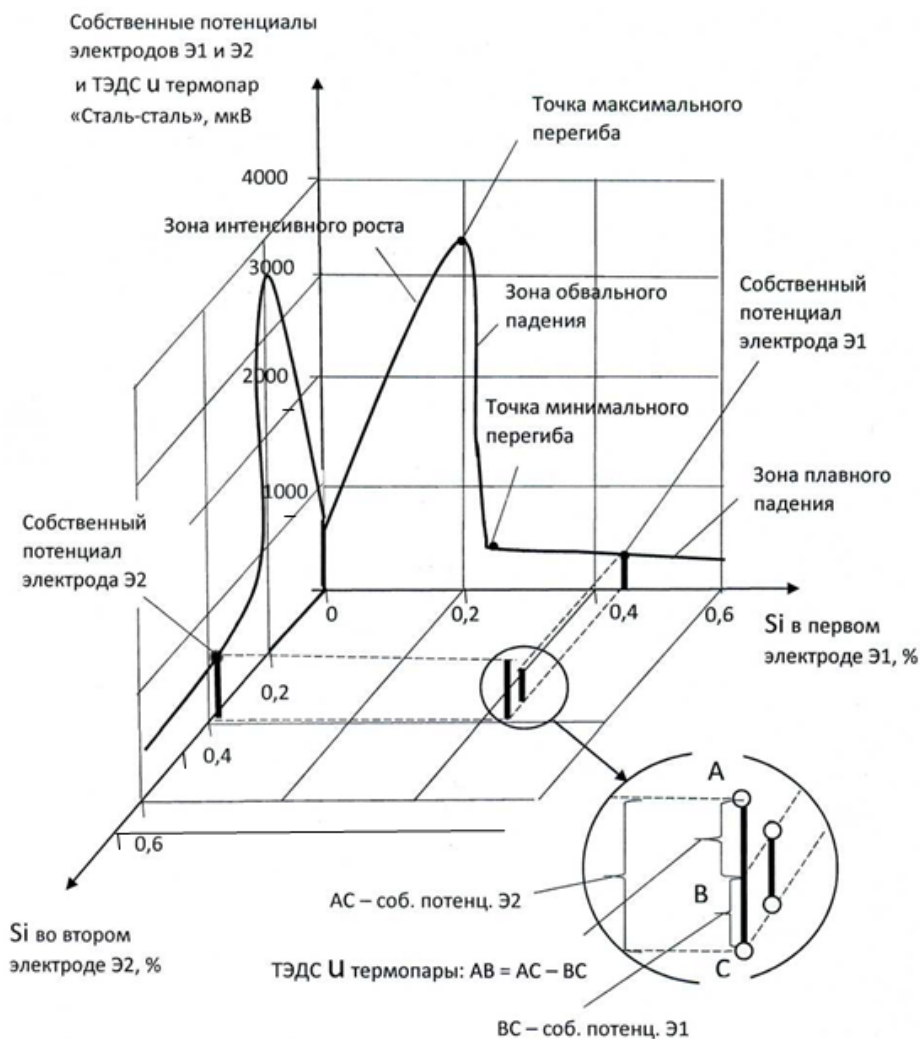


Рис. 2. Кривые изменения собственных потенциалов кремнийсодержащих электродов и пример нахождения ТЭДС термопары ТСС («сталь-сталь») при $\Delta t = 30^\circ C$

типовые области состояний сварного соединения, определяющие ту или иную склонность его к электрохимической коррозии. Каждая из 9 ситуаций при описании склонности к ЭХК предполагает свою область состояний сварного соединения, описываемую параметрами состояния. Такими параметрами являются: соотношение содержания кремния в электродах; для каждого электрода – участок принадлежности зависимости собственного потенциала стали от содержания кремния к той или иной области разбиения.

В дальнейшем для описания зависимости ТЭДС от влияющих факторов (и, прежде всего – содержания кремния в электродах термопар) потребуется отдельная идентификация в каждой из приведенных ситуаций.

Зависимость склонности к электрохимической коррозии сварного соединения сталей от содержания кремния в электродах образованной термопары

Технологическая ситуация по склонности сварного соединения к ЭХК	Абсолютное содержание кремния в электродах Э1 и Э2 термопары. Зона зависимости собственного потенциала стали от содержания кремния		Соотношение содержаний кремния в электродах	Соотношение собств. потенциалов электродов	Полярность ТЭДС образованной термопары
1.Благоприятная	Э1 с содержанием $0\% < Si_1$. Во всем диапазоне	Э2 с содержанием $0\% < Si_2$. Во всем диапазоне	$Si_1 \approx Si_2$	$u_1 \approx u_2$	Произвольная
2.Рядовая	Э1 с содержанием $Si_1 \gg 0,2\%$. Падающая	Э2 с содержанием $Si_2 \approx 0,2\%$. В окрестностях минимума	$Si_1 > Si_2$	$u_1 > u_2$	Э1 +, Э2 –
3.Рядовая	Э1 с содержанием $Si_1 \approx 0,2\%$. В окрестностях минимума	Э2 с содержанием $Si_2 \gg 0,2\%$. Падающая	$Si_1 < Si_2$	$u_1 < u_2$	Э1 –, Э2 +
4.Опасная	Э1 с содержанием $Si_1 > 0,2\%$. Падающая	Э2 с содержанием $Si_2 < 0,2\%$. Растущая	$Si_1 \gg Si_2$	$u_1 \ll u_2$	Э1 –, Э2 +
5.Опасная	Э1 с содержанием $Si_1 < 0,2\%$. Растущая	Э2 с содержанием $Si_2 > 0,2\%$. Падающая	$Si_1 \ll Si_2$	$u_1 \gg u_2$	Э1 +, Э2 –
6.Опасная	Э1 с содержанием $Si_1 > 0,2\%$. Падающая	Э2 с содержанием $Si_2 \ll 0,2\%$. Растущая	$Si_1 > Si_2$	$u_1 < u_2$	Э1 –, Э2 +
7.Опасная	Э1 с содержанием $Si_1 \ll 0,2\%$. Растущая	Э2 с содержанием $Si_2 > 0,2\%$. Падающая	$Si_1 < Si_2$	$u_1 > u_2$	Э1 +, Э2 –
8.Рядовая	Э1 с содержанием $Si_1 > 0,2\%$. Падающая	Э2 с содержанием $Si_2 > 0,2\%$. Падающая	$Si_1 < Si_2$	$u_1 < u_2$	Э1 –, Э2 +
9.Рядовая	Э1 с содержанием $Si_1 > 0,2\%$. Падающая	Э2 с содержанием $Si_2 > 0,2\%$. Падающая	$Si_1 > Si_2$	$u_1 > u_2$	Э1 +, Э2 –

В таблице 1 не раскрыто действие перепада температур Δt на результат – ТЭДС термопар. Однако, учитывая заложенный в неё фрагментарно-монотонный характер основополагающих зависимостей, становится возможным качественный анализ значений и структуры ТЭДС.

При оценке величины ТЭДС стальных сварных соединений по главному фактору – содержанию кремния в свариваемых стальных заготовках – следует по возможности учитывать и влияние углерода, т.к. он меняет наклон линии регрессии и его учет позволят точнее определиться с предполагаемой стойкостью соединения к ЭХК. По нашим данным, с увеличением содержания углерода в стали её собственный потенциал падает. При этом коэффициент регрессии углерода в регрессионном уравнении связи примерно в 3 раза меньше, чем при кремнии.

На основе проведенного анализа поведения и свойств сталей на кафедре ИМиТМ БГАРФ разработан способ эффективной стабильной защиты от электрохимической коррозии сварной металлоконструкции из взаимозаменяемых заготовок, который может быть использован на этапе сборки полотнищ обшивок судов, резервуаров и трубопроводов различного назначения. Способ длительного действия, и не требует специального периодического возобновления.

Основным преимуществом использования в предлагаемой в способе системы измерения по сравнению с традиционной дифференциальной является то, что её реализация не требует трудозатратного проведения измерений во всех возможных комбинациях заготовок. В предлагаемом способе число комбинированных измерений мало и равняется числу заготовок.

Основная идея способа и устройства его реализации состоит в учете при изготовлении сварных металлоконструкций, стойких к электрохимической коррозии, указанных выше специфических свойств сталей. Расстановка заготовок полотнищ обшивок судов только по единственному перепаду температуры, например, при 20 оС чревато тем, что при изменении перепада в ходе эксплуатации металлоконструкции в сварные узлы попадут заготовки с очень большими отличиями по собственному потенциалу. И этот узел будет быстро разрушаться. Поэтому на этапе сборки сварной стальной металлоконструкции предложено полнее измерять и учитывать собственные потенциалы стальных заготовок – не один, а несколько перепадов температуры, характерные для области эксплуатации обшивок судов, либо других сварных металлоизделий. По ним – выбирать фактически имеющие место самые опасные перепады (с максимальными значениями собственных потенциалов) для каждой заготовки. А уже с отобранными собственными потенциалами заготовок производить оптимизацию распределения заготовок в сварной металлоконструкции. Общее понижение термоэлектродвижущих сил во всех сварных соединениях обеспечивает пониженную электрохимическую коррозию сварных узлов. А именно они определяют срок службы стальной сварной металлоконструкции. Применение традиционной изолирующей, катодной и протекторной защиты лишь устраняет негативные последствия неправильной сборки металлоизделия, способствует снижению склонности металлоконструкции к электрохимической коррозии. Правильный же подбор заготовок в конструкции гарантированно устраняет саму причину возникновения ЭХК – понижает ТЭДС ниже опасного уровня.

Вторая по значимости идея способа и устройства для его реализации состоит в замене при измерении стандартного электрода сравнения на электрод термопары, обладающий высоко чувствительной, стабильной, симметричной, простой (монотонно изменяющейся), желательно линейной зависимостью собственного потенциала от перепада температуры между концами электрода. Целесообразно также при нулевом перепаде температур иметь нулевой собственный потенциал. Например, в качестве материала электрода сравнения используют константан, отвечающий всем этим требованиям.

Указанная замена позволила использовать в тяжелых производственных условиях надежный заменитель ненадежного стандартного электрода сравнения.

Третья идея способа и устройства состоит в разработке и использовании быстрого, надежного, высокотехнологичного и точного способа нагрева до небольших перепадов температур между рабочим и свободными концами термопары. Так, например, обшивка судов, в основном, эксплуатируется при перепаде температур до 30 оС. Кроме того, разработана процедура медленного охлаждения овала изотермы нагрева, позволяющая успевать надежно измерять температуру овала при каждом перепаде температур.

Для упрощения процедуры измерения, повышения надежности, точности, оперативности и эргономичности измерения температуры предложено использовать бесконтактный инфракрасный термометр, постоянно устанавливаемый в измерительном кондукторе, направляемый на изотермический овал заготовки, и служащий для измерения как температуры окружающей среды, так и температуры рабочего спая термопары.

Технический результат изобретения способа изготовления коррозионностойкой сварной металлоконструкции из взаимозаменяемых заготовок обеспечивает значительное снижение трудоёмкости выполнения защиты от электрохимической коррозии сварной металлоконструкции из взаимозаменяемых заготовок, расширение технологических возможностей и существенно сокращает сроки и объем производимых операций. Кроме того, способ повышает гарантии защиты из-

готовленной металлоконструкции от электрохимической коррозии при широком изменении условий эксплуатации. Для этого перед сборкой металлоконструкции измеряют напряжения в термопарах каждой заготовки с электродом сравнения. В качестве электрода сравнения используют электрод термопары из материала, чувствительного к изменению температуры. Измеряют собственный потенциал заготовки в замкнутом контуре при нескольких перепадах температуры между рабочим спаем и свободными концами термопары, при которых эксплуатируется металлоконструкция. По всем перепадам температур каждой заготовки находят максимальные собственные потенциалы заготовок. По ним заготовки при сборке раскладывают по объекту так, чтобы в среднем по всей изготавливаемой металлоконструкции минимизировать модули перепадов максимальных по всем перепадам потенциалов между всеми парами соседних заготовок. После чего выполняют другие операции по производству металлоконструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Н.Т. Ремонт судов: монография / Н.Т. Андреев, О.А. Борчевский, В.Г. Луговых [и др.]. - Л.: Судостроение, 1972. - 568 с.
2. Веревкин В.И. Разработка технологии шунтирующей защиты корпусов судов от коррозии/В.И. Веревкин, С.А. Терюшева, И.В. Безсмолова - Отчет по научно-исследовательской работе в рамках выполнения государственного задания. – Калининград, Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, 2013. – 144 с.
3. Веревкин В.И. Влияние содержания кремния и деформации сварных узлов из судостроительных сталей на их склонность к электрохимической коррозии (статья) / В.И. Веревкин, В.Ф. Игушев, С.А. Терюшева. // Морские интеллектуальные технологии. – 3 (37) Т. 1 2017. – С. 56-61.
4. Справочник химика 21. Химия и химическая технология. Глава 7. С.147-150.
5. Исакович, Р.Я. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Недра, 1970. – 488 с.
6. <https://infotables.ru/fizika/337-termopara-eds-elementov-i-splavov-po-otnosheniyu-k-platine-tablitsa#hcq=5slGp0s>
7. ГОСТ Р 8.585- 2001. Значения ТЭДС для термопар типа L (хромель-копель). Электронная версия.
8. [https://infotables.ru>Физика>Термопара железо-константан, значения ЭДС \(таблица\).](https://infotables.ru>Физика>Термопара железо-константан, значения ЭДС (таблица))

EFFECTS OF SILICON CONTENT IN STEEL CLADDINGS OF SHIPS ON THEIR CORROSION RESISTANCE

Verevkin Valery Ivanovich, Dr. Tech. sciences, professor
Iguhev Valery Fedorovich, Cand. tech. Sciences, Associate Professor
Teryusheva Svetlana Aleksandrovna, Cand. chem. sciences, associate professor

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: verevkinvi@mail.ru

Due to the difference in the chemical composition of the base metal and welded seams, electrochemical corrosion (ECC) occurs in the shell of ships. This is due to the appearance of TEMF in welded joints during operation. It is shown in the work that the TEMF value depends on the temperature difference outside and inside the skin and, to a greater extent, on the difference in silicon content in different parts of the skin. The maximum TEMF takes place with a large silicon gradient: a low silicon content in the electrodes and, consequently, in the welds and a high silicon content in the ship skin material.

ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ В СУДОСТРОЕНИИ НА ПРИМЕРЕ ПОЛИЛАКТИДА

Дектярев Александр Владимирович, аспирант по направлению «Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства»

Гришин Павел Романович, аспирант по направлению «Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства»

Морозов Владимир Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры кораблестроения

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Россия, e-mail: a.dektyarev@shipyard-yantar.ru; pchel2000@gmail.com; mvn3613@gmail.com

Цель работы – оценить возможности применения PLA-пластика в судостроении при изготовлении корпусов судов на примере имитации воздействия основных природных и естественных факторов на элементы корпуса судна. Новизна работы заключается в современных возможностях применения биоразлагаемых материалов не только в областях медицины и прототипирования, но и в тяжелой промышленности. Выводы – полилактид разлагается при определенных условиях, которые естественным, не лабораторным путем повторить практически невозможно; имитация основных действующих на корпус судна природных и естественных факторов не дает ощутимого изменения образцов.

Введение

На сегодня, полимерные материалы охватывают практически все области жизнедеятельности человека. С ростом населения увеличивается как производство полимерных изделий, так и рост числа отходов пластика. Отходы полимеров считаются одними из наиболее опасных для экологической обстановки, т.к. имеют чрезвычайную стойкость к влиянию окружающей среды, а при утилизации сжиганием выделяют токсичные газы [1, 2]. В связи с этим, разработка и внедрение современных полимерных материалов из возобновляемого сырья, приобретает особую актуальность, особенно в отрасли тяжелого машиностроения.

Биоразлагаемые полимеры – это класс высокомолекулярных соединений, содержащих в своем составе продукты жизнедеятельности биологических организмов (крахмал, белок, целлюлоза, нуклеиновая кислота, природная смола и т.д.), способные к разложению, при соответствующих условиях, на нейтральные для окружающей среды вещества [3, 4]. Главное достоинство биополимеров – возможность биологического разложения в течение продолжительного времени, что отличает их от традиционных аналогов из нефтехимического сырья.

Одним из представителей биоразлагаемых полимеров является полилактид или PLA-пластик, который, по своим прочностным показателям как в условиях лабораторных испытаний при стандартных условиях для пластика [5], так и при моделировании эксплуатационных режимов работы корпуса судна [6], превосходит другие наиболее распространенные в 3D-печати термопласты (ABS, SBS, HIPS, PETG). В судостроении из полилактида уже изготавливали модель судна для гидродинамических испытаний в опытовом бассейне [7], а также изделия судового машиностроения: защитные колпачки для системы судовой пожарной автоматики, крыльчатки для охлаждения мотора системы судовой вентиляции, тумблеры выключателя судового [8]. Все изготовленные изделия прошли цикл испытаний и эксплуатируются на кораблях.

Целью представленной работы является изучение возможностей применения биоразлагаемого PLA-пластика в судостроении при изготовлении корпусов судов на примере имитации воздействия основных природных и естественных факторов на элементы корпуса судна.

Литературный обзор

Полилактид или PLA-пластик - термопластичный биоразлагаемый полиэфир, который производится из отходов различных возобновляемых биомасс. Относительно биоразлагаемости PLA-пластика имеются различные сведения, отраженные как в зарубежной, так и в отечественной литературе.

В исследовании [9] сообщается о том, что полилактид полностью биоразлагаемый и его разложение происходит путем гидролиза до молочной кислоты, которая метаболизируется микроорганизмами в воду и окись углерода. При компостировании вместе с другой биомассой биодеградация происходит в течение двух недель, а материал полностью исчезает в течение 3-4 недель.

В исследовании [10] говорится о том, что при попадании отходов из полилактидных изделий в окружающую среду происходит их биологическая деструкция с образованием нетоксичных продуктов (CO_2 и воды). Процесс полного биоразрушения материалов в почве составляет 20-30 месяцев, в то время как в стандартном компосте они распадаются в течение 30-40 дней.

Исследование [11] сообщает о том, что, когда рассматриваются биоразлагаемые полимеры, компостирование является наиболее предпочтительным способом утилизации. Скорость гидролитического разложения PLA зависит от температуры и уровня влажности. В работе [11] биоразлагаемость чистого PLA изучалась при $58\text{ }^\circ\text{C}$ в соответствии со стандартом ASTM D5338 [12]. Стандарт [12] оценивает биоразложение пластиковых материалов в контролируемых условиях компостирования. Контролируемыми условиями компостирования считаются те условия, при которых уровни кислорода, температуры, влажности и pH компоста поддерживаются на оптимальном уровне. Продолжительность теста может составлять до 180 дней. В [11] содержание влаги в почве составляло около 60%, при этом, почва была вторичная (садовые отходы) и не имела особой микробной активности. При деградации PLA восприимчивость к влаге является основной движущей силой к деградации и включает четыре этапа, а именно: водопоглощение, расщепление сложного эфира, сольubilизацию олигомерных фракций и диффузию растворимых олигомеров бактериями [13]. Образцы для испытаний были отлиты под давлением до толщины 2 мм, а размеры образцов составляли приблизительно $6 \times 6\text{ см}^2$. Образцы были извлечены из почвы на разных стадиях разложения, промыты дистиллированной водой, высушены в печи при $50\text{ }^\circ\text{C}$ и взвешены. Было обнаружено, что начало деградации PLA происходило уже через 2 недели. Также, было отмечено охрупчивание образцов, однако потеря веса не была очень значительной для PLA до 8 недель в компостной почве.

В работе [14] говорится о том, что биоразлагаемость и скорость биодеградации PLA были исследованы в контролируемой и воспроизводимой тестовой среде согласно методике ISO 14855 [15]. Стоит отметить, что методика испытаний [15] практически идентична методу тестирования по [12]. Стандарт [15] оценивает предельную аэробную биоразлагаемость пластмасс в контролируемых условиях компостирования. Контролируемые условия компостирования поддерживаются на протяжении всего теста, включая содержание кислорода, влаги, температуры и pH. Биоразложение измеряется как процентное содержание органического углерода, превращенного в CO_2 . Продолжительность теста составляет 180 дней. В работе [14], испытательный прибор был откалиброван с использованием целлюлозы в качестве эталонного материала, который показал биоразлагаемость 91% через 42 дня. Однако начальная временная задержка гидролиза полимера до диффундирующих олигомеров до начала потери массы из-за полимера и утилизации микробов составляла около 13 дней. Это намного дольше, чем 5 дней, полученных в более ранних исследованиях [16]. Скорость биодеградации начинает постепенно увеличиваться, достигая максимума между 20-25 днями, а затем поддерживается постоянная скорость 2.2% в день.

В работе [17] сообщается, что полилактид подвергается биоразложению методами гидролиза и разрушения групп сложных эфиров в молекулярной цепи. В таблице 1 представлены стандартные периоды биоразложения полилактида при различных температурах и условиях влажности воздуха. В компосте полное биоразложение полилактида при влажности воздуха 80% и температуры воздуха $55\text{-}70\text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается за один месяц [18].

Биоразложение полилактида в зависимости от условий окружающей среды

№ п/п	Температура, °С	Влажность воздуха, %	Срок полного биоразложения
1	4	100	10.2 года
2	25	20	4.8 года
3	25	80	3.1 года
4	40	80	10 мес.
5	60	20	2.5 мес.
6	60	80	2 мес.

В работе [19] говорится, что деградация полимера происходит в основном за счет расщепления основных цепей или боковых цепей макромолекул. В природе деградация полимера индуцируется термической активацией, гидролизом, биологической активностью (то есть ферментами), окислением, фотолизом или радиолитом [20]. Биодеградация достигается путем синтеза полимеров, которые имеют гидролитически нестабильные связи в основной цепи. Наиболее распространенными химическими функциональными группами являются сложные эфиры, ангидриды, ортоэфиры и амиды [21]. С другой стороны, разложение PLA при утилизации в окружающей среде является более сложной задачей, поскольку PLA-пластик в значительной степени устойчив к воздействию микроорганизмов в почве или сточных водах в условиях окружающей среды. Полимер должен быть сначала гидролизован при повышенных температурах (около 60 °С), чтобы уменьшить молекулярную массу, прежде чем начнется биоразложение. В условиях высокой температуры и высокой влажности, как, например, в активном компосте, PLA быстро разлагается и распадается в течение недель или месяцев [22]. Первичный механизм деградации происходит двухступенчатым процессом, начинающимся также с гидролиза, за которым следует бактериальная атака на фрагментированные остатки. Во время начальных фаз разложения полиэфирные цепи с высокой молекулярной массой гидролизуются до олигомеров с более низкой молекулярной массой. Когда средняя молекулярная масса достигает приблизительно ~ 10000 г/моль, микроорганизмы, присутствующие в почве, начинают переваривать олигомеры молочной кислоты с более низкой молекулярной массой, образуя углекислый газ и воду [23]. Скорость гидролиза ускоряется кислотами или основаниями и зависит от содержания влаги и температуры. Продукты PLA быстро разлагаются как в аэробных, так и в анаэробных условиях компостирования [22]. Процесс также зависит от химических и физических характеристик полимера. К ним относятся диффузность, морфология пористости, сшивание, чистота, химическая реактивность, механическая прочность, термическая устойчивость и, в некоторых случаях, устойчивость к электромагнитному излучению [24]. Было обнаружено, что деградация PLA зависит от ряда факторов, таких как молекулярная масса, кристалличность, чистота, температура, pH, наличие концевых карбоксильных или гидроксильных групп, водопроницаемость и каталитические добавки, которые могут включать в себя ферменты, бактерии или неорганические наполнители [25]. В типичных условиях использования PLA очень стабилен и сохраняет свою молекулярную массу и физические свойства в течение многих лет.

Материалы и методы

Корпус судна, как известно, подвержен одновременному воздействию многочисленных факторов: его подводная часть постоянно взаимодействует с водной средой, для малых судов, стоящих на стоянке – днище взаимодействует с землей или илом, сам корпус, в зависимости от места хранения судна, может находиться как на открытом воздухе, принимая на себя смены температурных режимов, климатических условий и т.п., так и в закрытом помещении.

Поэтому, представленное исследование моделирует 4 типа «взаимодействия» корпуса:

1. С условиями нахождения в закрытом помещении при комнатной температуре – образец №1.
2. С водой – образец №2.
3. С климатическими условиями на открытом воздухе – образец №3.
4. С землей – образец №4.

Все испытания проводились в Калининградской области (г. Калининград, г. Зеленоградск).

Для этого, были изготовлены 4 пластины из PLA-пластика фирмы «Sорутка» с габаритами 90x90x8 мм (рисунок 1). Печать велась на принтере «Ultimaker 2+». Печать осуществлялась при температуре 202 °С, температура стола при первом слое – 65 °С, при последующих – 55 °С.



Рис. 1. Напечатанные образцы

15.03.2019 г. – начались испытания образцов: образцы были напечатаны и помещены в испытательные среды.

15.03.2020 г. – образцы были извлечены из испытательных сред, составлен протокол их визуального осмотра и дефектоскопии, проведена очистка (при необходимости) и взвешивание.

Образец №1, моделируя нахождение корпуса в закрытом помещении, был помещен в подобные условия.

Испытания в воде моделировались помещением образца №2 в резервуар с водой (рисунок 2) на вышеуказанный срок, моделируя, тем самым, нахождение корпуса судна в стоячей воде, т.е. в озере. Пробы воды были взяты из Нижнего пруда г. Калининграда.



Рис. 2. Образец №2, помещенный в испытательную среду

На период 2018-го года воды пруда Нижнего по содержанию растворенного кислорода и таких биогенных элементов, как нитриты и фосфаты, а также по величине перманганатной окисляемости относились к типу бета-мезосапробных, что определяло водоем как загрязненный. По величине прозрачности воды пруд был полисапробный (4-й класс качества воды - грязный водоем). Сильно повышенная величина перманганатной окисляемости, высокое содержание соединений азота при резком его снижении в теплый период позволяют оценить состояние пруда Нижнего как эвтрофное [26] (насыщение водоёмов биогенными элементами, сопровождающееся ростом биологической продуктивности водных бассейнов).

Образец №3 был прикреплен к балконной раме (рисунок 3), имитируя тем самым влияние различных погодных факторов на корпус судна.



Рис. 3. Образец №3, прикрепленный к балконной раме

Особенность Калининградского региона – переходный климат от морского западноевропейского к умеренно-континентальному восточноевропейскому с преобладанием циклонической погоды, что приводит к большой ее изменчивости, внутрисуточной и междусуточной [27]. При этом, согласно данным [28], на период испытаний, были зафиксированы следующие погодные факторы (таблица 2).

Таблица 2

Климатические условия в г. Калининград за период с 15.02.2019 по 15.03.2020 г.

№ п/п	Период	Температура воздуха, °С			Отн. влажность воздуха, %		Кол-во выпавших осадков, мм		
		Средн. знач.	Мин. знач. (дата)	Макс. знач. (дата)	Средн. знач.	Мин. знач. (дата)	Сумма осадков	Макс. знач. (дата)	Число дней с осадками
1	15.02.19 – 28.02.19	+3.2	-5.6 (22.02)	+11.7 (16.02)	79	36 (22.02)	1.6	1.0 за 12 ч. (20.02)	6
2	03.19	+4.6	-5.2 (2.03)	+15.7 (30.03)	79	44 (22.03)	56	10.0 за 12 ч. (5.03)	25
3	04.19	+9.2	-3.2 (2.04)	+26.3 (26.04, 27.04)	56	19 (23.04)	0	Следы осадков за 12 ч. (8.04, 9.04, 28.04)	3
4	05.19	+12.1	-0.8 (6.05)	+27.6 (20.05)	74	27 (9.05)	58	12.0 за 12 ч. (13.05)	18
5	06.19	+20.5	+7.9 (3.06)	+32.5 (12.06)	68	27 (9.06)	65	30.0 за 12 ч. (13.06)	7
6	07.19	+17.6	+10.3 (19.07)	+30.6 (29.07)	74	39 (29.07)	79	23.0 за 12 ч. (5.07)	15
7	08.19	+18.7	+10.0 (23.08)	+30.0 (28.08)	74	34 (27.08)	68	17.0 за 12 ч. (8.08)	12
8	09.19	+13.7	+1.2 (24.09)	+28.1 (1.09)	78	41 (20.09)	133	30.0 за 12 ч. (17.09)	17
9	10.19	+10.1	-1.1 (6.10)	+20.1 (16.10)	86	50 (30.10)	92	16.0 за 12 ч. (17.10)	22
10	11.19	+5.6	-1.7 (25.11)	+12.7 (4.11)	89	51 (30.11)	51	12.0 за 12 ч. (13.11)	18
11	12.19	+3.6	-3.3 (11.12)	+10.0 (18.12)	87	47 (30.12)	55	8.0 за 12 ч. (2.12, 7.12)	26
12	01.20	+3.9	-1.4 (5.01)	+8.8 (10.01)	87	57 (5.01)	83	12.0 за 12 ч. (13.01)	26
13	02.20	+3.9	-3.3 (7.02)	+12.9 (17.02)	80	47 (17.02)	79	9.0 за 12 ч. (10.02)	23
14	1.03.20 – 15.03.20	+5.2	-3.6 (15.03)	+10.3 (9.03)	77	34 (15.03)	42	10.0 за 12 ч. (12.03)	12

Образец №4 был помещен в почву в г. Зеленоградск. В Зеленоградской области, на плоских вершинах с наличием пространственных литологических микромозаик, куда был помещен образец, сформировались буроземы супесчаные глееватые. Режим увлажнения атмосферный, но наличие заиленных горизонтов в профиле и глинистых прослоек создает условия для временного избыточного увлажнения почв из-за скопления гравитационной влаги [29]. Также, стоит отметить, что, согласно [30] в Зеленоградском районе на глееватых буроземах элювиальных и трансэлювиальных элементарных геохимических ландшафтов встречаются в среднем 25 видов сорных растений, при этом, видовое богатство не зависит от площади почвенного ареала.

Результаты и обсуждения

После завершения цикла испытаний (15.03.2020 г.), были проведены визуальный осмотр, сравнение внешнего вида образцов и их масс. Отсюда был сделан вывод о том, что внешне, все образцы не получили заметных деформирований, однако, у образца №4 практически полностью слезла краска, которой был промаркирован ее порядковый номер. Массы образцов №1, №3, №4 оказались одинаковыми – 34 грамма (рисунок 4). Такая же масса была у образцов до начала испытаний. Следовательно, внешние факторы в виде воздействия почвы, климатических условий и нахождения в помещении не повлияли на разложение пластин из PLA-пластика. Образец №2 имел массу 50 грамм, что свидетельствует о сильном водопоглощении полилактида.



Рис. 4. Определение массы образцов (№2, №3, №4) после завершения испытаний

Водопоглощение PLA-пластика является одной из его самых значительных проблем [31-33], особенно при работе в области судостроения. Отсюда можно сделать вывод, что, для полного предотвращения взаимодействия PLA-пластика с окружающей средой, в том числе, с водой, как наиболее значимой агрессивной средой с точки зрения судостроения, которая может вызвать его старение или разложение, изделие из полилактида рекомендуется покрывать лаком или другими защитными материалами.

В качестве защитного покрытия могут выступать любые лакокрасочные покрытия на основе акриловых или алкидных смол, вододисперсионные краски, покрытие эпоксидными или полиэфирными смолами, композитные покрытия и т.д. Выбор защитного покрытия зависит от целей использования изделия из PLA-пластика. Для использования PLA-пластика при макетировании и моделировании, защитные покрытия можно не наносить. Однако, если изделие из PLA-пластика будет использоваться в среде с повышенной влажностью или же, соприкасаться с водой, то рекомендуется использовать любые аэрозольные акриловые лаки, желательно в несколько слоев во избежание непрокраса. Однако, у покрытий из акриловых лаков существуют недостатки, например, сильная хрупкость, малая стойкость к фрикционным нагрузкам, слабая устойчивость к УФ-излучению. По опыту работы с полилактидом, для работы изделия под фрикционными нагрузками, отлично подходит «Яхтный лак» [34] на основе алкидных смол, который обладает следующими преимуществами: не подвержен действию УФ-излучения, обладает гидрофобностью, износостойкостью, устойчивостью к химическим веществам (кислотам, щелочам, солям), эластичностью.

К недостаткам «Яхтного лака» можно отнести хрупкость при отрицательных температурах и токсичность компонентов, входящих в состав лака.

Выводы

В данной работе была поставлена цель – изучить возможности применения биоразлагаемого PLA-пластика в судостроении при изготовлении корпусов судов на примере имитации воздействия основных природных и естественных факторов на элементы корпуса судна. В целом, результаты проведенного исследования совпадают с данными работ [35, 36], в которых биоразлагаемость PLA-пластика исследовалась в неконтролируемых природных и естественных условиях. Процесс разложения PLA-пластика включает в себя насыщение пластика влагой из окружающей среды, активацию влагой процесса гидролиза с последующим уменьшением молекулярной массы, переработку микроорганизмами продуктов гидролиза. Также на процесс биodeградации оказывают влияние стабилизирующие добавки, которые используются при производстве пластика. Немаловажным фактором является то, что микроорганизмы, способные перерабатывать биоразлагаемые полимеры, такие полигидроксibuтират, поликапролактон, полибутиленсукцинат, не способны к переработке полилактида [37]. Такие микроорганизмы в природе встречаются достаточно редко: согласно [38], только 1 из 45-ти собранных образцов почвы содержит штамм необходимых для разложения полилактида бактерий.

Таким образом, разложение PLA-пластика в естественных природных условиях происходит крайне медленно и практически незаметно. Для его переработки необходимы специальные лабораторные условия или биореакторы, которые позволяют воспроизвести присутствие необходимых штаммов микроорганизмов (например, *Geobacillus thermoleovorans*), оптимальную температуру и высокую влажность. При подобных условиях, полилактид перерабатывается полностью и не оставляет вредных для окружающей среды веществ. При таком разложении, от PLA-пластика остается углекислый газ, вода и биомасса, не представляющая опасности для экологии [39].

Для целей судостроения, в том числе, для изготовления корпусов судов, изделий судового машиностроения и прочих узлов и механизмов, непосредственно соприкасающихся с водой, на объект из полилактида рекомендуется наносить лакокрасочное покрытие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вильданов Ф.Ш., Латыпова Ф.Н., Красуцкий П.А., Чанышев Р.Р. Биоразлагаемые полимеры: современное состояние и перспективы использования // Башкирский химический журнал. 2012. Т.19. №1. с. 135-139.
2. Васильева Н.Г. Биоразлагаемые полимеры // Вестник Казанского технологического университета. 2013. №22. с. 156-157.
3. G. Swift. Directions for environmentally biodegradable polymer research. Accounts of Chemical Research. 1993. 26 (3). pp.105-110.
4. D.R. Lu, C.M. Xiao, S.J. Xu. Starch-based completely biodegradable polymer material. eXPRESS Polymer Letters. 2009. Vol. 3. №6.. pp. 366-375.
5. Дектярев А.В., Романюта Д.А., Гришин П.Р., Морозов В.Н. Исследование физико-механических характеристик элементов судовых корпусных конструкций на примере судовых пластин в условиях аддитивного промышленного производства // Автоматизация в промышленности, 2019. №7. с. 16-18.
6. Дектярев А.В., Товпинец А.О., Гришин П.Р., Лейцин В.Н., Морозов В.Н. Сравнительный анализ физико-механических характеристик материалов аддитивного производства с традиционными методами литья как возможность применения 3D-печати в ремонтных работах на борту судна в рейсе в условиях Арктической зоны // Научные технологии в машиностроении. 2020. №2 (104). с. 41-48.
7. Дектярев А.В., Зобов П.Г., Николаев И.И., Гришин П.Р., Романюта Д.А., Морозов В.Н. Опыт применения 3D-печати в судомоделизме при исследовании буксировочного сопротивления маломерного судна в условиях опытового бассейна // Известия КГТУ, 2019. - №54. с. 166-177.
8. Дектярев А.В., Гришин П.Р., Морозов В.Н. Анализ применимости элементов объектов морской техники к аддитивному производству и их дальнейшие перспективы развития. Часть 2 //

Материалы VII Международного Балтийского морского форума: в 6 т. Калининград, 2019. с. 111-118.

9. K. Meinander, M. Niemi, J.S. Hakola, J.F. Selin. Polylactides – degradable polymers for fibres and films. *Macromolecular Symposia*. 1997. Vol.123. pp. 147–54.

10. С.Е. Роговина, К.В. Алексанян, А.Я. Горенберг, Ю.И. Дерябина, Е.П. Исакова. Исследование механических свойств, морфологии и биоразлагаемости композиций полилактида с полисахаридами // *Химия растительного сырья*. 2015. № 1. с. 29-39.

11. A.P. Mathew, K. Oksman, M. Sain. Mechanical Properties of Biodegradable Composites from Poly Lactic Acid (PLA) and Microcrystalline Cellulose (MCC). *Journal of Applied Polymer Science*. 2005. Vol. 97 (5). pp. 2014-2025.

12. ASTM D5338-15, Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Controlled Composting Conditions, Incorporating Thermophilic Temperatures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org

13. S.S. Ray, K. Yamada, M. Okamoto, K. Ueda. Polylactide-layered silicate nanocomposite: a novel biodegradable material. *Nano Letters*. 2002. Vol. 2 (10). 1093-1096.

14. W.Y. Jang, B.Y. Shin, T.J. Lee, R. Narayan. Thermal Properties and Morphology of Biodegradable PLA/Starch Compatibilized Blends. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2007. Vol. 13 (3). pp. 457-464.

15. ISO 14855, Evaluation of the Ultimate Aerobic Biodegradability and Disintegration of Plastics under controlled composting conditions - Method by analysis of released carbon dioxide, 1997.

16. J.B. Snook. Biodegradability of polylactide film in simulated composting environments. Michigan State University, Lansing, MI, USA, 1994, M. S. thesis. 130 P.

17. Намзиева А.И. Изменение комплекса свойств бумаги при обработке ее поверхности. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Казань. 2017. 114 с.

18. Тарасюк В.Т. Актуальность и перспективы применения биополимеров в пищевой промышленности // *Консервная промышленность сегодня: технологии, маркетинг, финансы*. 2011. №3. с. 55-62.

19. S. Farah, D.G. Anderson, R. Langer. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications – A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2016. vol. 107. pp. 367–392.

20. R. Muller in: A. Steinbchel (ed.). *Biopolymers. General Aspects and Special Applications*. Vol. 10. Chapter 12. Biodegradability of polymers: regulations and methods for testing. 2008. Wiley Publishers. pp. 366-388.

21. W. Khan, S. Muthupandian, S. Farah, N. Kumar, A.J. Domb. Biodegradable polymers derived from amino acids. *Macromolecular bioscience*. 2011. Vol. 11(12). pp. 1625-1636.

22. D.E. Henton, P. Gruber, J. Lunt, J. Randall in: A.K. Mohanty, M. Misra, L.T. Drzal (Eds.). *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. Polylactic Acid Technology*. Taylor & Francis, F.L. Boca Raton. 2005. pp. 527–577.

23. J. Lunt. Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers. *Polymer Degradation and Stability*. 1998. Vol. 59. pp. 145-152.

24. K.M. Nampoothiri, N.R. Nair, R.P. John. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. *Bioresource Technology*. 2010. Vol. 101(22). pp. 8493-8501.

25. K.I. Park, M.A. Xanthos. A study on the degradation of polylactic acid in the presence of phosphonium ionic liquids. *Polymer Degradation and Stability*. 2009. Vol. 94(5). pp. 834–844.

26. Миронова П.С., Цупикова Н.А. Результаты экологического мониторинга качества вод пруда Нижнего в теплый период 2018 года // *Вестник молодежной науки*. 2019. №3(20). с. 1-7.

27. Коровкина А.Н. Персонафицированная профилактика заболеваний пародонта населения Калининградской области // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки*. 2017. №1. с. 66-72.

28. Расписание погоды // r5gu URL: r5gu/Погода_в_мире (дата обращения: 20.04.2020 г.)

29. Анциферова О.А. Причины различий гидрогеологического режима буроземов на автономных позициях рельефа в условиях Самбийской равнины // *Известия КГТУ*. 2016. №43. с. 154-166.

30. Анциферова О.А., Колестро Е.В. Почвенно-геоморфологический подход к оценке засоренности пахотного поля // Известия КГТУ. 2016. №4. с. 162-174
31. T.J. Chung, J.W. Park, H.J. Lee, H.J. Kwon, H.J. Kim, Y.K. Lee, W. Tai Yin Tze. The improvement of mechanical properties, thermal stability, and water absorption resistance of an eco-friendly PLA/kenaf biocomposite using acetylation. *Applied Sciences*. 2018. Vol.8(3). 13 P.
32. N. Ayrilmis, M. Kariz, J.H. Kwon, M.K. Kuzman. Effect of printing layer thickness on water absorption and mechanical properties of 3D-printed wood/PLA composite materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 102(5-8). pp. 2195-2200.
33. C. Vicente, J. Fernandes, A. Deus, M. Vaz, M. Leite, L. Reis. Effect of protective coatings on the water absorption and mechanical properties of 3D printed PLA. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2019. Vol. 13(48). pp. 748-756.
34. Яхтные лаки: характеристики и разновидности // ТБМ Маркет URL: <https://www.tbmmarket.ru/help/useful-articles/item/3281/yakhtnye-laki-kharakteristiki-i-raznovidnosti/> (дата обращения: 23.08.2020 г.)
35. «Биоразлагаемый» PLA // 3D Today URL: <https://3dtoday.ru/blogs/hamsterius/biorazlagamu-pla> (дата обращения: 1.08.2020 г.)
36. О биоразлагаемости PLA // 3D Today URL: <https://3dtoday.ru/blogs/sergey-engineer/o-biorazlagamosti-pla> (дата обращения: 10.09.2020 г.)
37. T. Suyama, Y. Tokiwa, P. Ouichanpagdee, T. Kanagawa, Y. Kamagata. Phylogenetic affiliation of soil bacteria that degrade aliphatic polyesters available commercially as biodegradable plastics. *Applied and environmental microbiology*. 1998. Vol. 64, №12. pp. 5008-5011.
38. H. Pranamuda, Y. Tokiwa, H. Tanaka. Polylactide degradation by an *Amycolatopsis* sp. *Applied and environmental microbiology*. 1997. Vol. 63, №4. pp. 1637-1640.
39. E. Castro-Aguirre, R. Auras, S. Selke, M. Rubino, T. Marsh. Enhancing the biodegradation rate of poly (lactic acid) films and PLA bio-nanocomposites in simulated composting through bioaugmentation. *Polymer Degradation and Stability*. 2018. Vol. 154. pp.46-54.

ISSUES OF USE OF BIODEGRADABLE MATERIALS IN SHIPBUILDING ON THE EXAMPLE OF POLYLACTIDE

Dektyarev Alexandr Vladimirovich, a graduate student in the direction of "Technology of shipbuilding, ship repair and organization of shipbuilding production"
Grishin Pavel Romanovich, a graduate student in the direction of "Technology of shipbuilding, ship repair and organization of shipbuilding production"
Morozov Vladimir Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Shipbuilding

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university", Kaliningrad, Russia,
e-mail: a.dektyarev@shipyard-yantar.ru; pchel2000@gmail.com; mvn3613@gmail.com

The purpose of the article is to assess the possibilities of using PLA-plastic in shipbuilding in the manufacture of ship hulls by the example of simulating the impact of the main natural and natural factors on the elements of the ship's hull. The novelty of the article lies in the new possibilities of using biodegradable materials not only in the fields of medicine and prototyping, but also in heavy industry. Conclusions - polylactide decomposes only under certain conditions, which are practically impossible to repeat in a natural, not laboratory way; imitation of the main natural and natural factors acting on the ship's hull does not give a tangible change in the samples.

ВЛИЯНИЕ ПЕРФОРАЦИИ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ БАЛОК КОРПУСОВ СУДОВ

Притыкин Алексей Игоревич, д-р техн. наук, профессор кафедры кораблестроения
Лаврова Анна Сергеевна, канд. техн. наук, доцент кафедры ПГС

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: prit_alex@mail.ru

В большинстве днищевых балок судовых конструкций имеются регулярно расположенные вырезы круглой формы. Наличие вырезов приводит к снижению несущей способности балок, однако в справочной литературе не содержится данных о предельных нагрузках таких балок. В работе рассматриваются вопросы влияния круглых вырезов на предельную нагрузку судовых балок с помощью конечно-элементного анализа. Отмечено, что наличие вырезов по-разному влияет на снижение предельной нагрузки в зависимости от величины и расположения вырезов по длине балки, а также от соотношения величин поперечной силы и изгибающего момента в расчетном сечении.

Введение

В корпусе судна наряду с балками со сплошной стенкой значительная часть днищевых балок имеет технологические вырезы круглой или овальной формы, но в справочной литературе не содержится данных о предельных нагрузках перфорированных балок. Перфорированные балки с круглыми вырезами широко применяются также в строительстве, но параметры их перфорации сильно отличаются от судовых. В то время как перфорация в судовых балках ограничена высотой вырезов $d/H < 0.6$ (d – диаметр выреза, H – высота балки), а ширина перемычек между вырезами превышает диаметр выреза, т. е. $c/d \geq 1$, в строительных балках относительная высота вырезов принимает значения $0.667 \leq d/H \leq 0.75$ при относительной ширине перемычек в диапазоне $0.2 \leq c/d \leq 0.5$.

Аналитическое исследование несущей способности балок с вырезами по теории составных стержней было проведено в работах [1, 2], но оно не подходит для балок судовых конструкций из-за другого соотношения c/d . В работе [3] предельная нагрузка перфорированных балок-стенок определялась по критерию текучести перемычек, который может быть применим только для балок с $c/d \leq 0.3$. Из-за сложного характера распределения напряжений несущая способность перфорированных балок исследуется чаще всего не аналитически, а экспериментально и методом конечных элементов. В работе [4] экспериментально на 10-ти шарнирно опертых балках под сосредоточенной силой и МКЭ с помощью комплекса LUSAS изучалась предельная нагрузка балок с 4-мя круглыми вырезами разного диаметра, но не больше $d/H = 0.5$. Отмечается, что наличие вырезов может привести к снижению предельной нагрузки в 1.5 раза и указывается, что расчеты МКЭ позволяют достаточно надежно прогнозировать несущую способность таких балок.

Целью данной работы было исследование методом конечных элементов влияния расположения вырезов на несущую способность свободно опертых судовых балок при нагружении их равномерно распределенной нагрузкой. При анализе предполагалось, что материал является упругопластичным с билинейной диаграммой нагружения, показанной на рис. 1.

1. Методика оценки предельной нагрузки двутавровых балок

Будем рассматривать балки без вырезов и балки с изолированным вырезом, располагаемым в разных местах по ее длине. Подобное рассмотрение позволит оценить степень влияния вырезов на несущую способность балки.

1.1 Предельные нагрузки балки без вырезов

Для балок симметричного профиля со сплошной стенкой, обозначаемых как $l - h_w - t_w - b_f - t_f$ (рис.2), переход сечения в пластическое состояние может быть обусловлен как поперечной силой V , так и изгибающим моментом M . Предельный момент балки определяется как

$$M_T = \sigma_T W_T \quad (1)$$

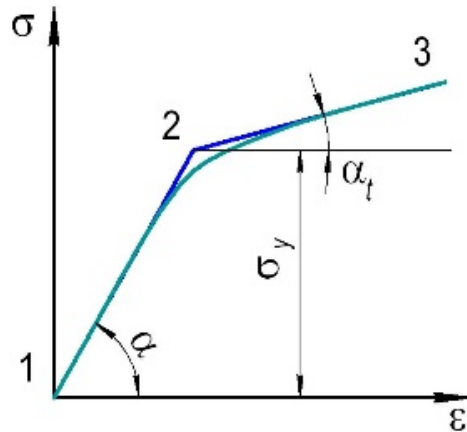


Рис.1. Диаграмма напряжений упругопластического материала с линейным упрочнением

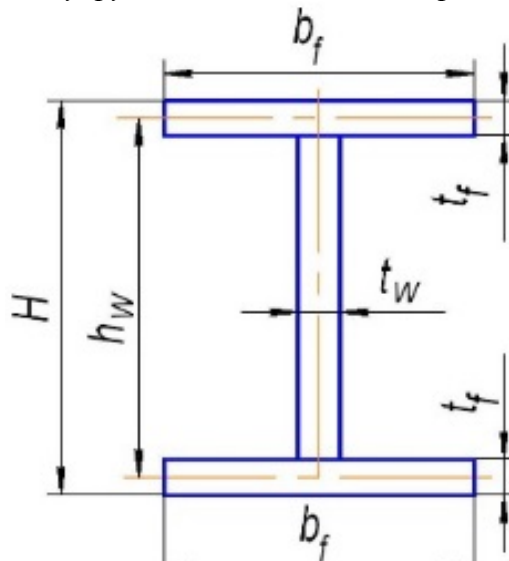


Рис.2. Форма сечения и параметры профиля

где σ_T – предел текучести материала при растяжении; W_T – предельный момент сопротивления сечения

$$W_T = b_f t_f h_w + t_w h_w^2 / 4. \quad (2)$$

Подстановка (2) в (1) дает

$$M_T = \sigma_T h_w^2 t_w (0.25 + \varphi), \quad (3)$$

где $\varphi = b_f t_f / h_w t_w$.

Для случая свободно опертой балки под действием равномерно распределенной нагрузки максимальный изгибающий момент посередине пролета M_{\max} равен

$$M_{\max} = ql^2/8. \quad (4)$$

По мере роста величины M_{\max} пластические зоны постепенно распространяются внутрь сечения, пока оно полностью не переходит в пластическое состояние. Величина момента M_T , указывающая на переход в предельное состояние, приводит к появлению пластического шарнира, т. е. к излому оси балки. Предельная нагрузка q_T , соответствующая этому состоянию, определится из (3) с учетом (4)

$$q_{T,M} = 8\sigma_T h_w^2 t_w (0.25 + \varphi)/l^2. \quad (5)$$

Зависимость (5) характеризует предельную нагрузку балки при игнорировании эффекта сдвига на развитие текучести, т. е. без учета влияния перерезывающей силы V .

Если текучесть сечения вызвана деформацией сдвига, обусловленной перерезывающей силой, то ее предельная величина V_T может быть вычислена как

$$V_T = \tau_T A_w, \quad (6)$$

где $A_w = h_w t_w$ – площадь стенки; $\tau_T = \sigma_T/\sqrt{3}$ – предел текучести материала при сдвиге.

Подставляя в (6) выражение для поперечной силы $V_T = ql/2$ и τ_T , получим

$$q_{T,V} = 1.155\sigma_T h_w t_w / l. \quad (7)$$

Приведем теперь зависимости для оценки предельных нагрузок балки с вырезами.

1.2. Предельные нагрузки балки с вырезом

Для перфорированной балки, в которой образование пластического шарнира будет происходить в зоне выреза, надо в (1) и (6) подставлять выражения

$$W_T^{\text{перф}} = h_w^2 t_w (\varphi + (1 - \alpha^2)/4), \quad (8)$$

где $\alpha = d/h_w$ – относительная высота вырезов, и

$$A_w = h_w t_w (1 - \alpha). \quad (9)$$

Для случая нагружения свободно опертой балки с изолированным вырезом равномерно распределенной нагрузкой предельное значение ее q_T определится по (5) с учетом (8) как

$$q_{T,M} = 8\sigma_T h_w^2 t_w (\varphi + (1 - \alpha^2)/4)/l^2. \quad (10)$$

При образовании пластического шарнира вблизи опорного сечения, где действует максимальная перерезывающая сила, величина предельной нагрузки из (6) с учетом (9) примет вид

$$q_{T,V} = 1.155\sigma_T h_w t_w (1 - \alpha)/l. \quad (11)$$

В случае расположения выреза в произвольном по длине сечении для определения предельной нагрузки потребуется учет обоих силовых факторов: изгибающего момента и перерезывающей силы. При совместном действии касательных и нормальных напряжений переход элемента в пластическое состояние происходит согласно критерию пластичности. Наибольшее сходство теоретических решений и экспериментов для судостроительных сталей обеспечивает критерий

пластичности Мизеса [5]. Согласно критерию Мизеса соотношение между нормальными σ и касательными τ напряжениями, приводящими к появлению текучести в элементе балки, будет

$$(\sigma/\sigma_T)^2 + (\tau/\tau_T)^2 = 1. \quad (12)$$

Учитывая выражения для напряжений σ и τ при равномерно распределенной нагрузке в произвольном сечении $\xi = x/l$ свободно опертой балки

$$\sigma = M/W_T^{\text{перф}} = 0.5ql^2(\xi - \xi^2)/(h_w^2 t_w (\varphi + (1 - \alpha^2)/4)). \quad (13)$$

$$\tau = V/A_w = 0.5ql(1 - 2\xi)/(h_w t_w (1 - \alpha)), \quad (14)$$

после подстановки (13) и (14) в (12) получим

$$\sigma_T^2 = (0.5q_T l^2 (\xi - \xi^2) / (h_w^2 t_w (\varphi + (1 - \alpha^2)/4)))^2 + 3(0.5q_T l (1 - 2\xi) / (h_w t_w (1 - \alpha)))^2. \quad (15)$$

Из (15) предельная нагрузка q_T при совместном действии изгибающего момента и перерезывающей силы примет вид

$$q_T = 2(\sigma_T h_w t_w / l) / (l^2 (\xi - \xi^2)^2 / (h_w^2 (\varphi + (1 - \alpha^2)/4)^2) + 3(1 - 2\xi)^2 / (1 - \alpha)^2)^{0.5} \quad (16)$$

Таким образом, получены зависимости для предельных нагрузок свободно опертой балки при разных расположениях выреза: в зоне максимального изгибающего момента при отсутствии перерезывающей силы (10); в зоне максимальной перерезывающей силы и отсутствующем моменте (11) и в зоне действия обоих силовых факторов (16). Остается проверить представленные выше зависимости расчетами МКЭ.

2. Результаты расчетов балок МКЭ

Проверим точность приведенных выше зависимостей с помощью сопоставительного расчета балок МКЭ. В качестве расчетных будем рассматривать напряжения по Мизесу, учитывающие все компоненты напряженного состояния. Вначале рассмотрим свободно опертую (с. о.) балку симметричного профиля размерами 150-15-0.4-5-0.6см, предельная величина равномерно распределенной нагрузки которой по (5) будет

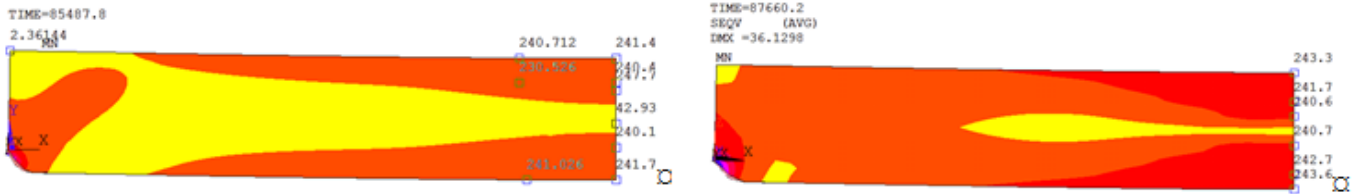
$$q_{T,M} = 8 \cdot 240 \cdot 150^2 \cdot 0.4(0.25 + (50 \cdot 0.6)/(150 \cdot 0.4))/1500^2 = 57.6 \text{ кН/м} \quad (17)$$

Расчет МКЭ (рис.3,а) при касательном модуле $E_t = 0.005E$ приводит к значению $q_{T,M}^{\text{МКЭ}} = 57 \text{ кН/м}$, что указывает на расхождение с аналитическим значением (17) в 1%.

Уменьшение касательного модуля до величины $E_t = 0.0025E$ привело к более корректному результату $q_{T,M}^{\text{МКЭ}} = 58.5 \text{ кН/м}$ (рис.3,б), имеющего расхождение с (5) менее чем на 1.6%. К более корректному, потому что напряжения в сечении посередине пролета почти полностью достигли текучести. Предельная нагрузка от перерезывающей силы V вблизи опорного сечения в данном случае была бы равна в соответствии с (7)

$$q_{T,V} = 1.155 \cdot 240 \cdot 150 \cdot 4/1500 = 111 \text{ кН/м}. \quad (18)$$

Проделанный выше расчет можно считать тарировочным, показавшим удовлетворительную работу программы ANSYS при использовании конечных элементов типа shell63 и shell43 в упругой и упругопластической стадии нагружения соответственно. Размер конечных элементов принимался равным $\Delta_{\text{кЭ}} = 0.13H$ (H – высота балки).



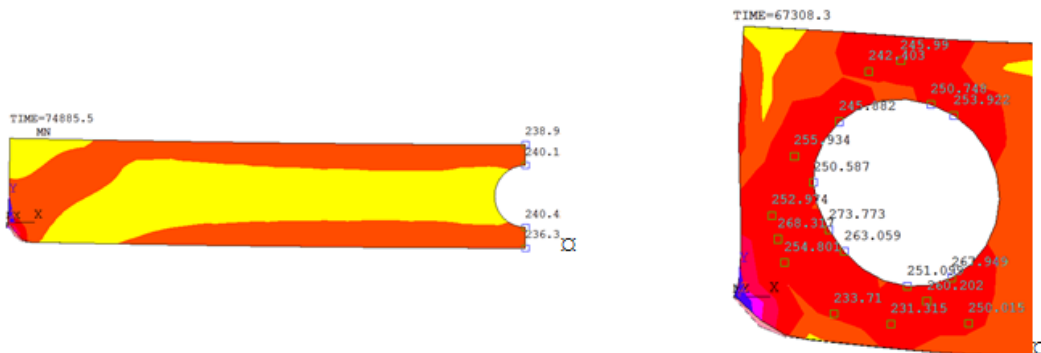
$$a/ q_{T,M}^{\text{МКЭ}} = 85.49/1.5 = 57 \text{ кН/м}; E_t = 0.005E \quad b/ q_{T,M}^{\text{МКЭ}} = 87.66/1.5 = 58.4 \text{ кН/м}; E_t = 0.0025E$$

Рис.3. Распределение напряжений в с. о. балке 150-15-0.4-5-0.6 см в предельном состоянии

Расчет МКЭ с. о. перфорированной балки с одним центральным вырезом диаметром $d = 0.6H$ при $E_t = 0.005E$ приводит к значению $q_{T,M}^{\text{МКЭ}} = 74886/1500 = 49.9 \text{ кН/м}$ (рис.4,а). Как видим, наличие выреза снижает предельную нагрузку балки примерно на 9%. Но здесь важно отметить еще одну особенность – из-за наличия концентрации напряжений в районе выреза максимальные напряжения по Мизесу возникают не в поясах балки, а в стенке у контура выреза. Причем их величина несколько превышает предел текучести материала балки $\sigma_T = 240 \text{ Н/мм}^2$. Действительно, уже при нагрузке $q_{T,M}^{\text{МКЭ}} = 49.9 \text{ кН/м}$ (рис.4,а) расчетное сечение почти полностью течет. Расчет по (10) приводит к величине

$$q_{T,M} = 8 \cdot 240 \cdot 150^2 \cdot 4 \left((50 \cdot 6) / (150 \cdot 4) + (1 - 0.6^2) / 4 \right) / 1500^2 = 50.7 \text{ кН/м}. \quad (19)$$

Как видим, расхождение не превышает 1.6%. Следует, однако, иметь в виду, что такой простой подход приемлем только для случая точного попадания выреза в зону образования пластического шарнира в балке со сплошной стенкой. В иных случаях процедура нахождения предельной нагрузки существенно сложнее, так как помимо изгибающего момента на текучесть материала заметное влияние оказывает и поперечная сила, которая в данном случае была равна нулю.



$$a/ q_{T,M}^{\text{МКЭ}} = 74886/1500 = 49.9 \text{ кН/м}; E_t = 0.005E; \Delta_{\text{КЭ}} = 10 \text{ мм} \quad b/ q_{T,V}^{\text{МКЭ}} = 67.3/1.5 = 44.9 \text{ кН/м}; E_t = 0.01E$$

Рис.4. Распределение напряжений в с. о. балке 150-15-0.4-5-0.6 см в предельном состоянии при наличии выреза: а/ посередине пролета; б/ вблизи опоры

Расчет МКЭ с. о. балки тех же размеров, но с одним круглым вырезом диаметром $0.6H$ (рис.4б), расположенным в районе опоры на расстоянии 35 мм от контура, т. е. при $\xi = 35/1500 = 0.023$ приводит к существенно меньшей нагрузке $q_{T,M}^{\text{МКЭ}} = 49.9 \text{ кН/м}$, демонстрируя появление текучести в зоне максимальной поперечной силы V . Действительно, согласно (14) предельная нагрузка $q_{T,V}$, вызывающая текучесть сечения от деформации сдвига, будет равна

$$q_{T,V} = 1.155 \cdot 240 \cdot 150 \cdot 4(1 - 0.6) / (1500(1 - 2 \cdot 0.023)) = 46.5 \text{ кН/м}, \quad (20)$$

что дает расхождение с $q_{T,V}^{\text{МКЭ}} = 44.9 \text{ кН/м}$ в 3.5%.

Из полученного МКЭ результата, представленного на рис.4б, видно, что наличие выреза в районе опорного сечения может существенно снизить несущую способность балки в сравнении с

результатом (18). Вот почему довольно часто в перфорированных балках строительных конструкций, изготовленных по безотходной технологии, в опорные вырезы ввариваются вставки (рис.5).



Рис.5. Вварные вставки в районе опорных сечений балок с круглыми вырезами

Для случая расположения выреза в произвольном сечении балки, где одновременно действуют изгибающий момент и перерезывающая сила, изменение величины предельной нагрузки в соответствии с зависимостью (16) имеет вид, приведенный на рис.6.



Рис.6. Зависимость предельной нагрузки от положения выреза по длине

При расположении выреза в произвольном сечении (рис.7) наступление полной текучести в зоне выреза наступает лишь при нагрузке, намного превосходящей предельную нагрузку сечения, расположенного посередине пролета. Если полная текучесть сечения при $\xi = 0.5$ наступает при полной нагрузке на балку $Q_T = 87.66$ кН (рис.3b), то полная текучесть в районе выреза (рис.7) наступит при нагрузке $Q_T = 90.52$ кН. Поэтому наиболее неблагоприятное расположение вырезов в районе максимальных величин V и M .

TIME=90520.5

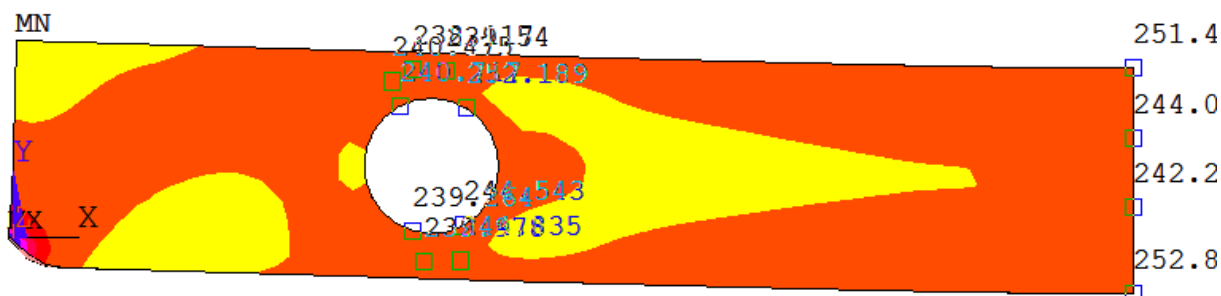


Рис.7. Наступление полной текучести в районе произвольного выреза

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Заключение

1. Аналитически определить несущую способность с. о. балки с вырезом, расположенным в произвольном сечении с параметром ξ , можно по зависимости (16).
2. Наличие в стенке балки выреза диаметром $d = 0.6H$ снижает предельную нагрузку q_y примерно на 9% при расположении выреза в зоне максимального изгибающего момента и на 24% при расположении выреза в зоне максимальной перерезывающей силы.
3. Наиболее надежную оценку несущей способности балки с вырезами дает расчет МКЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pritykin, A.I. Limit load of the perforated beams. Proceedings of the 12th Int. conference «Mechanika- 2007». (5.04.2007) - Kaunas.: «Technologija» Lithuania, 2007. – P. 241-246.
2. Несущая способность однорядно и двухрядно перфорированных балок / А.И. Притыкин, И.А. Притыкин // Актуальные проблемы исследований по теории сооружений: сб. науч. статей международной конф. Ч.2. (19-20.11.2009) – М., 2009. – С.34-45.
3. Притыкин, А.И. Предельная нагрузка перфорированной балки-стенки по критерию текучести перемычек // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2009. – № 2. – С. 22-26.
4. Azmi, M.Y.M. et al. Experimental studies on perforated plate girders with inclined stiffeners // Thin-Walled Structures. – 2017. – №117. – p. 247-256.
5. Апполонов, Е.М., Таровик, О.В. Предельные нагрузки и упругопластическое деформирование судовых балочных конструкций. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2012. – 128 с.

INFLUENCE OF PERFORATION ON LOAD CAPACITY OF THE SHIP GIRDERS

Ptitykin Alexej Igorevich, Dr. Tech. Sci., Prof. of the shipbuilding department
Lavrova Anna Sergeevna, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof. of the ICB department

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russia, e-mail: prit_alex@mail.ru

In most beams of the ship bottom structures there are regulary located circular openings. Presence of such openings lead to reducing of load capacity of beams, but in manuale on the ship strength is not considering limit load of such beams. In this work it is considering influence of circular openings on limit load of ship structures with help of the finite element analysis. It was noticed, the existence of opening influent in different way on reducing of limit load in dependence on value and location of openings along the beam and also on relation between values of shear force and bending moment in considered cross section.

СЕКЦИЯ «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ИНДУСТРИИ»

SECTION "ELECTRICAL SYSTEMS OF THE MARINE INDUSTRY OBJECTS"

УДК: 627.8.09

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА РЯДЕ СУДОВ ФЛОТА РЫБНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Белей Валерий Феодосиевич, д-р техн. наук, профессор кафедры ЭС и ЭЭ
Брижак Роман Олегович, аспирант кафедры ЭС и ЭЭ
Харитонов Максим Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры ЭС и ЭЭ

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: vbeley@klgtu.ru

В работе изложен анализ требований нормативных документов в области качества электроэнергии на морских судах. Показан ход разработки методики исследования показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения. Выявлены источники электромагнитных помех в судовых электроэнергетических системах. Представлены результаты исследования показателей качества электроэнергии на ряде судов, а также дана их оценка.

Введение

В настоящий момент в судовых энергетических системах находит активное применение полупроводниковая преобразовательная техника, светодиодное освещение и прочее, в основе которых лежат нелинейные элементы. Одним из главных преимуществ таких технологий является значительное снижение расхода электроэнергии. Внедрение преобразовательной техники обеспечивает высокий уровень автоматизации судового электрооборудования, что является немаловажным для автономных электроэнергетических систем. Однако полупроводниковые компоненты имеют критический недостаток, который проявляется в снижении качества электрической энергии в судовой электросети. Эксплуатация подобных элементов приводит к появлению в сети высших гармоник тока и напряжения, а, следовательно, и искажение формы их синусоиды, вызывая тем самым возникновение электромагнитных помех, значительных коммутационных перенапряжений. В настоящий момент проблема качества потребляемой электроэнергии стоит наиболее остро, так как значительно растёт число важных потребителей такие как элементы микропроцессорных систем управления и автоматики, которые являются помехочувствительным оборудованием и предъявляющие к электроэнергии повышенные требования. Таким образом можно сделать вывод, что проблема контроля за уровнем качества электрической энергии в судовой энергосистеме является одной из основополагающих и требующих особого внимания

1. Перечень требований Российского морского Регистра судоходства к качеству электрической энергии

Основным документом, где прописаны требования к качеству электроэнергии в судовых электроэнергетических установках является российский морской регистр судоходства в частности раздел «Правила классификации и постройки морских судов. [1] При этом стоит отметить, что данными документами регламентируется лишь часть показателей. Для таких показателей как не-

симметрия линейных напряжений и провалы напряжения не прописаны ограничения. Тем не менее для более углубленного исследования процессов, вызывающих снижение качества эклектической энергии целесообразно рассмотреть и их в том числе. В этом случае за нормированием показателей обратимся к ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.»

Таблица 1

Нормативные показатели качества электрической энергии в судовой ЭЭС согласно [1]

Показатель	Предельное значение
Коэффициент несинусоидальности графика напряжения	10 %
Отклонение частоты	
- длительное:	+0,2 Гц
- кратковременное (5 с):	+0,4 Гц
Коэффициенты гармонических составляющих напряжения 2-15 порядка	не более 10 %
Отклонение напряжения	
- длительное:	+6 / -10 %
- кратковременное (1,5 с):	+20 %

2. Результаты исследования показателей качества электроэнергии в судовой ЭЭС судна проекта В-673 «Иосиф Шмелькин»

Одним из объектов экспериментального исследования показателей качества электроэнергии было выбрано рыбопромысловое судно – «Иосиф Шмелькин» класса БМРТ (большой морозильный рыболовный траулер). Технические характеристики судна, принадлежащего к проекту В-673 приведены в таблице 2.

Таблица 2

Технические данные энергетической установки судов проекта В-673

Класс Судна	КМ*Л4 рыболовное
Силовые установки:	
Количество и мощность (л.с.)	1x5000
Модель двигателя	B&W 8L 35MC
Частота оборотов (об/мин)	164
Количество и мощность валогенераторов (кВт)	1x1200
Вспомогательные дизель-генераторы:	

Марка дизельгенератора	Cegielski-Sulzer 5 AT 25H
Количество и мощность генераторов (кВт)	2x640
Частота оборотов (об/мин)	750
Напряжение генератора (В)	400

Упрощённая принципиальная электрическая схема ЭЭС судна проекта В-673 «Иосиф Шмелькин» с отметками точек для которых проводились экспериментальные исследования, а также с перечнем наиболее энергоёмких потребителей изображена на рисунке 1. Основным генерирующим оборудованием являются: валогенератор переменного тока (ВГ), два дизель-генератора (ДГ-1, ДГ-2), кроме того судно оборудовано аварийным дизель-генератором (АДГ) мощностью в 125кВА.

Результаты обработки экспериментальных данных о показателях качества электроэнергии в ЭСС судна «Иосиф Шмелькин»

Параметр	Сеть 380 В			Сеть 220 В		
	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
Линейного напряжения, В	386,9	386,3	387,3	221,4	221,6	222,5
Отклонение напряжения, %	1,82	1,66	1,92	0,64	0,73	1,14
Частота, Гц	49,59					
Отклонение частоты, Гц	0,40					
Коэффициент несимметрии по обратной последовательности	0,2			0,2		

Анализируя результаты проведенных исследований можно сделать вывод о наличии незначительного небаланса линейного напряжения в сетях 380/220В. Максимальное отклонение линейного напряжения составляет в среднем 1,92 %, что не превышает нормативное значение. Отклонение частоты, вычисленное в соответствии с методикой, упомянутой в [2] составило 0,41 Гц, что в соответствии со значениями, приведенными в таблице 1 также не превышает допустимое значение.

Результаты измерений коэффициентов гармонических составляющих представлены в таблице 4. Сравнение экспериментально полученных данных с нормативными показателями качества электроэнергии регламентируемыми правилами классификации и постройки морских судов, а также ГОСТ 32144-2013 представлена на рисунке 3.

Таблица 4

Данные экспериментальных исследований гармонического состава напряжения и тока в ЭСС «Иосиф Шмелькин»

Показатель	Сеть 380 В			Сеть 220 В					
	Напряжение			Напряжение			Ток		
	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_A	I_B	I_C
K_n , %	1,5	1,4	1,9	1,9	2,0	2,0	5,4	3,2	3,1
$K_{(3)}$, %	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	2,1	1,8	1,8
$K_{(5)}$, %	0,6	0,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,6	1,3	1,3
$K_{(7)}$, %	1,0	0,9	1,3	1,3	1,3	1,4	1,6	1,0	0,9
$K_{(9)}$, %	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,6	0,3	0,3
$K_{(11)}$, %	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6	0,2	0,2
$K_{(13)}$, %	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3	0,5	0,7	0,7
$K_{(15)}$, %	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3

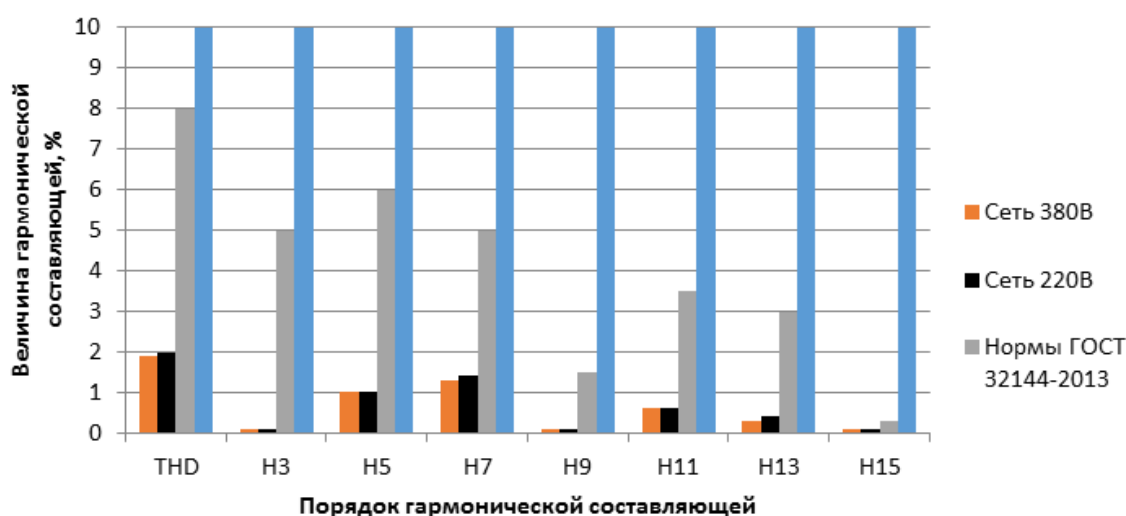


Рис. 3 – Сравнительный анализ коэффициентов, гармонических составляющих напряжения в электроэнергетической системе БМРТ «Иосиф Шмелькин» (точка I – сеть 380В, точка II – сеть 220В)

Анализируя результаты экспериментальных исследований, можно сделать вывод о присутствии в сети 220В нагрузок, эмитирующих в сеть высшие гармоники тока, вызывающие искажение формы синусоидальной кривой. Отталкиваясь от данных ранее проведенных исследований [3], а также учитывая перечень функционирующего в процессе эксперимента судового оборудования [4], можно предположить, что их основным источником является система освещения судна. Гармонический состав, полученный при измерении показателей несинусоидальности тока в сети с напряжением 220 В (точка II), изображенный на рисунке 4 также коррелирует с результатами раннего исследования.

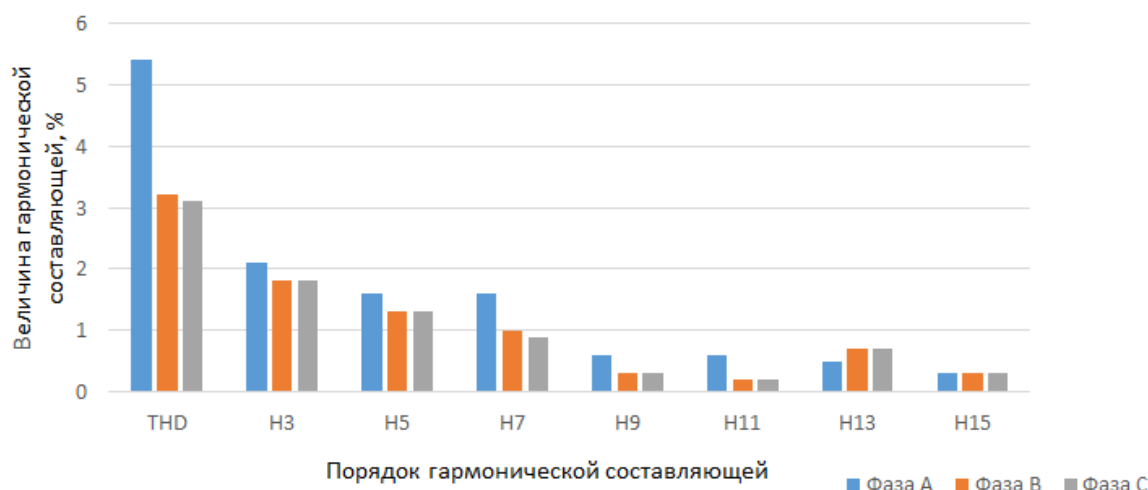


Рис. 4 – Данные измерений гармонического состава тока в цепи Т1 –ГРЩ 220В (точка II)

3. Обобщенные результаты исследования качества электроэнергии в судовой ЭЭС судна проекта Атлантик-333 «Коломенское»

Другим объектом для экспериментального исследования показателей качества электроэнергии было выбрано рыболовецкое судно - «Коломенское» проект Атлантик-333. На рисунке 5 дана упрощенная принципиальная схема судовой электростанции с точками подключения анализатора качества электрической энергии. Во время экспериментальных замеров показателей качества судно находилось на стоянке. Питание судовой ЭЭС осуществлялось от основной дизель-генераторной установки.

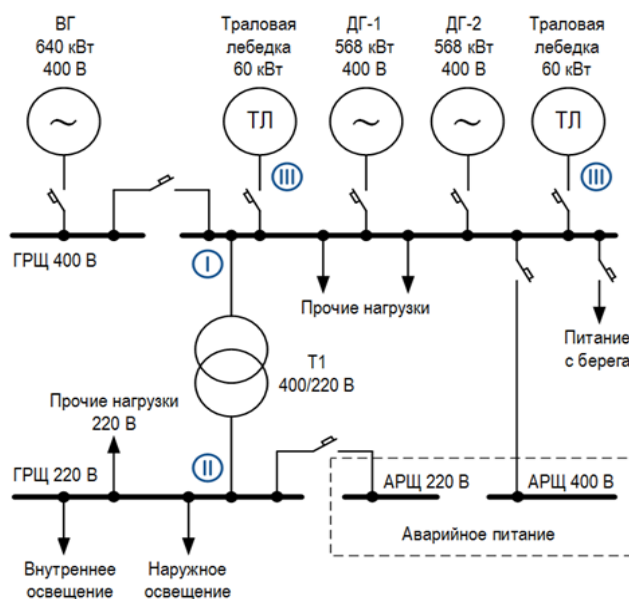


Рис. 5 - Точки подключения контрольно-измерительного оборудования при измерении показателей качества электроэнергии на судне «Коломенское»

Точки подключения контрольно-измерительного оборудования: шины ГРЩ-400В (рисунок 5, точка I), ГРЩ-220В (рисунок 5, точка II), цепи питания траловой лебедки (точка III). Кроме того, дополнительно было проведено замеры показателей в сетях системы освещения судна (220 В) (рисунок 5 точка IV).

Результаты исследования гармонического состава напряжения на шинах ГРЩ-400В а также расчёт их коэффициентов согласно методике [2] (рисунок 6) говорит о присутствии в сети 400В высших гармоник 7, 11 и 13-го порядка., величины которых, однако, не превышают нормативных значений (таблица 1).

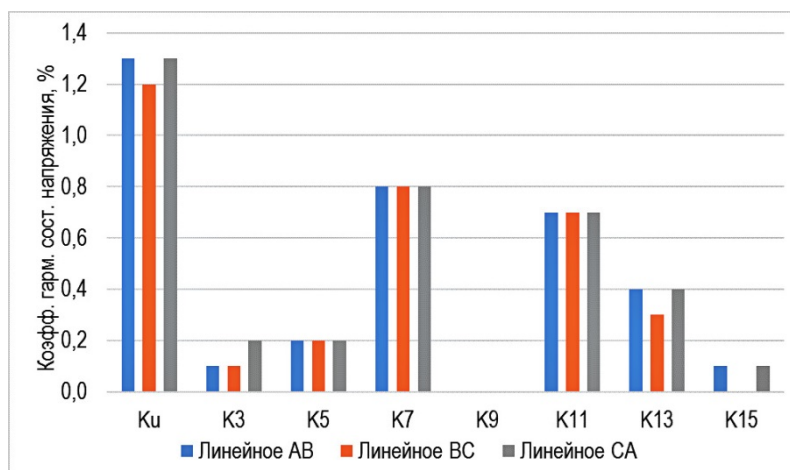


Рис. 6 – Экспериментальные данные по составу высших гармоник напряжения на шинах ГРЩ 400 В

Аналогично были получены опытные данные характеризующие показатели качества электрической энергии, измеренные в силовой цепи 220В трансформатора Т1 на низкой стороне (рисунок 5, точка II). Результаты исследования представлены на рисунке 7

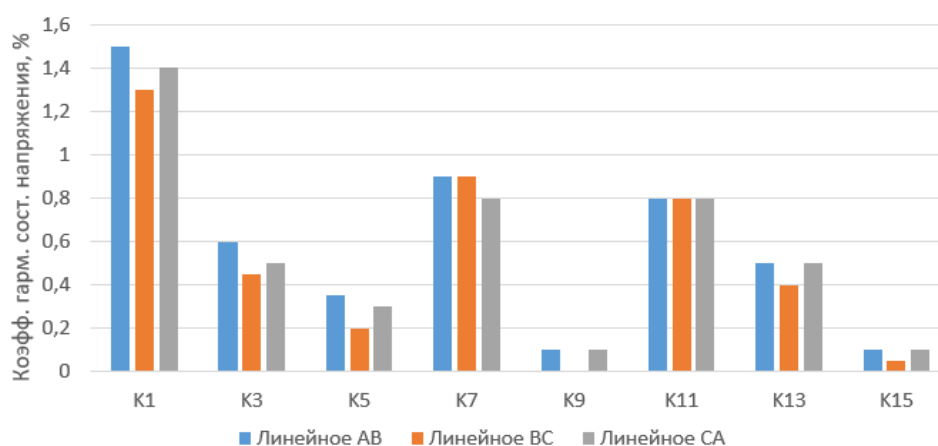


Рис.7. Экспериментальные данные по составу высших гармоник напряжения на шинах ГРЩ 230 В

Также было проведено исследование уровней, гармонических составляющих тока при эксплуатации многобарабанной траловой лебедки. Исследование лебедки проводилось в отсутствие механической нагрузки для трех скоростей работы асинхронного двигателя. Результаты исследования показаны на рисунке 8

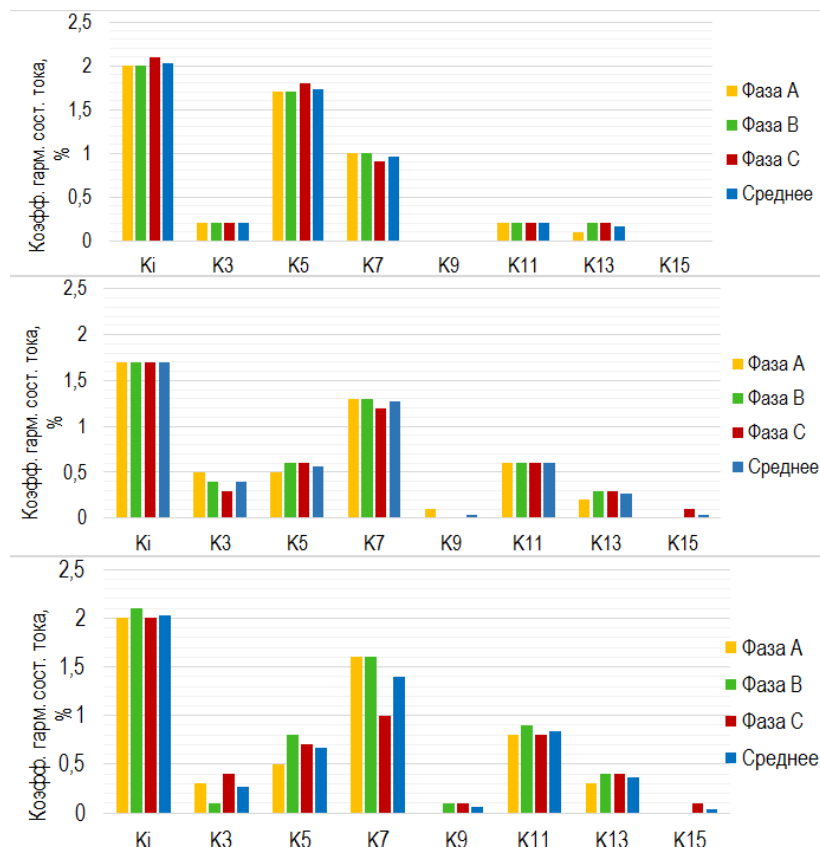


Рис. 8 – Гармонический состав тока, потребляемого траловой лебедкой на первой (а), второй (б) и третьей (в) скорости

Проанализировав результаты экспериментальных исследований уровней электромагнитных помех при прямом пуске асинхронного двигателя многобарабанной траловой лебедки можно сделать вывод, что значительная эмиссия высших гармоник тока при этом не наблюдается (рисунок 8).

Заключение

Изложенный экспериментальных исследований позволил проанализировать уровень ЭМП эмиссируемых рядов нелинейных электроприемников, вызывающие снижения качества электроэнергии в электроэнергетических системах рыбопромысловых судов, а также дать оценку их соответствию нормам, регламентированным российским судоходным морским регистром. В настоящий момент продолжается работа в данном направлении, в частности предполагается расширить выборку судов для исследования, а также более глубоко рассмотреть ряд явлений, предположительно лежащих в причине возникновения в судовой ЭЭС электромагнитных помех.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов НД № 2-020101-114. 2019.
2. «Некоторые результаты исследования качества электроэнергии в электроэнергетических системах судов флота рыбной промышленности» / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов, Р.О. Брижак, В.М. Минько, И.Н. Крюков // Морские интеллектуальные технологии, НИЦ «МОРИНТЕХ» – 2019. – №4. – 6с.
3. Белей, В.Ф. «Био и электромагнитная совместимость судовых систем освещения на основе светодиодных источников света» / В.Ф. Белей, М.С. Харитонов // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 1-3 (37). С. 67-73.
4. Отчет о выполнении НИОКР, проводимой в рамках государственного задания по теме: «Исследования качества электроэнергии в системах электроснабжения объектов морской индустрии с целью повышения их эффективности» 2019 г.

SOME RESULTS OF THE RESEARCH OF ELECTRIC POWER QUALITY INDICATORS ON A NUMBER OF VESSELS OF THE FISHING INDUSTRY FLEET

Beley Valery Feodosievich, Ph.D., Professor of the Department of Electrical Equipment of Ships and Energy
Brizhak Roman Olegovich, postgraduate student
Kharitonov Maksim Sergeevich, Ph.D., Associate Professor of the Department of Electrical Equipment of Ships and Energy

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russia, e-mail: vbeley@klgtu.ru

The paper presents an analysis of the requirements of regulatory documents in the field of power quality on sea vessels. The course of development of a methodology for researching power quality indicators in power supply systems is stated. The sources of electromagnetic interference in ship power systems have been identified. The results of the study of power quality indicators on a number of ships are presented, as well as their assessment is given.

УДК: 621.316.935.1

ЗАЩИТНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ УЧЕБНЫХ ПАРУСНЫХ СУДОВ «КРУЗЕНШТЕРН» И «СЕДОВ»

¹Кажекин Илья Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики

²Благинин Владимир Анатольевич, канд. техн. наук, доцент кафедры устройства и живучести корабля

³Рагозин Сергей Николаевич, главный инженер ООО «Автономные электрические системы»

¹Вольский Виктор Анатольевич, студент факультета судостроения и энергетики

¹ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, Россия, e-mail: kazhekin@mail.ru

²Филиал Военно-учебного научного центра ВМФ «Военно-морская академия им. Н.Г. Кузнецова» (г. Калининград), Калининград, Россия, e-mail: npp-met@rambler.ru

³ООО «Автономные электрические системы», Калининград, Россия, e-mail: snragozin@mail.ru

В работе описаны некоторые результаты исследований, проведенных в электросистемах учебных парусных судов «Крузенштерн» и «Седов». В ходе исследований впервые были испытаны устройства, совместно разработанные предприятием «АЭС» и КГТУ для повышения пожаро- и электробезопасности корпусных токов, возникающих при однофазных замыканиях на корпус или при однофазных прикосновениях людей к бортовому электрооборудованию. Тяжесть последствий подобных событий определяется величиной возникающих токов. Результаты испытаний подтвердили эффективность разработанных защитных устройств КГТУ как средства уменьшения токов однофазных замыканий и прикосновений до их безопасных значений.

Введение

Учебные парусные суда (УПС) «Крузенштерн» и «Седов» (рисунок 1) используются для проведения плавательной практики курсантами морских учебных заведений. При выполнении рейсов на борту каждого из них находится более сотни практикантов, которые только приступают к освоению значений и навыков, требующихся для безопасного мореплавания. Очевидно, что в этих условиях противопожарная устойчивость УПС и их безопасность в отношении смертельного поражения людей электрическим током должны быть в центре особого внимания.



а) УПС «Крузенштерн»



б) УПС «Седов»

Рис. 1. Фотографии учебных парусных судов, на которых были проведены испытания защитных устройств

Ранее было установлено, что уровни пожаро- и электробезопасности морской техники задаются величинами токов глухих однофазных замыканий (ОЗ) на корпус в их электроэнергетических системах – чем ниже значения этих токов, в судовых сетях, тем менее опасным оказывается само судно как в пожарном отношении, так и в отношении возможного смертельного исхода при электротравмах людей, находящихся на борту [1]. Испытания разработанных защитных устройств проводились с целью подтверждения их способности уменьшать токи глухих однофазных замыканий на корпус до безопасных уровней вне зависимости от режима работы учебных судов.

1. Описание электроэнергетических систем УПС

Однолинейная схема электроэнергетической системы УПС «Крузенштерн» показана на рисунке 2. Бортовые потребители напряжением 220 В получают питание от четырех генераторов 380 В через два понижающих трансформатора. До подключения защитных устройств были проведены измерения токов однофазных замыканий. Их результаты приведены в таблице 1.

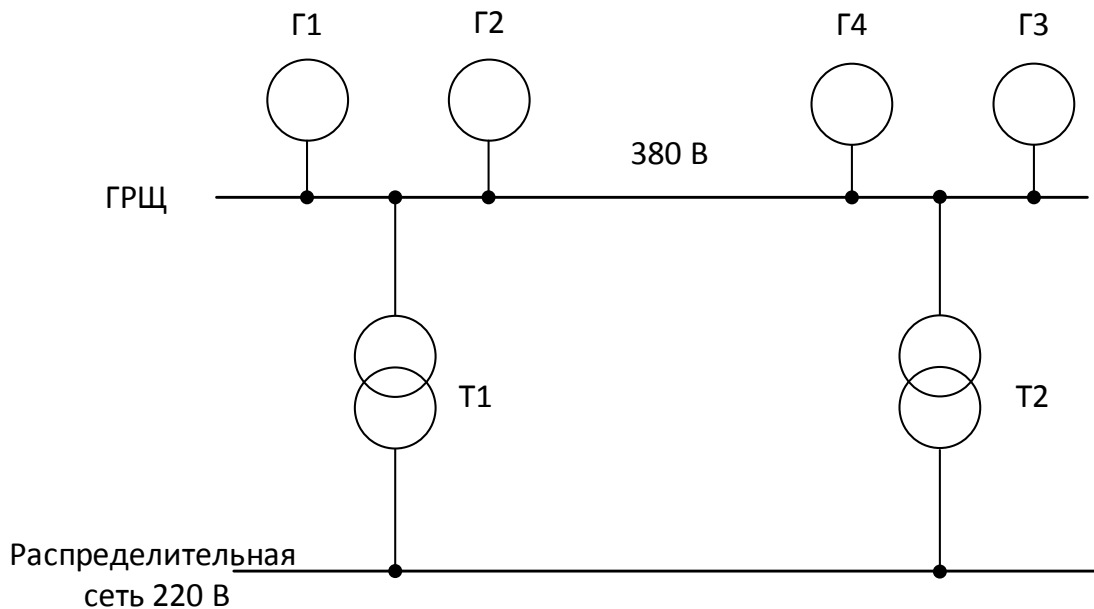


Рис. 2. Схема распределения электроэнергии на УПС «Крузенштерн»

Таблица 1

Результаты предварительного измерения токов однофазных замыканий в электросистеме УПС «Крузенштерн»

Величина тока однофазного замыкания, А			Частота сети при измерении, Гц	Напряжение сети, В	Примечание
Фаза А	Фаза В	Фаза С			
0,126	0,132	0,132	50	220	Включено максимальное количество фидеров
1,1	1,1	1,1	50	380	Включено максимальное количество фидеров

Значения токов, указанных в таблице 1, регистрировались во время перехода судна из Калининградского рыбного порта в Светловский судоремонтный завод. Измерения показали, что в сети напряжением 220 В токи однофазных замыканий достаточно малы. Их значения не превышают безопасные уровни. В то же время, как видно из таблицы 1, токи ОЗ в электросети напряжением 380 В превышают 1 А. При таких величинах токов однофазных замыканий уже опасны в пожарном отношении, поскольку они могут стать источником возгорания с самовоспламенившейся кабельной изоляцией. Для уменьшения токов ОЗ следует использовать защитное устройство, которое целесообразно подключить непосредственно к ГРЩ через один из резервных выключателей (рисунок 3 а). На УПС «Седов» подключение защитного устройства было осуществлено иначе. Для этого использовался один из фидеров напряжением 220 В, выведенный за пределы машинного отделения (рисунок 3б).



а) в электросистеме УПС «Крузенитерн»



б) в электросистеме УПС «Седов»

Рис. 3. Установка и проведение испытаний устройства компенсации токов однофазных замыканий в электросистемах УПС

Однолинейная схема распределения электроэнергии на УПС «Седов» представлена на рисунке 4.

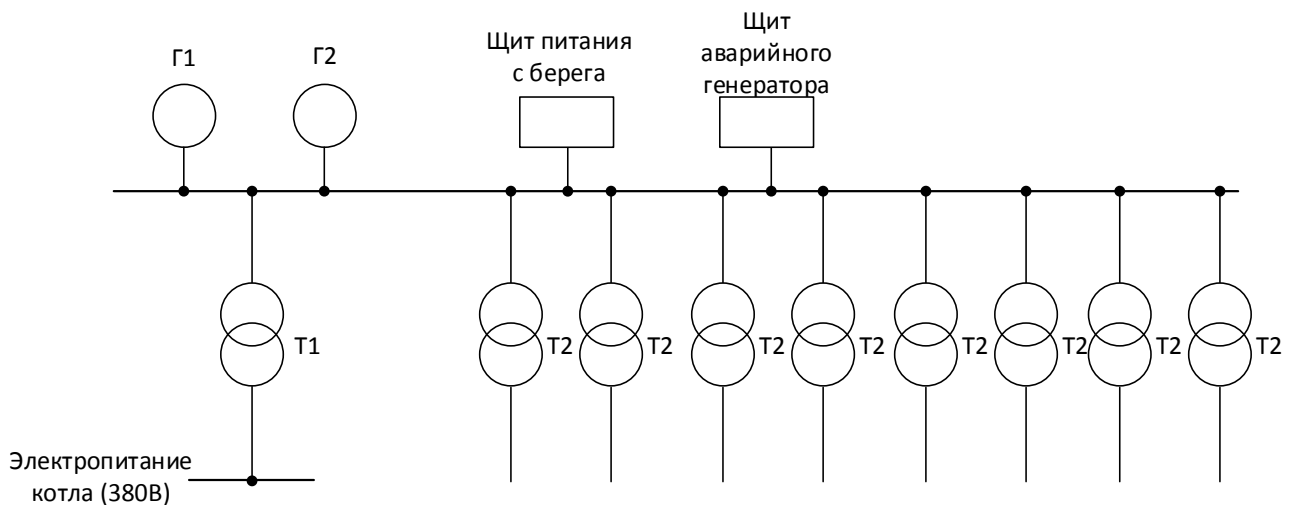


Рис. 4. Схема распределения электроэнергии на УПС «Седов»

Производство и основная часть распределения электроэнергии на УПС «Седов» осуществляется при напряжении 220 В. Часть наиболее мощных потребителей получают питание через отдельные трансформаторы на напряжении 380 В. При этом кабельные сети на напряжении 380 В не обладают большой протяженностью, а, следовательно, токи однофазных замыканий в них невелики. Через сеть напряжением 220 В электроэнергию получает большинство потребителей на судне. На этом участке сети отсутствуют какие-либо разделительные трансформаторы для отдельных групп потребителей. В результате сформирована достаточно протяженная и разветвленная общая кабельная сеть напряжением 220 В. Она обладает большой фазной емкостью относительно корпуса судна.

В таблице 2 приведены значения токов при однофазных замыканиях, измеренные в бортовых электросетях судна во время его стоянки в порту.

Результаты предварительного измерения токов однофазных замыканий в электросистеме УПС «Седов»

Величина тока однофазного замыкания, А			Частота сети при измерениях, Гц	Напряжение сети, В	Примечание
Фаза А	Фаза В	Фаза С			
0,91	0,92	0,95	50	220	Включено максимальное количество фидеров
0,79	0,83	0,85	50	220	Включено минимальное количество фидеров
0,05	0,052	0,052	50	380	Включено максимальное количество фидеров
0,048	0,048	0,048	50	380	Включено минимальное количество фидеров

Как видно из таблицы 2 минимальный ток в электросети 220 В составил 0,79 А, а при подключении максимально возможного в этом режиме работы судна количества кабелей его значение увеличивается почти до одного ампера. Учитывая, что на судне силовая, осветительная сети, а также сеть питания бытовых потребителей объединены, такие значения тока однофазного замыкания можно отнести к опасным.

2. Принцип действия и конструкция защитных устройств

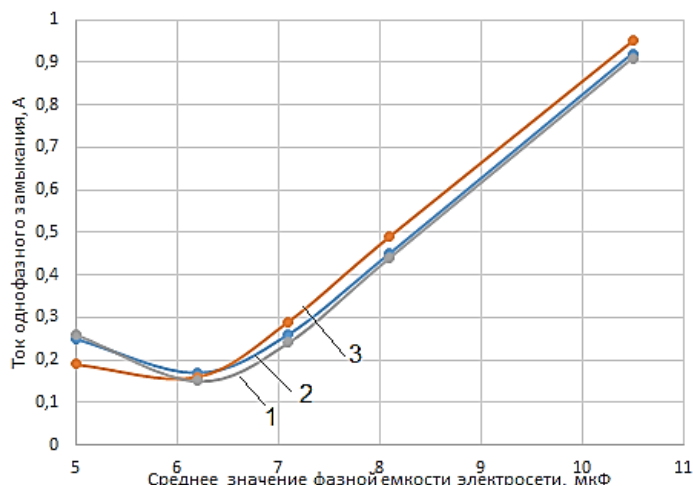
Защитные устройства, испытанные на УПС, представляют собой компенсаторы, в которых индуктивности настраиваются в резонанс с общей емкостью сети. В результате токи однофазного замыкания могут быть значительно уменьшены.

Включение компенсирующей индуктивности, предусматривающей увеличение «полного сопротивления» корпусной изоляции бортовых электроустановок и уменьшения таким образом, токов ОЗ до безопасных уровней. Среди них можно выделить два основных вида – с компенсатором в нейтрали и с пофазной компенсацией. Новизна обоих способов защиты подтверждена патентами на изобретение [2, 3]. Попытки разработки устройств, реализующих первый способ компенсации токов ОЗ в судовых электросетях, предпринимались и ранее [4]. Подобное устройство было успешно испытано в процессе длительной эксплуатации электросети действующего судна [5]. Однако, как было показано в [6], схема с пофазной компенсацией оказалась предпочтительнее.

Принцип пофазной компенсации заключается во включении между каждой фазой и корпусом судна три одинаковые части совокупного компенсатора. Устройства, реализующие такую компенсацию, потребовали разработки новой методики выбора их элементов и их проектирования с учетом особенностей эксплуатации. Например, расчет дросселя, входящего в состав компенсатора, должен приводить к результату, удовлетворяющему целому комплексу важных требований. Он включает в себя выбор типоразмера и материала сердечника, определение параметров обмотки в виде марки и сечения обмоточного провода и числа витков в катушке, определение температуры его нагрева за счет потерь в стали и обмотках, вычисление коэффициента формы тока дросселя, его весо-габаритных и стоимостных показателей и др. В рамках разработки устройств компенсации емкостных токов однофазных замыканий на корпус все перечисленные виды расчетов были проведены с учетом представленных выше результатов изменения фазных емкостей электросетей и коэффициента их несимметрии, зафиксированных в электросетях УПС.

Эффективность разрабатываемых устройств предварительно проверена на компьютерной и физической моделях. При моделировании регистрировались V-образные характеристики сетей, которые представляют собой зависимости $I_{O3Г} = f(C_A, C_B, C_C)$. Характеристики снимались при напряжении сети 220 и 380 В, при одинаковых коэффициентах несимметрии $k_{нес} = \left| \frac{C_A + a^2 C_B + a C_C}{C_A + C_B + C_C} \right| 100\%$. На таких характеристиках отражается способность сетей, работающих с защитными устройствами, уменьшать ток I_{O3} до некоторых минимальных значений по мере увеличения их фазных емкостей C_A, C_B, C_C .

Построение V-образных характеристик неоднократно проводилось для всех изготовленных защитных устройств как при наличии фиксированной несимметрии фазных емкостей сети на испытательном стенде, так и при ее отсутствии. При наличии несимметрии фазных емкостей сети во время проведения предварительных и последующих испытаний защитных устройств их настройка осуществлялась для каждой фазы в отдельности. Пример построения V-образных характеристик сети с компенсатором, подготовленным для судна «Крузенштерн» и снятой при различных регулируемых состояниях дросселя и симметричных емкостях приведен на рисунке 5.



1 – ток при замыкании фазы А, 2 – ток при замыкании фазы В, 3 – ток при замыкании фазы С
 Рис. 5. V-образные характеристики изготовленного защитного устройства при замыканиях каждой из фаз

С учетом полученных V-образных характеристик, а также параметров бортовых электросетей осуществлялся контроль и подстройка параметров при изготовлении компенсаторов токов ОЗ.

3. Результаты испытаний устройств

На рисунках 6, 7 представлены результаты испытания устройства в электросети УПС «Крузенштерн». Измерения проводились во время стоянки судна в порту, при питании от собственной электростанции.

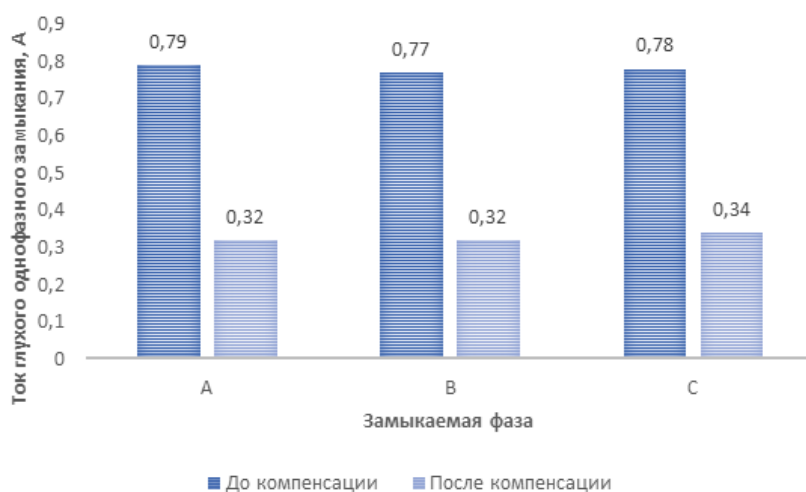


Рис. 6. Результаты испытаний устройств на УПС «Крузенштерн» при максимальном количестве включенных кабелей

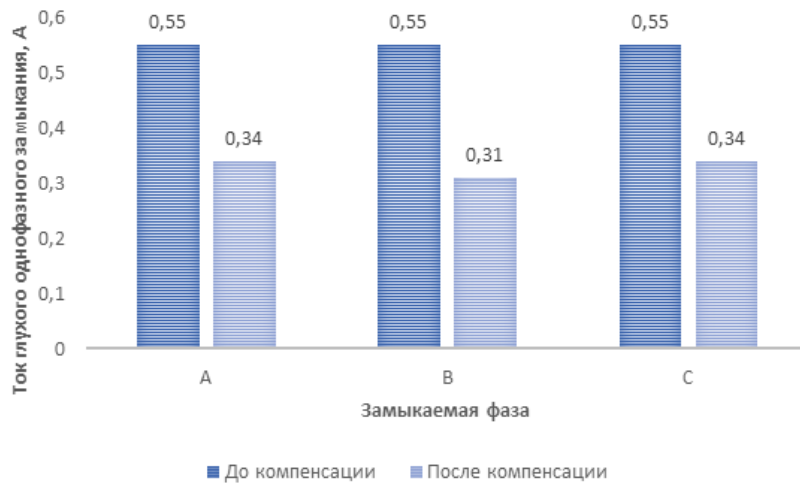


Рис. 7. Результаты испытаний устройств на УПС «Крузенитерн» при минимальном количестве включенных кабелей

Как видно из рисунков 6 и 7, при изменении конфигурации электросети от состояния, когда включено наибольшее возможное количество кабелей, к состоянию, когда включено наименьшее количество кабелей, токи ОЗ изменились на 30 %, а степень несимметрии от 1.48% до 0. В обоих состояниях электросети устройство позволило обеспечить безопасные значения токов. При максимальных фазных емкостях электросети токи ОЗ снизились на 57%, 58%, 56.4% для фаз А, В и С соответственно. При минимальных значениях фазных емкостей снижение токов ОЗ произошло на 38.2%, 43,6% и 38,2% для фаз А, В и С соответственно.

Ниже на рисунке 8 представлены результаты измерений токов ОЗ, проведенных в бортовой электросети УПС «Седов» перед включением устройства и после этого.

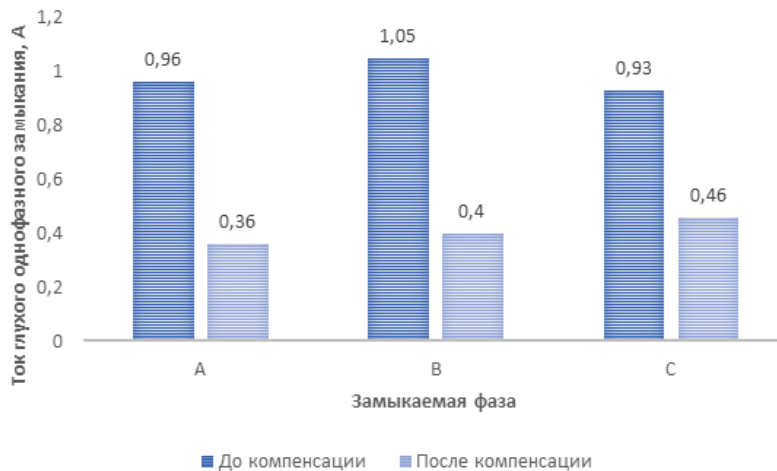


Рис. 8. Результаты испытаний устройства в электросети УПС «Седов»

Как видно из рисунка 8 ток ОЗ до подключения устройства к электросети в фазе В достигал величины 1.05 А. При этом его значение в фазах А и С составило 0,96 А и 0,93 А соответственно. Отклонение значений токов друг от друга свидетельствуют о некоторой несимметрии фазных емкостей электросети. Измеренным значениям токов ОЗ соответствует степень несимметрии, равная 7.35%.

После подключения устройства к электросети токи ОЗ снизились до безопасных значений 0.36 А, 0.4 А и 0.46 А в фазах А, В и С соответственно. Таким образом снижение токов произошло на 62.5% для фазы А, на 61.9% для фазы В и 50.5% для фазы С. Включение и отключение дополнительных кабелей в условиях подготовки судна к рейсу не привело к существенному изменению токов ОЗ.

Вывод

Разрабатываемые устройства для безопасности учебных парусных судов успешно прошли испытания в их электросетях. Испытания подтвердили способность предложенных технических средств обеспечивать безопасные токи ОЗ даже при имеющейся несимметрии фазных емкостей электросетей. Кроме того, продемонстрировано, что изменение величин фазных емкостей в электросети на 30%, не привело к превышению токами ОЗ безопасных значений после подключения к электроустановке защитного устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Благинин, В. А. Варианты защиты судовых электросистем от однофазных замыканий/ В.А. Благинин, И.Е. Кажекин// Безопасность жизнедеятельности. - 2010. - № 3. - С. 23-30
2. Способ ограничения перенапряжений в электросетях: пат. 2342756 Рос. Федерация МПК H02H 9/00 / В.А. Благинин, И.Е. Кажекин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет»: № 2007149444/09; заявл. 27.12.07; опубл. 27.12.08. Бюл. №36
3. Способ компенсации токов однофазного замыкания: пат. 2653510 Рос. Федерация МПК H02H 9/08 H02H 3/16 / И.Е. Кажекин, В.А. Благинин, В.М. Юсып; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»: № 2016151532 заявл. 26.12.16; опубл. 10.05.18. Бюл. №13
4. Брунав, Я.П. Судовые электрические сети/ Я.П. Брунав, Ю.Г. Татьянченко. – Л., 1982. – 232 с.
5. Благинин, В. А. Результаты длительных натуральных испытаний устройства защитного заземления нейтрали для судовых электросистем / В. А. Благинин, И.Е. Кажекин, В.М. Юсып и др. // Вестник Мурманского государственного технического университета. - 2015. - № 1. - С. 124-129
6. О возможности пофазной компенсации токов однофазных замыканий в судовых электро-системах/ И.Е. Кажекин, В.А. Благинин, С.Н. Рагозин, В.М. Юсып//Материалы VII Международного Балтийского морского форума: в 6 т.. 2019. С. 180-187.

PROTECTIVE DEVICES FOR THE SAFETY OF TRAINING SAILING VESSELS "KRUZENSTERN" AND "SEDOV"

¹Kazhekin Ilya Evgenievich, Cand. Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment for Ships and Electric Power Industry

²Blaginin Vladimir Anatolyevich, Cand. technical sciences, Associate Professor at the Department of the device and the survivability of the ship

³Ragozin Sergey Nikolaevich, Chief Engineer of Autonomous Electric Systems LLC

¹Volsky Viktor Anatolyevich, student of the Faculty of Shipbuilding and Energy

¹ FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russia, e-mail: kazhekin@mail.ru

²Branch of the Naval Research Center of the Russian Navy "Naval Academy named after N. G. Kuznetsov" (Kaliningrad), Kaliningrad, Russia, e-mail: npp-met@rambler.ru

³OOO "Autonomous electrical systems", Kaliningrad, Russia, e-mail: snragozin@mail.ru

The paper describes some of the results of research carried out in the electrical systems of the training sailing ships "Kruzenshtern" and "Sedov". In the course of the research, for the first time, devices were tested, jointly developed by «AES» and KSTU, to increase the fire and electrical safety of frame currents arising from single-phase short circuits to the case or single-phase touch of people to on-board electrical equipment. The severity of the consequences of such events is determined by the magnitude of the currents that arise. The test results confirmed the effectiveness of the developed protective devices of KSTU as a means of reducing the currents of single-phase short circuits and touching to their safe values.

ИМПУЛЬСНОЕ РЕЗИСТИВНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ В СУДОВЫХ И ПОРТОВЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ

Качесов Владимир Егорович, профессор кафедры техники и электрофизики высоких напряжений

Финашин Роман Андреевич, аспирант кафедры техники и электрофизики высоких напряжений

ФГБУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»,
г. Новосибирск, Россия, e-mail: romanfinashindoc@mail.ru

Разработано импульсно-резистивное заземление (ИРЗ) нейтрали, позволяющее ограничить дуговые перенапряжения в электрических и судовых сетях высокого и низкого напряжения. Проведена оценка энергии, выделяемой в нейтральном (нейтрале-заземляющем) резисторе, а также уровня производной напряжения в нейтрали электрической сети при различных режимах работы ИРЗ. Приведён расчёт амплитуды высших гармонических составляющих напряжения на выходе дифференцирующей цепи для отстройки устройства от ложных срабатываний при устойчивом замыкании на землю.

Наиболее частым видом нарушения нормального режима в электрических сетях (ЭС) с неэффективно заземленной нейтралью являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), которые в основном имеют дуговой характер.

По отношению к другим видам замыканий ОЗЗ занимают диапазон от 30% до 80%. Вызываемые таким видом замыкания повреждения сопровождаются неустойчивым (перемежающимся) горением заземляющей дуги, что приводит к дуговым перенапряжениям (ДП) с кратностями $3,1 \dots 3,2 U_{ф.м}$ ($U_{ф.м}$ – максимальное фазное напряжение ЭС). Особенно часто такие перенапряжения возникают в ЭС с изолированной нейтралью, распространённых в портах и многих судах.

Большая распространённость ЭС с изолированной нейтралью связана с возможностью передачи электроэнергии даже при замыкании одной из фаз на землю, малыми ёмкостными токами замыкания, а также дешевизной и простотой. Напротив, длительные ДП возможные в таких сетях, их негативное влияние на фазную изоляцию оборудования (особенно электродвигателей), а также возможность перехода ОЗЗ в междуфазное замыкание приводят к необходимости прерывать электроснабжение потребителей.

При таких отключениях электропотребитель может понести значительные экономические потери (например, из-за недотпуска продукции), а в случае судовых ЭС возможно отключение ответственных механизмов, отвечающих за живучесть судна.

Основные методики защиты изоляции и оборудования ЭС от негативного воздействия перенапряжений должны в первую очередь сократить их длительность и амплитуду.

Для снижения дуговых перенапряжений наряду с дугогасительным реактором (катушкой Петерсена) [1] применяют высокоомное резистивное заземление нейтрали [2]. Однако у данного способа существует недостаток - увеличение установившегося тока в месте замыкания на землю и, как следствие, - снижение пожаро- и электробезопасности, а также дополнительные технологические потери в нейтральном резисторе.

Решение данной проблемы было найдено на кафедре ТЭВН в НГТУ. Способ импульсного резистивного заземления принципиально меняет подход к заземлению нейтрали распределительной сети [3]. Аналогичный подход предложен в работах Рыжковой Е.Н, например в [4].

Особенностью работы импульсного резистивного заземления является возможность работы сети в нормальном режиме и в режиме устойчивого ОЗЗ с изолированной нейтралью, а при единичном зажигании заземляющей дуги или при неустойчивом её горении – в режиме высокоомного резистивного заземления.

В режиме устойчивого однофазного замыкания на землю (УОЗЗ), когда напряжения на неповрежденных фазах близки к линейному значению, сеть возвращается обратно на работу с изолированной нейтралью. Характерные кривые токов и напряжений обоих режимов представлена на рис. 1.

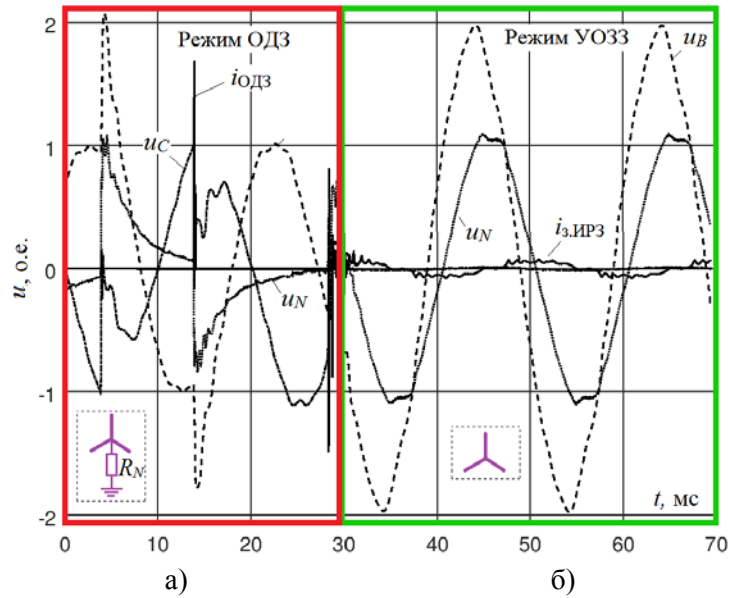


Рис.1. Осциллограммы, полученные при физическом моделировании напряжений и тока в месте замыкания [6]: а) – при ОДЗ (к нейтрали подключается НЗР) б) – при УОЗЗ (НЗР отключился от нейтрали)

Нейтрале-заземляющий резистор R_N (НЗР) может быть подключён к нейтрали сети при помощи управляемого ключа. Причём в случае многократного высокочастотного перемежающегося зажигания дуги (дуговым неустойчивом замыкании на землю) – он подключается, при каждом её зажигании (рис. 1, а), а его отключение происходит при переходе через нулевое значение тока, протекающего в НЗР. В случае прекращения неустойчивого горения дуги или при переходе замыкания в металлическое (УОЗЗ) НЗР автоматически отключается от нейтрали до следующего неустойчивого дугового замыкания. При этом ЭС не прерывает электроснабжение и продолжает работать во время поиска и устранения дефектного участка. (рис. 1, б).

В сравнении с постоянным высокоомным резистивным заземлением найтрали, основным достоинством ИРЗ является снижение ущерба, наносимого проводникам (провода, шины, места ихсоединения) и фазной изоляции за счёт уменьшения тока в установившемся режиме ОЗЗ в месте замыкания, а также в снижении потерь в самом НЗР.

При $K_R=I_R/I_C=1$ (I_R и I_C – активный и емкостный токи в месте замыкания, K_R - резистивый коэффициент компенсации), постоянная времени с которой ёмкость сети разряжается через НЗР равна $\tau=1/\omega$. При условном сопротивлении НЗР $R_N=1$ Ом, ток в резисторе равен напряжению. Тогда, выделяемая за период времени π/ω относительная энергия (1), после самогашения заземляющей дуги, равна:

$$E_{ИРЗ} = \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} (U_{N0}e^{-\omega t})^2 dt = \frac{U_{N0}^2(1 - e^{-2\pi})}{2\omega} \cong \frac{U_{N0}^2}{2\omega}, \quad (1)$$

где U_{N0} – теоретическое максимальное начальное напряжение на нейтрали сети по отношению к фазному максимальному значению ($U_{\phi,m}$) после самогашения заземляющей дуги (u_N на рис. 1, а).

При устойчивом замыкании на землю (горение дуги стабильно) и когда нейтральный резистор подключен постоянно, напряжение на нейтрали и ток в резисторе изменяются по синусоидальному закону (рис. 1, б). При напряжении в сети равном $U_{\phi,m}=1$ о.е. относительная энергия выделяемая на НЗР может быть рассчитана по формуле (2) как:

$$E_R = \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \sin^2 \omega t dt = \frac{\pi}{2\omega}, \quad (2)$$

Отношение энергий в различных режимах определяется согласно формуле (3):

$$\frac{E_{ИРЗ}}{E_R} = \frac{U_{N0}^2}{\pi}. \quad (3)$$

Для реальной сети начальное смещение напряжения на её нейтрали в относительных единицах, в среднем может составлять $U_{N0} \approx 1$ [5]. На рис. 1. приблизительно показан вид кривой (u_N) амплитуда которой заметно меньше теоретически максимального значения в силу потерь в сети и в дуговом канале заземляющей дуги.

Поэтому согласно (3), требуемая мощность заземляющего (нейтрального) резистора R_N при импульсном заземлении может быть на менее ~32% по отношению к мощности, требуемой при его непрерывном включении.

Соотношение энергий $\frac{E_{ИРЗ}}{E_R}$ может быть ещё меньше при длительном горении заземляющей дуги. Такое возможно благодаря уменьшению электрической прочности изоляции в месте повреждения. Напряжение пробоя и соответственно начальное напряжение на нейтрали сети снижаются, но при условии, что сохраняется пауза между пробоями - около одного полупериода промышленной частоты. При частых пробоях изоляции (т.е. при малых напряжениях пробоя) с паузами менее полупериода, отношение $\frac{E_{ИРЗ}}{E_R}$ повышается.

Устройство импульсного резистивного способно «отличать» устойчивое и неустойчивое ОЗЗ, благодаря чему возможно управлять режимом резистивного заземления нейтрали ЭС.

Скорость изменения напряжения на нейтрале (производная) является определяющим фактором на который реагирует ключ ИРЗ. При устойчивом ОЗЗ (УОЗЗ) когда горение дуги устойчиво и сопротивление дугового канала не меняется в широких пределах или при хорошей гальванической связи повреждённой фазы с землёй, можно считать что напряжение на нейтрали ЭС синусоидально. Тогда его производная du_N/dt равна произведению угловой частоты (ω) на максимальное фазное напряжение $U_{\phi.m.}$.

Учитывая, что изменение напряжения происходит по синусоидальному закону: $u_N(t) \cong U_{\phi.m.} \sin(\omega t)$, производная равна $du_N(t)/dt \cong U_{\phi.m.} \omega \cos(\omega t)$, или в относительных единицах (4), полагая $U_{\phi.m.} = 1$ о.е., она будет:

$$\frac{du_N(t)}{dt} \cong \omega \cos(\omega t). \quad (4)$$

При УОЗЗ, когда частота сети составляет 50 Гц, максимальная величина производной находится в диапазоне $du_N/dt_m = \omega$, т.е. равна $\sim 100\pi$ о.е./с.

При ОДЗ, скорость изменения напряжения на нейтрали много больше чем при устойчивом. Напряжение на нейтрали изменяется скачкообразно при каждом зажигании дуги что обусловлено наличием широкого спектра высших частот свободных колебаний, вызванных пробоями изоляции.

Приближенную оценку производной напряжения на нейтрали электрической сети для простейшей трехфазной сети без учёта нагрузки (рис. 2, а), может быть получена с помощью эквивалентной схемы замещения, приведенной на рис. 2, б.

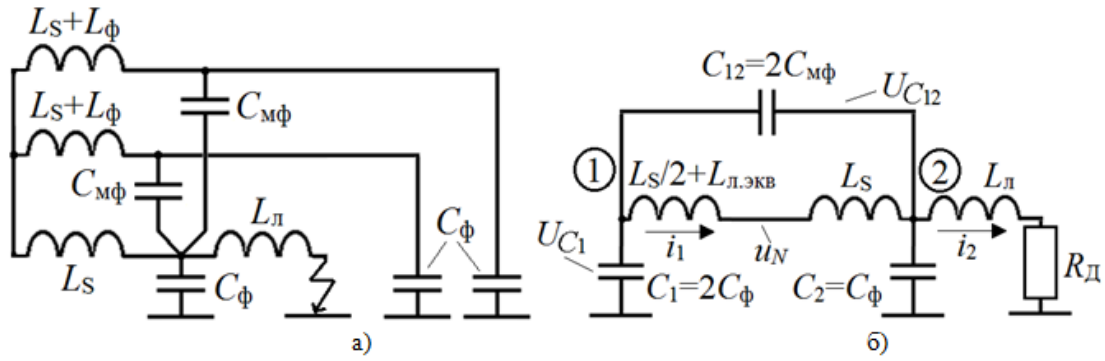


Рис. 2. Простейшая трехфазная ЭС с изолированной нейтралью (C_ϕ $C_{мф}$ – фазная и междуфазная ёмкость) – а); двухчастотная схема замещения ($R_д$ – сопротивление канала дуги) – б).

Индуктивность питающего трансформатора L_S , которая может быть определена согласно формуле (5), индуктивность «здоровой» L_ϕ и поврежденной фазы L_ϕ , а также эквивалентная индуктивность линии $L_{л.эКВ} = L_\phi/2$.

$$L_S = \frac{U_k \% U_{ном}^2}{100S\omega}, \quad (5)$$

где S – мощность питающего трансформатора, $U_{ном}$ – номинальное напряжение, а U_k – напряжение короткого замыкания, ω – угловая частота сети.

Система ОДУ (6), описывающая свободный переходный процесс в двухчастотном контуре приведённом на рис. 2, (схеме замещения ЭС в режиме ОДЗ) имеет вид:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{C_\phi}{K_C} & \frac{2C_{мф}}{K_C} \\ 0 & 0 & \frac{-3C_\phi}{K_C} & \frac{2C_\phi}{K_C} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{L_\phi} & \frac{-1}{L_\phi} & 0 & \frac{-R_д}{L_\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{C1} \\ u_{C12} \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $K_C = 6C_\phi C_{мф} + 2C_\phi^2$, u_{C1} u_{C12} – напряжения на ёмкостях, а вектор начальных условий равен:

$\mathbf{X}_0 = [-0.5 \ 1.5 \ 0 \ 0]^T$. Для случая первичного пробоя фазной изоляции в момент положительного максимума сетевого напряжения.

Решение системы дифференциальных уравнений можно численно выполнить методом трапеций. Производная du_N/dt вычисляется от напряжения на нейтрали, представляемого согласно (7) как:

$$u_N(t) = u_{C1} + u_{C12} \frac{0.5L_S + L_{л.эКВ}}{1.5L_S + L_{л.эКВ}}. \quad (7)$$

Производная напряжения (7) на нейтрали ЭС после ОДЗ зависит от индуктивно-ёмкостных параметров ЭС, мощности питающего трансформатора и удалённости места замыкания от центра питания. В судовых электрических сетях индуктивности питающих фидеров в силу их ограниченной длины относительно малы, поэтому динамика изменения производной в нейтрали ЭС проявляется в меньшей степени по сравнению с распределительными ЭС среднего напряжения (6-35 кВ) (особенно воздушными).

Расчётные значения скорости изменения напряжения du_N/dt при варьировании индуктивности поврежденной фазы/фидера ($L_\phi = [2.5; 75]$ мкГн) пропорциональной расстоянию до места замы-

кания применительно к параметрам судовой ЭС с индуктивностью источника $L_s=0.26$ мГн ($S=2 \times 320=640$ кВт) и фазной емкостью $C_\phi=10$ мкФ приведены на рис. 3. [6]. Максимальное значение производной достигло 27000 о.е./с при неудаленном ОЗЗ (около 10 м от узла питания) и снизилось до 11000 о.е./с при удаленном (~300 м от центра питания). Расчетная кратность превышения производной du_N/dt в установившемся режиме замыкания (314 о.е./с) составляет 35-86, что позволяет уверенно различать перемежающиеся ОЗЗ, когда должно работать ИРЗ.

В работе [5] приведено описание опыта искусственного дугового замыкания (ОДЗ) проводимого в 2001 году в действующей кабельной ЭС в г. Барнауле. В работе приведены осциллограммы фазных напряжений (на шинах низшего напряжения подстанции 110/10 кВ).

При мощности источника питания (трансформатора) $S=40$ МВА, ёмкостной ток ОДЗ составил $I_C=19,4$ А.

На основании данных приведённых в статье, напряжение на нейтрали ЭС составило около $1,4 U_{\phi.m}$, а его производная была в интервале $0,8 \dots 1,6 \cdot 10^5$ кВ/с или по отношению к указанному сетевому напряжению – 9220...18840 о.е./с. Хотя параметры распределительной ЭС 10 кВ заметно отличаются от выше рассмотренной судовой ЭС, превышение максимальной производной соответствующего значения на промышленной частоте составляет 29-60 раз, что сопоставимо с выше приведенными теоретическим оценками.

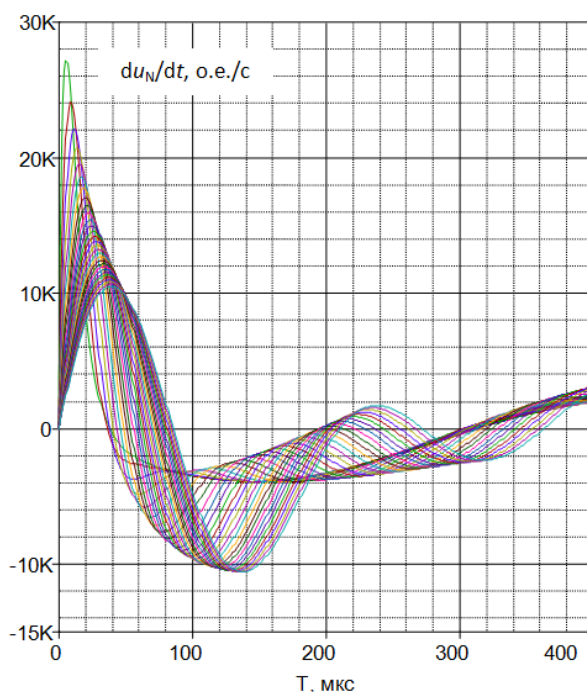


Рис. 3. Моделирование производной напряжения на нейтрали судовой ЭС при варьировании индуктивности поврежденной фазы (множитель по оси ординат $K=1000$)

Техническая реализация ИРЗ не сложна благодаря высоковольтным полупроводниковым ключам. Наиболее перспективно использование симметричных тиристоров (симисторов) в качестве коммутатора, подключающего резистор в нейтрали ЭС к заземляющему устройству (корпусу судна). В силу малого рабочего напряжения и малого тока замыкания для ИРЗ на судах могут применяться широко распространенные одиночные симисторы.

Запускающий ток (импульс управления) симистора может быть сформирован с помощью дифференцирующей запускающей цепочки (ДЗЦ). Она может быть реализована последовательно соединенными RC (рис. 4,а) или LC (рис. 4, б,в) элементами которые размещены между нейтральной точкой электрической сети и заземлителем (корпусом судна).

При резком скачке напряжения на нейтрали ЭС, RC или LC цепь выделяет его производную du_N/dt . Далее через высокочастотный многообмоточный трансформатор происходит разделение сигнала на отдельные импульсы управления, которые поступают на управляющие электроды последовательно соединённых симметричных тиристоров – симисторный ключ.

Запускающий импульс с ДЗЦ может быть усилен посредством простейшего узла усиления, однако в таком случае устройство потребует дополнительный источник питания.

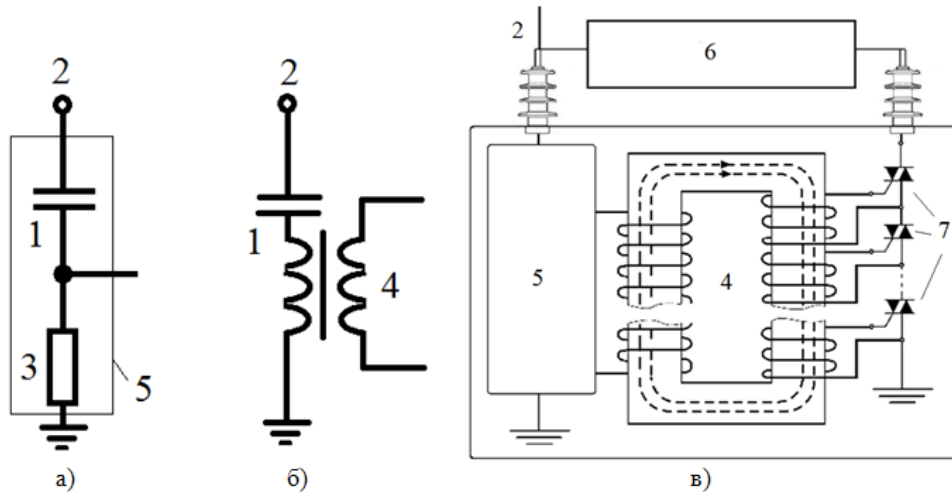


Рис. 4. Различные виды дифференцирующих цепочек ИРЗ: RC – цепь (а); LC – цепь (б); принципиальная схема устройства ИРЗ (в); [дифференцирующий конденсатор (1), к нейтрали ЭС (2), резистор нижнего плеча (3), индуктивность запускающего трансформатора (4), ДЗЦ (5), НЗР (6), полупроводниковый симисторный ключ (7)]

Время включения НЗР много меньше полупериода промышленной частоты, поэтому можно допустить что нейтральный резистор подключается практически мгновенно к нейтрали электрической сети при каждом возникновении замыкания. Процесс подключения нейтрале-заземляющего резистора к заземляющему устройству (корпусу судна) можно разделить на два основных интервала. От момента возникновения ОДЗ до момента, когда напряжение на нейтрали сети поднимется выше некоторого порогового значения достаточного для открытия цепочки симисторов; от начала перехода всей цепочки симисторов в проводящее состояние до начала протекания основного тока в НЗР.

В судовых ЭС малого напряжения (230, 400 В) ИРЗ может быть реализовано простейшим образом – посредством применения ДЗЦ на основе RC-цепи и одиночного симистора (см. рис.4,а). Прототип такой ЭС с ИРЗ, реализованной в виде лабораторной установки, используется в учебном процессе в НГТУ [6].

Очевидно, что устройство ИРЗ должно быть отстроено от ложного срабатывания в нормальном режиме работы и при устойчивом ОЗЗ. Устройство ИРЗ может сработать в таком режиме из-за наличия в спектре напряжения на нейтрали ЭС высших гармонических составляющих. Частоты таких составляющих (например, от 21 гармоники и выше) могут быть сопоставимы с частотами собственных колебаний электрической сети при ОЗЗ, однако их амплитуды значительно меньше. Согласно ГОСТ о качестве электрической энергии [7], в нормальном режиме работы ЭС 6-35 кВ, коэффициент гармонических составляющих напряжения должен быть менее 5%, а доля составляющих выше 21 гармоники не должна превышать 0.2%.

Произведём оценку максимального значения производной в режиме УОЗЗ используя, например, полученных в работе [3] осциллограммы фазных напряжений распределительной ЭС.

На рис. 5, а, изображен спектральный состав напряжения на нейтрали сети полученного после анализа имеющихся в работе [3] данных. На рис. 5, б, показаны производные высших гармоник, составляющих напряжение на нейтрали ЭС в относительных единицах, приведённых к промышленной частоте (100π рад/с). Очевидно, что производные увеличиваются пропорционально произведению амплитуды на номер гармоники.

Согласно рисункам, 5-ая (250Гц) и 7-ая (350 Гц) гармоники вносят наибольшее искажение в форму напряжения - доля 7-й гармоники составляет 0.025 о.е., а 5-ой - 0.015 о.е.

Однако, уровень производной составил всего $\sim 0,25$ о.е.

При повышении напряжения до наибольшего рабочего и ввода коэффициента запаса $K_{н.р.}=1.2$, максимальная производная составит: $du_N/dt=1.2(1+0.25)=1.5$ о.е.. В качестве порога срабатывания устройства по производной можно принять порог уставки - $K_{уст}=2K_{н.р.}=2.4$.

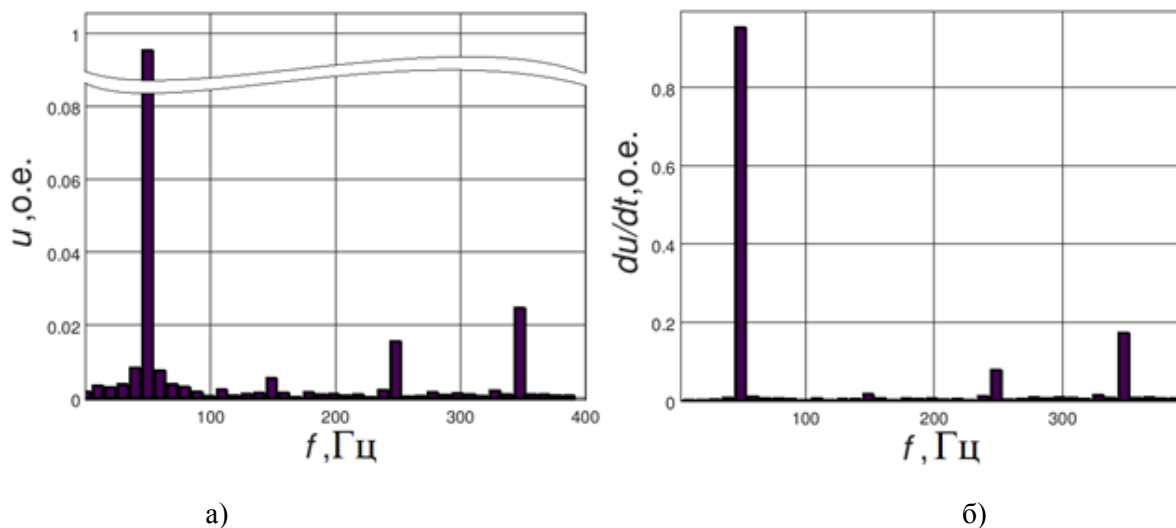


Рис. 5. Гистограмма спектра гармоник, составляющих напряжение на нейтрали электрической сети при ОЗЗ полученная на основании данных приведённых в [3] – а, Производные гармоник того-же спектра напряжения на нейтрали ЭС – б.

Область применения ИРЗ может включать в себя помимо электроустановок объектов морской техники электрические сети, относящиеся и к иным объектам морской индустрии: портовые сооружения, судостроительные и судоремонтные предприятия. Напряжение таких электросетей может достигать 6-10 кВ, а ток однофазного замыкания не требовать его компенсации. При этом такие объекты обладают весьма ответственными потребителями, например высоковольтными грузоподъемными двигателями, двигателями мощных рефрижераторов и насосов. Учитывая, что изоляция электрических машин наиболее подвержена воздействию перенапряжений (уровень фазной изоляции $\sim 3U_{ф.макс}$), а также постоянные воздействия повышенной влажности, обеспечение защиты изоляции такого электрооборудования без прерывания электроснабжения имеет большое значение не только с экономической точки зрения, но и для безопасности самих объектов, относящихся к морской индустрии.

Заключение

Импульсно-резистивное заземление нейтрали электрической сети позволяет снизить энергию, выделяемую в НЗР. Количество энергии выделенной в нейтральном резисторе при повторных зажиганиях дуги через каждый полупериод частоты 50 Гц меньше на $\sim 30\%$ по сравнению с режимом устойчивого ОЗЗ и постоянно включенном резисторе. Выделение энергии в НЗР уменьшается пропорционально снижению пробивного напряжения (электрической прочности) поврежденного участка и интервала времени между повторными зажиганиями.

Селективность работы ИРЗ обеспечивается гораздо большей производной (скоростью изменения) напряжения на нейтрали сети при ОДЗ, чем при УОЗЗ.

Возможность ложного срабатывания устройства импульсного резистивного заземления из-за сигнала с ДЗЦ, вызываемого высшими гармоническими составляющими при УОЗЗ, маловероятна из-за их малой амплитуды.

ИРЗ уменьшает требуемую мощность нейтрального резистора, а также его габариты, что немаловажно в связи с ограниченным пространством судна. Также в случае ОЗЗ электроснабжение потребителей не прекращается, что позволяет минимизировать экономические потери. Уменьшение тока замыкания в установившемся режиме, способствует лучшему дугогашению и самоустранению ОЗЗ, уменьшает вероятность перехода замыкания в междуфазное, увеличивает электро- и пожаробезопасность. Ограничение дуговых перенапряжений осуществляется так же, как и при постоянном подключении НЗР.

ИРЗ объединяет достоинства изолированной и резистивно заземленной нейтрали, что делает его применение в сетях с малыми ёмкостными токами ОЗЗ перспективным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Petersen W. Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss. ETZ, 38 (1917), Н. 47, -S. 553-555, Н. 48, - S. 564-566.
2. Ильиных М. В., Ширковец А.И., Кузьмин А. А. Исследование процессов при металлических и дуговых ОЗЗ в условиях резистивно заземлённой и изолированной нейтрали в сети 6 кВ ПС «Карьерная-2» ОАО «Разрез тугнуйский» // Горный информационно-аналитический бюллетень.- 2011.- № 12(4).
3. Патент на полезную модель: РФ № 117738 (от 23.12.2011), Н02Н9/00. Устройство заземления нейтрали трехфазной электрической сети/ В.Е. Качесов, А.Е. Петухов// БИ №18, 2012.
4. Патент на изобретение SU 1277294 А1, от 27.11.1984, Н02Н9/04. Устройство для защиты от дуговых перенапряжений в сети с изолированной нейтралью/ Рыжков В.П., Рыжкова Е.Н. // Бюл. №46.
5. Качесов, В. Е. О результатах мониторинга перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю в распределительных кабельных сетях [Текст] / В. Е. Качесов, В. Н. Ларионов, А. Г. Овсянников // Электрические станции. – 2002. – № 8. – С. 38–45.
6. Kachesov, V. E. Pulse-resistive neutral grounding of three-phase power network and its physical model [Текст] / V. E. Kachesov, R. A. Finashin, L. I. Tolstobrova // Actual problems of electronicinstrumentengineering (APEIE–2018). В 8 т. : тр. 14 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 2. – С. 259–263.
7. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – Введ. 2014–07–01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 18 с.

PULSE RESISTIVE GROUNDING IN SHIPBOARD AND PORT ELECTRICAL NETWORKS

Kachesov Vladimir Egorovich, Professor of the High Voltage Engineering
and Electrophysics Department

Finashin Roman Andreevich, postgraduate student of the High Voltage Engineering and
Electrophysics Department

"Novosibirsk State Technical University",
Novosibirsk, Russia, e-mail: romanfinashindoc@mail.ru

Pulse-resistive neutral grounding (PRG) has been developed. PRG allows to reduce arc overvoltage in electrical distribution and ship networks of high and low voltage. The assessment of the energy released on the resistor, as well as the level of the voltage derivative in the network neutral under different PRG operating modes was made. For detuning the device from false alarms with a stable ground fault, the calculation of the voltage amplitude of the higher harmonic components at the output of the differentiating circuit is given.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ НУЛЕВОГО ВЫБРОСА ПОРТА КАЛИНИНГРАД

¹ Никишин Андрей Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики

¹Харитонов Максим Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики

²Никитакос Никитас, prof., Department of Shipping, Trade and Transport

¹ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, Россия, e-mail: nikduke@klgtu.ru

²University of the Aegean, Греция, e-mail: n.nikitakos@aegian.gr

В статье дан анализ основных тенденций в области концепции порта нулевого выброса. Рассмотрены основные направления сокращения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от портовых операций. Дана оценка потенциала возобновляемой энергии в районе расположения объектов инфраструктуры порта Калининград. Рассмотрены особенности расчета системы распределенной генерации на основе фотоэлектрических панелей на примере Калининградского морского торгового порта.

Согласно стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года устойчивое функционирование объектов морской индустрии - одно из стратегических направлений развития экономики государства. Среди заявленных целей - обеспечение экологической безопасности морской среды и сохранения экосистем в Мировом океане при эксплуатации его ресурсов и пространств с учетом всех процессов природного и техногенного характера [1]. Её достижение, в том числе, будет включать в себя все более широкое использование возобновляемых источников энергии для снижения экологической нагрузки портов на окружающую среду.

Порты нулевого выброса, концепция и мировые тенденции

Считается, что морские порты являются важнейшими инфраструктурными активами и служат катализатором экономического роста региона. В мире наблюдается феноменальный рост морской торговли в целом и портовой индустрии в частности. За последние 20 лет общемировой объем морских перевозок увеличился более чем в 2 раза и в 2019 году составил более 11 млрд тонн [2]. С одной стороны, все это приводит к интенсивному развитию морских портов, с другой – к росту экологической нагрузки.

Как результат, с переходом в постиндустриальную эру, наблюдается изменение стратегии и приоритетов развития портов со все большим уклоном в сторону экологии и устойчивого развития. Это связано с тем, что экономические выгоды распространяются в том числе на другие регионы, а негативные последствия, особенно с точки зрения экологии, локализуются в портовом регионе [3].

Еще в 1992 г. Организация объединенных наций определила ключевые аспекты устойчивого развития портов в экономической, социальной и экологической сферах [4]. Сегодня на этих основаниях в сфере экологии формулируется концепция «зеленого» порта будущего или, как его еще называют, порта с нулевым выбросом, подразумевая, что выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ при эксплуатации портовой инфраструктуры будут сведены к нулю.

При этом единого подхода, какие условия должны быть выполнены, чтобы характеризовать порт как «зеленый» еще не выработано. В частности, ассоциация портов северо-восточной Азии в своей концепции «Эко-порт» среди прочих формулирует такие условия как: сокращение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от портовых операций, экономия энергии и использование максимальной энергоэффективности для портовых операций. Схожим образом, среди основных экологических приоритетов устойчивого развития европейского портового сектора первое и вто-

рое место занимают снижение выбросов парниковых газов и повышение эффективности энергопотребления [5,6]. Оба тренда связаны, эффективная эксплуатация портовой инфраструктуры очевидным образом приводит к снижению величины углеродного следа порта.

Отметим, что ежегодные выбросы только диоксида углерода от мирового морского судоходства составляют 1,12 млрд тонн и к 2050 г. ожидается их увеличение до 5 раз. Лидеры по объемам - США, Россия, КНР, Республика Корея и Япония [7]. Во всех вышеперечисленных странах, кроме России ведутся систематические исследования в этой области. Один из результатов - принятие в 2018 г. стратегии сокращения объема суммарных выбросов парниковых газов с морских судов на 50% к 2050 г.

Наиболее значимой целью устойчивого развития портовых городов является сокращение выбросов в порту, направленное на снижение возможных рисков для здоровья местного населения. Можно выделить две основные группы выбросов - от собственных операций портов и судовые выбросы у причала для обеспечения электроснабжения судов от вспомогательных двигателей. При этом вторые оцениваются десятикратно выше, и потенциал их снижения существенно более значим. Основные инновационно-технические мероприятия по снижению выбросов в обеих группах и трансформации в порт нулевого выброса включают в себя:

- использование возобновляемых источников для обеспечения собственного электропотребления порта и судов во время их стоянки в порту;
- перевод максимального количества операционных и технологических процессов в порту на использование электроэнергии и возобновляемых топлив, например – электротранспорт и водород;
- повышение эффективности эксплуатации существующих систем электроснабжения.

Последняя группа мероприятий в основном связана со снижением потерь электроэнергии, и их можно назвать традиционными (рис. 1), все они подробно описаны в соответствующей литературе [8]. Суммарный их вклад в снижение выбросов, как указано выше невелик, тем не менее эффективная работа системы электроснабжения без их реализации невозможна.



Рис. 1. Мероприятия по снижению потерь электроэнергии в системах электроснабжения

Второй блок в основном включает в себя внедрение технологического электротранспорта: маневровые локомотивы, погрузчики, перегружатели, грузовые и легковые автомобили. Для особо крупных и тяжелых, но при этом подвижных потребителей, например, буксиров и порталных погрузчиков, которые весьма трудно раскатать электротягой источником возобновляемых и надежных энергоресурсов мог бы стать водород, производимый непосредственно на месте.

Подключение к береговому электроснабжению судов у причала – еще один способ, который может значительно снизить выбросы местных загрязнителей воздуха и парниковых газов от

вспомогательных двигателей в порту. В России при этом руководствуются требованиями РТМ 212.0051-75 «Энергоснабжение судов от береговых сетей». На рис. 2 дается пример схемы электропередачи «берег-судно» [9].

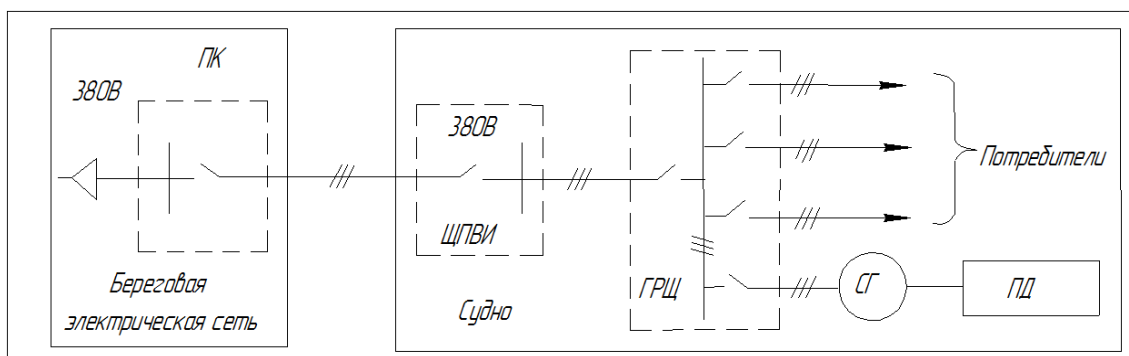


Рис. 2. Система электропередачи «берег – судно»:

ПК – питательная колонка для присоединения судов; ЩПВИ – щит питания от внешнего источника; ГРЩ – главный распределительный щит; СГ – синхронный генератор; ПД – приводной двигатель

Потенциал всех вышеперечисленных мероприятий в большой степени зависит от способа получения электроэнергии. Энергия, получаемая портом из региональной энергосистемы, вырабатывается на традиционных электростанциях за счет сжигания ископаемого топлива. При генерации электричества за счет ветра, солнечных панелей и другого рода альтернативных источников, размещенных в акватории или на территории порта можно получить значительное сокращение выбросов парниковых газов [10]. При этом, приближение источников электроэнергии к центрам нагрузок повышает энергоэффективность системы электроснабжения порта в целом.

Оптимальная совместная работа вышеперечисленных систем возможна при их объединении с использованием технологий умных сетей, как агентов, работающих в составе микрогрид системы электроснабжения порта. Принципиальная схема связей объектов в составе такой системы приведена на рис. 3.



Рис. 3. Принципиальная схема концепции микрогрид системы электроснабжения порта

Основой питания являются возобновляемые источники энергии излишки которой могут запасаться в системах накопления электроэнергии или использоваться для производства водорода, который в дальнейшем может применяться для питания технологических процессов напрямую, через топливные элементы или в составе синтетических топлив. Подключение к региональной энергосистеме обеспечивает необходимый уровень надежности электроснабжения потребителей, но не является основным источником электроэнергии. Распределение потоков энергии и обеспечение оптимальных режимов эксплуатации системы контролируется автоматизированной системой управления. При этом потребители также являются активным агентом системы микрогрид,

для чего в их системе управления реализуются функции управления спросом [11]. С этой точки зрения большой интерес представляет анализ перспектив использования возобновляемых источников электроэнергии для обеспечения нужд электроснабжения порта Калининград.

Потенциал энергии ветра

Порт Калининград находится в ведении Северо-Западного бассейнового филиала ФГУП «Росморпорт» и является самым западным портом России. Основы инфраструктуры порта составляют терминалы для приемки судов, расположенные на побережье Калининградского морского канала, а так же в г. Балтийск, г. Светлый и г. Калининград.

Ветроэнергетический потенциал, главным образом, определяется средней скоростью ветра на высоте, соответствующей параметрам ветроэнергетической установки. Оценка средней скорости ветра выполнена для территории порта Калининград на основе анализа данных информационной системы [12]. На рис. 4 в фиктивных цветах представлены данные о средних скоростях ветра на высоте 50 и 100 м в районе расположения объектов инфраструктуры порта (отмечены белым цветом). Обобщенные данные по отдельным прибрежным районам приведены в таблице 1.

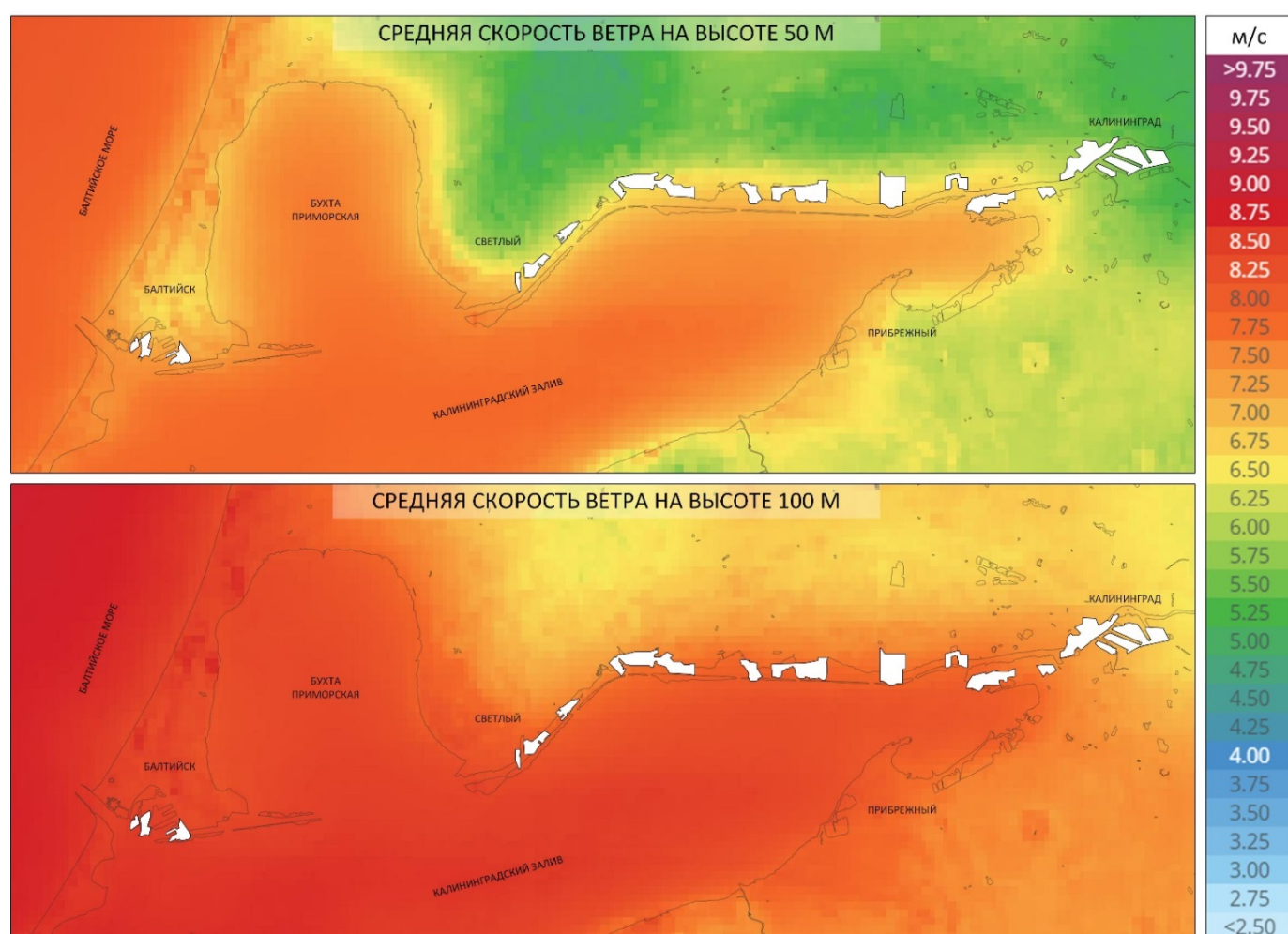


Рис. 4. Карта средней скорости ветра в районе расположения терминалов порта Калининград

Таблица 1
Данные о средней скорости ветра в районе расположения порта Калининград

Средняя скорость ветра, м/с	г. Балтийск	г. Светлый	г. Калининград	Морской канал
на высоте 50 м	7,65	7,18	5,86	7,21
на высоте 100 м	8,57	8,13	7,21	8,06

Анализ приведенных данных показывает, что обобщенная для района расположения порта Калининград средняя скорость ветра составляет 7 м/с (50 м) и 8 м/с (100 м). Для оценки эффективности функционирования промышленно выпускаемых ветроэнергетических установок (ВЭУ) в заданных условиях был проведен анализ рабочих характеристик современных ВЭУ российского (ВДМ-техника) [13] и зарубежного (Enercon) [14] производства (рис. 5). При наиболее характерной форме рабочей характеристики (ВЭУ Enercon) в диапазоне скоростей 7-8 м/с использование установленной мощности ВЭУ не превышает 40%. В случае инновационной российской разработки VDM-30 использование установленной мощности в заданном диапазоне скоростей достигает 80%. Однако ось ступицы ветроколеса данной установки располагается на высоте 18 м, что соответствует средней скорости ветра 6,5 м/с [12].

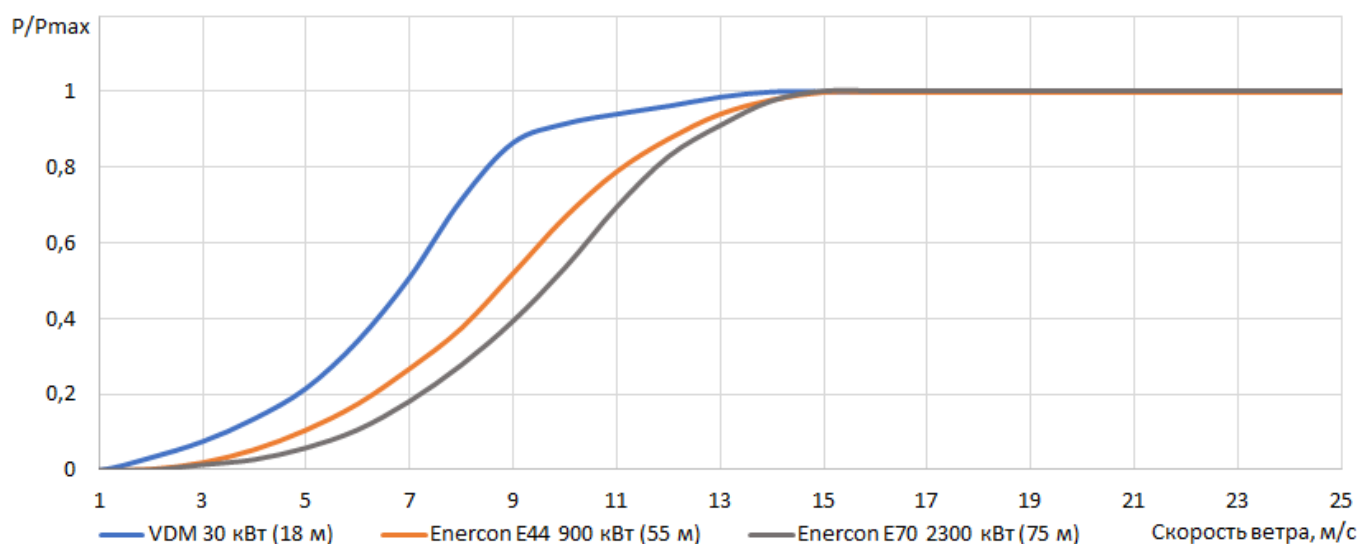


Рис. 5. Сопоставление рабочих характеристик ВЭУ с различной мощностью и высотой ступицы

Таким образом, можно сделать вывод, что в районе расположения терминалов порта Калининград имеется доступный для освоения потенциал энергии ветра, однако с учетом характеристик современных ВЭУ не будет обеспечено полное использование установленной мощности генерирующего оборудования. В то же время с позиции концепции микрогрид и распределённой генерации перспективным можно считать применение на объектах порта Калининград ВЭУ малой мощности со сниженным рабочим диапазоном скоростей ветра.

Потенциал энергии солнца

Анализ интенсивности солнечного излучения на территории порта Калининград выполнен на основе данных информационной системы [15]. Следует отметить, что оценка энергетического потенциала солнечного излучения для конкретного участка, доступная через систему [15], подходит для предварительных исследований, так как она задаёт значения по умолчанию для многих факторов, которые должны быть учтены при проектировании фотоэлектрической системы.

Распределение интенсивности солнечного излучения по территории Калининградской области значительно более равномерное в сравнении со средней скоростью ветра (рис. 6). Для районов расположения объектов инфраструктуры порта Калининград средняя дневная сумма прямой солнечной радиации составляет $2,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$.

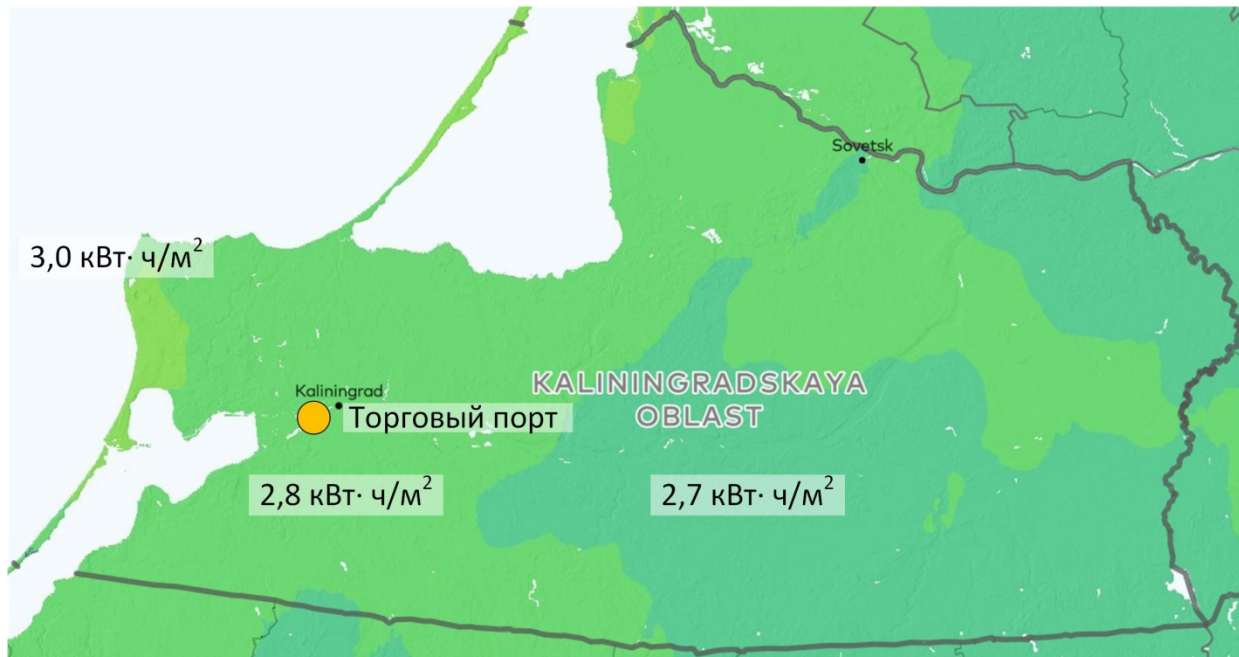


Рис. 6. Средняя дневная прямая солнечная радиация в Калининградской области

Использование фотоэлектрических панелей для преобразования солнечного излучения в электрическую энергию требует большого количества свободных площадей для установки панелей. В условиях объектов морской индустрии в качестве площадок для размещения панелей успешно используются крыши портовых сооружений. В качестве примера рассмотрен вариант размещения солнечных электростанций на территории Калининградского морского торгового порта (рис. 7).



Рис. 7. Расположение складов на территории Калининградского морского торгового порта

Отчуждаемые для размещения солнечных электростанций площади зависят от типа, мощности, размеров фотоэлектрических панелей и требуемого угла наклона. В рамках проведенного исследования расчет произведен для панелей Nevel HVL-380/НТ мощностью 380 Вт, производимых на территории России группой компаний «Хевел» (таблица 2) [16]. Угол установки панелей принят равным 38° в соответствии с рекомендациями [15].

Таблица 2

Технические характеристики фотоэлектрической панели Nevel HVL-380/НТ

Номинальная мощность, Вт	КПД, %	Напряжение холостого хода, В	Напряжение в рабочей точке, В	Размеры, мм	Вес, кг
380	19	52,78	44,37	1996 × 1002 × 30	32

При оценке мощности солнечной электростанции в расчет принимались склады на территории порта без рефрижераторного оборудования, имеющие плоские крыши сравнительно большой площади и надежные перекрытия. Расчет произведен для десяти наиболее крупных складов на территории торгового порта (таблица 3, рис. 7).

Таблица 3

Расчет параметров размещения фотоэлектрических панелей на крышах складов

№ склада	Площадь, м ²	Параметры площадки для установки панелей, м	Количество панелей, шт	Мощность, Вт
1	6 180	166 × 37,2	2075	788 500
2	9 102	104 × 87,5	3016	1 146 080
3	927	46 × 20,2	299	113 620
4	3 267	73 × 44,5	1080	410 400
5	2 756	87 × 31,7	903	343 140
6	340	20 × 17	110	41 800
7	1 958	58 × 33,7	580	220 400
8	4 628	117 × 39,5	1624	617 120
9	1 948	51,2 × 38	650	247 000
10	5 255	128 × 41,1	1728	656 640
Итого:	36 361	–	12 065	4 584 700

По результатам проведенных оценочных расчетов установлено, что при суммарной площади кровли 36,3 тыс. м² на крышах складов возможно разместить около 12 тыс. фотоэлектрических панелей HVL-380/НТ, имеющих суммарную установленную мощность более 4,5 МВт. Однако с учетом сезонного изменения количества дневной солнечной радиации объемы производимой солнечной электростанцией электроэнергии будут также изменяться (рис. 8). Проведенные расчеты показали, что при благоприятных условиях максимальная годовая выработка электрической энергии рассматриваемой солнечной электростанцией может достигать 3,5 млн. кВт·ч, что составляет 45,5% от потребления Калининградского морского торгового порта по данным за 2018 год.

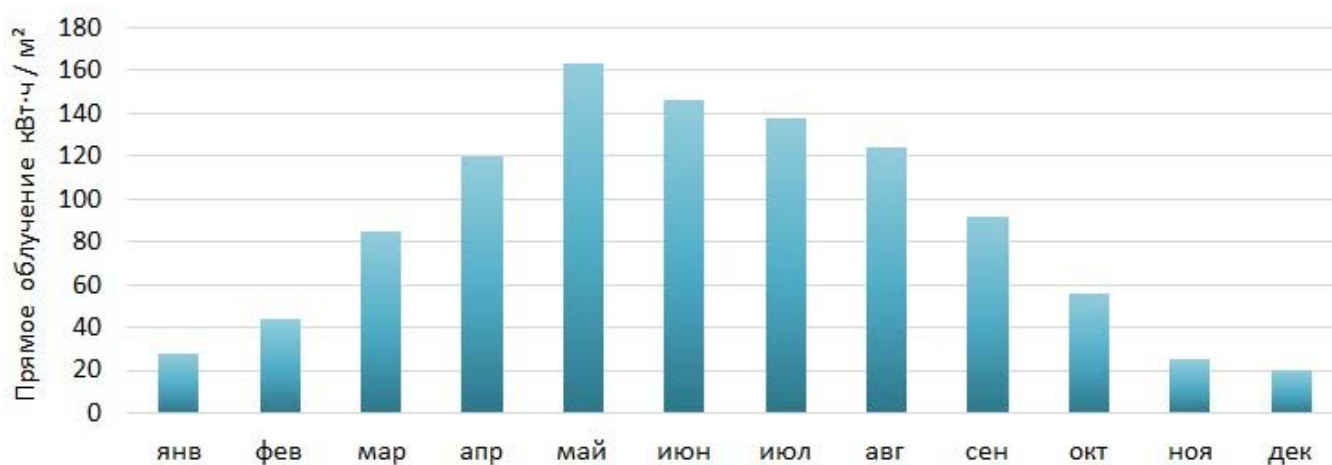


Рис. 8. Данные о суммарной прямой солнечной радиации в районе расположения торгового порта

Заключение

Рассмотренные в статье тренды развития морской индустрии позволяют сделать вывод о том, что деятельность портов в ближайшее время будет во все большей степени нормативно регулирована в сторону широкого внедрения «зеленых» технологий для обеспечения выполнения новых международных экологических требований и требований энергоэффективности. Меры воздействия – это прямые запреты и финансовые стимулы. Одним из технических решений, позволяющих привести порт в соответствие с концепцией нулевых выбросов является использование возобновляемых источников для обеспечения электропитания потребителей порта.

Проведенный анализ ветрового и солнечного потенциала акватории и территория порта Калининград позволяет утверждать, что при использовании современных технических средств – ветроустановок и солнечных панелей доступных на рынке, значительные объемы электропотребления порта могут быть покрыты за их счет. Финансовые перспективы реальных проектов требуют отдельной проработки и будут зависеть от ожидаемых экономических санкций при неисполнении новых требований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 30.08.2019 N 1930-р «О Стратегии развития морской деятельности в РФ до 2030 года»
2. Asariotis R. et al. Review of Maritime Transport, 2019. – 2019. – №. UNCTAD/RMT/2019.
3. Заостровских Е. А. «Зеленые порты» северо-восточной Азии: тенденции, проблемы и пути совершенствования //Новая азиатская политика и развитие Дальнего Востока. – С. 194.
4. Fujita M., Mori T. The Role of Ports in the Making of Major Cities: Self-Agglomeration and Hub-Effect // Journal of Development Economics. 1996. No. 49. Pp. 93–120
5. BERHAD M. B. Sustainability Report 2017 //Tenaga Nasional Berhad, Kuala Lumpur. – 2017.
6. Guide E. E. G. Towards excellence in port environmental management and sustainability //European Sea Ports Organization: Brussels, Belgium. – 2012. – С. 37.
7. Asariotis R., Benamara H., Mohos-Naray V. Port Industry Survey on Climate Change Impacts and Adaptation / UNCTAD. Research Paper No. 18. 2017. 66 p.
8. Воротницкий В. Э. Основные направления снижения потерь электроэнергии в электрических сетях //Энергия единой сети. – 2013. – №. 2. – С. 24-35.
9. Клеутин В. И. Задачи системы электроснабжения судна от береговой сети / Клеутин В. И., Руппель А. А., Мочалин К. С. // Энерго-и ресурсосбережение-XXI век. – 2016. – С. 96-100.
10. Nikitakos N. Green logistics: The concept of zero emissions port //FME Transactions. – 2012. – Т. 40. – №. 4. – С. 201-206.
11. Павлов Д. К. Оценка состава нагрузок крупных электропотребителей Калининградской области с целью оценки возможности и перспективы пилотного внедрения технологии управления потреблением / Павлов Д. К., Никишин А. Ю. // Вестник молодежной науки. – 2019. – №. 5.
12. Global wind atlas [Электронный ресурс]. 2020 –Режим доступа: <https://globalwindatlas.info/> (Дата обращения: 01.09.2020).
13. Краткое техническое описание ветроустановки 30кВт [Электронный ресурс]. 2020 – Режим доступа: <http://vdmtech.ru/ru/node/7> (Дата обращения: 01.09.2020).
14. Overview of ENERCON platform [Электронный ресурс]. 2020 –Режим доступа: <https://www.enercon.de/en/products/> (Дата обращения: 01.09.2020).
15. Global solar atlas [Электронный ресурс]. 2020 – Режим доступа: <https://globalsolaratlas.info/> (Дата обращения: 01.09.2020).
16. Модуль фотоэлектрический HVL-380/HJT [Электронный ресурс]. 2020 – Режим доступа: <https://www.hevelsolar.com/catalog/solnechnye-moduli/modul-fotoelektricheskie-hvl-380hjt/> (Дата обращения: 01.09.2020).

PROSPECTS FOR USING RENEWABLE ENERGY WITHIN THE ZERO-EMISSION CONCEPT OF THE PORT OF KALININGRAD

¹Nikishin Andrey Yuyrevich, Dr.Sc.(eng.), associate professor

²Kharitonov Maxim Sergeevich, Dr.Sc.(eng.), associate professor

³Nikitas Nikitakos, prof. Department of Shipping, Trade and Transport

^{1,2}FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",

e-mail: nikduke@klgtu.ru; maksim.haritonov@klgtu.ru

³University of the Aegean, Greece, e-mail: n.nikitakos@aegian.gr

The article provides the analysis of the main trends in the frame of zero emission port concept. The main measures of atmosphere pollutants emissions from port operations reduction are considered. Renewable energy potential in the area of the infrastructure facilities of the port of Kaliningrad assessment is given. Special aspects of a photovoltaic distributed generation system calculation based on the example of the Kaliningrad Sea Trade Port is given.

УДК 629.5.072

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ НА СУДАХ С КОЛЕСНЫМ ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВЫМ КОМПЛЕКСОМ

Новоселов Кирилл Андреевич, преподаватель кафедры «Электрооборудование и автоматика судов»

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: kirill-n1996@mail.ru

Приводится описание комплексной системы контроля и управления судовыми системами и объектами на пассажирских судах с колесным движительно-рулевым комплексом. Рассмотрены функциональные возможности, структура системы, программно-аппаратная реализация с использованием контроллеров FASTWEL.

Колесный движительно-рулевой комплекс (КДРК) на судах представляет собой два гребных колеса, расположенных на корме по обеим сторонам. Энергия, для их работы, поступает от двух дизель-генераторов и в общей сумме количество вырабатываемой энергии составляет 240 кВт. У судов постройки такого типа малая осадка (всего 0,75 м) и практически в половину уменьшен расход топлива (на 40 %). Колеса приводятся в движение двумя независимыми управляемыми электроприводами, в состав которых входят также преобразователи частоты и асинхронные электродвигатели. Процесс управления КДРК осуществляется изменением частоты вращения гребных колес, используя для этого два джойстика.

Первое судно такого типа было введено в эксплуатацию в Нижнем Новгороде в 2011 году.

При проектировании судов такого типа необходимо учитывать, что конструктивные особенности (плоское дно, малая осадка и т.д.) вызывают особую реакцию на управляющее воздействие, что в свою очередь приводит к необходимости создания комплексной системы контроля и управления (сокращенно – КСКУ). Основными функциями этой системы являются: контроль и управление вспомогательными техническими средствами судна и контроль всех параметров всех судовых систем.

Параметры судовых систем выводятся на сенсорные панели. Взаимодействуя с информацией на них, оператор может осуществлять удаленное управление судовыми системами.

Функционально на панелях два уровня для вывода информации – системный и служебный. Первый обеспечивает оперативный контроль параметров, форма вывод данных – мнемосхемы; второй – обеспечивает непосредственно дистанционное управление. На экранах элементы располагаются следующим образом: в верхней части – кнопки, при нажатии на которые в центральной части экранов отображаются мнемосхемы различных судовых систем (рулевой, осушительной, топливной и т.д.). Также выделены сенсорные кнопки для перехода на дистанционное управление.

Комплексная система контроля и управления спроектирована таким образом, что становится возможным и аварийный (ручной) режим управления КДРК. При задействовании этого режима управляющие сигналы будут напрямую передаваться на вход электроприводов, минуя КСКУ, для этого дополнительно проложена отдельная кабельная линия.

Стоит отметить еще одно отличие судов с КДРК от традиционных: на традиционных судах судоводитель имеет возможность отслеживать положение пера руля в любой промежуток времени, то на судах с КДРК параметры частотных приводов (например, частота вращения, момент и т.д.) передаются в систему КСКУ по шине RS-485 и на их основании происходит вычисление, построение и отображение на экранах вектора, благодаря которому судоводитель может принимать решения [1].

Когда судно находится в режиме маневров, а также при швартовных операциях и необходимо плавное управление частотой вращения гребных колес, то КСКУ принимает, обрабатывает аналоговые сигналы, а затем формирует шесть ступеней этого сигнала для частотных приводов. При управлении джойстиком возможно их резкое перемещение оператором, что может привести к перегрузке дизель-генераторов, с последующей их аварийной остановкой. Для того, чтобы избежать такой ситуации в КСКУ реализовано ограничение по моменту, который могут развивать приводы колес.

Для того, чтобы процесс управления поддерживался на высоком уровне, а расход топлива был экономным, предусматриваются следующие возможности джойстиков: левый – задает скорость движения судна, а правый – угловую скорость и направление [2, 3]. Для совершения поворота судна необходимо увеличить частоту вращения одного из колес: когда у выбранного колеса частота станет максимальной, то у другого – частота вращения начнет снижаться. В конструкции судна предусмотрена возможность, как для медленного, так и для быстрого разворота. Для совершения медленного разворота необходимо левый джойстик установить в нулевое положение, а правым нужно задать нужное отклонение руля в сторону поворота. Для совершения быстрого разворота необходимо задействовать режим «Циркуляция». В этом режиме колеса вращаются в противоположные стороны.

Для того, чтобы судоводитель получал адекватную обратную связь от систем контроля и управления и, следовательно, имел возможность дать объективную оценку ситуации, система КСКУ отображает на компьютерных панелях во всех режимах все необходимые параметры (нагрузка электроприводов колес, частота вращения колес, величина управляющих воздействий, направление вектора упора, ориентация судна и т.п.) (рис. 1).



Рис. 1. Панель «Рулевая система»

Выше было сказано, какие элементы располагаются в верхней и центральной частях панелей. В нижней же части расположены индикаторы и элементы аварийно-предупредительной сигнализации (АПС). Когда возникает какая-либо аварийная ситуация в судовых системах, то экранные индикаторы, соответствующие той или иной системе, начинают мигать жёлтым или красным цветом. Для выяснения причины срабатывания, оператор вызывает подробную мнемосхему на экран и смотрит в какой части системы, произошла авария. При нажатии на участок, который обозначен как аварийный происходит квинтирование аварийной ситуации.

Система КСКУ предоставляет огромные возможности для диагностики как всей системы в целом, так и её отдельных компонентов (рис. 2), к которым можно отнести: частотные преобразователи; контроллеры; модули ввода/вывода; линии связи. В структуру системы КСКУ входят следующие компоненты: контроллер машинного отделения (КНТ МО); контроллер носового отделения (КНТ НО); контроллер рулевой рубки (КНТ Р); панельный компьютер управления ПК1 (основной); панельный компьютер управления ПК2 (дублирующий).



Рис. 2. Панель диагностики

КНТ НО размещается в санитарном отсеке, предназначается для обслуживания датчиков и исполнительных механизмов, расположенных в данной части судна. КНТ МО размещается в машинном отделении, предназначается для обслуживания датчиков и исполнительных механизмов, расположенных в данной части судна. КНТ Р располагается непосредственно в рулевой рубке, в пульте управления судном. Его назначение – обслуживание датчиков и органов управления рулевой рубки.

Общее назначение контроллеров – сбор данных с различных датчиков для последующей их передачи в компьютерные системы для обработки и принятия решений, а также для передачи сигналов управления от компьютеров на исполнительные устройства. Для связи между системными элементами используется промышленная локальная сеть Ethernet при использовании коммутаторов Моха. Вся система представлена на рис. 3.

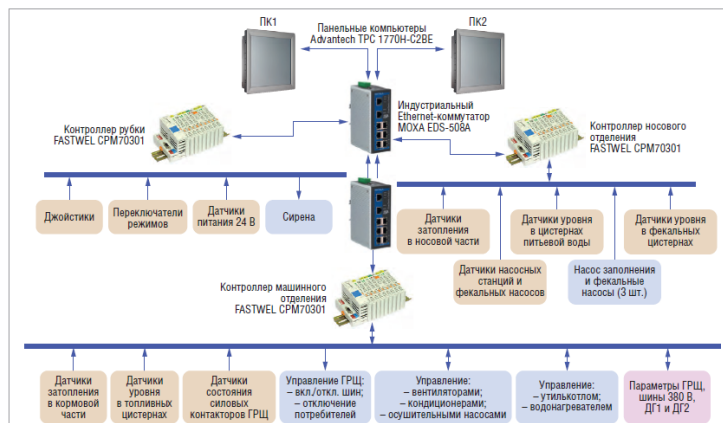


Рис. 3. Структура КСКУ

Как выше уже упоминалось на судне реализована линия RS-485, которая используется для обмена информацией между контроллерами и частотными преобразователями (ПЧ1 и ПЧ2); главным распределительным щитом (ГРЩ) и дизель-генераторами (ДГ1 и ДГ2). Для снижения длины кабельных линий контроллеры, реализованные на базе компонентов распределённой системы ввода/вывода FASTWEL I/O, размещают недалеко от датчиков (рис. 4).

Компоненты	Тип модуля	Количество модулей в контроллерах		
		КНТ МО	КНТ НО	КНТ Р
Контроллер узла сети	CPM70301	1	1	1
Модуль ввода питания	OM75101	1	1	1
Модуль дискретного ввода	DIM71701	8	6	1
Модуль дискретного вывода	DIM71901	2	1	1
Модуль аналогового ввода	AIM72702	–	–	1
Модуль аналогового вывода	AIM73101	1	–	–
Модуль интерфейсный	NIM74101	2	–	2
Оконечный модуль	OM75001	1	1	1

Рис. 4. Модули FASTWEL I/O в КСКУ

Компьютерные панели (экраны), на которые выводится вся необходимая информация, представлены маркой TPC-1770H фирмы Advantech. Их размещают на пульте управления. Они полностью идентичны, как по конструкции, так и по ПО, кроме того они полностью дублируют функции и возможности друг друга. При нормальном режиме один из этих экранов служит для вывода информации, которую использует судоводитель, другой – отображает мнемосхемы о состоянии устройств, механизмов и судовых систем. Так как экраны сенсорные, то это позволяет легко проводить различные манипуляции, менять мнемосхемы, управлять судовыми устройствами. Кроме того, сам судоводитель, при желании, может вызвать на экран любую мнемосхему, любую информации и состояния.

Выводы

Система КСКУ на судах с КДПК имеет следующие преимущества при сравнении судов данного типа с традиционными:

- используются два сенсорных компьютерных экрана для отображения всей необходимой информации и удаленного управления судовыми системами;
- система КСКУ распределенная, что приводит к уменьшению длины кабелей и проводов;
- мнемосхемы, выводимые на экраны, содержат всю необходимую для судоводителя информацию, которая позволяет ему принимать верные и объективные решения;
- система легко модернизируется благодаря распределенной структуре и унифицированной аппаратной базе, а простота технического обслуживания и ремонта обеспечивается широким диапазоном возможностей системы ввода/вывода FASTWEL I/O.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грошева Л.С., Мерзляков В.И., Перевезенцев С.В., Плющаев В.И. Контроль вектора тяги колёсного движительного комплекса теплохода // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. – 2011. – № 3.
2. Поляков И.С. Моделирование расхода топлива в различных эксплуатационных режимах судна с колёсным движителем // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2013. – Вып. 35.
3. Плющаев В.И., Соловьёв Д.С. Снижение влияния внешних воздействий на процесс удержания судна с колёсным движителем на курсе // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. – 2014. – Вып. 40.

COMPLEX SYSTEM OF CONTROL AND MANAGEMENT ON SHIPS WITH WHEEL-STEERING COMPLEX

Novoselov Kirill Andreevich, Lecturer, Department of Electrical Equipment
and Automation of Ships

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: kirill-n1996@mail.ru

The description of an integrated control and management system of ship systems and objects on passenger ships with a wheeled propulsion and steering complex is given. The functional capabilities, system structure, software and hardware implementation using FASTWEL controllers are considered.

УДК 629.5.054

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ МУФТОЙ

Павликов Сергей Алексеевич, канд. техн. наук, доцент

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
г. Калининград, Россия, e-mail: sergeypavlikov@mail.ru

Система дистанционного автоматического управления (ДАУ) реализует следующие функции управления ССУ: дистанционный пуск и останов ГД1, ГД2 с поста управления в ЦПУ, дистанционное управление муфтами главного двигателя с поста в ПВМ, а также с местного управления в машинном отделении, автоматическую установку номинальной уставки (100%) регулятора частоты вращения после включения одной из муфт ПМ1 или ПМ2 (изменение уставки регулятора частоты вращения серводвигателем от пускового значения (62%) до номинального значения (100%) после ввода главного двигателя в работу.

В состав силовой установки входят главные двигатели ГД1, ГД2, мощностью 883 кВт каждый, частотой 1000 об/мин, редуктор Р (1000/203 об/мин) и пневматические муфты сцепления ПМ1, ПМ2, ПМ3. Для затормаживания гребного вала в режиме дрейфа судна при остановленной ССУ предусмотрен гидравлический тормоз вала (ГТВ). Изменение шага ВРШ осуществляет механизм изменения шага МИШ. В системе ДАУ ССУ предусмотрены три поста управления: командный пост управления с ходового мостика, пост дистанционного управления в ЦПУ, пост местного управления в машинном отделении. Система ДАУ реализует следующие функции управления ССУ:

- дистанционный пуск и останов ГД1, ГД2 с поста управления в ЦПУ, дистанционное управление муфтами главного двигателя с поста в ПВМ, а также с местного управления в МО, автоматическую установку номинальной уставки (100%) регулятора частоты вращения после включения одной из муфт ПМ1 или ПМ2 (изменение уставки РЧВ серводвигателем от пускового значения (62%) до номинального значения (100%) после ввода ГД в работу,
- автоматическую установку пусковой уставки (62%) регулятора частоты вращения (РЧВ) обоих ГД после отключения обеих муфт ПМ1, ПМ2 (изменение уставки РЧВ от номинального значения (100%) до пускового (62 %) после вывода обоих главных двигателей),
- дистанционное изменение частоты вращения главного двигателя с помощью серводвигателей РЧВ с трех постов,
- режим раздельного регулирования частоты вращения в диапазоне (90-100)% с целью равномерного распределения нагрузки между ГД1 и ГД2,

- режим раздельного регулирования частоты вращения в диапазоне (50-100)% с местного поста управления, режим совместного (одновременного) регулирования частоты вращения обоих главных двигателей в диапазоне (90-1000)% с секций управления главного распределительного щита (ГРЩ) для подгонки частоты валогенератора,
- экстренный останов ГД1 и ГД2 и одновременное отключение соответствующих пневмо-муфт с ПВМ в ЦПУ.

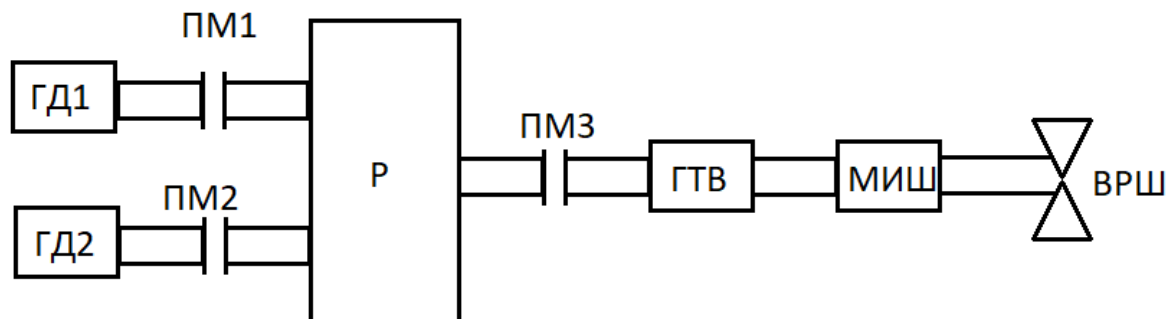


Рис.1. Схема силовой установки судна

Контур дистанционного управления муфтой главного двигателя.

Включение муфты происходит при выполнении следующих условий:

Отсутствует сигнал стоп главного двигателя, блокирующий включение муфты на период остановки главного двигателя.

Главный двигатель запущен и достигнута частота вращения $n > 60\%$ номинальной.

Винт регулируемого шага главного двигателя должен быть установлен в нейтральное положение, если муфта включается первой, а вторая отключена. Если муфта включается не первой выполнение этого условия не обязательно.

Валоповоротное устройство отключено.

Муфта валогенератора отключена.

Наличие нормального рабочего давления масла смазки редуктора.

Наличие нормального рабочего давления управляющего воздуха.

Отсутствие выполнения в данный момент времени аварийного или экстренной остановки главного двигателя.

Установлено минимальное значение уставки регулятора частоты главного двигателя. Если данная муфта включается не первой выполнение данного условия не обязательно.

При аварийном или экстренном основе главного двигателя отключение муфты происходит при выпни любого из следующих условий

Частота вращения главного двигателя превышает предельное значение $n > n_p$

Низкое давление масла в системе смазки главного двигателя.

Экстренная остановка главного двигателя.

Управление муфтой осуществляет микропроцессорный контроллер ЛОГО, схема которого приведена ниже.

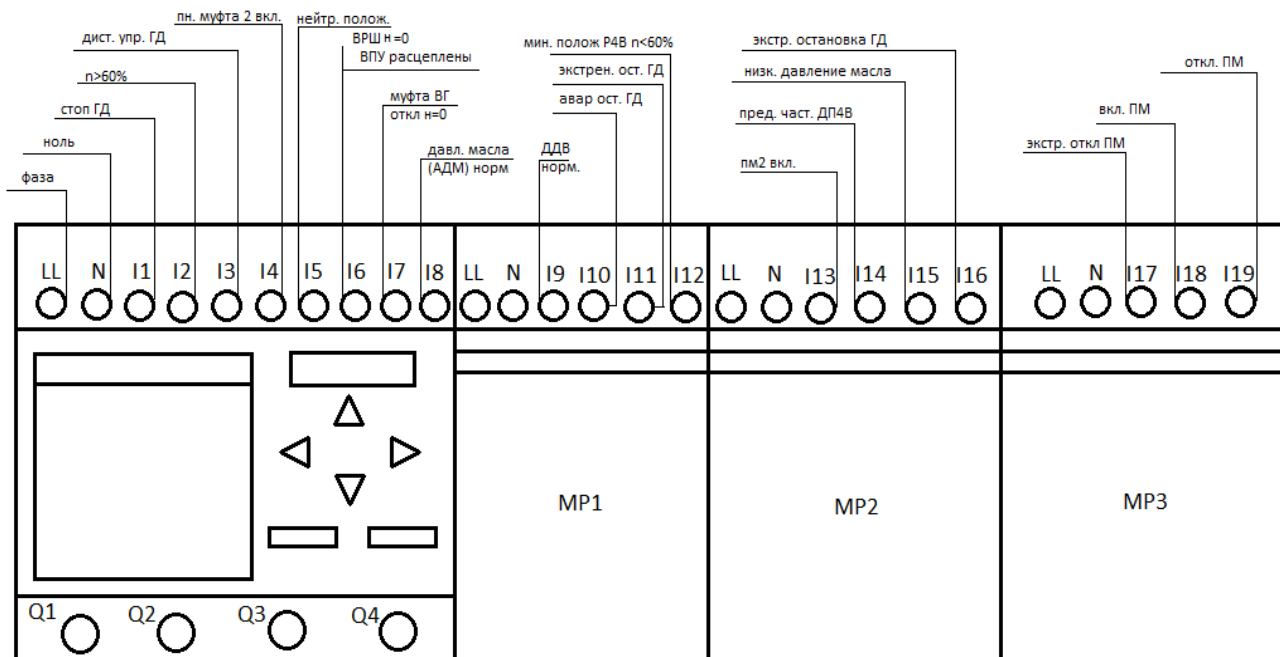


Рис. 2. Состав и схема подключения микропроцессорного контроллера.

Микропроцессорный контроллер включает базовый модуль и три модуля расширения (MP1, MP2 и MP3). На клеммы LL и N подается напряжение питания 12-220 вольт. К клеммам I1-I19 подводится напряжение питания контроллера от тумблеров, переключателей и контактов, положение которых соответствует состоянию системы управления муфтой в данный момент времени. Эти напряжения преобразуются в логические сигналы, поступающие в систему управления муфтой и определяющие ее работу. Обозначения этих сигналов указаны на рис.2.

Стоп ГД блокирует включение муфты на период остановки главного двигателя. Сигнал $n > 60\%$ соответствует достижению частоты вращения главного двигателя 60% от номинальной. Дистанционное управление главного двигателя включает, отключает дистанционное управление главного двигателя.

Пневматическая муфта 2 вкл. – блокирует установку ВРШ в нейтральное положение если пневмомуфта 1 включается не первой.

Нейтральное положение – установка ВРШ в нейтральное положение.

ВПУ расцеплены – валоповоротное устройство расцеплено.

Муфта вг. откл.н =0 – муфта валогенератора постоянного тока отключена.

Давл. масла (АДМ) норм. – нормальное давление масла в редукторе.

Мин. полож. РЧВ $n < 60\%$ - РЧВ ГД установлен в минимальное положение.

Экстрен.ост. ГД – отсутствие экстренного останова ГД.

Авар. ост. ГД – отсутствие аварийного останова ГД.

Пм2 вкл. – если муфта 2 включена то блокируется условие $n > 60\%$ при включении муфты 1.

Пред. част. ДП4В – предельная частота вращения ГД $n > n_{пред}$.

Низкое давление масла – низкое давление масла смазки ГД.

Экстренная остановка главного двигателя - автоматическое отключение муфты при экстренной остановке главного двигателя.

Экстренное отключение ПМ – экстренное отключение ПМ клапаном аварийного отключения.

Включение ПМ – включение муфты при выполнении всех условий для включения.

Откл. ПМ – кнопочная команда отключения муфты [1].

Работа программы управления муфтой.

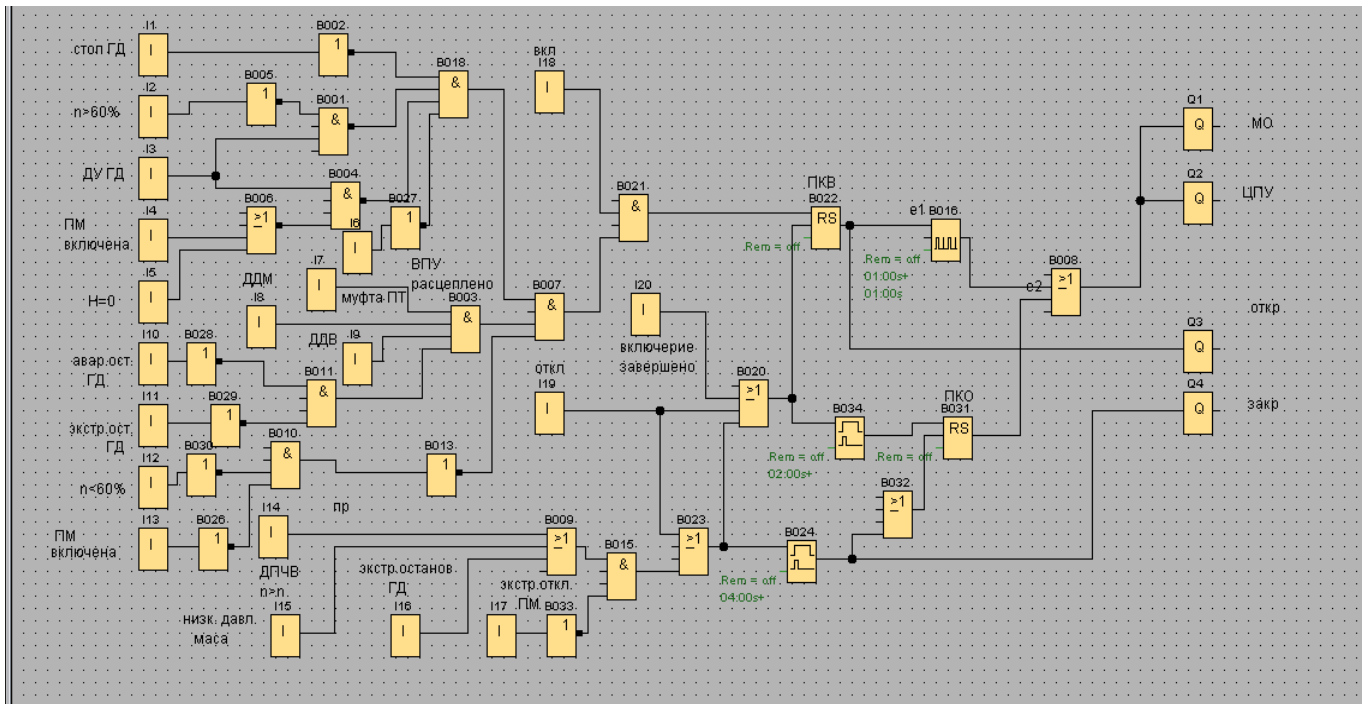


Рис. 3. Схема программы управления муфтой

Через входы I1-I20 микропроцессорного контроллера (МК) в схему поступают сигналы, совокупность которых позволяет включить муфту. Через вход I1 поступает сигнал стоп главного двигателя, при отсутствии которого логическая единица с выхода инвертора В002 поступает на вход элемента “И” блок В018. Через вход I2 поступает сигнал $n > 60\%$, при наличии которого с выхода инвертора В005, 0-сигнал поступает на вход блокирующего элемента “И” блок В001, логическая единица с выхода которого поступает на второй вход блок В018.

Если управление главным двигателем осуществляется не дистанционное, а местное, то через вход I3 в схему поступает 0-сигнал, который элементом В001 блокирует выполнение условия $n > 60\%$ и муфта может включаться без выполнения этого условия. Если данная муфта включается первой, то через вход I5 в схему должен поступать сигнал установки ВРШ в нейтральное положение ($H=0$), при наличии которого элементами В006 и В004 формируется 1-сигнал, поступающий на третий вход блока В018. Если данная пневмомуфта включается не первой, то на вход I4 поступает сигнал от другой пневмомуфты, наличие которого блокирует сигнал $H=0$. Сигналы $H=0$ и ПМ включена блокируются так же при местном управлении главным двигателем, т.е когда сигнал дистанционного управления главным двигателем отсутствует. Через вход I6 в схему поступает сигнал об отключении валоповоротного устройства (ВПУ) в результате на четвертый вход блока В018 поступает логическая единица.

Через входы I7, I8, I9 в схему поступают сигналы об отключенном состоянии валогенератора (муфта ПТ), о наличии нормального давления масла редуктора (ДДМ), о наличии нормального давления управляющего воздуха (ДДВ). Наличие этих сигналов вызывает появление логических единиц на трех верхних входах элемента “И”(модуль В003). Через входы I10 и I11 в схему поступают сигналы, соответствующие экстренной или аварийной остановке главного двигателя. При отсутствии этих сигналов через модули В028, В029 и В011 логическая единица поступает на четвертый вход модуля В003. Если через вход I12 в схему поступает сигнал о том, что уставка Р4В главного двигателя выведены в нижнее предельное значение ($n < 60\%$), то через блоки В030, В010 и В013 на нижний вход элемента “И” (блок В007) поступает логическая единица. На два верхних входа этого элемента поступают логические единицы с блоков В003 и В018, в результате на выходе блока В007 появляется логическая единица, поступающая на вход элемента “М” (блок В021), что обеспечивает разрешение прохождения команды на включение пневмомуфты.

Команда на включение пневмомуфты поступает в схему через вход I18 в виде логической единицы на входе блока В021. Это приводит к установке R-3 триггера (память команды включения ПКВ). Логическая единица с выхода ПКВ поступает на вход мультивибратора блока В016,

импульсы с которого поступают из лампы, установленные в ЦПУ и машинном отделении (МО). Одновременно логическая единица с ПКВ поступает на электромагнит, открывающий подачу воздуха в пневмосхему включения муфты. В течении времени, необходимого для включения муфты, лампы мигают. По завершении включения муфты замыкается связанный с ней блок контакт, сигнал с которого через I20 и V020 сбрасывает триггер ПКВ. “О” – сигнал с выхода ПКВ закрывает электромагнит подачи воздуха. Одновременно через блоки V020, V031 и V008 подается постоянное напряжение на лампы, переключая их 1 режим постоянного свечения. После этого замыкается блок контакт “включение завершено” и кнопка команды «включения» может быть разомкнута.

Выключение муфты осуществляется либо путем нажатия на кнопку отключения “откл”, либо при появлении сигналов аварийный или экстренный остановки главного двигателя. Сигнал с кнопки “откл” поступает в схему через вход I19, в результате логическая единица через блок V23 поступает на ждущий мультивибратор. Короткий импульс с выхода мультивибратора поступает на клапан “закр”, подающий сжатый воздух в пневмосистему отключения пневмомуфты. Одновременно через блок V020 короткий импульс поступает на вход установки и через блок V032 на вход сброса триггера ПКО. Продолжительность импульса больше, чем установки поэтому триггер ПКО остается в состоянии сброс независимо от продолжительности сигнала “откл”, поэтому сигнальные лампы в ЦПУ и МО гаснут. При экстренной или аварийной остановки главного двигателя логическая единица через входы I14, I15 или I16 действует аналогично поступлению сигнала с кнопки “откл”. Их действие блокируются сигналом экстренного отключения пневмомуфты, который может поступать через вход I17.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобраков В.Ф. Электронные системы дистанционного автоматизированного управления силовыми установками судов флота рыбной промышленности : Учебное пособие. – Калининград : ВИПК Минрыбхоза СССР. – 1987. - 88с.

PNEUMATIC CLUTCH CONTROL SYSTEM

Pavlikov Sergey Alekseevich, Associate Professor, Cand. tech. sciences

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: sergeypavlikov@mail.ru

The DAU system implements the following control functions of the SSU: remote start and stop of GD1 , GD2 from the control station in the CPU, remote control of the main engine clutches from the post in the FDA, as well as from the local control in the MO, automatic setting of the nominal setpoint (100%) of the speed controller after turning on one of couplings PM1 or PM2 (change setpoint PWR servo motor from the starting value (62%) to n on in the nominal value (100%) after the input DG in operation.

АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ БЕРЕГОВОЙ ЗАРЯДНОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПАРОМА

Савенко Алексей Александрович, студент
Геллер Борис Львович, канд. техн. наук, доцент кафедры
электрооборудования судов и электроэнергетики

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: rector@klgtu.ru

Целью работы является анализ возможных решений по разработке береговой зарядной станции для среднего магистрального автомобильно-пассажирского экологически чистого паромов на электроходе. Произведен анализ зарядных профилей литий-ионных аккумуляторов и выбор наиболее эффективного профиля для зарядной станции, определены структуры выпрямителя и формирователя зарядного тока, рассмотрена возможная реализация зарядного устройства с усовершенствованным режимом заряда аккумуляторов.

1. Разработка требований к зарядной станции. Определение метода заряда

Экологическая чистота паромов, разрабатываемого в НИЦ судостроения КГТУ, достигается использованием в качестве основного и резервного источников электроэнергии аккумуляторных батарей (АБ). Заряд АБ производится от береговой зарядной станции, работающей в ночное время и восполняющей суточный расход электроэнергии.

Для определения параметров станции рассчитаем максимальную потребляемую мощность паромов за день, исходя из эксплуатационного режима работы паромов Балтийск – Балтийская Коса. Расстояние между причалами 800 м, количество рейсов в сутки – 8. При этом суточное расстояние составит 12,8 км. При номинальной скорости 10 км/ч суммарное время хода за сутки 1,3 ч.

Принимаем суточное время работы паромов 17 ч (с 6:00 до 23:00). Таким образом, суточное время стоянки составит $17 - 1,3 = 15,7$ ч.

Определим максимальную энергию W_m , потребляемая паромом за сутки:

$$W_m = S_x t_x + S_c t_c, \quad (1)$$

где S_x – потребляемая мощность в ходовом режиме;

t_x – длительность хода, ч;

S_c – потребляемая мощность при стоянке;

t_c – время стоянки, ч;

В проекте электрического паромов определено: $S_x = 63,5$ кВт, $S_c = 19,5$ кВт. При этих параметрах расчет по (1) дает: $W_m = 389$ кВт·ч.

При выборе запаса энергии АБ следует учесть два обстоятельства:

1. Глубокий разряд аккумуляторов крайне отрицательно сказывается на ее сроке службы, особенно при токах заряда порядка 1С. Это особенно важно для судов с электрическим ходом, так как аккумуляторы представляют собой наиболее дорогостоящую часть судового оборудования. Поэтому глубина разряда должна быть ограничена.

2. Возможен экстремальный режим эксплуатации при большом наплыве пассажиров или при чрезвычайных ситуациях (до 18 рейсов в сутки).

Исходя из этого запас энергии АБ принят равным 1704 кВт·ч.

В соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства на судне установлены две АБ с запасом энергии 1704 кВт·ч каждая. Параметры АБ приведены в таблице 1.

Параметры аккумуляторной батареи.

Тип аккумуляторов	NMC
Количество АБ	2 (батареи левого борта и правого борта)
Конфигурация сборки одной АБ	216s5p
Напряжение номинальное, В	710
Напряжение максимальное, В	806
Напряжение минимальное, В	576
Номинальная емкость АБ, А·ч	1200
Максимальный режим заряда	1С

Для любого зарядного устройства, как правило, предусматриваются три этапа работы: предзаряд (восстановление сильно разряженных АБ), основной заряд и буферный заряд (floating charge – компенсация саморазряда). Наибольшее значение имеют алгоритмы основного заряда (называемые также профилями заряда), поскольку они сильно влияют на количество жизненных циклов АБ.

Самые простые профили – это заряд постоянным током (CC) и постоянным напряжением (CV). Применение только одного из этих профилей нецелесообразно, так как ведет к перезаряду или недозаряду, поэтому чаще используют комбинированный профиль CC-CV [1,2], в котором вначале производится заряд постоянным током. По достижении заданного напряжения батареи зарядное устройство подает постоянное напряжение, и ток АБ начинает экспоненциально уменьшаться, пока не достигнет достаточно малого заданного значения (рисунок 1). Вариантом комбинированного профиля является алгоритм DL-CC-CV, использующий обратную связь по напряжению. ПИД-контроллер сравнивает напряжение АБ с эталонным напряжением. При большом рассогласовании происходит заряд CC, в дальнейшем минимизация рассогласования достигается методом CV. Поскольку для измерения требуется только напряжение на клеммах АБ, необходимость в датчике тока отпадает.

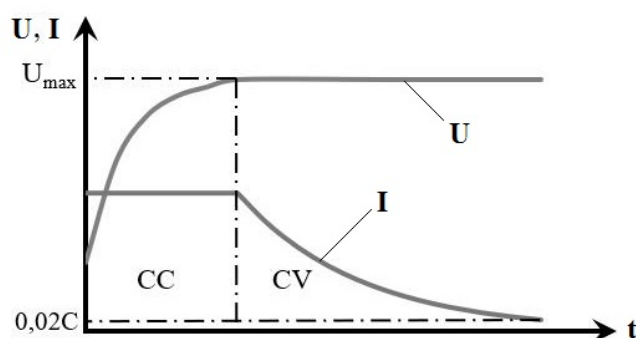


Рис. 1. Профиль заряда CC-CV

Более совершенные схемы управления оптимизируют зарядный ток в режиме CV профиля CC/CV. Это схемы с нечеткой логикой (FL-CC-CV) и схемы с прогнозирующими моделями (GP-CC-CV). Основной особенностью этих двух алгоритмов является использование напряжения холостого хода вместо напряжения заряда. По величине напряжения холостого хода рассчитывается степень заряда АБ, в соответствии с которой определяется зарядный ток в режиме CV. График заряда этих алгоритмов показан на рисунке 2.

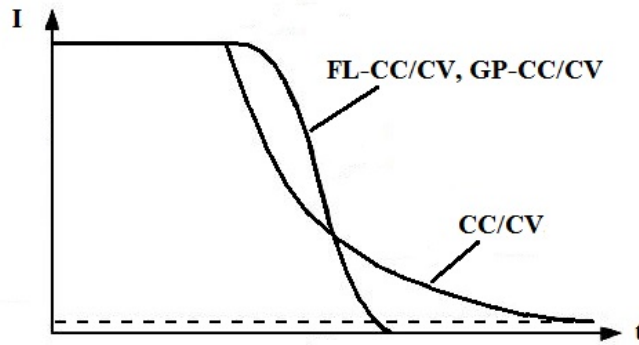


Рис. 2. Профили зарядного тока FL-CC/CV, GP-CC/CV и CC/CV.

Еще один вариант алгоритма заряда реализуется при помощи управления фазовой автоподстройки частоты (PLL). Функциональная схема устройства, реализующего этот алгоритм, и график профиля показаны на рисунке 3, а. Напряжение батареи V_b передается на дифференциальный усилитель ДУ. С выхода усилителя сигнал поступает на генератор импульсов, управляемый напряжением (ГУН), который генерирует фазу обратной связи P_o . Фазовый компаратор ФК сравнивает входную опорную фазу P_i с фазой обратной связи P_o . Фазовая погрешность P_c передается в генератор импульсов тока ГИТ для заряда АБ. Профиль заряда PLL-CC-CV показан на рисунке 3, б.

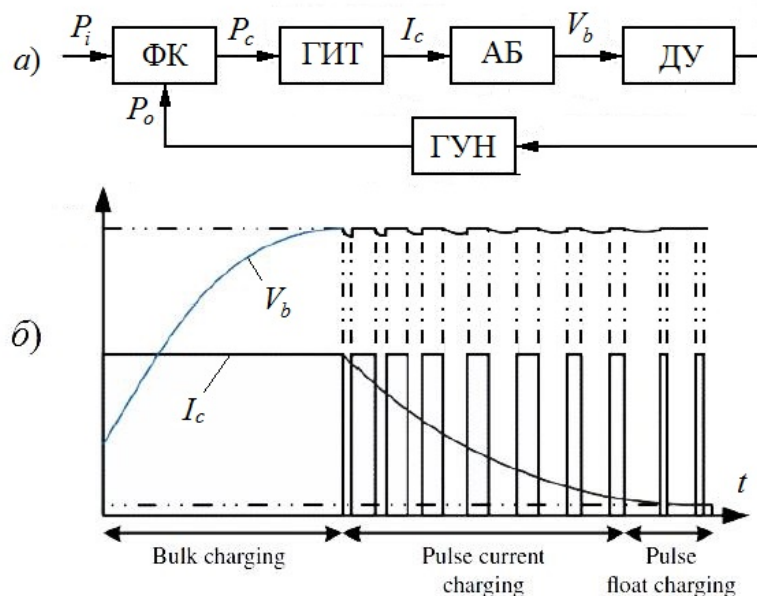


Рис. 3. а) Структурная схема PLL-CC-CV; б) Зарядный профиль PPL-CC-CV

Основная идея алгоритма MSCC заключается в использовании многоступенчатого процесса уменьшения амплитуды тока для минимизации возможности перезаряда и повышения эффективности заряда. Для определения амплитуды каждой ступени дополнительно используются температура АБ и характер ее изменения. Алгоритм MSCC имеет более высокую скорость заряда и более высокую эффективность заряда, чем алгоритм заряда CC/CV.

Алгоритм заряда TSCC-CV (двухступенчатый постоянный ток) объединяет высокий CC-I, низкий CC- II и CV режимы в один профиль. Вначале АБ заряжается установленным током в режиме CC до напряжения отсечки, после чего ток заряда снижается более чем в два раза и по достижении опять напряжения отсечки переключается в режим CV.

Алгоритм BC-CC-CV отличается от CC-CV тем, что сначала заряд осуществляется увеличенным постоянным напряжением (4,3 В на элемент для литиевых АБ) в течение 5–10 минут, затем происходит переход на стандартный режим CC-CV. Этот алгоритм эффективен для полностью разряженных АБ.

Импульсные профили заряда можно разделить на две группы. Первая группа – это заряд импульсами напряжения с изменяющейся частотой (FCV-PC). Основная идея FCV-PC заключается в нахождении оптимальной частоты, при которой импеданс батареи сведен к минимуму, поэтому возрастает допустимый зарядный ток. Вторая группа – это заряд АБ импульсами тока (CC-PC) с регулируемой амплитудой и длительностью.

В таблице 2 резюмируются главные характеристики рассмотренных профилей заряда. В правом столбце используются обозначения: V – напряжение, I – ток, T – температура.

Таблица 2

Основные характеристики алгоритмов заряда

Профиль заряда	Аналоговый (А) или цифровой (Ц)	Время заряда	Эффективность заряда	Сложность внедрения и стоимость	Срок службы	Контролируемые параметры
CC	А	короткое	низкая	низкая	короткий	V, T
CV	А	долгое	средняя	низкая	короткий	I, T
CC-CV	А или Ц	долгое	средняя	средняя	короткий	V, I, T
DL-CC-CV	А	долгое	средняя	низкая	короткий	V, T
FL-CC-CV	Ц	среднее	средняя	высокая	средний	V, I, T
GP-CC-CV	Ц	среднее	средняя	высокая	средний	V, I, T
PLL-CC-CV	А	долгое	средняя	средняя	средний	V, I, T
CPLL-CC-CV	А	долгое	средняя	средняя	средний	V, I, T
MSCC	Ц	среднее	средняя	высокая	долгий	V, I, T
TSCC-CV	Ц	короткое	средняя	средняя	долгий	V, I, T
BC-CC-CV	Ц	короткое	низкая	средняя	короткий	V, I, T
FCV-PC	Ц	короткое	высокая	высокая	долгий	V, I, T
CC-PC	А или Ц	короткое	высокая	высокая	средний	V, I, T

Как следует из данных таблицы 4, предпочтительными режимами заряда являются TSCC-CV, FCV-PC и DCV-PC. В дальнейшем рассматривается импульсный заряд с изменением частоты импульсов: FCV-PC.

2. Определение структуры силовой части зарядной станции

Учитывая большую мощность, зарядная станция должна питаться от электрической сети среднего напряжения (15 кВ для г. Балтийск). Структурная схема силовой части станции представлена на рисунке 4.

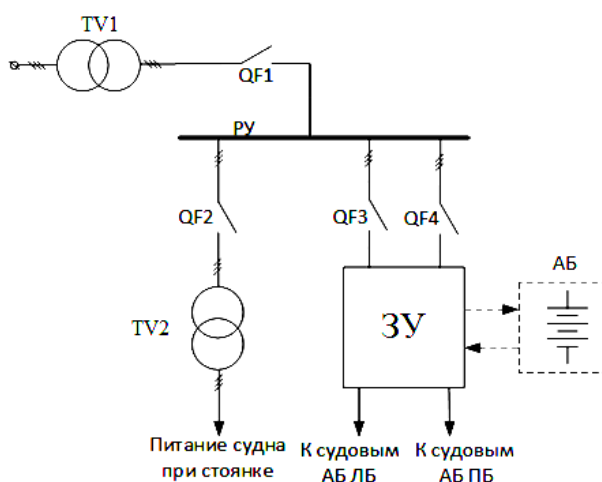


Рис. 4. Обобщенная структурная схема силовой части зарядной станции

На первичную обмотку трансформатора TV1 подается напряжение сети. Минимальное вторичное напряжение исходя из номинального напряжения АБ 768 В и коэффициента передачи

трехфазного мостового выпрямителя 1,35, с учетом возможного снижения напряжения сети от номинального до 10%, составляет $768/0,9/1,35 = 632$ В.

Таким образом, зарядная станция должна включать два трансформатора: TV1 15/0,66 кВ – для питания зарядного устройства ЗУ и TV2 0,66/0,38 кВ для питания судна при стоянке с берега. Можно использовать стандартный трансформатор, например, TV1 15/0,4 кВ как для питания судна с берега, так и для ЗУ. В этом случае в состав ЗУ должен входить повышающий преобразователь DC-DC, тогда необходимость в трансформаторе 15/0,66 кВ отпадает.

В составе ЗУ целесообразно использовать систему 12-пульсного выпрямления. Низкое значение пульсаций выпрямленного напряжения позволяет исключить сглаживающий фильтр. Кроме того, 12-пульсная схема отличается сниженным содержанием высших гармоник в сетевом токе: 9,1% для 11-й гармоники и 7,7% для 13-й гармоники [3], что позволяет значительно упростить сетевой фильтр или отказаться от него.

Классические схемы 12-пульсного выпрямления содержат два трехфазных моста, соединенные последовательно. Для повышения КПД предлагается заменить соединенные друг с другом анодную и катодную группы вентилей, принадлежащих разным мостовым секциям, кольцевым вентильным коммутатором [4]. Выпрямительная схема представлена на рисунке 5.

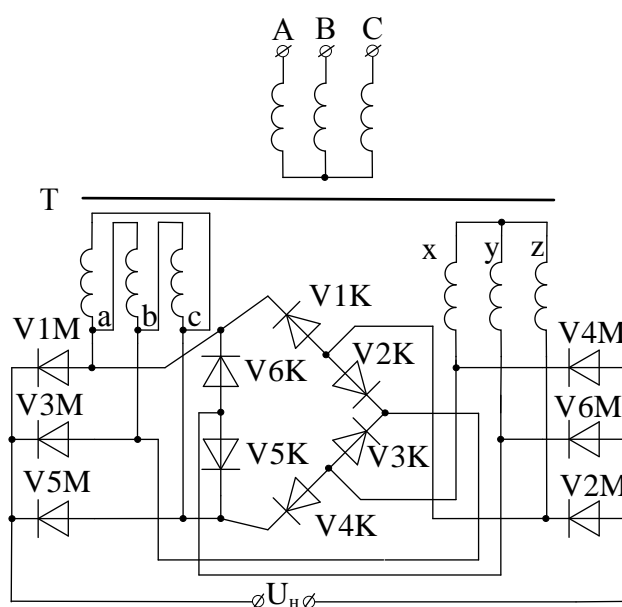


Рис. 5. 12-пульсная схема выпрямления с кольцевым вентильным коммутатором

Для заряда судовых АБ в импульсном режиме рекомендуется использовать ток заряда 0,7С [5], что составляет 1193 А. При этом мощность заряда составит более 900 кВт. Для уменьшения установленной мощности трансформатора на зарядной станции можно установить аккумуляторный накопитель энергии, который заряжался бы в течение дня малым током, а в ночное время отдавал энергию судовым АБ. Указанный накопитель может использоваться также в качестве источника бесперебойного питания при потере питания от городской сети. Недостатками такого решения являются увеличение стоимости оборудования и усложнение систем управления и контроля.

3. Определение режимов заряда судовых аккумуляторов

Импульсный заряд обеспечивает более равномерную диффузию, вследствие чего увеличиваются скорость заряда и продолжительность жизненного цикла.

Оптимальная частота определяется исходя из необходимости обеспечения минимума импеданса АБ. На рисунке 6 показана эквивалентная схема сопротивления АБ [7].

Анодное сопротивление Z_A на единицу площади состоит из емкости двойного электрического слоя $C_{дэс,А}$, емкости тонких слоев $C_{т.с.}$, сопротивления тонких слоев $R_{т.с.}$, фарадеевского сопротивления $Z_{F,А}$. Катодное сопротивление Z_K на единицу площади состоит из емкости двойного

электрического слоя $C_{ДЭС,К}$ и фарадеевского сопротивления $Z_{F,К}$. Полное сопротивление электролита, сепаратора и токоъемника представлено омическим сопротивлением R_0 , включенным между анодом и катодом. Элемент L отображает индуктивность токоъемников и кабелей.

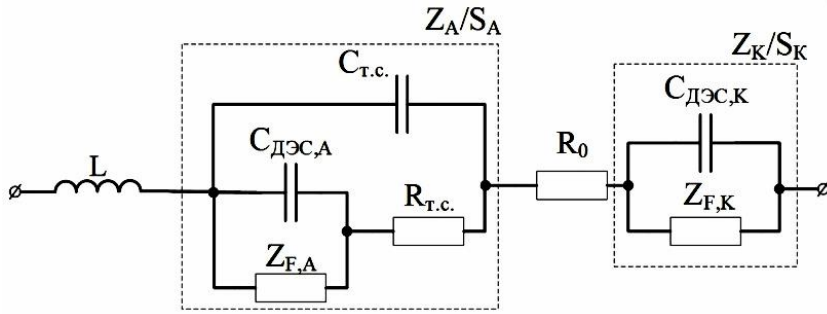


Рис. 6. Эквивалентная схема полного сопротивления батареи

Полное сопротивление АБ можно найти из выражения

$$Z = j\omega L + \frac{Z_A}{S_A} + R_0 + \frac{Z_K}{S_K}, \quad (2)$$

где S_A, S_K – эффективные площади поверхности анода и катода соответственно.

Так как все величины в (2) зависят от частоты (кроме R_0), можно найти оптимальную частоту, обеспечивающую минимизацию полного сопротивления АБ, и тем самым максимальную эффективность передачи энергии.

Найти аналитическую зависимость оптимальной частоты от параметров АБ не представляется возможным ввиду зависимости переменных от времени, сложной структуры АБ и трудностей нахождения параметров элементов. Поэтому оптимальная частота определяется автоматически в процессе заряда: система управления зарядным устройством, изменяя частоту и одновременно измеряя среднее значение тока; осуществляет поиск оптимальной частоты, обеспечивающей минимальное полное сопротивление батареи.

Структурная схема системы генерирования импульсов (СГИ) представлена на рисунке 7, а. Система состоит из детектора оптимальной частоты и контроллера (ДОЧик), генератора импульсов различной частоты (ГИРЧ), датчика тока и преобразователя (ДТиП). ДТиП измеряет ток заряда i и преобразовывает значение тока заряда в цифровой сигнал N_i . ДОЧик вычисляет оптимальную частоту импульсного заряда. На рис. 7, б показана блок-схема ДОЧик. Коммутатор последовательно переключает ДОЧик для работы в трех режимах: режим обнаружения полной заряда (РОПЗ), режим поиска (РП) и режим заряда (РЗ).

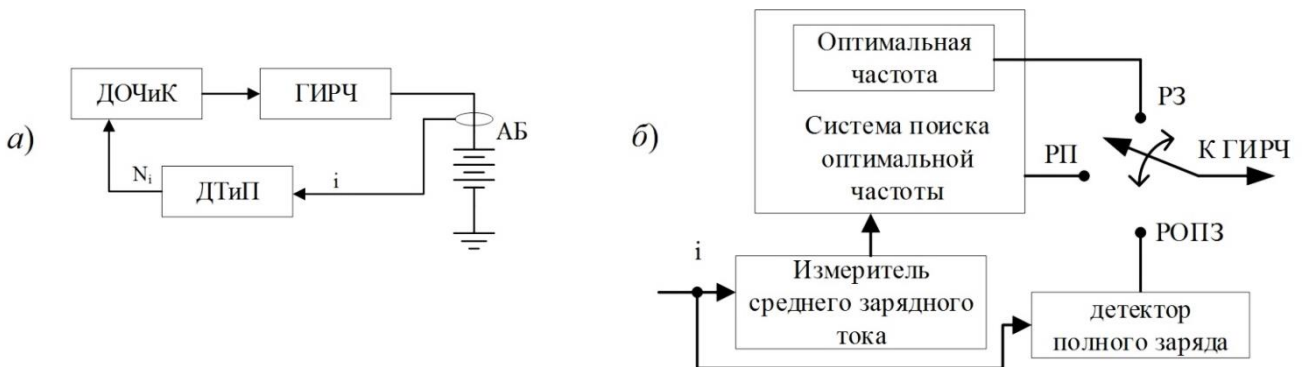


Рис. 7. Структурные схемы СГИ (а) и ДОЧик (б)

РОПЗ, РП и РЗ характеризуются соответственно периодом обнаружения полной заряда T_F , периодом поиска T_S и периодом заряда T_C . На рисунке 8 показаны временная последовательность (а) и диаграмма рабочего состояния СГИ (б).

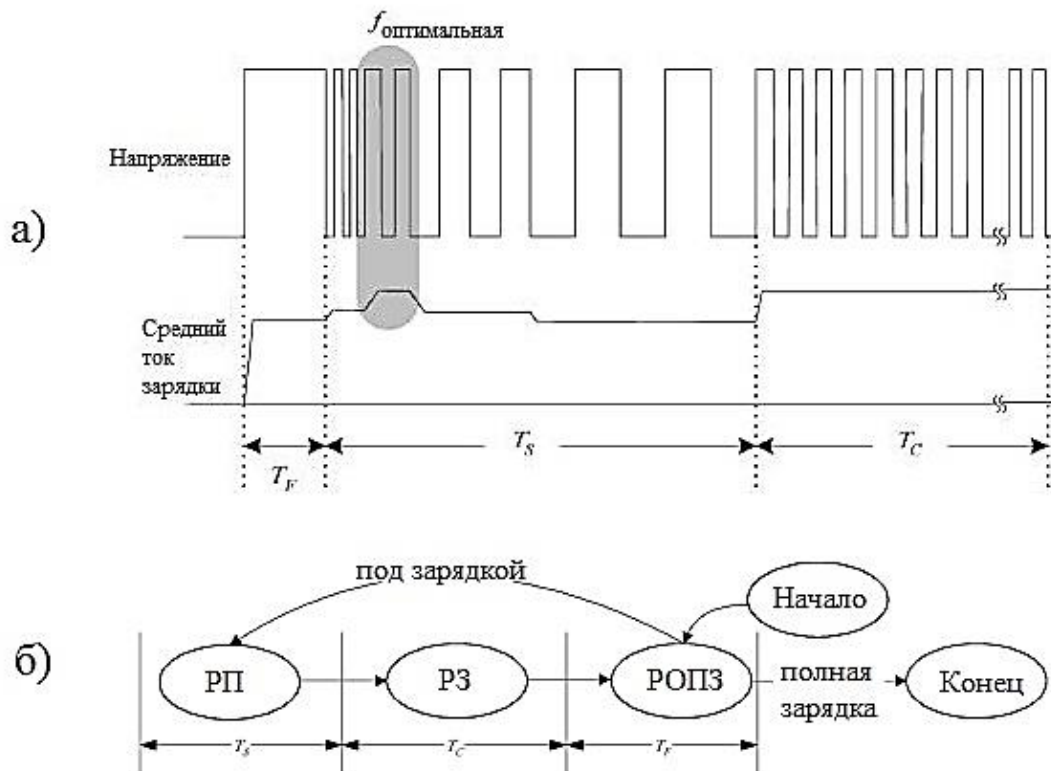


Рис. 8. Временная последовательность и диаграмма рабочего состояния СГИ

Если АБ полностью заряжена, СГИ завершает процесс заряда аккумулятора. В противном случае СГИ переходит в РП, а измеритель среднего зарядного тока и система поиска оптимальной частоты определяют необходимую частоту импульсов заряда. После окончания РП система генерирует импульсы с оптимальной частотой для заряда АБ в РЗ в течение периода заряда.

В РОПЗ определение степени заряда применяется для обнаружения состояния АБ. ДОЧик сначала дает команду ГИРЧ генерировать постоянное напряжение для заряда. Затем ток заряда батареи измеряется и преобразуется в цифровой сигнал с помощью ДТиП. Поскольку ток заряда показывает степень электрохимической реакции, ДОЧик может определить, полностью ли заряжен аккумулятор. В РП измеритель среднего зарядного тока, и система поиска оптимальной частоты работают совместно, чтобы получить оптимальную частоту импульсов заряда. Измеритель среднего тока заряда может быть реализован как программно, так и аппаратно, в то время как поиск оптимальной частоты может быть реализован только программно.

После получения оптимальной частоты заряда импульса ДОЧик переходит к РЗ, а значение оптимальной частоты отправляется в ГИРЧ для генерации импульсов в течение периода заряда. После периода заряда СГИ снова возвращается в РОПЗ, чтобы определить состояние АБ. Описанный процесс повторяется циклически до тех пор, пока зарядный ток не станет меньше или равен 0,01 С, когда аккумулятор полностью заряжен.

4. Определение структуры СГИ

Функциональная схема СГИ показана на рисунке 9. Система состоит условно из трех частей: понижающий DC-DC преобразователь, дроссель и выходной IGBT транзистор. Типичная частота коммутации DC-DC преобразователя составляет 100 Гц. Регулирование тока или напряжения реализуется путем изменения времени открытого состояния транзистора системой управления СУ1. Время открытого состояния изменяется в соответствии разностью сигнала датчика и установленного значения соответствующего параметра в зависимости от выбранного: источник тока или источник напряжения. Дроссель L2 ограничивает скорость нарастания тока заряда АБ.

Выходной IGBT силовой транзистор VT2 коммутируется системой управления СУ2 и обеспечивает формирование напряжения U_z и тока I_z в соответствии с алгоритмом импульсной заряда FCV-PC при частоте импульсов от 500 Гц до 15 кГц.

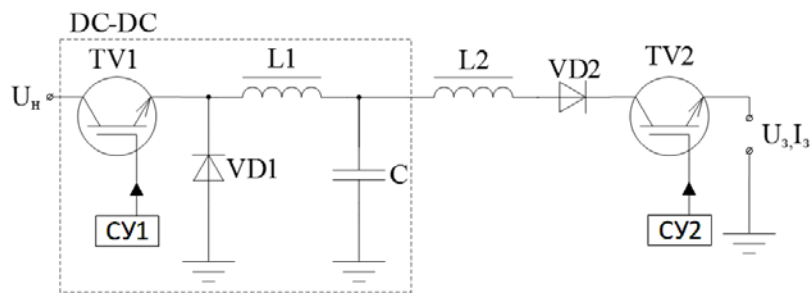


Рис. 9. Функциональная схема СГИ

Заключение

В работе произведен сравнительный анализ зарядных профилей, и выбран наилучший из них для увеличения эффективности заряда аккумуляторных батарей и увеличения их срока службы. Определена схема проектируемой зарядной станции и зарядного устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weixiang Shen, Thanh Tu Vo, Ajay Kapoor. Charging Algorithms of Lithium-Ion Batteries: an Overview // 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). -Faculty of Engineering and Industrial Sciences Swinburne University of Technology Hawthorn, Victoria, 3122, Australia. – 2012. – с. 1567–1572.
2. Shen Weixiang, Xiong Rui. Advanced Battery Management Technologies for Electric Vehicles / Weixiang Shen, Rui Xiong. – Australia: Swinburne University of Technology.-2019. – 256 с.
3. Полупроводниковые выпрямители. Под ред. Ф. И. Ковалева и Г. П. Мостковой. – М.: Энергия, 1978. – 448 с.
4. Игольников Ю. С., Нестеров С. А, Федотов Ю.Б. Двенадцатифазная последовательная схема выпрямления с кольцевым коммутатором // Электронный научный журнал «APRIORI. Серия: Естественные и технические науки». – 2015. – № 4.
5. Liang-Rui Chen. A Design of an Optimal Battery Pulse Charge System by Frequency-Varied Technique// IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 54, NO. 1. – February 2007. – с. 398–405.
6. Baojin Wang, Shengbo Eben Li, Huei Peng. An electrochemistry-based impedance model for lithium-ion batteries // Journal of Power Sources. – 20 May 2018. – с. 9 – 19.
7. Roberts Steve. DC/DC Book of Knowledge / Steve Roberts. – Austria: RECOM Engineering GmbH & Co KG, 2015. – 235 с.

ANALYSIS OF THE SOLUTION FOR THE DEVELOPMENT OF A COASTAL CHARGING STATION FOR AN ELECTRIC FERRY

Savenko Alexey Alexandrovich, student

Geller Boris Lvovich, candidate of engineering sciences, associate professor

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russia, e-mail: rector@klgtu.ru

The purpose of this work is to analyze a possible solution for the development of a Baltic coastal charging station for a medium-sized mainline automobile and passenger eco-friendly electric ferry. In this work, we analyzed the charging profiles of lithium-ion batteries, determined the structure of the power part of the substation, and considered the possible implementation of a charger with an improved charging mode for lithium-ion batteries.

МЕТОДИКА СБОРА ИНФОРМАЦИИ ОБ ОДНОФАЗНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ ИЗОЛЯЦИИ В СУДОВОМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ

Харитонов Максим Сергеевич, канд. техн. наук,
доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики
Кажекин Илья Евгеньевич, канд. техн. наук,
доцент кафедры электрооборудования судов и электроэнергетики
Кугучева Дарья Константиновна, студентка гр. 19-ЭЭ/м.

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: kuguchevad@yandex.ru

В работе описывается методика сбора информации об аварийности судового электрооборудования, связанного с однофазными повреждениями изоляции, на основе экспертных опросов. Разработанные для проведения опросов анкеты позволяют оценить вероятность возникновения однофазных замыканий и опасность их последствий. Проводимое исследование направлено на выявление особенностей возникновения и развития однофазных замыканий в судовых электросетях для последующего формирования требований к средствам защиты и техническому обслуживанию электрооборудования.

С увеличением числа судового электрооборудования резко возросли затраты на обслуживание и ремонт электротехнических устройств. В результате приобретает актуальность задача по созданию и внедрению достаточно достоверных методов оценки и прогнозирования состояния оборудования, а также по улучшению качественных характеристик электротехнических устройств. На многих современных судах общая протяженность кабельных линий составляет сотни километров, суммарная мощность объектов морской техники может измеряться в десятках мегаватт, а напряжение достигать десятков киловольт. При этом постоянно появляются все более электрифицированные суда и указанные показатели увеличиваются. Вместе с этим растет и роль электрооборудования в их аварийности на различных флотах.

Наиболее слабым местом любого электрооборудования считается изоляция. Однако в судовых электроустановках помимо прочего она подвергается воздействиям довольно специфических факторов, таких как повышенная влажность, изменение температуры в широких диапазонах, повышенная вибрация и т.д. Все это способствует ухудшению изоляции, ее электрическому старению, которое приводит к возникновению дефектов и дальнейшему ее пробою. Характерные условия эксплуатации судового оборудования увеличивают вероятность пробоя изоляционных материалов. Дополнительные факторы, оказывающие воздействие на состоянии изоляции, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные виды воздействия на изоляцию судового электрооборудования

Фактор воздействия	Вид воздействия
Механическое	Давление, изгибы, ударо- и виброэлектродинамическое, ударо- и вибромеханическое
Тепловое	Повышенная температура окружающей среды, повышенная температура нагрева, направленное тепловое воздействие, градиент температур
Атмосферное	Влажность, пыль, инертные газа
Электрическое	Повышенное напряжение, частота, частичные и поверхностные электрические разряды
Нагрузка	Кратковременная, длительная, повторно-кратковременная, электрическое торможение и периодический пуск

Еще одной особенностью судовых электросетей, способствующей интенсивному старению изоляции, является их работа в режиме изолированной нейтрали. Перенапряжения, возникающие в таких электросетях по различным причинам, считаются самыми большими [1].

Снижение аварийности за счет уменьшения происшествий, связанных с электрооборудованием, может быть достигнуто за счет двух составляющих. Первая заключается в совершенствовании защитных мероприятий, направленных на уменьшение последствий выхода из строя элементов судовых электросистем и снижения негативных воздействий на них в процессе эксплуатации, например [2]. Вторая направлена на совершенствование методов диагностики для своевременного выявления дефектов электрооборудования на начальной стадии их развития. Повреждения изоляции приводит к необходимости проведения относительно трудоемких восстановительных работ, в крайних случаях включающих демонтаж электрооборудования. Возникновение повреждения в виде однофазного замыкания, не требующего отключения, может сопровождаться опасными дугowymi процессами. Такие повреждения могут стать причиной крупных морских аварий [3, 4]. При этом роль электрооборудования в возникновении судовых пожарах оценивается как весьма значительная [5]. Для обеспечения безаварийной работы большое значение имеет правильное обслуживание электростановки. Известно, что в системе технического обслуживания электрооборудования большое внимание уделяется вопросам диагностического контроля состояния изоляции наиболее ответственных элементов энергосистемы. Своевременно обнаруженные ухудшения диэлектрических свойств изоляции (которые можно определить по значениям емкости и сопротивлению изоляции, тангенсу угла диэлектрических потерь) и принятые меры по восстановлению прочности изоляционных материалов требуют гораздо меньших затрат, чем при вынужденном простое судна и ликвидации последствий аварий.

Для увеличения срока службы и улучшения эксплуатационных характеристик электроэнергетического оборудования за счет оценки состояния изоляции возможно проведение диагностических мероприятий, представленных в таблице 2.

Таблица 2

Перечень типовых стратегий обслуживания оборудования

Вид обслуживания	Методика обслуживания	Обеспечение обслуживания
Обслуживание по факту отказа	Определение элемента оборудования, вызвавшего нарушение работоспособности всей установки	Контроль электротехнических параметров стандартными средствами, протокол поиска причины повреждения.
Регламентное обслуживание	Контроль ресурса оборудования и срока наработки на отказ	Использование методов математического моделирования и экспериментальных методик оценки долговечности оборудования, статистический анализ опыта эксплуатации, способы ускоренных испытаний
Обслуживание по техническому состоянию	Сбор информации о фактическом состоянии элемента энергосистемы	Использование средств технической диагностики
Обслуживание на основе прогнозных данных	Определение прогнозов ожидаемых состояний оборудования, оценка остаточного ресурса	Методы и средства для определения прогнозов ожидаемых состояний оборудования

Насыщенность судовых электроэнергетических систем оборудованием затрудняет применение непрерывного мониторинга каждого элемента электроустановки. Поэтому основным направлением данного исследования является определение наиболее подвергнутых выходам из строя элементов судовой электроэнергетической системы. Это позволит с одной стороны усилить контроль за состоянием изоляции этого оборудования, а с другой – предложить мероприятия по снижению опасности последствий его выхода из строя.

Методика проведения исследования

К основным трудностям в сборе информации об аварийности судового электрооборудования следует отнести:

- отсутствие систематизированных данных в открытой печати об результатах расследований аварийных ситуаций на различных флотах;
- отсутствие наблюдения за повреждениями электрооборудования.

Последнее приводит к ограниченности статистических данных об эксплуатации, которые могут быть использованы для оценки показателей надежности электрооборудования. Оценка таких показателей может проводиться тремя путями [6]:

- в результате стендовых испытаний в лабораторных и заводских условиях;
- путем компьютерного моделирования процессов эксплуатации;
- на основании статистических материалов, полученных путем наблюдений за изделиями в процессе эксплуатации.

Наиболее ценными следует признать результаты полученные третьим путем, поскольку они основываются на изучении и статистическом анализе данных наблюдений за оборудованием в процессе эксплуатации. Такая информация должна собираться и анализироваться в течение длительного времени, а ее сбор необходимо периодически повторять.

При разработке методики сбора информации следует учесть, что запрос излишних сведений затрудняет получение достоверных данных и их последующую обработку. Наилучшим способом указанным требованиям к сбору информации удовлетворяет проведение экспертных опросов, выполненное на основе количественных методов оценки [7].

Анкета должна включать вопросы, ответы на которые позволят оценить опасность однофазных повреждений изоляции. Сбор информации должен обладать незначительной трудоемкостью заполнения анкет и однозначностью толкования задаваемых вопросов и ответов на них. Форма информации, предоставляемой экспертами, должна быть удобной для последующей математической обработки [8, 9]. Сам опрос должен быть индивидуальным, что позволит дифференцировать сообщаемый экспертом опыт по типам судов, их возрасту и времени года наблюдения.

Наиболее достоверную информацию об опыте эксплуатации судового электрооборудования можно получить только у судовых электромехаников, непосредственно обслуживающих его. Их опрос целесообразно организовать при проведении повышения квалификации, во время или после занятий на близкие темы. Сбор информации следует проводить до момента формирования выборки, позволяющей на основе полученных ответов установить статистические закономерности. Для уменьшения субъективности ответов предполагается собирать только информацию, связанную с последним рейсом эксперта.

Описание экспертного опроса

Разработанная для проведения опроса анкета состоит из нескольких частей. Первая предназначена для идентификации опыта эксперта, о котором он сообщает информацию. В этой части анкеты указываются данные о судне и его электрооборудовании, за которым осуществлялось наблюдение, а также данные о стаже опрашиваемого. На этом этапе экспертам предлагается указать следующие данные:

- опыт практической работы на судах;
- год постройки судна;
- темпы обновления оборудования (для судов старше 15 лет);
- тип судна;
- название судна;
- период наблюдения (сроки рейса).

При достаточной выборке получение такой информации позволит выявить наиболее уязвимые места изоляции для судов различных типов, а также сопоставить количество ее выходов из строя с периодом наблюдения.

Вторая часть анкеты предназначена для определения количественных показателей опасности, определяющих вероятность возникновения и длительность существования однофазных замыканий. В этой части опроса эксперты должны оценить показатели, перечисленные в первом столбце таблицы 3. В правом столбце этой таблицы, во второй строке предлагается провести оценку максимального времени, уходящего на поиск повреждения изоляции, а также сколько требуется для это времени в среднем и как наиболее быстро удастся обнаружить и устранить замыкание. В третьей строке второго столбца приводятся возможные причины возникновения однофазных повреждений изоляции, экспертам необходимо распределить указанные в первой строке цифры по предлагаемым вариантам.

Вопросы для количественной оценки вероятности возникновения и длительности однофазных замыканий

Количество случаев замыкания фазы на корпус или частота их возникновения	
Продолжительность существования однофазных замыканий на корпус	Максимальная Средняя Минимальная
Количество случаев замыканий произошедших по следующим причинам	<ul style="list-style-type: none"> – старение изоляции; – механические повреждения; – увлажнения; – загрязнения нефтепродуктами; – электрический пробой изоляции; – перегрев изоляции; – скрытые дефекты изготовления диэлектрической конструкции.

Как показали пробные опросы экспертов, количественные ответы на приведенные ниже вопросы весьма затруднительны и носят приближенный характер. Поэтому остальные этапы опроса носят качественный характер и проводятся в виде ранжирования сравниваемых вариантов по вероятности их возникновения во время последнего рейса.

Третья часть анкеты предназначена для оценки электрооборудования, наиболее подверженного повреждениям. Экспертам необходимо сопоставить различные судовые помещения и виды электрооборудования по вероятности возникновения в них однофазных замыканий. Вопросы и варианты для сравнения этой части анкеты приведены в таблице 4.

Таблица 4

Вопросы для оценки наиболее вероятных мест возникновения однофазных замыканий

Места возникновения однофазных замыканий	<ul style="list-style-type: none"> – машинные отделения; – палуба; – жилые помещения; – иные помещения; – помещения с технологическим оборудованием.
Оборудование, в котором возникли замыкания фазы на корпус	<ul style="list-style-type: none"> – электрические машины; – кабельное оборудование; – катушки индуктивности; – щитовое оборудование; – бытовые потребители; – элементы силовой электроники.

В четвертой части оценивается характер и последствия однофазных замыканий. В таблице 5 приводятся сопоставляемые варианты.

Таблица 5

Вид и последствия однофазного замыкания

Характер однофазного повреждения изоляции	<ul style="list-style-type: none"> – устойчивая дуга; – неустойчивая дуга или искра, в том числе при периодическом контакте фазы с корпусом; – переходное сопротивление; – глухое замыкание; – неустранено .
Последствия однофазного замыкания	<ul style="list-style-type: none"> – возгорание; – погасание судовой электростанции; – нарушения электроснабжения ответственных потребителей; – нарушение электроснабжения технологических потребителей; – капитальный ремонт электрооборудования; – текущий ремонт электрооборудования; – электротравмы.

Как видно из таблиц 3-5 предложенный опрос позволяет собрать наиболее значимую информацию об однофазных замыканиях при весьма ограниченном наборе достаточно четко сформулированных вопросов, задаваемых экспертам.

Заключение

Разработанная методика сбора информации позволяет оценить опасность однофазных повреждений изоляции при современном состоянии различных флотов. На основе полученных результатов могут быть определены направления в совершенствовании защитных устройств, предназначенных для снижения последствий однофазных замыканий, а также разработаны методы диагностики электрооборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Благинин, В. А. Дуговые перенапряжения в судовых электросистемах с различными режимами нейтрали / В. А. Благинин, В. И. Лозовенко, И. Е. Кажекин // Известия КГТУ. - 2008. - № 13. - С. 118-121.
2. Кажекин, И.Е. Феррорезонансные процессы при однофазных замыканиях в судовых электроустановках с компенсированной нейтралью / И.Е. Кажекин // Известия КГТУ. - 2019. - №52. - С. 145-154.
3. Кажекин, И.Е. Формирование максимальных перенапряжений при возникновении феррорезонансных процессов во время дуговых однофазных замыканий в низковольтных судовых электросистемах/ И.Е. Кажекин// Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. - 2020. - № 1. - С. 115-124.
4. Кажекин, И.Е. Описание процессов при дуговых однофазных замыканиях в низковольтных судовых электросетях с компенсированной нейтралью/ И.Е. Кажекин // Морские интеллектуальные технологии. - 2019. - Т. 4. - № 4 (46). - С. 83-87.
5. Емельянов, М.Д. Критичные элементы морских судов (в порядке обсуждения)/ М.Д. Емельянов // Судостроение. - 2008. - № 6 (781). - С. 16-22.
6. Борисов, В.М. Методика сбора информации для оценки экспериментальной надежности компрессорных и холодильных машин/ В.М. Борисов, С.В. Борисов // Вестник Казанского технологического университета. - 2012. - Т. 15. - № 10. - С. 222-225.
7. Бубнова, А.Ю. Сравнительный анализ социологических методов исследования аудитории/ А.Ю. Бубнова, С.Л. Мельников// Научный журнал Дискурс. - 2018. - № 5 (19). - С. 87-101.
8. Осипов, Г. В. Методы измерения в социологии/ Э.П. Андреев, Г.В. Осипов. - М. : Наука, 1977. – 170 с.
9. Девятко И. Ф. Методы социологического исследования. - Екатеринбург: Изд-во Урал, унта, 1998.- 208 с.

THE METHOD OF COLLECTING INFORMATION ABOUT SINGLE-PHASE INSULATION DAMAGES IN SHIP'S ELECTRICAL EQUIPMENT

Kharitonov Maxim Sergeevich, Cand. Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment for Vessels and Electric Power Industry
Kazhekin Ilya Evgenievich, Cand. Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment for Ships and Electric Power Industry
Kugucheva Daria Konstantinovna, student of gr. 19-EE / m.

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russia, e-mail: kuguchevad@yandex.ru

The paper describes a methodology for collecting information on the accident rate of ship electrical equipment associated with single-phase insulation damage, based on expert interviews. The questionnaires developed for conducting surveys allow us to assess the likelihood of single-phase faults and the danger of their consequences. The study is aimed at identifying the features of the occurrence and development of single-phase faults in ship power grids for the subsequent formation of requirements for protection means and maintenance of electrical equipment.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУДОВЫХ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

¹Чижма Сергей Николаевич, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры электрооборудования и автоматики судов

²Молчанов Сергей Васильевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент Института физико-математических наук и информационных технологий

²Матюнин Петр Александрович, аспирант Института физико-математических наук и информационных технологий

¹ Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: chisn@yandex.ru

²ФГАОУ ВО Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия, e-mail: smolchanov@kantiana.ru; pmatiunin@kantiana.ru

Появление постоянных неодимовых высококоэрцитивных магнитов изменило тенденции в построении синхронных электрических машин. Синхронные машины на постоянных магнитах повсеместно начинают использоваться в судовых генераторах и двигателях. В статье рассмотрены особенности построения электрических машин на постоянных магнитах, их достоинства и недостатки, особенности применения в качестве судовых генераторов и двигателей. Показано состояние использования синхронных машин на постоянных магнитах ведущими предприятиями, производящими судовые электрические машины.

Введение. В судовых электроэнергетических системах наиболее часто в настоящее время применяются асинхронные и синхронные электрические машины (СЭМ), а также машины переменного тока, которые выполняют роль и двигателей, и генераторов.

Распространенным видом маломощных генераторов сейчас являются синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ). Этому способствовало появление на рынке неодимовых ПМ, обладающих высокой удельной магнитной энергией при относительно невысокой стоимости. Тенденция применения таких генераторов наблюдается и в судовых системах, при этом наблюдается значительный рост мощности генераторов.

Электродвигатели на ПМ уже несколько десятилетий применяются в маломощных устройствах, где они привлекают характерным для них малым отношением массы к мощности. Усовершенствование конструкции двигателей обеспечивает значительное повышение мощности, позволяет обойтись без редукторов, а это упрощает обслуживание, повышает надежность и улучшает массогабаритные показатели [1].

Использование мощных синхронных электрических машин с постоянными магнитами (СЭМПМ) в судовых электроэнергетических системах становится все более заметным. При этом их объем ограничен более стоимостью, чем технологией. Большая плотность мощности и энергоэффективность – вот главные преимущества СЭМПМ.

В настоящей статье описаны результаты информационного обзора и анализа применения электрических двигателей и генераторов на ПМ в судовых электроэнергетических системах.

Обзор существующих судовых электрических машин с ПМ. Современные судовые электроэнергетические системы, как правило, работают на переменном токе. В случае большого количества потребителей постоянного тока, их энергообеспечение выполняется с помощью преобразователей переменного тока в постоянный – инверторов. По этой причине, наиболее часто в современных судах в качестве источников электроэнергии используются генераторы переменного тока [2, 3].

Отечественный морской флот использует СЭМ нескольких серий в диапазоне мощностей 10кВт...10 МВт: МСК, МСС, ГСС, ГМС, ТМВ и др., с напряжением 230 или 400 В и промышленной частотой 50 Гц. Номинальная частота вращения ротора генератора может быть равна 500, 750, 1000,

1500 и 3000 об/мин. Наибольшее применение получили синхронные генераторы (СГ) серий МС, МСК, МСС, ГМС, ОС, СБГ [4].

В качестве СГ в составе отечественных судовых турбогенераторных и дизель-генераторных установках в сейчас используются СЭМ следующих марок:

- МСК, ГМ, ГС, МСС, ГМС (АО «Электросила», г. Санкт-Петербург);
- ТК (АО «Привод», г. Лысьва);
- ТПС (ООО «ПО ЛЭЗ», г. Санкт-Петербург);
- СГ2 (АО «СЭЗ», г. Сафоново, Смоленской обл.);
- DSG62L24W, DSG74L14W и другие (ТО «AvK» Германия);
- 1FC2, 1FC3 («Siemens» Германия).

Основными техническими требованиями, предъявляемыми к генераторам морских судов, являются:

- обеспечение низких уровней шумов и вибраций;
- обеспечение высоких показателей надёжности;
- достижение минимально возможных массогабаритных показателей.

Применение синхронных электрических машин с постоянными магнитами в качестве генераторов позволяет создавать высокоскоростные электрические машины с хорошими массогабаритными и виброшумовыми характеристиками, а следовательно избежать описанных выше проблем и достичь заданных технических требований.

Традиционные СЭМ сложнее асинхронных, и поэтому требуют большего объема ремонтно-профилактических работ. Однако применение в новых СЭМ постоянных магнитов позволило упростить конструкцию благодаря созданию в зазоре между статором и ротором постоянного магнитного потока, что исключило необходимость наличия роторных обмоток и щеток, обычно применяемых для возбуждения.

В итоге получилась СЭМ, сочетающая в себе высокую точность, свойственную синхронным двигателям, и конструктивную надежность асинхронного двигателя. Напряжение подается непосредственно на статор от блока возбуждения с переменной частотой.

СЭМ отличается также большей мощностью при меньших габаритах. В случае привода механизмов, имеющих частоты вращения от 220 до 600 об/мин для обычной асинхронной машины требуется опорная конструкция существенно большего размера, чем для двигателя, работающего на 1500 об/мин. Новые СЭМ в большинстве случаев требуют опорной конструкции такого же и даже меньшего размера, что и для асинхронного двигателя.

Постоянные магниты. ПМ современных двигателей и генераторов изготовлены из новейшего материала NdFeB (неодим-железо-бор), который отличается наиболее высокими магнитными характеристиками. Он обеспечивает создание магнитного потока высокой плотности, обладает очень высокой способностью к намагничиванию и исключительно устойчив к размагничиванию. К тому же он дешевле материала на основе соединения кобальта с самарием – еще одним редкоземельным элементом, широко применявшимся в 80-е годы прошлого столетия.

Коррозионная стойкость, механические свойства и температурный диапазон современных магнитных материалов в последнее время значительно повысились. Это обеспечило возможность эксплуатации машин с ПМ в различных отраслях транспорта, которые характеризуются тяжелыми режимами работы. Удельная намагничивающая сила неодимовых ПМ за последние десять лет повысилась в три раза, при этом стоимость магнитов уменьшилась в пять раз. На рис. 1 показана динамика изменения мощности электрических машин с ПМ [5]. Стоимость на неодимовых ПМ за последние годы значительно снизилась, тем не менее, этот магнитный материал более дорогой, чем материалы, используемые в роторах асинхронных двигателей. Фактор высокой стоимости ПМ и относительно малый объем выпуска обуславливают высокую цену СЭМ ПМ. Что, в свою очередь, определяет невысокий спрос на эти машины.

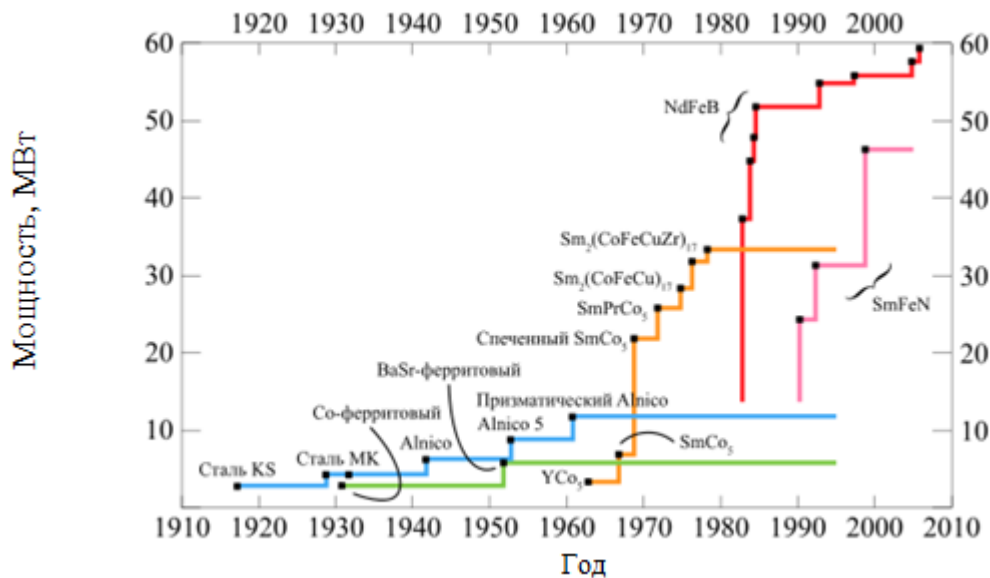


Рис. 1. Динамика изменения мощности электрических машин с ПМ

Конструкции электрических машин с ПМ. В СЭМПМ постоянно направленное поле возбуждения образуется с помощью ПМ. Электрическая машина на ПМ работает по принципу взаимодействия магнитных полей движущегося ротора и неподвижного статора. СЭМПМ не нужен возбудитель. Эти машины имеют высокий КПД за счет отсутствия потерь на возбуждение и в скользящем контакте, при этом их надежность существенно выше, чем у обычных СЭМ, которые имеют ненадежные вращающуюся обмотку возбуждения и щеточное устройство. СЭМПМ практически не требуют обслуживания за весь срок службы

СЭМ содержит неподвижный статор и подвижный ротор, которые при протекании тока через обмотку статора в двигательном режиме или при вращении ротора в режиме генератора взаимодействуют между собой. Ротор СЭМ ПМ содержит постоянные магниты [6].

СЭМПМ не содержат роторные обмотки возбуждения. Вращение ротора происходит путем взаимодействия магнитных полей статорных обмоток и ПМ, которые расположены на роторе электрической машины.

СЭМ содержит подвижную (ротор) и неподвижную (статора) части. Различают следующие типы роторов:

- по типу установки магнитов. ПМ размещаются на поверхности (рис. 2) и внутри (рис. 3) ротора. Роторы со встроенными ПМ могут использоваться в электрических двигателях, работающих при высоких нагрузках на валу и значительных скоростях. Роторы такого типа имеют высокую стоимость;

- по конструктивным особенностям (роторы с явными и неявными полюсами). Неявнополюсные имеют равную индуктивность по осям горизонтальной плоскости, явнополюсные роторы имеют одинаковую величину индуктивности.

Соответственно, существуют две конфигурации роторов: со слабо выраженными магнитными полюсами и с ярко выраженными полюсами. Роторы с неявно выраженными полюсами имеют равная индуктивность по перечным и продольным осям, роторов с ярко выраженными полюсами подобная однородность отсутствует.

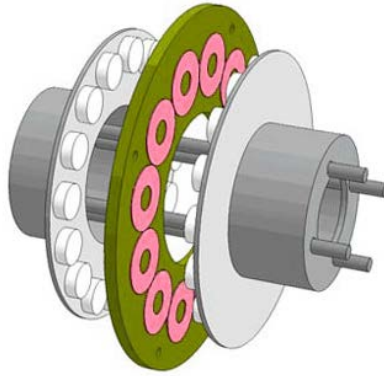


Рис. 2. СЭМ с ротором с поверхностным креплением магнитов



Рис. 3. СЭМ с ротором со встроенными магнитами

Статор СЭМ содержит сердечник, набранный из листов электротехнической стали, и одно-, трех-или многофазной обмотки. Существуют с обмотками распределенного и сосредоточенного типа. Первый тип обмотки отличается различным положением витков в магнитном поле. В обмотках сосредоточенного типа витки расположены одинаково.

СЭМ содержит следующие основные составляющие (рис. 4): выполненный из электротехнической стали сердечник статора со стержневой обмоткой, ступица ротора, секции сердечника ротора, постоянные магниты, являющиеся частью ротора, опорный подшипник.

В основе своей работы генераторы переменного тока на ПМ применяют вращающееся магнитное поле, которое создается магнитами. При вращении ротора магнитное поле, создаваемое ПМ, находящимися на вращающемся роторе, индуцирует электродвижущую силу (ЭДС) в обмотке статора и соответственно напряжение на выходе генератора, а при подключении нагрузки – ток в обмотках статора.

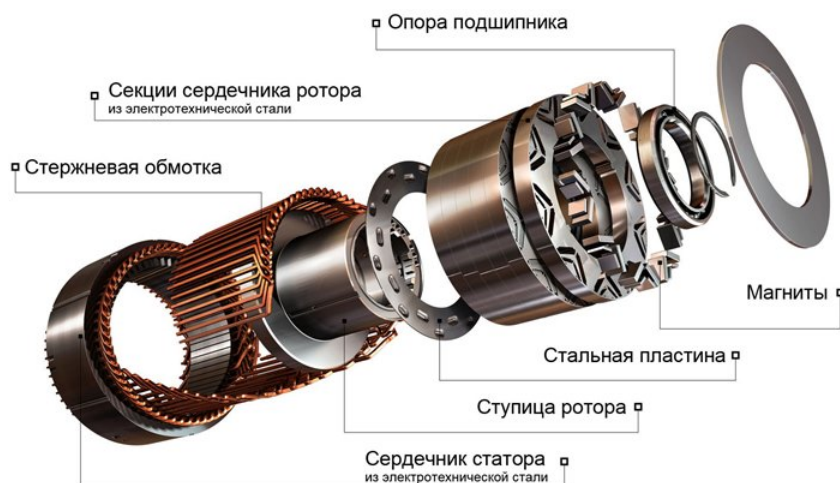


Рис. 4. Конструкция СЭМПМ

Если СЭМ используется как двигатель, то переменный ток, проходящий через обмотки статора, генерирует вращающееся магнитное поле, взаимодействующее с ПМ таким образом, что ротор начинает вращаться синхронно с магнитным полем.

Принцип работы СЭМ базируется на законе Ампера. Вращающий момент создается при взаимодействии поля ротора, образуемого ПМ, и магнитного поля обмоток статора.

Наиболее перспективным типом электрической машины с ПМ является машина с полюсами на статоре. Такая электрическая машина имеет простую конструкцию статора. Тепловыделение происходит в основном только на статоре. При этом легко обеспечиваются герметизация конструкции, воздушное или водяное охлаждение.

При использовании сильных ПМ стало возможным получить необходимую мощность СЭМ меньших размеров, в совокупности с инвертором электрического тока – получить идеальный синусоидальный выходной сигнал.

Управление синхронными машинами в двигательном режиме осуществляется при помощи частотных преобразователей. Для управления СЭМ используется два принципа: скалярный и векторный.

Скалярное управление – достаточно простой и дешевый принцип. При малых скоростях вращения ротора и нестабильной величине нагрузке на валу, такой метод неэффективен. При превышении предельного момента силы на валу, СЭМ теряет синхронный режим и становится неуправляемой.

Векторный принцип управления синхронным двигателем с ПМ реализуется тремя способами:

- полеориентированное управление. Имеется возможность плавного регулирования частоты вращения и момента на валу. Необходим датчик положения;

- полеориентированное управление СЭМ без датчика обратной связи. Угол поворота ротора основывается на генерации двигателем против ЭДС при вращении. Метод неэффективен при малых скоростях вращения;

- прямое управление моментом. Этот принцип отличается хорошими динамическими характеристиками и широким диапазоном регулировки скорости. Для этого принципа характерны значительные погрешности расчета положения ротора и большие колебания момента на валу и тока статора.

Достоинства и недостатки СЭМПМ. Синхронные машины с ПМ позволяют совместить простоту конструкции двигателей переменного тока и гибкость управления двигателями постоянного тока. Они имеют следующие достоинства.

1. Энергетическая плотность СЭМПМ более высока по сравнению с асинхронными и синхронными двигателями. Это свойство обуславливает меньшие вес и габариты. Например, асинхронный двигатель аналогичной мощности и класса энергоэффективности по габаритам в два раза больше СЭМПМ.

2. Высокий КПД при любых частотах вращения ротора, включая пониженные скорости. СЭМПМ на 1-2% превосходят по КПД синхронные и асинхронные машины при полной нагрузке и на 10-15% – при неполной. Эффективность обеспечена постоянным возбуждением ротора на ПМ и отсутствием потерь в роторе на любой скорости. Примером является низкоскоростной корабельный синхронный двигатель [7], достигающий поразительного КПД – 99,3%!

3. Охлаждение машины более простое, так как тепло, исходящее от ротора, достаточно мало. В СЭМПМ нужно охлаждать только статор, поэтому легко реализуется охлаждение забортной водой. Простая конструкция системы охлаждения также обеспечивает достаточно гибкую геометрию машины.

4. В СЭМПМ возможен большой диапазон соотношений размеров, по сравнению со стандартными машинами. Возможны как более короткие, но с увеличенным диаметром, так и удлиненные, узкие машины.

5. Длительный срок эксплуатации.

6. Малый шум и вибрации при работе машины.

7. Автономность работы, которая дает возможность эксплуатировать СЭМПМ без постоянного обслуживания установки.

8. Колебания напряжения в сети в малой степени воздействуют на машину.

9. Высокая перегрузочная способность. Сохранение момента на валу при любой скорости вращения ротора. Скорость вращения выходного вала остается неизменной при любой нагрузке, если она не превышает показатель перегрузочной способности.

10. Малая инерционность при большом моменте.

Недостатками СЭМПМ являются:

1. Высокая стоимость по сравнению с синхронными машинами аналогичного класса.

2. Хрупкость ПМ. При сильном ударе, неодимовый ПМ может потерять свои свойства.

3. Малая коррозионная стойкость. Для устранения этого недостатка необходимо специальное покрытие магнитов.

4. Магнитные параметры ПМ зависят от температуры, под влиянием нагревания неодимовые магниты частично теряют свои магнитные свойства, существует тенденция размагничивания ПМ при высоких температурах.

5. Недостатком СЭМПМ является необходимость использования оборудования для запуска и вхождения в синхронный режим. Указанная проблема решается с помощью частотных преобразователей и современных материалов для магнитов.

Применение СЭД с ПМ в генераторах. Синхронные генераторы соединяются с питающей сетью или напрямую, или через звено постоянного тока [8]. В первом случае необходимо обеспечивать стабильную частоту вращения генератора. В случае наличия звена постоянного тока используется схема, представленная на рис. 5.

Двигатель внутреннего сгорания или турбина вращает вал генератора, выходной сигнал которого выпрямляется, фильтруется и с помощью конвертера на базе широтно-импульсной модуляции стабилизируется, после чего преобразуется в синусоидальный сигнал с помощью инвертора и выходного фильтра.

При изменении скорости вращения генератора выходное напряжение не изменяется за счет стабилизации выходного напряжения конвертера, управление которым осуществляется путем регулирования коэффициента заполнения, частота выходного сигнала инвертора обеспечивается стабильностью частоты задающего генератора. Появление быстродействующих IGBT-транзисторов, работающих при больших напряжениях и токах позволяет создать мощные схемы с высоким КПД и малыми потерями.

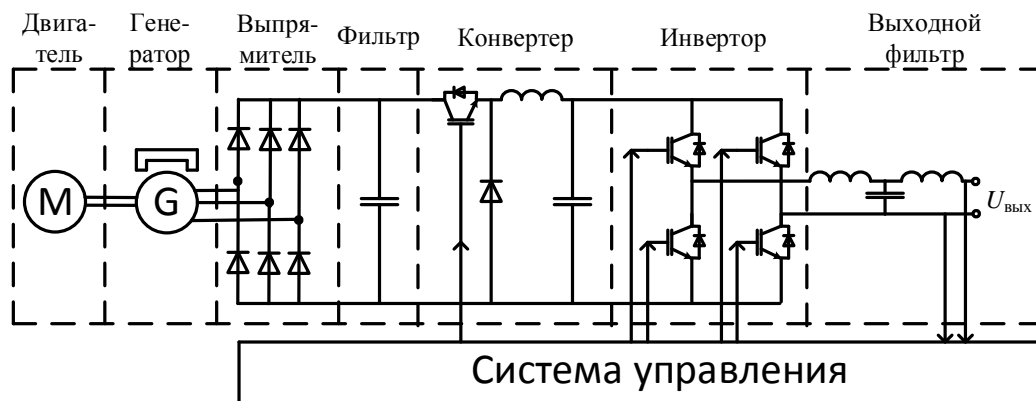


Рис. 5. Структурная схема генератора со звеном постоянного тока

Один из лидеров по изготовлению судовых генераторов – фирма АВВ выпускает линейку генераторов [9], в том числе и на постоянных магнитах. Генераторы АВВ на постоянных магнитах с концепцией полных преобразователей позволяют добиваться максимальной производительности при компактном размере и малом весе, а также упростить производство энергии и ее логистику, обладают одним из самых высоких показателей КПД на рынке – более 98 %. Производителям турбин это сочетание позволяет быстро перейти к концепции полного преобразователя без необходимости изменять конструкцию.

Генераторы, выпускаемые фирмой АВВ, имеют мощность до 8 МВА, выходное напряжение 690 В...12 кВ, диапазон скоростей 14...2000 об/мин.

Ряд иностранных компаний начали производить синхронные генераторы для морских судов различных категорий. Так, фирма Gamesa Electric [10] производит различные генераторы переменного тока и двигатели на постоянных магнитах мегаваттного класса для морского применения. Фирма разработала продукты в соответствии с международными морскими требованиями, чтобы гарантировать их хорошую интеграцию с существующими системами надводных и подводных судов. На рис. 6 приведен внешний вид генератора на постоянных магнитах фирмы Gamesa Electric.

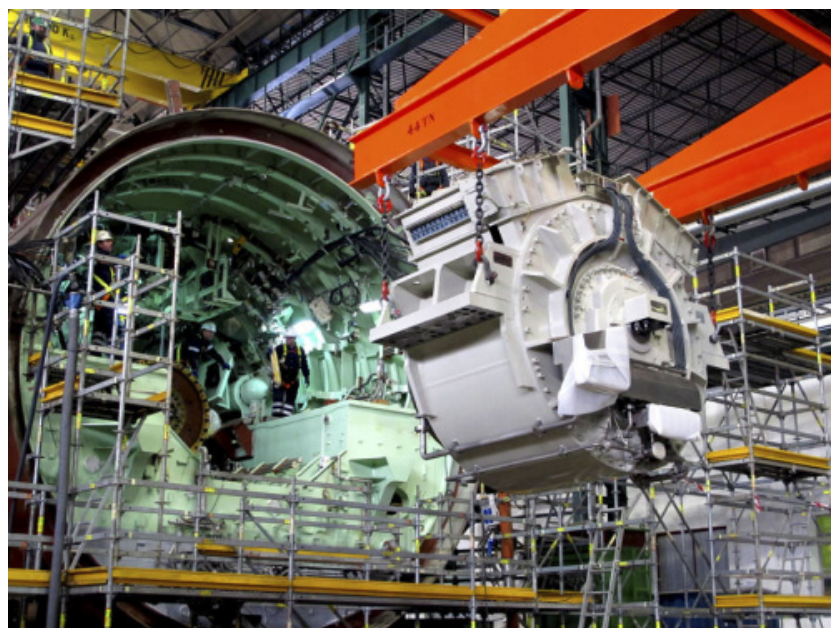


Рис. 6. Внешний вид генератора на постоянных магнитах фирмы Gamesa Electric

Фирма EMG-EMCO (Франция) выпускает трехфазные генераторы на постоянных магнитах мощностью от 1 до 250 кВА, выходная частота от 50 Гц до 400 Гц, частота вращения от 75 до 3600 об/мин (рис.7).



Рис. 7. Внешний вид генератора на постоянных магнитах фирмы EMG-EMCO

Фирма Nautic Expro [11] предлагает линейку синхронных электрических машин переменного тока с постоянными магнитами серий LPMG (рис. 8), SPM, MWB, имеющих возможность работать как в генераторном, так и в двигательном режимах. Машины предназначены для работы в са-

мых суровых условиях, где требуется надежный, компактный и долговечный двигатель/генератор с высоким КПД. Назначение электрических машин – от небольших прогулочных яхт до больших коммерческих судов, мощность от 10 до 350 кВт.

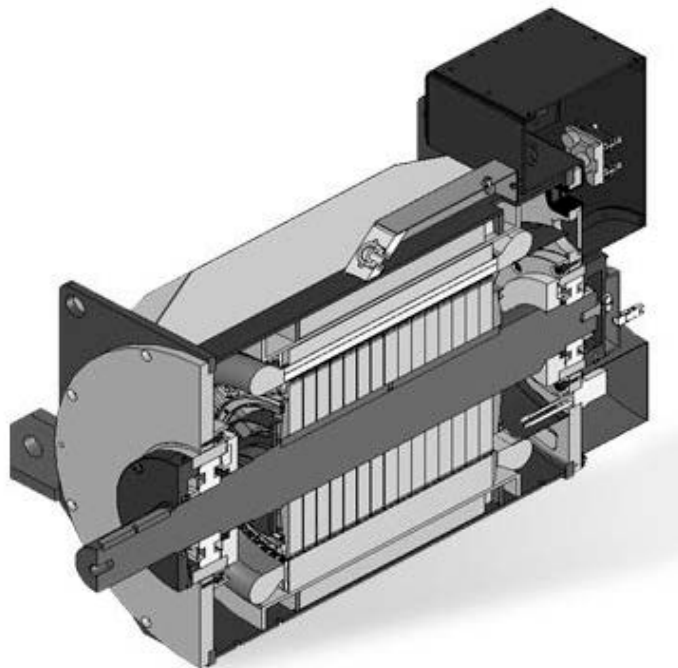


Рис. 8. Генератор переменного тока для судна LPMG

Применение генераторов с постоянными магнитами на яхтах и катерах стало уже повсеместным. Применяются дизель-генераторы с переменной скоростью вращения. Генератор обеспечивает переменное напряжение, частота и амплитуда которого стабилизируются внешним модулем. После этого напряжение подается на комбинированное инвертор-зарядное устройство, которое питает бортовую сеть переменного тока и заряжает аккумуляторную батарею во время работы дизельного генератора или когда лодка подключена к береговой сети.

Таким образом, в современных генераторах все чаще используют постоянные магниты, что делает актуальным исследование таких генераторов и внедрение их в судовые электроэнергетические системы.

Применение СДПМ в двигателях. В последние годы произошло значительное повышение надежности частотных преобразователей, увеличение их номинальной мощности. Мощность современных может достигать до 60 МВт. Тенденция повышения мощности связана с разработкой устройств коммутации сигналов с большими напряжениями и токами, в первую очередь транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и тиристоров с полным управлением (IGCT). Двигатели с ПМ оптимальны там, где используются частотный приводы или там, где управление с регулируемой частотой экономически целесообразно.

Раньше частотные преобразователи с IGBT-транзисторами, управляющими СЭМПМ в двигательном режиме, были мало доступны из-за дороговизны. За последние годы такие преобразователи стали более доступными по более низким ценам. Тем не менее считается, что малый объем использования двигателей с ПМ обусловлен рыночными, а не с технологическими факторами. Мощные двигатели с ПМ достаточно легкодоступны, но невзирая на высокую плотность мощности, лучшую эффективность, меньшие габариты и более высокие динамические характеристики эти двигатели дороже аналогичных синхронных двигателей. По этой причине количество производителей таких двигателей ограничено [12].

Одной из первых синхронные двигатели на ПМ стала применять фирма АВВ [9]. Azipod – система без редуктора, в которой электродвигатель расположен вне корпуса судна в изолированной гондоле. Azipod содержит электрический двигатель и управляющий частотный преобразователь (рис. 9). Для судов,двигающихся по ледовым путям, требуется высокий крутящий момент на валу гребного винта. Здесь СЭМПМ имеют значительное преимущество по сравнению с дизель-

ными двигателями: они имеют возможность создавать максимальный крутящий момент при малых частотах вращения гребного винта.

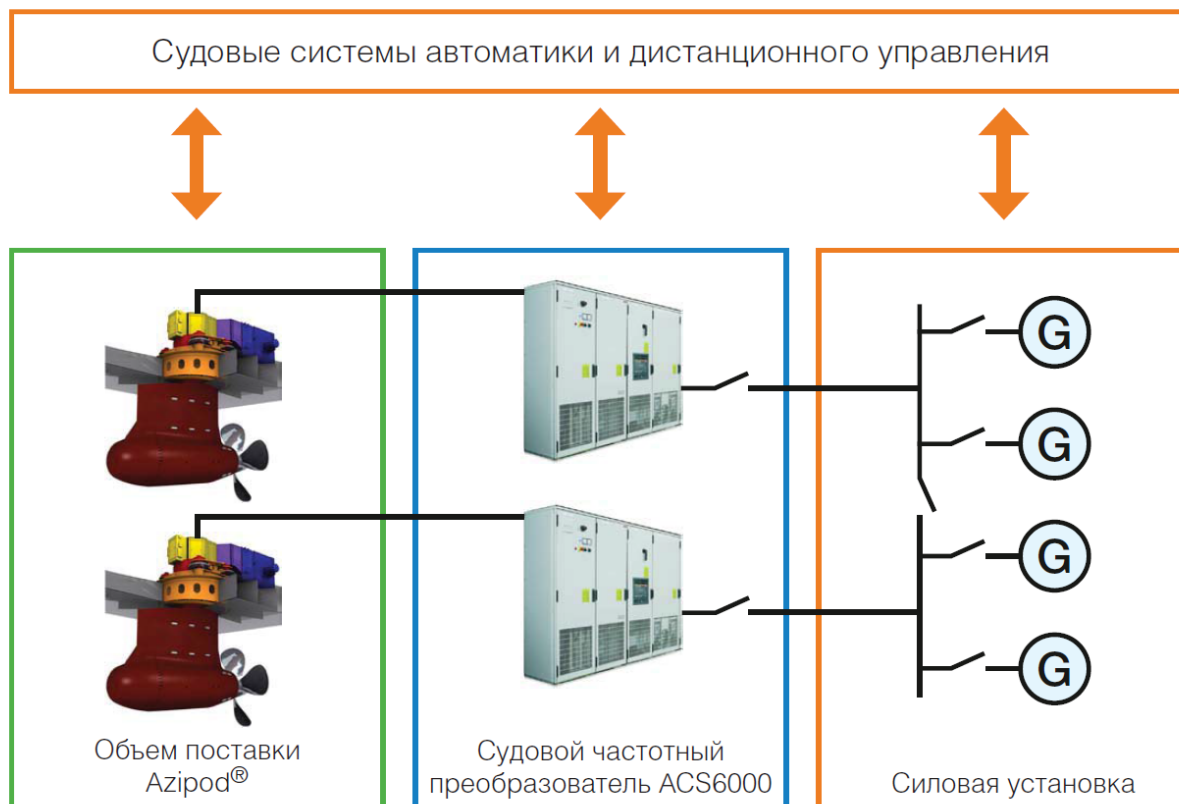


Рис. 9. Упрощенная однолинейная схема силовой установки и движительной системы

Azipod ICE оснащен электродвигателем на постоянных магнитах – наиболее оптимальной технологией для невысоких мощностей. Эффективность системы обеспечивается благодаря мощным синхронным двигателям с постоянными магнитами и передаче момента на винт без редуктора – напрямую. Конструкция позволяет двигателю охлаждаться непосредственно окружающей морской водой без дополнительных охлаждающих сред.

Данные комплексы установлены на танкеры-снабженцы «Тимофей Гуженко», «Михаил Ульянов» и «Кирилл Лавров». Мощность их ГЭД в среднем составляет от 2 до 10 МВт [13].

Компания DRS Technologies Inc., занимающаяся разработкой и производством больших асинхронных двигателей с ПМ, начала применять ряд своих разработок на морских судах [7] и выпускать двигатели больших размеров. Частотные приводы, применяемые фирмой, представляют собой приводы высокого напряжения (1,5-6,6 кВ) с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и векторным принципом управления.

DRS Technologies испытали при максимальной мощности в 36,5 МВт судовой асинхронный двигатель с ПМ для ВМС США, при этом величина крутящего момента была не менее 270 кНм. Фирма Sanory Technologies LLC, совместное предприятие DRS и Elliott Company, проведено испытание синхронного двигателя мощностью 11,4 МВт, частота вращения 6225 об/мин. Производитель утверждает, что это два двигателя являются самыми мощными СЭМПМ в мире. Мощные двигатели с ПМ имеют оптимальное использование в больших морских судах. Их применение экономически эффективно по причине роста цены топлива. По сообщению DRS, эта организация также выпускает высокоэффективные судовые двигатели с ПМ, которые имеют энергоэффективность более 1,65 кВт/кг при мощностях 380...750 кВт.

Фирма Powertec Industrial Motors Inc. участвует в программе ВМС США «Stealth Destroyer», где применяются мощные высокودинамичные синхронные двигатели с ПМ. Синхронный двигатель, имеющий малый диаметр (30 см), создает крутящий момент не менее 1080 Нм при скорости 2000 об/мин и пиковой мощности до 220 кВт. По итогам испытаний ВМС рекомендует использование судовых СЭМПМ везде по возможности, учитывая их меньшие массу и размеры [14]. В на-

стоящее время фирма Powertec достигла уровня 750 кВт для стандартных синхронных двигателей с ПМ [15].

Подразделение фирмы Siemens – Automation & Drives Div. Siemens AG выпускают асинхронные двигатели с ПМ, имеющие высокий крутящий момент [16]. Двигатели такого типа работают с прямым приводом без редуктора. По мнению специалистов Siemens мощные двигатели с ПМ с частотами вращения 800...5000 об/мин не имеют реальных преимуществ по сравнению с асинхронными двигателями, при этом применение ПМ эффективно для высокоскоростных электродвигателей с частотами вращения 10000 об/мин и выше. Стоимость неодимовых ПМ постоянно снижается, а это делает технологию двигателей с ПМ более экономически эффективной. В то же время, двигатели с ПМ все еще дороже по сравнению с асинхронными двигателями. Поэтому синхронные двигатели с ПМ вряд ли заменят в обозримом будущем широко распространенные асинхронные двигатели для стандартных приложений.

Специалисты Yaskawa Electric [17] выражают мнение, что для создания больших бесколлекторных двигателей с ПМ в диапазоне до 100 кВт не существуют технических барьеров. Проблемы в заключаются в высокой стоимости двигателей с ПМ.

Итальянское предприятие Oemer Motori Elettrici Spa также производит мощные синхронные двигатели с ПМ [18]. Предприятие выпускает безредукторные синхронные электродвигатели с ПМ, имеющие большие пусковые моменты с мощностями до 300 кВт и числом оборотов до 500 об/мин, трехфазные двигатели мощностью до 318 кВт при 5000 об/мин, имеющие жидкостное охлаждение, и высокоскоростные двигатели, которые имеют выходную мощность более 1 МВт при числе оборотов до 2600 об/мин для скоростных приложений.

Выводы

1. Выпускаемые в последнее время постоянные неодимовые магниты получили широкое распространение при изготовлении электрических машин. Опыт проектирования, разработки, производства и эксплуатации электрических машин с высококоэрцитивными постоянными магнитами показал их высокие технико-экономические характеристики, обоснованность и целесообразность их применения в судовых электроэнергетических системах как в качестве генераторов электрической энергии, так и в качестве двигателей.

2. В настоящее время расширение диапазона мощностей судовых электрических машин с постоянными магнитами сдерживается не техническими, а экономическими причинами. Ожидается, что по мере расширения областей применения электрических машин на постоянных магнитах цена магнитных материалов для них, которая сегодня довольно высока, будет снижаться. Это открывает дорогу к более широкому применению таких машин в морском исполнении, где благодаря повышенному КПД, обусловленному значительным снижением потерь, они обеспечат экономию электроэнергии и улучшенные массогабаритные и эксплуатационные показатели.

3. Ведущие зарубежные предприятия, выпускающие судовое электрооборудование, ведут интенсивные разработки в области создания эффективных электрических машин с постоянными магнитами с мощностями более десяти мегаватт. Всё это показывает актуальность проведения работ по исследованию и конструированию судовых электрических машин с постоянными магнитами отечественными научными и конструкторскими организациями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н.И. Волков. Электромашинные устройства автоматики / Волков Н.И., Миловзоров В. П. – М.: Высшая школа, 1986 – 335 с.
2. Ищенко В.Ф. Судовая электротехнология / В.Ф. Ищенко. – Северодвинск: Севмашвтуз, 2007. – 171с.
3. Ericson T. Power electronics and future ships electrical system / T. Ericson, N. Hingorani, Yu. Khersonsky // IEEE Transactions of industry applications. – 2006. – Vol. 42. – Is. 1. – Pp. 76–79.
4. Дядик А.Н. Корабельные энергетические системы / А.Н. Дядик, Б.В. Никифоров. – Новочеркасск: Колорит, 2012. – 680 с.

5. Ануфриев А.С. Повышение эффективности магнитоэлектрических генераторов малой мощности для ветроэнергетических установок: дис... канд. техн. наук: 05.09.01 / А.С. Ануфриев. – Самара: ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», 2018. – 135 с.
6. В.А. Балагуров. Электрические генераторы с постоянными магнитами / Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
7. DRS Technology. – URL: <https://www.drstechnology.com> (дата обращения 01.09.2020).
8. L. Zhong E. A. A direct torque controller for permanent magnet synchronous motor drives, IEEE Trans. Energ. Convers., 14(3):637–642, 1999 DOI:10.1109/60.790928
9. Каталог АВВ – URL: <http://new.abb.com/> (дата обращения: 01.04.2018).
10. Gamesa Electric. – URL: <https://www.gamesaelectric.com/product/marine-propulsion> (дата обращения 01.09.2020).
11. Nautil Expo. – URL: <https://www.nauticexpo.ru/prod/tema-doo/product-39710-341308.html> (дата обращения 01.09.2020).
12. Markus Lindegger. Economic viability, applications and limits of efficient permanent magnet motors. - Switzerland: Swiss Federal Office of Energy, 2009.
13. Романовский В. В. Перспективы развития систем электродвижения / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2018. – Т. 10. – № 3. – С. 586-596.
14. Бесколлекторные двигатели с постоянным магнитом // Электронный журнал «Control Engineering», №6, 2006. – URL: <https://controlengrussia.com/innovatsii/beskollektornye-dvigateli-s-postojannym-magnitom> (дата обращения 01.09.2020).
15. Powertec Motors. – URL: <http://powertecmotors.com/products/brushless-motors> (дата обращения 05.04.2019).
16. Siemens. Marine_References. – URL: http://www.siemens.no/ccmi/bu/ea/pdf/Marine_References.pdf (дата обращения 22.03.2020).
17. Yaskawa Electric. – URL: https://ru.yaskawa.eu.com/products/environmental%2520energy/productdetail/product/permanent-magnet-shaft-generators_1160 (дата обращения 22.06.2019).
18. Oemer Motori Elettrici Spa. – URL: <http://oemermotori.ru/products/electrodvygateli-qls> (дата обращения 22.04.2020).

PROSPECTS FOR THE USE OF MARINE SYNCHRONOUS ELECTRIC MACHINES WITH PERMANENT MAGNETS

¹Chizhma Sergey Nikolaevich,, doctor of engineering, docent, professor of the department of electrical equipment and ship automation

²Molchanov Sergey Vasilievach, PSD of physical and mathematical sciences, docent, docent institute of physical and mathematical sciences and information technologies

²Matyunin Petr Aleksandrovich, post-graduate student, institute of physical and mathematical sciences and information technologies

¹ Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: chisn@yandex.ru

²FSBAI HE Immanuel Kant Baltic Federal University,
Kaliningrad, Russia, e-mail: smolchanov@kantiana.ru; pmatiunin@kantiana.ru

The appearance of permanent neodymium high-coercive magnets changed the trends in the construction of synchronous electric machines. Synchronous machines with permanent magnets are widely used in marine generators and engines. The article discusses the features of construction of electric machines on permanent magnets, their advantages and disadvantages, features of use as marine generators and engines. The state of use of synchronous machines on permanent magnets by leading enterprises producing marine electric machines is shown.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА СУДАХ РАЙОНА КЕРЧЕНСКОЙ ПАРОМНОЙ ПЕРЕПРАВЫ

¹Шабалин Леонид Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент

²Савенко Александр Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент

²Савенко Павел Станиславович, курсант

¹ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: shabalin44@mail.ru

²ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический
университет», Республика Крым, Керчь, Россия, e-mail: savenko-70@mail.ru

Рассмотрены причины снижения качества электроэнергии в электротехнических комплексах судов, работающих в портах Крым и Кавказ. Проведены экспериментальные исследования на судах с целью выяснения отклонения параметров электроэнергии и их влияния на судовое электрооборудование. Предложено использовать возобновляемые источники электроэнергии в составе судовых электротехнических комплексов для улучшения качества электроэнергии. Обосновано применение панелей солнечных электростанций во время стоянки судов в портах и работе в море.

Введение

Электротехнические комплексы морских судов получают электрическую энергию от собственных источников, в большинстве случаев это дизель-генераторные агрегаты, или от береговых систем электроснабжения. В зависимости от специфики работы судов и выполняемых ими технологических задач преобладает автономное или централизованное электроснабжение с берега. В обоих случаях необходимо обеспечить надлежащее качество электрической энергии для эффективной работы судового электротехнического комплекса.

Развитие энергетики поставило вопрос о постепенном переходе от традиционных технологий, предусматривающих использование централизованного генерирования электрических сетей, к принципиально новому решению, которое ориентированно на широкое применение рассредоточенных источников энергии и активных сетей, которые способны оказывать услуги по передаче, хранению и преобразованию электрической энергии. Активные электрические сети способны быстро адаптироваться к меняющимся потребностям заинтересованных сторон - собственников, потребителей, продавцов. Они рассматриваются как ключевой элемент инфраструктуры «умных» энергосистем будущего. На сегодняшний день все аспекты создания подобных «умных» энергосистем рассматриваются в концепции Smart Grid, наиболее известной концепции электрических сетей [1, 2].

Постановка задачи

Порты Крым и Кавказ расположены в оживленном районе судоходства Керченского пролива. На протяжении нескольких десятилетий паромы и буксиры этих портов обеспечивали перевозку грузов и пассажиров между Крымом и Кубанью. В зависимости от грузопотока и погодных условий менялось соотношение времени, в течение которого суда находились в море и соответственно их электростанции вырабатывали собственную электроэнергию и времени, когда эти суда стояли у причалов и получали электрическое питание от береговых источников. Казалось бы, что качество электроэнергии в обоих режимах должно соответствовать установленным нормам, а электротехнические комплексы судов работают в штатных условиях. Этому действительно способствует большое количество систем автоматики как на судах, так и на берегу [3]. Однако исследования проведенные на паромах и буксирах, работающих в портах Крым и Кавказ, обнаружили существование значительных отклонений показателей качества электрической энергии в различных режимах работы судов.

Результаты исследования

Буксиры-кантовщики «Бульбаш» и «Доковец» осуществляют заводу железнодорожных паромов в порту «Крым». Большую часть времени эти буксиры находятся у причала и получают питание от централизованного берегового электроснабжения. Паромы во время погрузок и отстоя у берега также получают береговое электропитание. Замеры уровня напряжения, которое подавалось на суда от береговой подстанции в 2009 году, показали, что оно составляло 450–470 В вместо 380 В. Повышенное напряжение привело к выходу из строя электронной аппаратуры буксира «Бульбаш», в частности около двадцати микропроцессорных зарядных устройств аккумуляторных батарей [4]. В результате оказался невозможным запуск четырех дизельных двигателей «Volvo Penta» с электронным впрыском, установленных на буксире и судно не смогло выйти в море для осуществления кантовочных операций с железнодорожными паромовыми. Для приведения параметров электроэнергии, подаваемой на буксир к допустимому значению 380 В, на судне был установлен трехфазный стабилизатор напряжения мощностью 45 КВА. В каждой фазе стабилизатора предусмотрен автотрансформатор с сервоприводом, что обеспечивает точное поддержание уровня напряжения, поступающего на судно, независимо от его значения на берегу, от судовой нагрузки и других факторов. Кроме того, в каждой фазе стабилизатора есть возможность ручной настройки напряжения на его выходе. Такое решение позволило обеспечить исправность всего современного электронного оборудования на борту буксира-кантовщика «Бульбаш» уже в течение более десяти лет. Аналогичные меры по обеспечению необходимого уровня подаваемого напряжения были предприняты и на других судах порта «Крым». Морской Регистр одобрил установку дополнительного оборудования во время освидетельствования судов. Это было единственно верным и возможным решением для сохранения оборудования судов и обеспечения их безаварийной работы, так как береговая инфраструктура электросетей не могла осуществлять поставку электроэнергии с напряжением необходимого уровня. Таким образом, целесообразно устанавливать стабилизаторы напряжения для берегового питания еще на этапе постройки судов.

Можно предложить еще один вариант снабжения электрической энергией судов, в основе которого лежит применение возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) и концепции Smart Grid. На этапах проектирования и постройки судов необходимо предусмотреть покрытие верхних палуб и надстроек панелями из солнечных батарей. Кроме того, потребуется установка дополнительных аккумуляторных батарей. При стоянке судов у причала или на рейде солнечные батареи смогут покрывать потребности потребителей и заряжать аккумуляторные батареи для обеспечения потребностей в электроэнергии в ночное время. Во время выполнения судами переходов и других технологических операций, которые требуют значительных объемов производства электроэнергии, работают дизель-генераторные агрегаты преимущественно в параллельном режиме. Используя концепцию Smart Grid, солнечные батареи также могут подключаться параллельно дизель-генераторным агрегатам.

Стандартов, имеющих отношение к Smart Grid, насчитывается около сотни. Среди них стандарты IEC («Standards for power quality» и «Flicker Standards»), стандарты CSA (CAN3-C235-83, 107.1 / UL1741, C22.2, C.22.3, C22.1), стандарты IEEE 2030 и другие. В комплексе этих стандартов рассматриваются принципы обеспечения интероперабельности энергетических технологий, информационных технологий с элементами энергетических систем, автоматикой конечных пользователей и нагрузочными устройствами потребителей. Основным стандартом, регламентирующим подключения на параллельную работу ВИЭ, является стандарт института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE 1547) [2]. Действующий стандарт устанавливает критерии и требования для соединения ВИЭ с электроэнергетической системой. Комплекс стандартов IEEE 1547 содержит ряд документов, посвященных различным аспектам обеспечения взаимодействия и связности между распределенными ресурсами, интегрированными в состав энергетических систем, и состоит из следующих частей:

IEEE 1547.1 - стандарт общей процедуры соответствия испытаний присоединения ВИЭ к энергосистеме.

IEEE 1547.2 - обеспечивает детализированные указания присоединения на параллельную работу.

IEEE 1547.3 - требования по обмену информацией, мониторингу и контролю ВИЭ.

IEEE 1547.4 - требования к оборудованию и его эксплуатации в обособленных локальных энергосистемах с ВИЭ.

IEEE 1547.5 - предназначен для ВИЭ мощностью выше 10 МВА.

IEEE 1547.6 - практические аспекты подключения ВИЭ к распределительным сетям.

Процесс присоединения на параллельную работу ВИЭ к электрическим сетям, на сегодня, не имеет четкого отраслевого руководящего документа или стандарта. Поэтому увеличение количества ВИЭ приводит к обострению технических проблем по организации их параллельной работы в энергосистеме – обеспечению устойчивости работы, качества электроэнергии, организации диспетчерского управления, в том числе контролю отделения ВИЭ от энергосистемы, синхронизации ВИЭ с энергосистемой.

Сравнительный анализ указывает на целесообразность решения комплекса задач оптимизации функционирования ВИЭ в локальных электрических системах с учетом показателей качества и потерь электроэнергии с последующим переходом к единому стандарту. Этот стандарт будет регламентировать подключения на параллельную работу ВИЭ с учетом стратегии развития электрических сетей. Это расширит возможности применения ВИЭ и возможности потребителей, а также позволит выполнять оптимизацию функционирования локальных энергосистем, учитывая улучшение взаимодействия всех субъектов системы в режиме реального времени [2].

Следующий этап исследований был посвящен качеству электроэнергии на судах во время параллельной работы нескольких дизель-генераторных агрегатов на общую потребительскую нагрузку. На рисунке 1 изображена схема электротехнического комплекса парома «Ейск». В его состав входят три основных дизель-генератора Г1-Г3 и один стояночный Г4. Вспомогательный дизель-генератор Г4 S350SB 200кВА запускается для обеспечения электрической энергией ограниченной мощности потребителей во время стоянок судна у причала или на рейде.

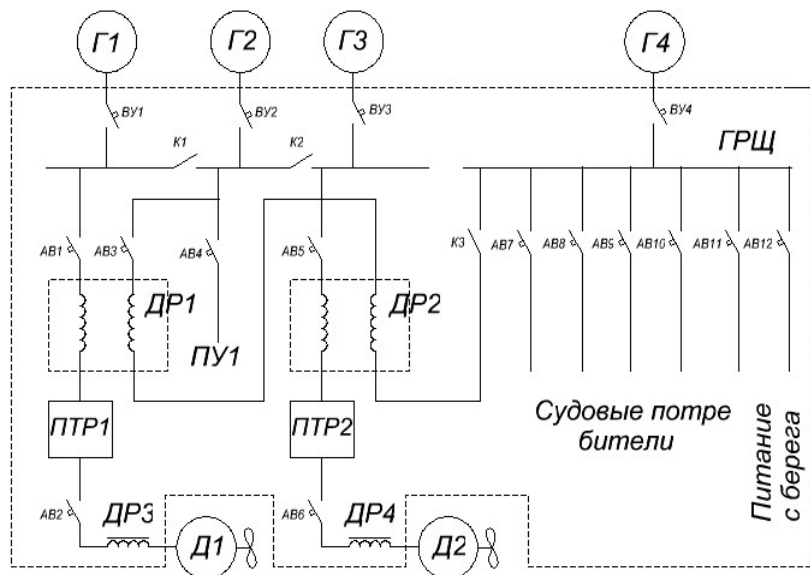


Рис. 1. Схема электротехнического комплекса парома «Ейск»

Рассмотрим подробнее параллельную работу основных генераторов на основе двигателей внутреннего сгорания 6VD26/20-AL-2 и синхронных генераторов S450MG 800кВА. Основными потребителями электроэнергии, вырабатываемой этими дизель-генераторами, в ходовом режиме являются два гребных электрических двигателя постоянного тока, нагруженных винтом регулируемого шага. Необходимо особенно отметить, что гребные электродвигатели постоянного тока, поэтому для преобразования переменного напряжения основных генераторов в постоянное напряжение, необходимое гребным электродвигателям, установлены два тиристорных преобразователя КТЭ 1600/460 ЕВО. Все остальные потребители на судне переменного тока и они также получают электроэнергию от основных генераторов во время их работы. Наиболее мощным потребителем переменного тока является подруливающее устройство ПУ с винтом регулируемого шага. Общеизвестным является факт искажения синусоидальной кривой напряжения из-за коммутации силовых тиристорных преобразователей. Для сглаживания последствий этого отрицательного явления при постройке судна

разработаны и установлены сдвоенные реакторы. Одна из обмоток реакторов включена в цепь питающую тиристорный преобразователь, а через вторую обмотку протекает ток отбора электрической мощности.

Для проверки эффективности мер предпринятых для сохранения качества электроэнергии при работе тиристорных преобразователей были запущены и подключены к шинам главного распределительного щита два основных дизель-генератора. После этого судно начало движение при помощи гребных установок, то есть были задействованы оба тиристорных преобразователя. При поддержании тока в цепях постоянного тока гребных электродвигателей на уровне 600А и частоты их вращения 300 об/мин, нагрузка каждого дизель-генератора составила по 350 кВт, а двигатели внутреннего сгорания вращались с частотой 980 об / мин, обеспечивая частоту сети 49 Гц в момент снятия осциллограммы (рисунок 2). Экспериментальные мгновенные значения тока и напряжения одного из генераторов (рисунок 2) имеют очень значительные искажения синусоидальности. Очевидно, что в моменты включения тиристоров для непрерывного снабжения гребных электродвигателей амплитуда пульсаций доходит до 80%, что совершенно не соответствует норме в 5% [5].

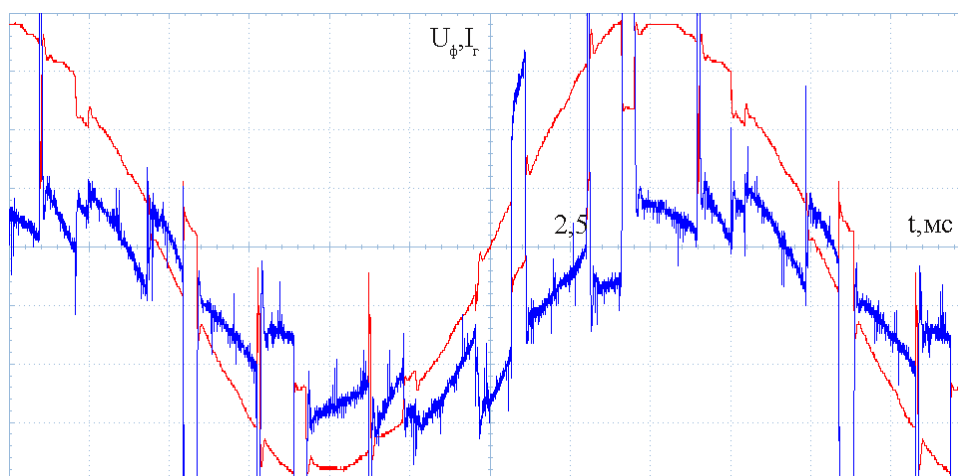


Рис. 2. Фазное напряжение и ток дизель-генератора

Рассмотрим ситуацию работы электротехнического комплекса судна, при которой не происходит ни подключения новых потребителей электроэнергии, ни изменения механической нагрузки у уже работающих потребителей. Назовем такой режим работы квазиустановившимся. Казалось бы, что токи параллельно работающих генераторов в таком режиме должны быть постоянными. Однако, на осциллограмме (рисунок 3) мы отчетливо видим, что с периодичностью 600 – 800 мс происходит зеркальное изменение распределения мощности порядка 20% от потребляемой. Такое явление характерно для обменных колебаний мощности (ОКМ) и возникает оно из-за люфтов в контурах регулирования частоты вращения дизельных двигателей внутреннего сгорания. Вследствие появления таких колебаний регуляторы частоты вращения вырабатывают свой ресурс значительно быстрее. ОКМ способствуют пульсациям напряжения и не позволяют использовать генераторные агрегаты на полную мощность. Становится невозможным использование судовых механизмов с высоким коэффициентом полезного действия. Системы судовой автоматики не в состоянии эффективно выполнять свои функции, таким образом, снижается надежность безаварийность работы судового электротехнического комплекса и живучесть всего судна. Известны случаи, когда амплитуда ОКМ увеличивалась настолько, что синхронные генераторы самопроизвольно прекращали параллельную работу, энергосистема «разваливалась» и судно оставалось без электрической энергии. Мириться с такой ситуацией становится невозможным, так как в условиях автономности судна – это прямая угроза жизни людей на борту и сохранности судна [5, 6].

В случае установки возобновляемых источников электроэнергии в виде солнечных батарей с аккумуляторными накопителями, можно отказаться от стояночного генератора Г4. Такое техническое решение позволит освободить полезное пространство на судне и повысит надежность электроснабжения судна в стояночных режимах работы. Кроме того, это позволит экономить значительные средства на уменьшении расхода дизельного топлива, отказа от эксплуатационных расхо-

дов по техническому обслуживанию стояночного дизель-генератора. Положительным оказывается и отсутствие шумов и вибраций на судне, связанных с работой дизель-генераторного агрегата, а также выбросов отработанных газов в окружающую среду.

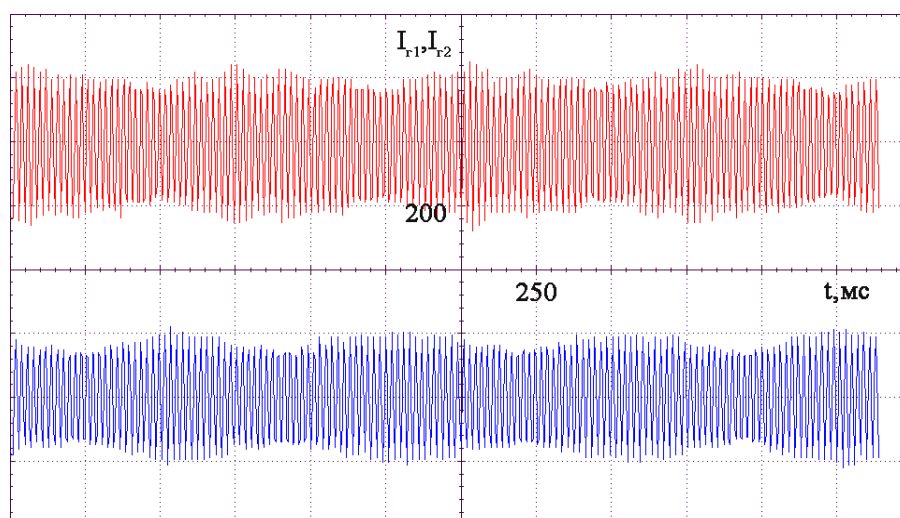


Рис. 3. Токи параллельно работающих генераторов в квазиустановившемся режиме

Наличие солнечных батарей может позволить уменьшить амплитуду обменных колебаний мощности или полностью избавиться от них. Это позволит сделать «умная» энергосистема с концепцией Smart Grid. Для этого солнечные батареи имеют возможность отдавать электроэнергию в сеть параллельно с дизель-генераторами. Система отслеживает начало изменения углов нагрузки синхронных генераторов в квазиустановившихся режимах. При появлении первых признаков таких изменений для упреждения увеличения нагрузки самих генераторов производится подключение солнечной батареи на период обменных колебаний мощности.

Для решения задачи определения оптимальной установленной мощности по комплексному критерию с учетом специфики обеспечения рентабельности локальных электрических систем (ЛЭС) целесообразно воспользоваться выражением суммарной прибыли от функционирования ВИЭ, объединенных на параллельную работу в ЛЭС [2].

$$П_j^{ВИЭ} = \sum_{j=1}^n (c_j \cdot P_j^{ВИЭ} \cdot k_{uj} \cdot T),$$

где $P_j^{ВИЭ}$ - установленная мощность j -го ВИЭ, кВт;

c_j - тариф на производство электроэнергии j -м ВИЭ («зеленый тариф»), руб / кВт · ч;

k_{uj} - коэффициент использования установленной мощности j -го ВИЭ;

T - продолжительность графика нагрузок, ч.

Предлагаемый метод определения оптимальной установленной мощности возобновляемых источников энергии в локальной электрической системе, который путем учета ограничения прибыли от функционирования ВИЭ по критерию качества электроэнергии и по критерию потерь электроэнергии на ее транспортировку, а также корректировкой влияния частных критериев оптимальности результатов оптимизации, создает предпосылки для повышения эффективности функционирования возобновляемых источников энергии в локальных электрических системах на этапе проектирования.

Выводы

Для улучшения работы судового электротехнического комплекса с целью улучшения показателей качества электроэнергии [7,8]. целесообразно предусмотреть на этапе проектирования, а затем постройки судов покрытия верхних палуб и надстроек солнечными батареями адаптированными к работе в морских условиях. Такие возобновляемые источники электроэнергии совместно аккумуляторными батареями, накапливающими дневную электроэнергию для работы в ночное и неясное время суток позволят отказаться от необходимости получения электроэнергии от береговых сетей во время стоянки у причалов. Это позволит избежать выхода из строя судового электро-

оборудования из-за отклонения параметров береговой электроэнергетики от требуемых значений. Использование солнечных батарей и «умной» энергосистемы с концепцией Smart Grid обеспечит устойчивую работу судового электротехнического комплекса в квазиустановившихся режимах. Для этого необходимо обеспечить реализацию метода устранения обменных колебаний мощности путем параллельного подключения возобновляемых энергоисточников к судовым дизель-генераторным агрегатам. Использование солнечных батарей в районе портов Крым и Кавказ имеет высокий коэффициент полезного действия, так как Республика Крым и Краснодарский край расположены в регионе с большим количеством солнечных дней в году.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лежнюк П.Д. Оптимизация распределения нагрузки между рассредоточенными источниками энергии в локальной электрической системе / П.Д. Лежнюк, В.В. Нетребский, А.В. Никиторович // Технічна електродинаміка. 2012. № 2. С. 38-39.
2. Малогулко Ю.В. Оптимізація функціонування відновлюваних джерел енергії в локальних електричних системах: дис. ... канд. техн. наук. – Вінниця 2015. – 157 с.
3. Хватов О.С. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Электротехника. 2014. № 3. С. 28–32.
4. Шабалин Л.Д. Исследование работы судового электротехнического комплекса при питании от береговой сети с повышенным напряжением / Л.Д. Шабалин, А.Е. Савенко, П.С. Савенко // V Международный Балтийский морской форум. 21-27 мая: материалы форума. Часть 1. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2017. – С. 282-287.
5. Савенко А.Е., Голубев А.Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах // Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Иваново, 2016. – 172 с.
6. Савенко А.Е. Влияние люфта на амплитуду обменных колебаний мощности в автономных электротехнических комплексах / А.Е. Савенко, П.С. Савенко // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20 № 5-6. С. 46-54.
7. Мещеряков В.Н., Левин П.Н., Синюкова Т.В. Повышение эффективности поискового алгоритма для оптимизации энергосбережения за счет формирования магнитного потока асинхронного двигателя. // Приборы и системы, управление, контроль, диагностика. 2014. №6, стр.25–30.
8. Голубев А.Н. Математическая модель для расчета электромагнитных сил в синхронном электроприводе с постоянными магнитами / А.Н. Голубев, В.А. Мартынов, А.В. Алейников // Вестник ИГЭУ. 2015. № 1. С. 10-13.

RESEARCH OF THE QUALITY OF ELECTRIC POWER ON SHIPS IN THE AREA OF KERCHEN FERRY CROSSING

¹Shabalin Leonid Dmitrievich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

²Savenko Aleksandr Evgenyevich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

²Savenko Pavel Stanislavovich, cadet

¹ FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russia, e-mail: shabalin44@mail.ru

²Kerch State maritime technological university,
Kerch, Crimea Republic, Russia, e-mail: savenko-70@mail.ru

The reasons for the decrease in the quality of electricity in the electrical complexes of ships operating in the ports of Crimea and the Caucasus are considered. Experimental studies on ships were carried out in order to clarify the deviation of electricity parameters and their effect on ship electrical equipment. It is proposed to use renewable energy sources as part of ship electrical complexes to improve the quality of electricity. The use of solar panels during the mooring of ships in ports and work at sea has been substantiated.

СЕКЦИЯ «СУДОВЫЕ И СТАЦИОНАРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ»

SECTION "SHIP AND STATIONARY POWER PLANTS"

УДК 621.12.061:628.169 (043)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПУТЕВОГО ЖАЛЮЗИЙНОГО СЕПАРАТОРА ПАРА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ И ОТОПИТЕЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ

Архипов Максим Игоревич, преподаватель кафедры
судовых энергетических установок и теплоэнергетики
Филонов Александр Георгиевич, канд. техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой судовых энергетических установок и теплоэнергетики

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: gromus08@bk.ru; udfac@yandex.ru

В работе представлены методика и результаты производственных испытаний путевого жалюзийного сепаратора пара для производственных и отопительных котельных. Приводится принципиальная схема сепаратора. Проведено сопоставление измеренных значений влажности пара после сепаратора, полученных во время производственных испытаний с расчетной зависимостью полученной ранее на атмосферном экспериментальном стенде.

Технологические потребители тепловой энергии промышленных предприятий Калининградской области: сушильные установки, банкомоечные машины, бланширователи, аппараты для наполнения и закатки банок, автоклавы - потребляют обычно насыщенный пар с давлением $P = (0,1 \div 0,7)$ МПа в количестве $(80 \div 3000)$ кг/ч. При значительной длине теплотрассы $(100 \div 500)$ м транспортировка насыщенного пара к теплопотребляющему оборудованию сопровождается его конденсацией и дальнейшим увеличением влажности, которая перед технологическими потребителями может повышаться до значений $\omega_1 = (10 \div 25)$ % [1, 2].

Образовавшийся таким образом конденсат и попавшая из пароводяного барабана в паропровод котловая вода увлекаются насыщенным паром и при скорости в теплотрассе $(10 \div 30)$ м/с вызывают гидроудары, эрозионно-коррозионное разрушение металла в наиболее уязвимых участках паропроводов (отводы, тройники, повороты, путевые соединения). Попадая в запорную арматуру соли, содержащиеся в котловой воде, образуют отложения на уплотняющей поверхности.

Высокая влажность насыщенного пара может вносить большие погрешности при определении расхода теплоносителя на технологические промышленные потребители стандартной измерительной диафрагмой с острой кромкой в комплекте с дифманометром-расходомером во время контроля отпуска пара и проведения теплотехнических испытаний. Применяемые на промышленных предприятиях и в производственных котельных способы измерения расхода насыщенного пара рассчитаны только для однофазной среды. Вследствие разницы плотностей жидкой и паровой фазы в месте сужения диафрагмы, где происходит ускорение потока, тяжелая жидкая фаза отстает от легкой паровой и проходит через отверстие диафрагмы с меньшими скоростями. С помощью стандартных измерительных диафрагм с острой кромкой возможно проводить измерения расхода только однофазной среды, то есть сухой части насыщенного пара.

С целью снижения погрешности измерения расхода насыщенного пара (до нормируемой величины погрешности расходомерного устройства) и защиты пароконденсатной системы теплопотребляющего технологического оборудования от эрозионно-коррозионного разрушения на предприятиях в Калининградском государственном техническом университете были разработаны,

изготовлены и установлены на паропроводах диаметром $D_y 32 \div D_y 125$ перед технологическими аппаратами промышленных предприятий путевые вертикальные сепараторы. Поперечное сечение жалюзийных сепараторов для прохода пара выбиралось из обеспечения условия скорости пара в сепараторе $W_c'' < W_{кр}''$. Так как исследования проводились при абсолютных давлениях пара $P = (0,2 \div 0,8)$ МПа и влажности пара перед сепаратором $\omega_1 \geq 1\%$, значения критической скорости пара в испытываемом путевом сепараторе $W_{кр}''$ определялись по формуле для вертикальных жалюзийных сепараторов барабанных котлов [2]

$$W_{кр}'' = 5,8 \cdot \left[\frac{g \cdot \sigma \cdot (\rho' - \rho'') \cdot \eta''}{(\rho'')^2 \cdot \eta'} \right]^{0,25}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где ρ' и ρ'' - плотности воды и пара, σ - поверхностное натяжение воды, Н/м, а η' и η'' - динамические вязкости воды и пара, кг/м·с.

На рис. 1 представлена принципиальная схема работы путевого жалюзийного сепаратора. Сепаратор может быть установлен только на горизонтальном участке паропровода. Предварительная, грубая сепарация влаги из потока влажного насыщенного пара происходила во время снижения скорости пара W_c'' и уменьшения его транспортирующей способности в диффузоре 1, который одновременно предотвращал работу вертикального жалюзийного сепаратора 2 в области закритических скоростей, характеризующихся срывом уловленной влаги с пластин жалюзи, установленных в корпусе 3.

Выпадение крупных капель из потока на стенки диффузора, работающего по принципу линейного сепаратора, происходит в результате турбулентного массообмена. Осаждаясь в диффузоре, капли воды образуют пленку, которая облегчает условия дальнейшего отделения крупных капель. Влага, транспортируемая паром по стенкам паропровода, поступая в диффузор из теплотрасы, также способствует процессу предварительной сепарации капель.

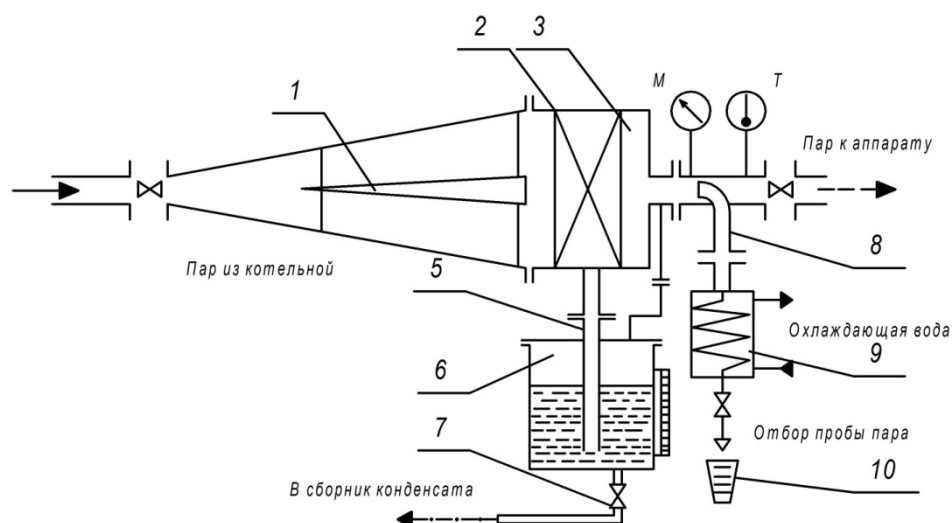


Рис. 1. Схема путевого вертикального жалюзийного сепаратора
1- стабилизатор, 2- вертикальный жалюзийный сепаратор, 3- корпус сепаратора, 4,
5- дренажные трубы, 6- сборник уловленной влаги, 7- дренажный клапан,
8 – изокинетический пробоотборник, 9 – холодильник пробы, 10- расходомерная емкость

Находящийся в диффузоре, конический, оребренный стабилизатор потока пара 4 предотвращал образование вращательного движения потока перед входом в жалюзийный сепаратор. Окончательная, тонкая очистка пара от мелкодисперсных капель происходила в вертикальном пакете жалюзийного сепаратора. Профиль криволинейного канала жалюзи приводится на рис.2.

Проведенные ранее экспериментальные исследования жалюзийных сепараторов при $P = 0,101$ МПа показали, что наибольшей критической скоростью $W_{кр}''$ обладал вертикальный каплеуловитель с геометрическими характеристиками именно этого профиля канала жалюзи.

Уловленная в диффузоре и жалюзийном сепараторе влага, собиралась в нижней части корпуса сепаратора 3 и отводилась по дренажной трубе 5 в сборник сепарата 6, оснащенный водоуказательным стеклом.

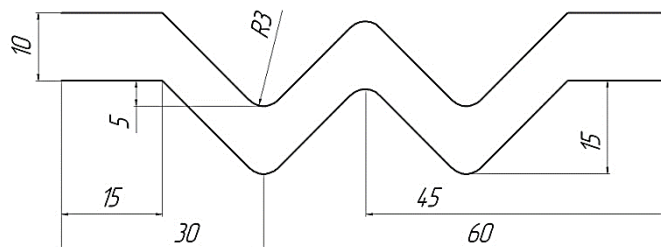


Рис. 2. Геометрические характеристики профиля криволинейного канала жалюзийного сепаратора

Для оценки качества пробы очищенного от влаги насыщенного пара использовался изокINETИЧЕСКИЙ пробоотборник и змеевиковый охладитель пробы 8, которые устанавливались на паропроводе после сепаратора.

После сборки сепаратор вместе с изокINETИЧЕСКИМ пробоотборником в собранном виде переносился в помещение цеха промышленного предприятия, или котельной и присоединялся к технологическим потребителям насыщенного пара по схеме, показанной на рис. 3. Сепарационный комплекс вместе с измерительной диафрагмой и дифманометром-расходомером подключался до и после клапана 5, по которому насыщенный пар поступал к промышленному потребителю.

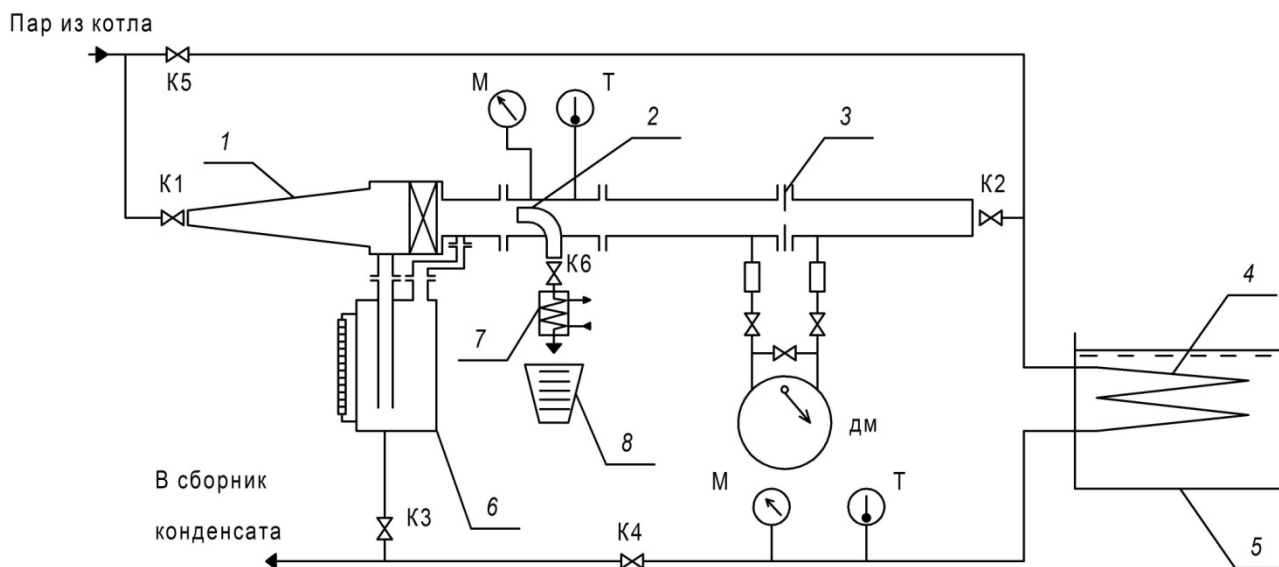


Рис. 3 Схема испытаний путевого жалюзийного сепаратора для производственных и отопительных котельных

1 - сепаратор, 2 – изокINETИЧЕСКИЙ пробоотборник, 3- диафрагма, 4- поверхность теплообмена, 5 - технологический аппарат, 6 – сборник уловленной влаги, 7 – охладитель пробы, 8 – мерная емкость

Для обеспечения полной конденсации пара в поверхности теплообмена 4 технологического аппарата 5 схема испытаний дополнялась клапаном К4 на конденсатопроводе, термометром и манометром. Эффективность работы сепараторов во время проведения промышленных испытаний

оценивалась по влажности пара на входе в сепаратор и после него. Начальная влажность перед сепаратором рассчитывалась через измеренные расходы уловленной влаги, собирающейся в сборнике сепарата G_c , и очищенного пара $D_{cух}$, измеряемого стандартной диафрагмой

$$\omega_1 = \left(\frac{G_c}{G_c + D_{cух}} \right) \cdot 100, \% \quad (2)$$

Конечная влажность очищенного пара, перед диафрагмой рассчитывалась по формуле [2, 3]

$$\omega_2 = \left(\frac{S_{п2}}{S_{кв}} \right) \cdot 100, \% \quad (3)$$

где $S_{кв}$ и $S_{п2}$ - солесодержание котловой воды и конденсата очищенного пара, отбираемого после сепаратора перед расходомерным устройством. Все пробы конденсата очищенного пара, сепарата и котловой воды отбирались в предварительно обработанную полиэтиленовую посуду. Измерение солёности отобранных проб котловой воды и конденсата очищенного пара проводилось пламенном анализаторе жидкости ПАЖ-2 по иону натрия на.

Расход пара через путевые сепараторы во время проведения исследований зависел от потребностью промышленных, технологических аппаратов. Он изменялся в интервале (80 ÷ 2100) кг/ч. Скорость пара в корпусе вертикального жалюзийного сепаратора составляла $W_c'' = (0,18 ÷ 8,98)$ м/с. Начальная влажность насыщенного пара на входе в сепаратор во время испытаний изменялась от 1,0 % до 18 % и зависела от нагрузки котла, а также от длины паропровода от котла до сепаратора. На рис. 4 приводится сравнение расчетных значений влажности пара $\omega_2^{расч}$ после вертикальных жалюзийных сепараторов, с результатами производственных испытаний путевых сепараторов Ду 50 и Ду 100 при давлении насыщенного пара перед сепараторами $P = 0,5$ МПа. Насыщенный пар поступающий к потребителям во время испытаний вырабатывался котлами типа ДКВр.

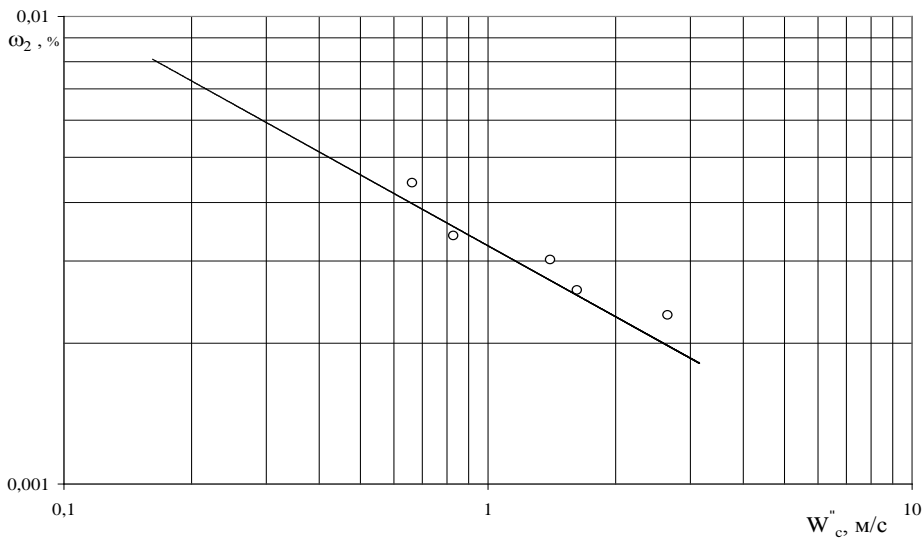


Рис. 4 Сопоставление результатов расчета влажности пара после вертикального жалюзийного сепаратора по формуле (4) с результатами производственных испытаний при $P = 0,5$ МПа

Значения $\omega_2^{расч}$ рассчитывались по зависимости (4) для скорости пара приведенной с «зеркалу испарения» $W_0'' = 0,057$ м/с, характерной для котлов типа ДКВр при работе на номинальной нагрузке и рабочем давлении пара в котле 1,3 МПа [2, 3].

$$\omega_2 = 0,114 \cdot (W_0'')^{-0,68} \cdot (W_c'')^{-1,0} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right)^{0,35}, \% \quad (4)$$

Из рис. 4 видно, что значения влажности пара после путевых вертикальных жалюзийных сепараторов, полученные во время испытаний, оказались сопоставимы расчетными.

Несмотря на то, что отбор пробы очищенного пара производился только после полной отмывки изокINETического пробоотборника, некоторые опытные данные ω_2 оказались выше $\omega_2^{расч}$. Полученное расхождение можно объяснить тем, что в этих случаях охладитель пробы не успевал отмыться во время проведения испытаний, Поэтому соленость пробы очищенного пара оказывалась выше истинного значения $S_{п2}$.

Результаты производственных испытаний показали справедливость зависимости (4) для расчета влажности насыщенного пара после вертикальных жалюзийных сепараторов при значениях приведенной скорости пара менее 1 м/с и давлении пара от 0,2 МПа до 0,8 МПа, а также подтвердили полученный ранее вывод о том, что начальная влажность пара перед жалюзийным сепаратором не влияет на величину ω_2 .

Путевой жалюзийный сепаратор показал высокую эффективность. Влажность очищенного пара в зависимости от скорости пара W_c'' составляла $\omega_2 = (9,7 \cdot 10^{-4} \div 4,6 \cdot 10^{-3}) \%$. Это позволяет рекомендовать его для установки на паропроводах в производственных и отопительных котельных и перед технологическими аппаратами пищевой и рыбной промышленности, в которых происходит контакт влажного, насыщенного пара с пищевым продуктом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девянин В.А. Выбор оптимальных условий работы жалюзийных сепараторов для парогенерирующих установок ТЭС и АЭС: автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М., 1985. - 20 с..
2. Филонов А.Г. Влияние режимных и конструктивных параметров сепараторов судовых опреснителей на эффективность процессов тонкой очистки пара. автореф. дисс... канд. техн. наук. Калининград, 2000. 22 с.
3. Архипов М.И., Филонов А.Г. Исследование эффективности вертикальных сепараторов пара судовых дистилляционных опреснителей // Морские интеллектуальные технологии. – 2017, № 3 (37). Т.1. – С.74-79

RESULTS OF TESTS OF AN EXTERNAL CHEVRON PLATES STEAM SEPARATOR FOR INDUSTRIAL AND HEATING BOILERS

Arkhipov Maksim Igorevich, assistant of ship power plants
and heat power engineering department
Filonov Alexandr Georgievich, PhD, associate professor,
head of the ship power plants and heat power engineering department

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russia, e-mail: gromus08@bk.ru; sudfac@yandex.ru

The paper presents the methodology and results of an external chevron plates steam separator production tests for production and heating boilers. Separator schematic diagram is given. A comparison of the measured values of steam humidity after the separator, obtained during production tests, with the calculated dependence obtained earlier on the atmospheric experimental stand is shown

ВЕЛИЧИНА ЭМИССИИ САЖИ С ОТРАБОТАВШИМИ ГАЗАМИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ ПРИ ОБЪЁМНО-ПЛЁНОЧНОМ СМЕСЕОБРАЗОВАНИИ

Глазков Дмитрий Юрьевич, старший преподаватель
кафедры судовых энергетических установок

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: @gmail.com

В статье рассмотрены процессы, происходящие при образовании и выгорании сажи в цилиндре двигателя при различных способах смесеобразования. Приведены результаты исследования влияния эксплуатационных факторов на величину эмиссии твёрдых частиц углерода. Предложена математическая модель эмиссии твёрдых частиц углерода с отработавшими газами двигателя при объёмно-плёночном смесеобразовании.

ВВЕДЕНИЕ

Вследствие неравномерного распределения топлива и окислителя в объёме камеры сгорания образуются зоны с малым содержанием кислорода. В таких зонах при высокой температуре рабочего тела впрыснутое топливо подвергается частичному сгоранию и пиролизу с образованием угарного газа, альдегидов, карбоновых кислот, сажи, различных тяжёлых углеводородов, в основном ароматических типа нафталина, с кратными связями и малым количеством водорода [1,2].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Скорость образования сажи определяется скоростью химических реакций, протекающих при пиролизе углеводородов топлива согласно закона Аррениуса[3]:

$$K = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

где A – коэффициент пропорциональности, характеризующий частоту столкновения молекул топлива и кислорода, E_a – энергия активации, $R=8,314$ кДж/(кмоль К) – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура.

В течение периода задержки воспламенения температура в цилиндре не превышает 1500 К,[1, 4] образование сажи происходит в основном по механизмам поликонденсации и полимеризации. Зародышами сажевых частиц в таком случае являются молекулы циклических углеводородов. С появлением видимого пламени температура в цилиндре резко возрастает, поэтому на первое место выходят реакции пиролиза молекул топлива с дальнейшим отщеплением водорода и образованием сотовых структур, состоящих из сконденсированных ароматических колец.

Реакции, протекающие при термическом разложении углеводородов топлива, схематично описываются следующим уравнением:



Значение концентрации кислорода в пламени, при которой начинается выделение сажи, зависит от ряда факторов: молекулярного состава топлива, температуры и давления рабочего тела, мелкости распыла топлива, механизма смесеобразования. Чем выше молекулярный вес предельных и непредельных углеводородов с прямыми цепями, тем выше скорость образования сажевых частиц. Многочисленными исследованиями установлено [4, 5 и др.], что сажевыделение в пламени

начинается при локальном значении коэффициента избытка воздуха $\alpha=0,33\dots0,7$. С ростом температуры и давления в цилиндре скорость сажеобразования возрастает.

Параллельно с образованием сажевых частиц происходит их выгорание в реакциях с гидроксильными группами ОН и кислородом. Скорость выгорания сажи зависит также и от размеров частиц. Имеющаяся [4] в пламени сажа успевает полностью выгореть, если размеры её частиц не будут превышать нескольких микрометров.

Первичные структуры, из которых состоит сажа, образующаяся в дизелях, представляют собой остатки капель топлива с удельной поверхностью до $70\dots80 \text{ м}^2/\text{г}$ [5]. Однако еще в процессе сгорания происходит коагуляция частиц сажи, приводящая к образованию вторичных и третичных структур. Большая часть образовавшейся в цилиндре сажи имеет диаметры $0,5\text{-}5 \text{ мкм}$. Она успевает полностью сгореть до момента открытия выпускных органов газораспределения. Поскольку её сгорание происходит на линии расширения, то выделившееся при этом тепло не может быть эффективно использовано в цилиндре. Его эффективное использование возможно только в турбине и утилизационном котле. Сажевые частицы обладают большой удельной поверхностью, и, оседая на поверхности газохода, впитывают в себя как губка пары несгоревших углеводородов [6, 7]. При увеличении температуры газов вследствие, например, возрастания нагрузки на двигатель, такие пропитанные парами углеводородов отложения за счёт содержащегося в газах остаточного кислорода склонны к пожарам.

Протекание процессов образования и выгорания сажи в дизелях зависит также и от способа смесеобразования. При струйном (объёмном) механизме смесеобразования топливо подаётся в цилиндр в виде факелов, содержащих около 10^7 капель [8] с диаметрами от 1 мкм до $0,3 \text{ мм}$ и более. При этом максимальный диаметр топливных капель равен диаметру сопловых отверстий распылителя [9]. Поверхность топливных струй в данном случае является границей теплообмена между поданным в цилиндр топливом и воздушным зарядом. В двигателях с плёночным и объёмно-плёночным способами смесеобразования часть цикловой подачи топлива (от 50 до 95% в зависимости от конструкции камеры сгорания) попадает на днище поршня и оттуда испаряется. Для этого камера сгорания таких двигателей выполнена в поршне. Конструкция поршня с камерой сгорания ЦНИДИ, применяющаяся, в частности, на двигателе 6ЧН18/22, показана на рисунке 1 [2].

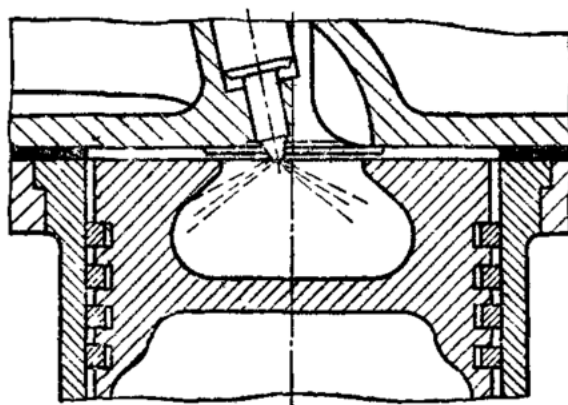


Рис. 1. Камера сгорания типа ЦНИДИ

В таких двигателях границей теплообмена между цикловой подачей топлива и воздушным зарядом является свободная поверхность плёнки растекшегося по днищу поршня топлива.

Механизм теплообмена при испарении топлива в данном случае зависит от средней температуры кипения топлива и температуры днища поршня [4]. Когда температура поверхности поршня немного превышает температуру кипения топлива, что характерно для режимов пуска двигателей и их работы при низкой температуре окружающего воздуха, топливо растекается по днищу поршня в виде плёнки, в которой начинается пузырьковое кипение. При дальнейшем увеличении температуры стенок камеры сгорания по мере прогрева двигателя теплообмен между топливом и днищем поршня интенсифицируется и достигает максимума: режим кипения переходит в плёночный. В дальнейшем непосредственный контакт между днищем поршня и плёнкой топлива исчезает, теплообмен происходит через слой паров топлива.

Для определения зависимости величины поверхности топливных факелов от действующих факторов автором были выполнены расчёты методом профессора А.С. Лышевского [10]. С целью выявления количественных закономерностей изменения показателя $F/g_{ц}$ были проведены расчёты при подаче топлива через одно сопловое отверстие для различных условий топливоподачи. Результаты моделирования для одного из режимов топливоподачи приведены на рисунке 2.

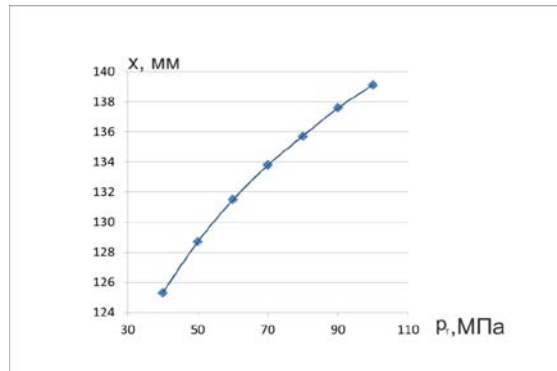


Рис. 2. Зависимость дальности топливного факела от среднего располагаемого напора при впрыске (противодавление 5 МПа, диаметр соплового отверстия 0,4 мм)

Моделирование проводилось в следующем порядке [10].

1. Средняя скорость истечения топлива из соплового отверстия

$$U_1 = \mu_c \sqrt{2 * 10^4 \frac{g}{\rho_T} (p_T - p_c)}, \quad (3)$$

где $g=9,81 \text{ м/с}^2$; ρ_T – плотность применяемого топлива, кг/м^3 ; p_T – давление топлива в процессе топливоподачи, бар; p_c – давление воздуха в цилиндре в процессе впрыска, бар.

2. Безразмерные критерии We (число Вебера) и M , описывающие движение топливной струи и свойства применяемого топлива, и отношение плотностей топлива и воздушного заряда:

$$We = \frac{U_1^2 \rho_T d_c}{\sigma}, \quad (4)$$

$$M = \frac{\mu_T^2}{\rho_T d_c \sigma}, \quad (5)$$

$$\rho = \frac{\rho_B}{\rho_T}. \quad (6)$$

где U_1 – скорость истечения топлива, м/с ; d_c – диаметр соплового отверстия, м ; σ – коэффициент поверхностного натяжения топлива, Н/м ; μ_T – динамическая вязкость топлива, $\text{Па}\cdot\text{с}$; ρ_B – плотность воздуха в цилиндре в процессе топливоподачи, кг/м^3 .

3. Средний объёмный расход топлива в процессе топливоподачи по вычисленной скорости истечения:

$$Q = 0,785 d_c^2 U_1 \quad (7)$$

4. Продолжительность топливоподачи $\tau_{впр}$ по известной цикловой подаче $g_{ц}$

$$\tau_{впр} = \frac{g_{ц}}{\rho_T Q} \quad (8)$$

где $g_{ц}$ – цикловая подача топлива, кг .

5. Дальность факела топлива «х»:

$$x = \frac{d_c}{\sqrt[4]{2} \sqrt{3}} \left(\frac{U_1 \tau_{впр}}{d_c} \right)^{0,5} \frac{We^{0,105} M^{0,08}}{\rho^{0,5}} \quad (9)$$

6. Угол конуса топливной струи γ :

$$\gamma = 19,77 C_{\alpha} \mu_c^{0,64} \left(\frac{T_0}{T_c} \right)^{0,5} (p_T - p_c)^{0,32} \left(\frac{p_c}{p_0} \right)^{0,5} \frac{d_c^{0,39} \sigma^{0,07}}{\rho_T^{0,43} \mu^{0,614}} \quad (10)$$

где $C_a=0,91$ – коэффициент пропорциональности, μ_c – коэффициент расхода соплового отверстия форсунки; p_T – среднее давление топлива в период топливоподачи, кПа; p_c и T_c – давление и температура воздуха в цилиндре в начале топливоподачи, кПа и К соответственно; p_o и T_o – параметры наружного воздуха; d_c – диаметр сопловых отверстий распылителя, м; ρ_T , σ и μ – плотность, коэффициент поверхностного натяжения и динамическая вязкость топлива, кг/м³, Н/м и Па*соответственно. При этом величина угла получается в градусах.

7. Вычисляются радиус и площадь наружной поверхности топливной струи из геометрических соображений.

8. Рассчитывалась относительная поверхность топливной струи, то есть отношение площади поверхности топливного факела к массе содержащегося в нём топлива.

Автором установлено, что с увеличением располагаемого напора при впрыске, то есть разности давлений топливоподачи и рабочего тела в цилиндре, относительная поверхность топливного факела растёт по логарифмическому закону:

$$\left(\frac{F}{g_{ц0}}\right)_{э} d_{сп} - \left(\frac{F}{g_{ц0}}\right)_{п} d_{сэ} = 0,6 \ln \left(\frac{d_{сп}(p_{тэ} - p_{сэ})}{d_{сэ}(p_{тп} - p_{сп})} \right) \quad (11)$$

где $F/g_{ц0}$ – относительная поверхность топливного факела, d_c – диаметр соплового отверстия форсунки, $P_T - P_c$ – располагаемый напор при впрыске, P_T – среднее давление топливоподачи, P_c – среднее давление воздушного заряда в цилиндре двигателя в процессе впрыска.

Данное выражение построено на основе метода [8] сравнения рассматриваемого двигателя (индекс «п») и эталонного (индекс «э»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ЭМИССИЮ САЖИ

С целью разработки метода расчёта величины эмиссии сажи, в явном виде показывающего влияние на её величину действующих факторов, были проведены эксперименты на двигателях 6ЧН18/22 и МАН Д 2866, а также обработаны результаты замеров дымности отработавших газов, выполненные в Санкт-Петербургском морском университете им. Адм. С.О. Макарова на двигателе 12ЧН18/20 [11] и в Алтайском Политехническом Университете им. И.И. Ползунова [12].

С ростом величины цикловой подачи увеличивается дальнобойность топливных струй согласно выражения (9). Поэтому в ряде двигателей с преимущественно объёмным способом смесеобразования на режимах, близких к полной нагрузке, часть цикловой подачи топлива попадает на стенки камеры сгорания. К объёмному механизму смесеобразования подключается плёночный. Но, в отличие от двигателей с преимущественно плёночным смесеобразованием, испарение топлива происходит в худших условиях, с относительно холодных поверхностей. Это обстоятельство вызывает рост эмиссии сажи [5, 13]. Зависимость величины удельной эмиссии сажи от индикаторной мощности по нагрузочной характеристике для некоторых двигателей показано на рисунках 3-5.

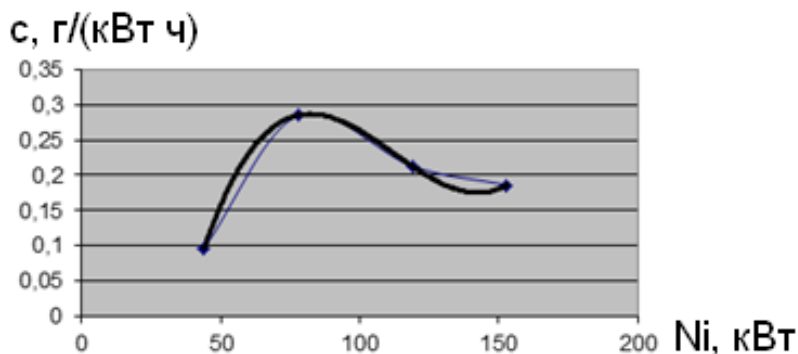


Рис. 3. Зависимость удельной эмиссии сажи от индикаторной мощности для двигателя 6ЧН18/22 «Хабаровец» ($n=750$ об/мин)

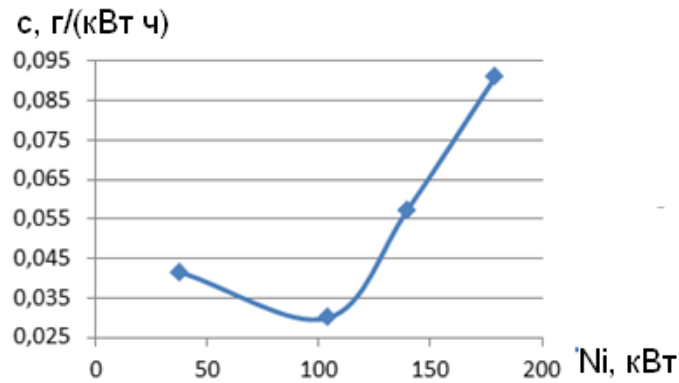


Рис. 4. Зависимость удельной эмиссии сажи от индикаторной мощности для двигателя MAN D 2866 ($n=1500$ об/мин, 6ЧН12,8/15,5)

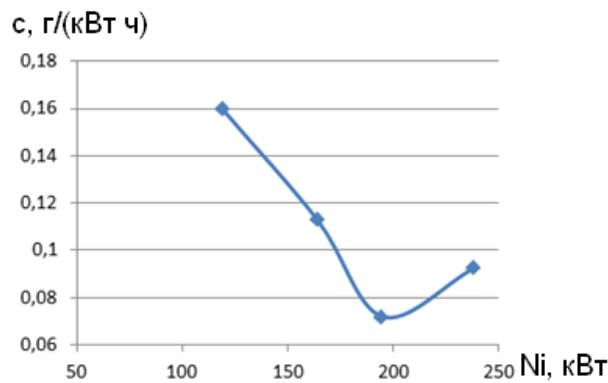


Рис. 5. Зависимость удельной эмиссии сажи от индикаторной мощности для двигателя 3Д6 завода «Барнаултрансмаш» ($n=1900$ об/мин, 6Ч15/18) [9]

С целью выявления степени влияния конструктивных особенностей двигателя и его технического состояния на процессы образования, выгорания и эмиссии сажи представленные на рисунках 3-5 результаты были обработаны в соответствии с методом, предложенным профессором В.И. Одинцовым [8].

Метод основан [8] на сравнении исследуемого или проектируемого двигателя с эталонным, для которого показатели рабочего процесса и конструктивные характеристики известны. Данный метод также может быть использован для оценивания изменений в рабочем процессе двигателя при его модернизации. Сравнение выполняется при помощи ряда безразмерных критериев подобия:

$$B = \left(\frac{\mu_{сн}}{\mu_{сэ}}\right)^{1,42} \left(\frac{d_{сн}}{d_{сэ}}\right)^{1,05} \left(\frac{\Delta P_{п}}{\Delta P_{э}}\right)^{0,71} \left(\frac{\rho_{тэ}}{\rho_{тэ}}\right)^{1,05} \left(\frac{\sigma_{э}}{\sigma_{п}}\right)^{0,37} \left(\frac{\mu_{тэ}}{\mu_{тп}}\right)^{0,32} \frac{T_{сн} P_{сэ} g_{цп} J_{ср}}{T_{сэ} P_{сн} g_{цэ} J_{сэ}} \quad (12)$$

$$C = \frac{tg(\gamma_{п})(1/\cos(\gamma_{п})+tg(\gamma_{п}))}{tg(\gamma_{э})(1/\cos(\gamma_{э})+tg(\gamma_{э}))} \quad (13)$$

$$D = \frac{\tau_{инд п} \tau_{впр э}}{\tau_{инд э} \tau_{впр п}} \left(\frac{\tau_{z п}-0,5\tau_{впр п}}{\tau_{z э}-0,5\tau_{впр э}}\right)^{1,6} \quad (14)$$

где μ_c – коэффициент расхода форсунки, d_c и J_c – диаметр и число сопловых отверстий распылителя, P_f – среднее давление топливоподачи, P_c и T_c – давление и температура в цилиндре в период впрыска, g_c – цикловая доза топлива, ρ , σ , и μ – плотность, поверхностное натяжение и динамическая вязкость топлива, γ – угол раскрытия топливного факела, $\tau_{инд}$ – продолжительность задержки воспламенения, $\tau_{впр}$ – продолжительность топливоподачи, τ_z – продолжительность процесса сгорания.

Зависимости удельной эмиссии сажи от безразмерных критериев рабочего процесса (выражения (2), (3) и (4)), показаны на рисунках 6-8 [14].

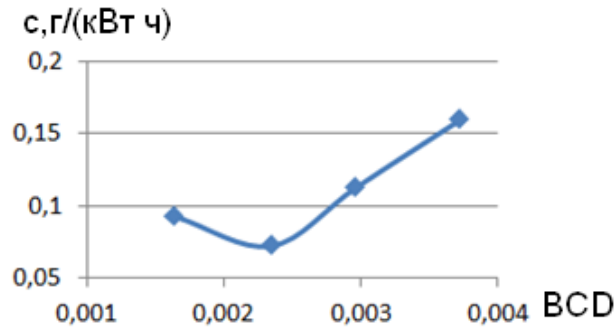


Рис. 6. Зависимость эмиссии сажи от произведения критериев BCD для двигателя 3Д6

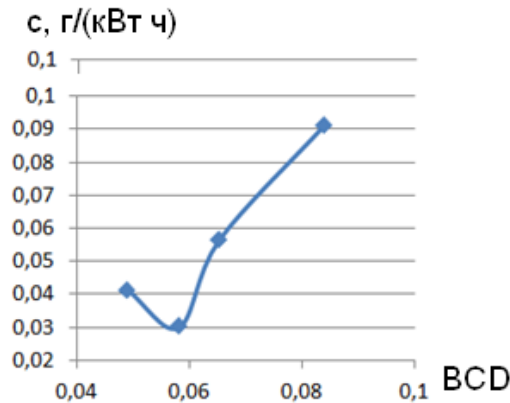


Рис. 7. Зависимость эмиссии сажи от произведения критериев BCD для двигателя MAN D 2866

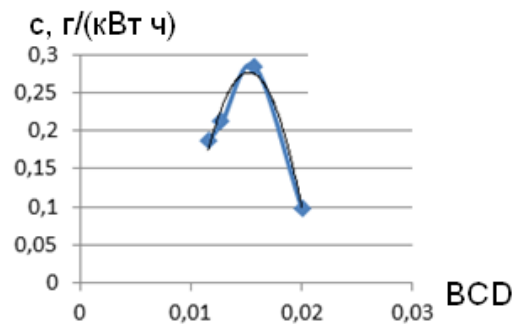


Рис. 8. Зависимость эмиссии сажи от произведения критериев BCD для двигателя 6ЧН18/22 «Хабаровец»

На рисунках 6-8 чётко видны экстремумы. Расчёты дальнобойности топливного факела, проведённые по методу проф. А.С. Лышевского [10] (выражения (3)-(10)), показали, что в точке экстремума топливные факелы достигают днища поршня, а смесеобразование становится объёмно-плёночным.

Для участка объёмного смесеобразования при участии автора [15] было предложено выражение для расчёта эмиссии сажи с отработавшими газами:

$$\frac{c_p}{c_e} = H \left(\frac{J_{ce}}{J_{cp}} \right)^{0,4} \left(\frac{d_{ce}}{d_{cp}} \right)^{0,8} \left(\frac{g_{ce}}{g_{cp}} \right)^{-0,4} \left(\frac{P_{pe}}{P_{pp}} \right)^{0,3} \left(\frac{C_e}{C_p} \right)^{0,08} \left(\frac{\alpha_e}{\alpha_p} \right)^{-0,08} \left(\frac{Q_e}{Q_p} \right)^{-0,1} \quad (15)$$

где $H = \left(\frac{\tau_{ze}}{\tau_{zp}} \frac{n_e}{n_p} \frac{z_p}{z_e} \right)^{0,12}$ – критерий длительности внутрицилиндровых процессов, τ_z – продолжительность процесса сгорания в секундах, n – частота вращения коленчатого вала, $z=0,5$ для 4-тактных двигателей и $z=1$ для двухтактных; J_c и d_c – число и диаметр сопловых отверстий распылителя; g_c – цикловая подача топлива; P_T – среднее давление топлива в процессе впрыска; α – среднemasсовый коэффициент избытка воздуха при сгорании; C – геометрическая характеристика топливной струи, определяемая согласно выражения (13); $Q_{нэ}^P$ и $Q_{нп}^P$ – теплотворные способности топлив.

Для участков объёмно-плёночного смесеобразования обработка производилась относительно произведения критериев В и С [8] (выражения (12) и (13))[14].

На участке объёмно-плёночного смесеобразования изменение величины эмиссии сажи описывается степенной функцией, близкой к квадратной параболе с близкими значениями коэффициента при аргументе. В частности, для двигателя «Хабаровец» данное выражение примет вид:

$$c = 0,0829(BC)^{-1,937} \quad (16)$$

для двигателя МАН

$$c = 0,0877(BC)^{2,206} \quad (15)$$

для двигателя ЗД6

$$c = 0,087(BC)^{2,078} \quad (16)$$

Для трёх рассмотренных выше двигателей нагружение осуществлялось на генераторный агрегат при постоянных оборотах коленчатого вала.

Исследование рабочего процесса двигателя 12ЧН 18/20 [11] осуществлялось по винтовой характеристике с переменными оборотами коленчатого вала. Двигатель имеет неразделённые камеры сгорания и аккумуляторную систему топливоподачи, что позволяет поддерживать давление впрыска постоянным вне зависимости от режима нагружения.

Для двигателя 12ЧН18/20 зависимость эмиссии сажи от индикаторной мощности показана на рисунке 9.

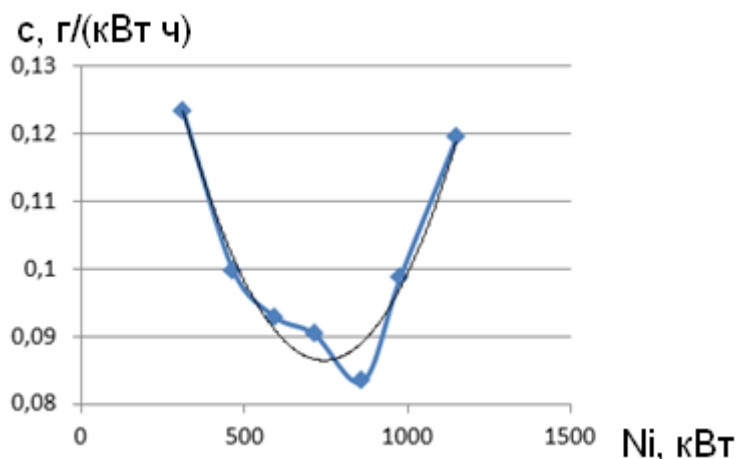


Рис. 9. Зависимость удельного выброса углерода от индикаторной мощности для двигателя 12ЧН18/20 при его работе по винтовой характеристике

Как видно из рисунка, для двигателя 12ЧН18/20 также характерен минимум величины удельного выброса углерода на режиме нагружения около 75% (индикаторная мощность 850 кВт) при частоте вращения коленчатого вала 1340 об/мин.

Полученные данные также были обработаны в соответствии с методикой профессора В.И. Одинцова [8].

Результаты обработки показаны на рисунке 10.

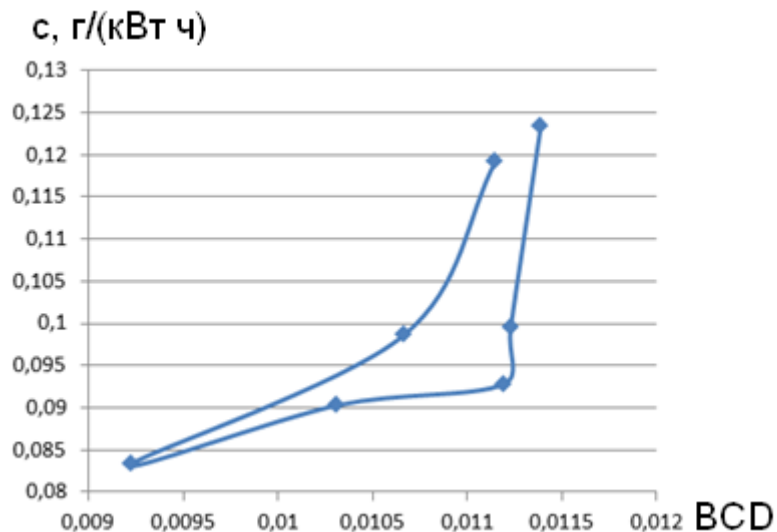


Рис. 10. Зависимость величины удельного выброса углерода от безразмерных критериев рабочего процесса В, С, и Д.

Чтобы учесть влияние на величины выбросов частоты вращения и, соответственно, продолжительности внутрицилиндровых процессов по времени, в зависимость, показанную на рисунке 10, была введена поправка на частоту вращения в виде отношения текущих оборотов двигателя к номинальным.

В таком случае зависимость примет вид, близкий к квадратной параболе, что показано на рисунке 11.

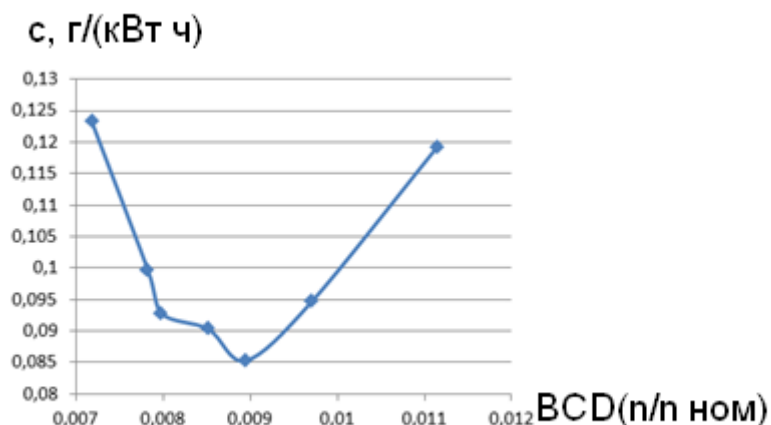


Рис 11. Зависимость удельного выброса сажи с ОГ двигателя 12ЧН18/20 от критериев рабочего процесса В, С и Д с поправкой на обороты

Автором ранее было установлено, что в точке экстремума на зависимости величины выброса сажи от мощности и критериев рабочего процесса В,С и Д смесеобразование становится объёмно-плёночным.

Зависимость выброса сажи от критериев рабочего процесса В и С для двигателя 12ЧН18/20 показана на рисунке 12.

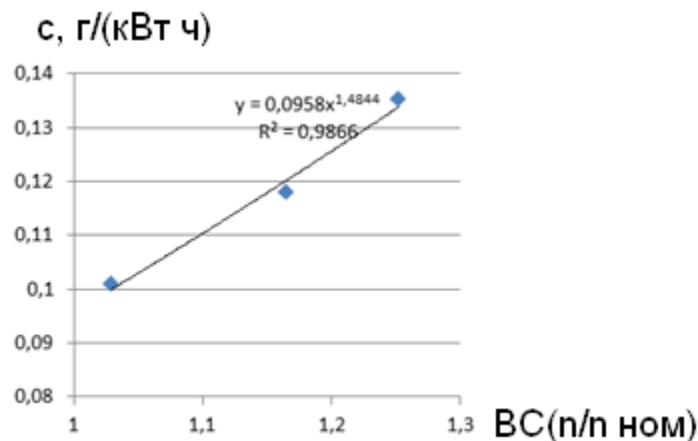


Рис. 12. Зависимость удельного выброса углерода от критериев В и С с поправкой на частоту вращения коленчатого вала для двигателя 12ЧН18/20 на участке объёмно-плёночного смесеобразования

Как видно из рисунка, данная зависимость описывается нижеследующей степенной функцией:

$$c = 0,0958(BC(n/n_{ном}))^{1,484} \quad (17)$$

Таким образом, эмиссия сажи с отработавшими газами дизелей на участке объёмно-плёночного смесеобразования может быть выражена уравнением вида:

$$c = A(BC)^x \quad (18)$$

где А и х – эмпирические показатели, характеризующие особенности протекания рабочего процесса в конкретном двигателе.

При работе двигателя при переменной частоте вращения коленчатого вала в уравнение (18) следует вводить поправку на обороты.

Чтобы выявить влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на значения показателей А и х из уравнения (18), была замерена дымность отработавших газов двигателя 1ч8/7,5. Такие двигатели применяются для привода виброплит, переносных дизель-генераторов и мотопомп, мини-тракторов. Рассматриваемый в настоящей работе двигатель установлен на переносной мотопомпе и работает при постоянной частоте вращения коленчатого вала $n=2400$ об/мин. Зависимость величины выбросов твёрдых частиц углерода от индикаторной мощности данного двигателя показана на рисунке 13.

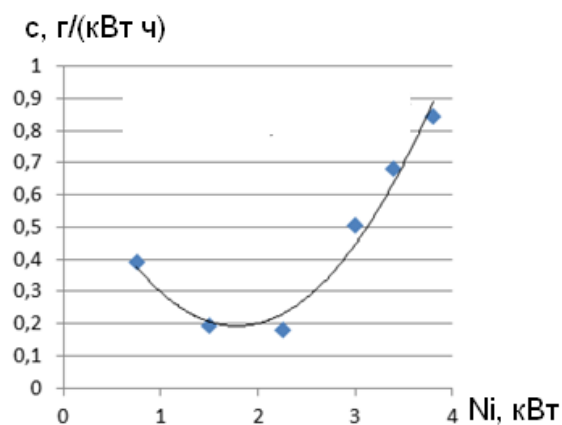


Рис. 13. Величина выбросов твёрдых частиц углерода в зависимости от индикаторной мощности двигателя 1Ч8/7,5 (2400 об/мин)

Из рисунка видно, что на режиме нагрузки 2,25 кВт смесеобразование становится объёмно-плёночным. Функция удельной эмиссии углерода на этом участке была пересчитана относительно критериев рабочего процесса В и С [8]. Результат обработки показан на рисунке 14.

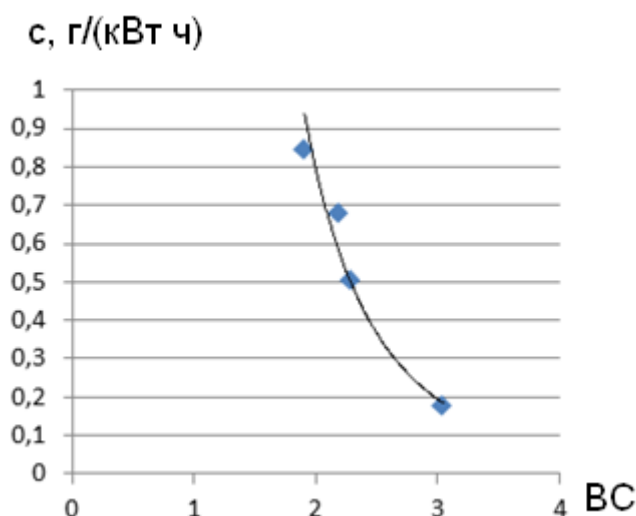


Рис. 14. Величина эмиссии углерода в функции от критериев рабочего процесса В и С.

Как видно из представленного рисунка, зависимость эмиссии углерода от критериев рабочего процесса выражается таким же по структуре уравнением, как и для других рассмотренных двигателей:

$$c = 8,75(BC)^{-3,465} \quad (19)$$

что соответствует принятой модели.

Для удобства логарифмирования с целью получения зависимостей для определения значений показателей в выражении (18) оно было переписано в виде

$$c = (KBC)^x \quad (20)$$

где $K = \sqrt[x]{A}$

К множителю «К» и показателю степени «х» была применена теория рабочего процесса ДВС, разработанная профессором В.И. Одинцовым [8]. В качестве эталонного в данном случае был принят 1-цилиндровый двигатель 1Ч8/7,5. В ходе исследования было установлено, что множитель «К» представляет собой функцию массы воздушного заряда во всех цилиндрах двигателя, а показатель степени «х» зависит от площади проходного сечения распылителя форсунки и количества цилиндров.

Соответствующие уравнения имеют вид:

$$\frac{K_{п}}{K_{э}} = -2 * 10^{-4} \left(\frac{m_{п}}{m_{э}} \right) + 0,1824 \quad (21)$$

$$\frac{x_{п}}{x_{э}} = 1,571 * \left(\frac{F_{pп}}{F_{pэ}} \right)^{0,5} * \left(\frac{i_{цэ}}{i_{цп}} \right) + 0,16 \quad (22)$$

где m – масса воздушного заряда во всех цилиндрах двигателя, $i_{ц}$ – число цилиндров двигателя, F_p – площадь проходного сечения распылителя форсунки, параметры с индексом «п» относятся к исследуемому или проектируемому двигателю, а с индексом «э» – к эталонному.

Выводы

1. Получена математическая модель величины эмиссии твёрдых частиц углерода с отработавшими газами дизелей при объёмно-плёночном смесеобразовании.
2. Предложены выражения для определения величин множителя и показателя степени в полученном уравнении для расчёта величины эмиссии сажи при объёмно-плёночном смесеобразовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Броне, Д.Д. Сгорание в поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1969 г.-247 с.
2. Дьяченко Н.Х., Костин А.К., Пугачёв Б.П., Русинов Р.В., Мельников Г.В. Теория двигателей внутреннего сгорания/ Под. Ред. Н.Х. Дьяченко.- Л.:Машиностроение, 1974.-552 с.
3. Теоретические основы химмотологии / под ред. А.А. Браткова. – М.: Химия, 1985. – 320 с
4. Кавтарадзе, Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учеб.для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 719 с.
5. Одинцов В.И., Глазков Д.Ю. Некоторые закономерности образования сажи в цилиндрах судовых дизелей // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. – Астрахань, 2014. – № 3. – С. 83 - 87.
6. Межеричкий А.Д. Турбокомпрессоры систем наддува судовых дизелей. Л.: Судостроение, 1986.- 248 с.
7. Soot Deposits and Fires in Exhaust Gas Boilers. www.manbw.com, 2005.- 25 p.
8. Одинцов В.И. Рабочий процесс судовых ДВС. Монография. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2010.- 135 с.
9. Медведев, Г.В. Повышение эффективности систем очистки отработавших газов судовых дизелей применением металлокерамических фильтров: автореф. на соиск. уч. степ.д.т.н. / Г.В. Медведев. – Алтайский техн. ун-т им. И.И. Ползунова, 2016. – 18 с.
10. Гафуров, Р. А. Исследование структуры дизельной топливной струи при циклическомвпрыскивании методом импульсной голографии / Р. А. Гафуров, Г. А. Глебов, Ю. М. Скворцов // Двигателестроение. – 1996. – № 3–4. –С. 10–12.
11. Лышевский, А.С. Распыливание топлива в судовых дизелях. Л.: Судостроение, 1971. – 248 с.
12. Glazkov, D. Impact of Air-Fuel Mixture Formation Method on Soot Emission Volume in Ship Engine Exhaust Gas / D/ Glazkov // Scientific Journal of Gdynia Marytime University. – 2019. - №112/2019. – p. 23-34.
13. Щенников, И. А. Прогнозирование эксплуатационных показателей дизельной энергетическойустановкисудна на этапе проектирования её элементов: дис. на соиск. уч. степ. к. т. н. / И. А. Щенников. –Санкт-Петербург, 2015. – 229 с.
14. Одинцов, В.И. Обеспечение условий безопасной эксплуатации судовых ДВС путём ограничения выбросов продуктов неполного сгорания топлива / В.И. Одинцов, Д.Ю. Глазков // Вестник АГТУ. Сер. Морская техника и технология. – Астрахань, 2016. – № 4. – С. 70 - 79.
15. Victor Odintsov, Dmitry Glazkov, Nikita Sviridiuk. Regularities of changes in specific carbon and nitrogen oxide emissions of marine and transport diesel engines. 18-th Annular General Assembly of the International Association of Maritime Universities. Global perspectives in MET: Towards Sustainable, Green and Integrated Maritime Transport. Volume I, Varna, 2017, p. 470-480.

VALUE OF SOOT EMISSION WITH EXHAUST GASES OF MARINE DIESELS DEPENDING ON THE ACTUAL FACTORS DURING VOLUME-FILM MIXTURE

Glazkov Dmitry Yurevich, Senior Lecturer, Department of Ship Power Plants

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: @gmail.com

Processes occurring during formation and burning of soot in the engine cylinder with different methods of mixing formation are described in this article. The results of research of the influence of the operating factors on soot emission are given. The empirical equations of the value of soot emission from operation factors are given for some diesel engines with volume-film and whirl-chamber methods of mixing formation.

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ СУДОВОГО ДВУХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ MAN B&W СЕРИИ MC

Дорош Кирилл Сергеевич, аспирант

Волкова Лариса Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, зам. декана ФСЭ по учебной работе

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,

Калининград, Россия, e-mail: kirill.dorosh@klgtu.ru; larisa.volkova@klgtu.ru

Рассмотрен модельный ряд высоконагруженных двухтактных пропульсивных установок ведущего производителя в отрасли судового дизелестроения MAN B&W. Описана регулировка момента впрыска в зависимости от изменения основных параметров работы двигателя. Произведены численные расчеты основных параметров топливной аппаратуры, расхода топлива, потребляемого воздуха для корректной работы дизеля.

Введение

Судовые двигатели компании MAN B&W серии MC-C были представлены миру в 1991 году как основная пропульсивная установка на судах коммерческого сектора. Прейдя на смену поколению двигателей серии MC, данная модель была обозначена как класс «СОМРАСТ». Цель ее проектирования заключалась в уменьшении веса, модернизации топливной и лубрикаторной аппаратуры, увеличении интервалов ремонта, параллельно с этим подняв общий КПД агрегата.

В конструкции дизелей серий MC и MC-C используются насосы золотникового типа, регулировка в которых осуществляется по концу подачи. Стоит отметить, что в двигателях с диаметром камеры сгорания более 700мм в конструкции насоса предусмотрена система регулировки момента впрыска (VIT - Variable Injection Timing), осуществляющаяся путем перемещения втулки плунжера вверх или вниз [1].

При опускании втулки движущийся вверх плунжер будет раньше перекрывать впускное отверстие во втулке, процесс сжатия топливной смеси и впрыск в цилиндр будет произведен ранее.

Смещение втулки вверх приводит к запаздыванию момента подачи, то есть уменьшению угла опережения. За перемещения втулки отвечает рейка регулировки момента впрыска (Рис.1), которая осуществляет свой ход от пневмоцилиндра. Пневмоцилиндр приводится в движение воздухом, который нагнетается от управляющего клапана. Открытие клапана на каждом цилиндре происходит в определенный момент изменения положения вала на регуляторе числа оборотов двигателя [2].

Данная система применяется на нагрузках двигателя от 40 до 90%, на малых нагрузках система отключается в след за уменьшением подачи топлива и смещением нижней топливной рейки.

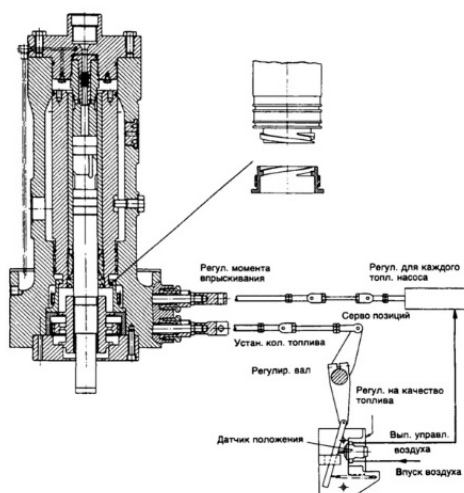


Рис. 1. Система регулировки момента впрыска VIT

Основная часть

Расчет диаметра и хода плунжера судового дизеля

Объектом исследования топливной аппаратуры выбран двигатель MAN B&W 6S60 MC-C. Основные технические данные дизеля MAN B&W 6S60MC-C:

1. Шесть цилиндров. D цилиндра, 600 мм. Ход поршня, 2400 мм.
2. Удельный расход топлива на номинальных оборотах, 170 г/(кВт·ч). Эффективная мощность на номинальных оборотах, 13530 кВт.
3. Частота вращения коленвала, до 105 мин^{-1} . Номинальная частота, 105 мин^{-1} .
4. Пуск двигателя производится сжатым воздухом под давлением 3 Мпа.
5. Степени сжатия камеры сгорания эквивалентна 13.
6. Используемые виды топлива: мазут ультра-низкосернистый (ULSFO, содержание серы до 0.5% с 01.01.2020).
8. Коэффициент избытка воздуха при сжигании топлива равен 1,5.

На Рисунке 2 отражен поперечный разрез в двух плоскостях модели 6S60 MC-C.

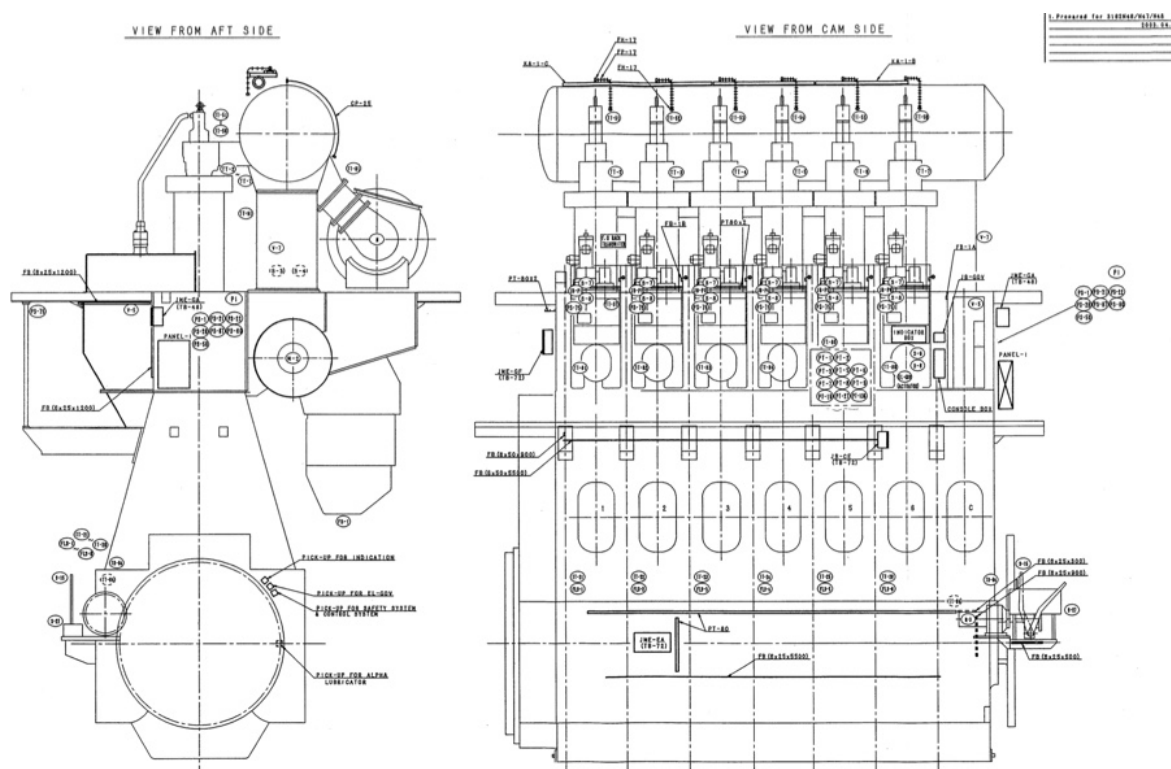


Рис. 2. Поперечный разрез судовой пропульсивной установки «MAN B&W 6S60MC-C» в двух плоскостях

Расчетным путем определим диаметр плунжера и его ход топливного насоса высокого давления судового двухтактного, шести цилиндрового дизеля MAN B&W 6S60MC-C, с диаметром цилиндра 60 см и мощностью 13530 кВт.

Во время проведения практических исследований дизеля при прохождении пятнадцатилетнего классификационного испытания для инспекции DNV были получены следующие результаты мощности (Рис.3). В качестве измерительного прибора использовался аппаратно-программный комплекс “Doctor Diesel”, зарекомендовавший себя как ведущий производитель диагностического судового оборудования.

6S60MC-C			
Power		Speed	
kW	%	rpm	%
14911	110	108.3	102.85
13559	100	105.1	100
11951	88.3	100.8	96.0
10191	75	95.5	90.95
6780	50	83.5	79.5
3389	25	66.2	63.0

Рис. 3. Результаты практического мощностного анализа двигателя 6S60MC-C

Рассмотрим цикловую подачу топлива для дизеля 6S60MC-C на номинальной мощности по формуле:

$$q_{ц} = N_e \cdot q_e \cdot \frac{1000}{i \cdot n_n \cdot \rho_T \cdot 60} = 13530 \cdot 170 \cdot \frac{1000}{6 \cdot 105 \cdot 0.9 \cdot 60} = 67610 \text{ мм}^3 \quad (1)$$

в которой параметр N_e представляет эффективную номинальную мощность дизеля на 105 оборотах в минуту, 13 530 кВт; q_e – удельный эффективный расход топлива на номинальных оборотах, 170 г/(кВт·ч); i – количество цилиндров, 6; n_n – частота вращения распределительного вала насоса, 105 мин⁻¹; ρ_T – плотность используемого топлива, 0,9 г/см³ (900 кг/м³).

На режиме пуска двигателя подача топлива должна быть увеличена в 1,5 – 2,0 раза [3].

$$q_{\text{пуск}} = (1,5 - 2,0) \cdot q_{ц} \quad (2)$$

Обозначим отношение полного (геометрического) хода плунжера h_n к диаметру плунжера d_n через величину m , которая может лежать в пределах 1,0 – 1,5.

$$m = h_n / d_n \quad (3)$$

Диаметр плунжера выбирается с учетом величины максимальной цикловой подачи топлива. Плунжерные пары должны обеспечивать двигатель топливом на всех режимах работы, особенно на режиме пуска:

$$d_n = \sqrt[3]{4 \cdot q_{ц} \cdot \varphi_n / (\pi \cdot m \cdot \eta_n)} \quad (4)$$

где φ_n – коэффициент, учитывающий увеличение цикловой подачи на режиме пуска, 1,5-2,0; η_n – коэффициент подачи насоса, который учитывает гидравлические потери, 0,7-0,9.

Для $q_{ц} = 67\,610 \text{ мм}^3$; $\varphi_n = 1,5$; $\eta_n = 0,7$; $m = 1,1$ значение диаметра плунжера $d_n = 55 \text{ мм}$.

Подача топлива за цикл зависит от площади плунжера, его активного хода, коэффициента подачи и определяется по формуле [4]

$$q_{ц} = \frac{\pi \cdot d_n^2}{4} \cdot h_{\text{акт}} \cdot \eta_n \quad (5)$$

Для диаметра плунжера $d_n = 55 \text{ мм}$ активный ход плунжера, с учетом выражения (5) равен

$$h_{\text{акт}} = \frac{4 \cdot 67610}{\pi \cdot 55 \cdot 55 \cdot 0.7} = 40.7 \text{ мм} \quad (6)$$

С учетом увеличения пусковой цикловой подачи в 1,5 – 2,0 раза по сравнению с номинальной подачей и износа плунжерной пары в процессе длительной эксплуатации

$$h_{\text{max}} = 1.5 \cdot h_{\text{акт}} = 1.5 \cdot 40.7 = 61 \text{ мм} \quad (7)$$

Полный ход плунжера принимаем равным 61 мм, который должен быть согласован с размерами кулачкового вала насоса.

Расчет форсунки дизеля MAN B&W 6S60MC-C и коэффициента избытка воздуха

Уравнение (1) показывает нам, что цикловая подача топлива для рассматриваемого агрегата серии 6S60 MC-C на режиме номинальной мощности должно составлять 67 610 мм³/цикл.

Стоит отметить, что в каждой голове цилиндра двигателя установлено по две одинаковые форсунки, в следствии чего цикловая подача на каждую форсунку составляет 50% от подачи на цилиндр, то есть 33805 мм³ на форсунку за один цикл.

Форсунки описываемого двигателя работают через механический ТНВД, осуществляющий впрыск через контакт с кулачком распредвала и подающий давление топлива 100МПа. Согласно технической документации завода-изготовителя, средний перепад давления составляет 60Мпа.

На рисунке 4 представлен разрез двух типов форсунок, используемых на малооборотных дизелях. Их отличительная особенность выражена в конструкции распылителей, а именно в возможности проведения «горячей замены» распылителя для последующего использования[5].

На самом распылителе малооборотных дизелей имеется несколько отверстий, через которые топливо равномерно поступает в камеру сгорания для более объемного распыла и заполнения всей камеры.

Произведем расчет номинальной скорости течения дизельного топлива через сопловые отверстия форсунки:

$$v_T = \sqrt{2 \cdot \Delta P / \rho_T} \quad (8)$$

где ΔP отражает средний перепад давления мазута, возникающий перед сопловыми отверстиями, Па.

$$v_T = \sqrt{\frac{2 \cdot 600 \cdot 10^5}{900}} = 365 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (9)$$

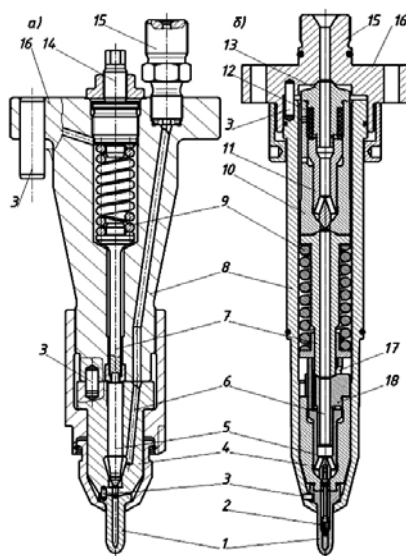


Рис. 4. Форсунки судовых малооборотных двигателей:

а) – производитель Wartsila модель RTA58T; б) – производитель MAN B&W модель MC/MC-C

Расход топлива в мм³/с определим по формуле:

$$Q = v_T \cdot \mu F \quad (10)$$

в которой μF – активное сечение потока топлива через распылитель форсунки, мм².

Объемный топлива, потребляемого за цикл рассчитаем по его количеству ($q_{ц}$), поступающему в камеру сгорания за момент впрыска топлива τ [6]

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot F_c}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.45}{3.14}} = 0.8 \text{ мм} \quad (11)$$

Количество и диаметр отверстий в распылителе устанавливается в ходе опытно-конструкторских испытаний топливной аппаратуры, установленной на двигателе. Конструктивные и регулирующие параметры ТНВД и форсунок должны обеспечивать допустимый удельный эффективный расход топлива и ограниченное количество вредных выбросов в атмосферу. Давление открытия иглы сопла составляет 32 МПа.

Величина цикловой подачи используется в регулировке и диагностике топливной аппаратуры.

Основываясь на значении цикловой подачи, определенном по формуле (1), определим часовой расход топлива на номинальных оборотах:

$$G_{ч} = 60 \cdot i \cdot q_{ц} \cdot n_H = 60 \cdot 6 \cdot 67.6 \cdot 105 = 2555 \text{ л/ч} \quad (12)$$

При постоянной работе двигателя на 30% нагрузке теоретический расход топлива составит около 18 тонн в сутки.

Весомым параметром в расчете экономичности дизеля является коэффициент избытка воздуха, который представляет из отношение поступившего количество воздуха в камеру к теоретически необходимому количеству воздуха для сгорания 1000 грамм мазута.

$$\alpha = \frac{M_d}{M_T} \quad (13)$$

По формуле Менделеева-Клайперона определим массу поступившего в цилиндр воздуха после продувки[5]:

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (14)$$

где P означает абсолютное давление, Н/м²; V – объём цилиндра двигателя без учета объема, занятых продувочными окнами, м³; m – масса поступившего в цилиндр воздуха, кг; R – газовая постоянная для воздуха, равная 287 Дж/(кг·К); T – температура, К.

Предположим, что давление в ресивере двигателя эквивалентно 0,25 МПа. Принимая во внимание потери на трение и завихрения воздуха, предположим, что на входе в цилиндр через продувочный окна давление составляет 0,2 Мпа. Таким образом, рассчитаем массу воздуха, поступившую в цилиндр:

$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{0,2 \cdot 10^6 \cdot 0,62}{(287 \cdot 320)} = 1,35 \text{ кг} \quad (15)$$

Учитывая плотность и количества топлива, найдем массовое отношение воздуха к топливу:

$$\frac{M_B}{M_T} = \frac{1350 \text{ г}}{67,6 \text{ см}^3 \cdot 0,9 \text{ г/см}^3} = 20,2$$

Согласно теории дизелестроения, для сгорания 1 г топлива необходимо 14,8 г воздуха [1]. Коэффициент избытка воздуха будет равен $a = 20,2 / 14,8 = 1,5$. Полученный результат расчета соответствует техническим данным судового дизеля MAN B&W 6S60MC-C.

В процессе испытания двигателя величину a более точно определяют по формуле

$$\alpha = M_B / (L_T \cdot G_T) \quad (17)$$

где M_B – массовое количество воздуха, поступившее в цилиндры на данном режиме испытания, кг/ч; L_T – теоретическое массовое количество воздуха, необходимое для сжигания 1 кг топлива, ≈ 15 кг/кг; G_T – часовой расход топлива, кг/ч.

Плотность воздуха ρ_B определяют по формуле

$$P = \rho_B \cdot R \cdot T \quad (18)$$

где P – абсолютное давление, Н/м²; R – газовая постоянная для воздуха 287 Дж/(кг·К); T – температура, К. Для P = 2 · 10⁵ Па и T = 320 К $\rho_B = 2,18$ кг/м³.

С достаточной для практики точностью плотность воздуха, поступившего в один цилиндр, рекомендуется определять по следующей методике. Вначале определяют необходимый часовой расход воздуха (кг/ч), при котором обеспечивается полное сгорание топлива:

$$M_B = \alpha \cdot L_T \cdot q_e \cdot N_{eц} \quad (19)$$

Для $\alpha = 1,5$; $L_m = 14,8$; $q_e = 0,17$ кг/(кВт· ч); $N_{eц} = 2255$ кВт; $M_e = 8523$ кг/ч.

За одну секунду в цилиндр двигателя поступит следующее количество воздуха:

$$M_{Bc} = M_B / 3600 = 8523 / 3600 = 2,37 \text{ кг/с} \quad (20)$$

Масса воздуха, поступившего в один цилиндр за цикл (один оборот коленчатого вала для двухтактного дизеля) равна:

$$M_{Bц} = \alpha \cdot L_T \cdot q_e \cdot N_{eц} \cdot \frac{60}{n \cdot 3600} = 1,5 \cdot 14,8 \cdot 0,17 \cdot 2255 \cdot \frac{60}{105 \cdot 3600} = 1,36 \text{ кг} \quad (21)$$

Плотность воздуха, поступившего в цилиндр дизеля

$$\rho_B = M_{Bц} / V_h = 1,36 / 0,62 = 2,2 \text{ кг/м}^3 \quad (22)$$

Заключение

1. Рассмотрены системы управления моментом впрыска топлива в зависимости от серии двигателей, представлены модельные ряды ведущего производителя.
2. Описаны конструктивные особенности исполнения ГНВД в зависимости от размеров ЦПГ двигателей.
3. Произведен математический вывод формулы для расчета цикловой подачи топлива.

4. Произведены числовые расчеты часового и суточного расхода мазута, выведен принцип расчета диаметра сопловых отверстий на форсунках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные подходы к конструированию поршневых двигателей: учебное пособие / Г.А. Конкс, В.А. Лашко. – М.: «МОРКНИГА», 2009. – 388 с.
2. Судовые дизельные установки. Системы автоматического регулирования: учебное пособие / Г.А. Конкс, В.А. Лашко. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2011. – 462 с.
3. Макушев, Ю.П. Расчет систем и механизмов двигателей внутреннего сгорания математическими методами / Ю.П. Макушев, Т.А. Полякова, Л.Ю. Михайлова, А.В. Филатов: учеб. пособие. – Омск: СибАДИ, 2011. – 284 с.
4. История двигателестроения и введение в направление [Электронный ресурс]: практикум / Ю.П. Макушев, А.Л. Иванов. Омск, СибАДИ, 2018. – 89 с. Режим доступа: <http://bek.sibadi.org/fulltext/esd596.pdf>.
5. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта: учебное пособие / Г.А. Конкс, В.А. Лашко. – М.: Машиностроение, 2005. – 512 с.
6. Основы научных исследований и испытаний двигателей. [Электронный ресурс]: практикум / Ю.П. Макушев, В.И. Подгурский, Л.Ю. Волкова. Кафедра тепловые двигатели и автотракторное электрооборудование. – Омск: СибАДИ, 2019. – Режим доступа: <http://bek.sibadi.org/fulltext/esd1033.pdf>.

NUMERICAL CALCULATION OF FUEL EQUIPMENT PARAMETERS FOR A SHIPBOARD TWO-STROKE INTERNAL COMBUSTION ENGINE MAN B&W MC SERIES

Dorosh Kirill Sergeevich, Kaliningrad state technical University,
Department "Ship power plants and heat power engineering", postgraduate student
Volkova Larisa Yurievna. Kaliningrad state technical University,
Department "Ship power plants and heat power engineering", kand. Techn. Sciences,
associate Professor

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russia, e-mail: kirill.dorosh@klgtu.ru; larisa.volkova@klgtu.ru

Abstract. The model range of high-loaded two-stroke propulsion systems of the leading manufacturer in the marine diesel engine industry MAN B&W is considered. The regulation of the injection moment is described depending on changes in the main parameters of the engine operation. Numerical calculations of the main parameters of the fuel equipment, fuel consumption, consumed air for the correct operation of the diesel engine.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ НАСОСОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Закиров Сарвар Зафарович, аспирант

Волкова Лариса Юрьевна канд. техн. наук, доцент, зам. декана ФСЭ по учебной работе

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, le-mail: arisa.volkova@klgtu.ru; sarvar.zakirov@klgtu.ru

Рассмотрены современные дизелестроительные компании. Представлена классификация дизельных двигателей по частоте вращения. Описан принцип работы топливного насоса высокого давления. Описана регулировка ТНВД в зависимости от изменения основных параметров дизельного двигателя. Для повышения мощности двигателя увеличивают цикловую подачу топлива без изменения ТНВД, увеличивают диаметр плунжера и его активный ход.

Ключевые слова: судовой дизельный двигатель, ТНВД, регулировка ТНВД.

Введение

Конструктивное исполнение топливных насосов высокого давления (ТНВД) зависит от частоты вращения коленчатого вала двигателя. По частоте вращения двигатели классифицируются следующим образом:

1. малооборотные двигатели (МОД) – с частотой вращения от 50 до 250 мин-1;
2. среднеоборотные двигатели (СОД) – с частотой вращения от 250 до 1300 мин-1;
3. высокооборотные двигатели (ВОД) – с частотой вращения свыше 1300 мин-1.

На конструкцию ТНВД дополнительное влияние оказывают: максимальная величина среднего эффективного давления в цилиндре (МОД – 1,9 МПа; СОД – 2,8 МПа; ВОД – 3,0 МПа), номинальная мощность двигателя, число и расположение цилиндров, цикловая подача топлива, вид топлива (дизельное или мазут), диаметр цилиндра, вид камеры сгорания, способ смесеобразования, техническая характеристика форсунок.

В настоящее время 20 зарубежных фирм работают в области судового дизелестроения, рассмотрим некоторые из них.

Главной фирмой по выпуску судовых двигателей является MAN (Германия), B&W Diesel (Дания) [1]. Основным видом деятельности следует отнести разработку, производство, техническое обслуживание судовых дизельных двигателей и агрегатов на их базе:

- двухтактных дизелей (МОД) морского исполнения мощностью от 1000 до 70 000 кВт;
- судовых (СОД) мощностью от 450 до 16 800 кВт;
- судовых дизель-генераторных мощностью от 430 до 4 125 кВт.

Число цилиндров от 4 до 12.

Судовые МОД фирмы MAN B&W достигают большой мощности, массы и габаритных размеров. Для обеспечения цилиндрической мощности 5800 кВт диаметр плунжера насоса высокого давления должен быть не менее 50 мм. На рис. 1 приведена погрузка судового двигателя MAN B&W12-K-98-MS мощностью 70 000 кВт и его габаритные размеры в сравнении с ростом человека.

Некоторые российские дизелестроительные предприятия, используя зарубежный опыт по конструированию и эксплуатации, приобретают лицензионное право производства современных моделей дизелей и агрегатов на базе ведущих мировых фирм. Это, например, ОАО «БМЗ» (г. Брянск), которое в течение нескольких десятилетий выпускает судовые малооборотные двигатели фирмы MAN B&W (Дания, Германия). Цилиндрическая мощность данных двигателей от 1310 до 4880 кВт, диаметр цилиндра от 46 до 90 см, частота вращения от 76 до 129 мин-1, число цилиндров от 4 до 8.

Финская фирма Wartsila Diesel является одной из крупнейших изготовителей СОД и ВОД. Это международная группа компаний, располагающая производством в Голландии, Испании, Норвегии, Финляндии, Франции, Швеции. Выпускает двигатели с частотой вращения коленчатого вала от 1600 до 1800 мин-1, мощностью от 690 до 34 900 кВт, с числом цилиндров от 6 до 18. Выпускают двигатели Vasa 20, W20 (20 – это диаметр поршня в см), 26, 32, 38, 46, 64.

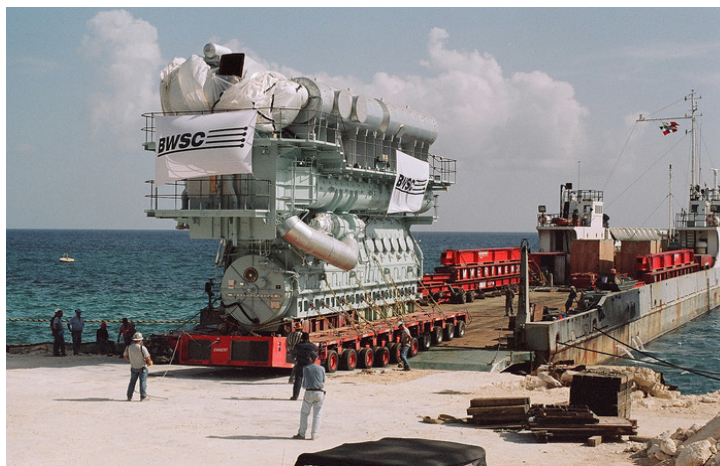


Рис. 1. Погрузка судового двигателя MAN B&W 12-K-98-MS мощностью 70 000 кВт

Швейцарская фирма Sulzer выпускает четыре модели четырехтактных СОД:

- S20 мощностью от 460 до 1 440 кВт с частотой вращения от 720 до 1000 мин-1;
- AT25 мощностью от 700 до 4 900 кВт с частотой вращения от 720 до 1000 мин-1;
- ZA40S мощностью от 4 500 до 13 500 кВт с частотой вращения 510 мин-1;
- ZA50S мощностью от 7 200 до 21 600 кВт с частотой вращения 450 мин-1.

Цифра в условном обозначении двигателя указывает на диаметр поршня в см.

Основная часть.

Принцип работы ТНВД судовых дизелей не отличается от работы автомобильных или тепловозных дизелей. Главной задачей является подавать к форсункам под высоким давлением строго определенные порции топлива в нужное время относительно верхней мертвой точки (ВМТ) поршня дизеля. Отличие заключается в том, что цилиндровая мощность малооборотного судового двухтактного дизеля, например, MAN B&W 6S60MC при частоте вращения коленчатого вала 105 мин-1, достигает 2250 кВт, а цикловая подача топлива равна 60 см³, что в 46 раз больше, чем у тепловозного дизеля 8ЧН 26/26 с цилиндровой мощностью 124 кВт при частоте вращения коленчатого вала 750 мин-1. Диаметр плунжера насоса дизеля 8ЧН 26/26 равен 18 мм, а у MAN B&W 6S60MC – 55 мм.

Увеличение диаметра плунжера в 3,0 раза приводит к повышению габаритных размеров и массы насоса высокого давления судовых двигателей.

На судовых двигателях большой мощностью (до 70 000 кВт) применяют вспомогательные двигатели (дизели-генераторы). Ими могут быть тепловозные двигатели Коломенского завода, двигатели КамАЗ, ЯМЗ или других заводов-изготовителей.

На рис 2 показан общий вид насоса высокого давления фирмы MAN с золотниковым регулированием цикловой подачи и изменением угла опережения впрыска топлива. Топливо под низким давлением поступает (указано стрелкой) по горизонтальному каналу, а затем по полости впуска поднимается к всасывающему (обратному) клапану (он расположен в верхней части насоса).

Такая схема подвода топлива обеспечивает равномерный прогрев плунжерной пары во время перевода с дизельного топлива на тяжелое (мазут), что уменьшает вероятность заклинивания плунжера [1].

Количество поданного топлива (цикловая подача) регулируется путем поворота плунжера, что изменяет его активный ход. Зубчатая рейка (нижняя) при поступательном движении вращает

зубчатую поворотную втулку, в пазы которой входит крестовина плунжера. Таким образом, вместе с вращением втулки поворачивается плунжер на определенный угол.

Угол опережения впрыска топлива регулируется второй дополнительной (верхней) зубчатой рейкой. Возможно применение зубчатого механизма, который позволит перемещать втулку плунжера (вверх или вниз). При опускании втулки плунжер раньше перекроет впускное отверстие, в результате чего насос начнет раньше подавать топливо, увеличивая тем самым угол начала впрыскивания топлива в камеру сгорания рабочего цилиндра. При подъеме втулки плунжера угол опережения впрыска топлива уменьшается. Перемещение рейки осуществляется электронным регулятором нагрузки двигателя.

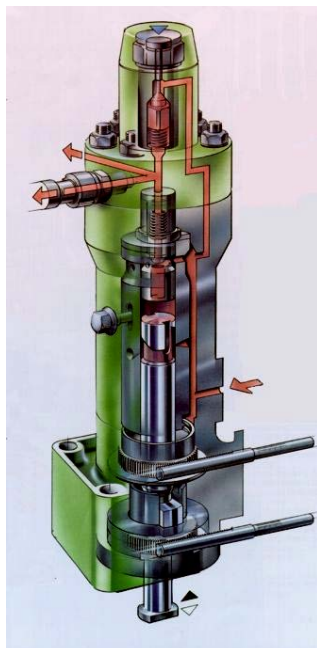


Рис. 2. Топливный насос высокого давления типа MAN с золотниковым регулированием цикловой подачи и изменением угла опережения впрыска топлива

Для изменения угла опережения впрыска топлива применяется механизм, который способен увеличивать или уменьшать угол наклона оси ролика относительно оси плунжера. Изменяется начало подъема плунжера (время контакта кулачка с роликом толкателя плунжера) и начало впрыска топлива.

В насосе высокого давления судового дизеля 8ДКРН 74/160-2 угол опережения впрыска топлива относительно ВМТ поршня изменяется следующим образом (рис. 3). Между роликом толкателя плунжера 5 и кулачковой шайбой 2 привода вала насоса размещают промежуточный ролик 3 качающегося рычага 24 [2].

На втором конце рычага выполнено отверстие, в котором расположен эксцентрик 23. При повороте эксцентрика качающийся рычаг перемещается в горизонтальном направлении. Рычаг 24 вместе с роликом 3 движутся навстречу вращающемуся кулачку. Подъем плунжера начнется раньше, что увеличит угол опережения впрыска топлива, это очень важно при переходе питания дизеля на тяжелое топливо (мазут). При повороте эксцентрика можно изменять угол опережения впрыска топлива и подбирать его оптимальное значение.

Условное обозначение судового дизеля 8ДКРН 74/160-2 следующее: 8 – число цилиндров, Д – двухтактный; К – крейцкопфный; Р – реверсивный; Н – с наддувом; 74/160 – диаметр цилиндра и ход поршня в см. Крейцкопф – ползун.

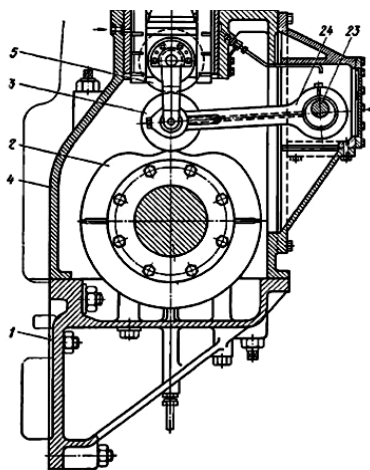


Рис. 3. Устройство для изменения угла опережения впрыска топлива судового дизеля Брянского машиностроительного завода 8ДКРН 74/160-2: 1 – кронштейн; 2 – кулачковая шайба; 3 – промежуточный ролик рычага; 4 – корпус насоса; 5 – ролик толкателя плунжера; 23 – эксцентрик; 24 – рычаг качающийся

Основные детали и узлы индивидуального насоса высокого давления показаны на рис. 4.

Количество топлива, поданного за цикл, регулируется изменением активного хода плунжера путем его поворота. Этот способ регулирования количества топлива, поданного насосом, называется отсечкой в конце подачи. При повороте плунжера изменяется положение винтовой отсечной (косой) кромки наклонного паза относительно отверстия отвода топлива. Изменяется величина активного хода плунжера и количество поданного топлива.

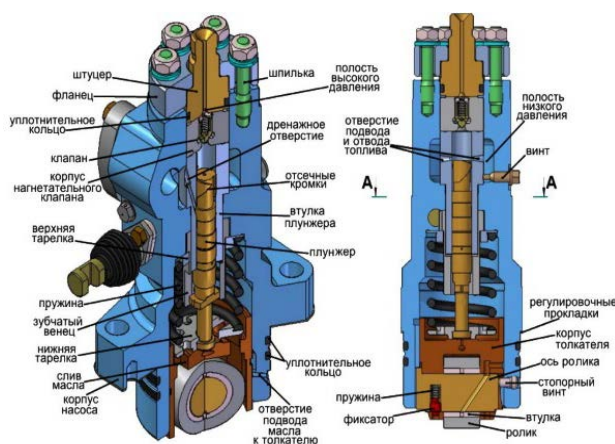


Рис. 4. Топливный насос высокого давления

Поворот плунжера происходит при помощи зубчатой рейки, соединенной с рычагом органа управления. Рейка соединяется при помощи зубчатой венца с плунжером. Поворот плунжера осуществляется зубчатым сектором с втулкой, имеющей паз, в который входит плунжер. [3]

Для смазки толкателя и ролика под давлением подводится моторное масло. В некоторых ТНВД под давлением масла дополнительно смазывается нижняя часть плунжера. Верхняя часть плунжера смазывается утечками топлива, которые возникают при повышении давления над плунжером, скапливаются в проточке втулки и отводятся в линию низкого давления.

Для реверсивных судовых дизелей кулачковые шайбы (кулачки) рекомендуется выполнять вогнутого профиля, а не выпуклого, как в других дизелях. Применение таких кулачков на двигателях с прямоточно-клапанной продувкой дает возможность устанавливать один распределительный вал для насоса и для выпускных клапанов. При реверсе двигателя эти кулачковые шайбы поворачиваются в одну сторону [4].

На рис. 5 показаны разрезы топливных насосов высокого давления с золотниковым регулированием цикловой подачи судовых двигателей различных фирм. Конструктивное исполнение насосов позволяет подавать топливо к одной форсунке или двум (рис. 5б).

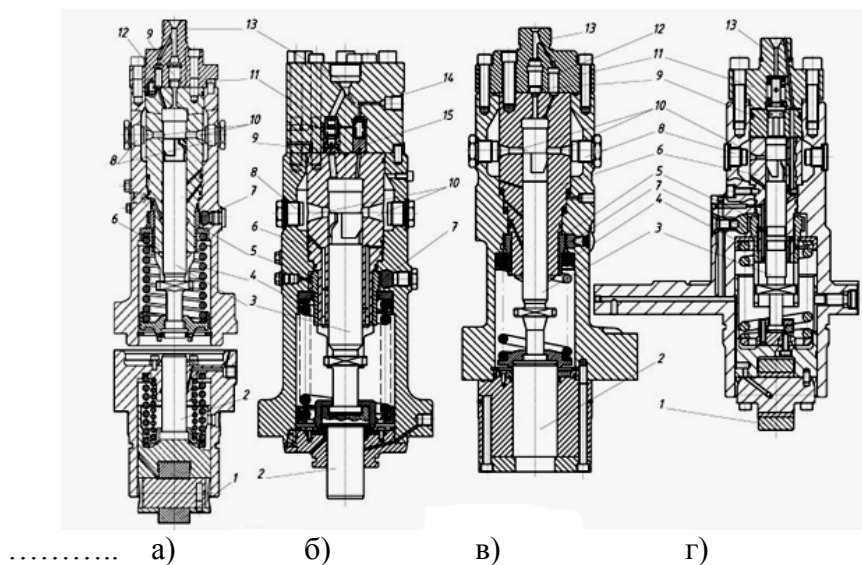


Рис. 5. Топливные насосы высокого давления с золотниковым регулированием цикловой подачи, а – TBD 645 фирмы Deutz MWM; б – Wartsila 46; в – MaK 32C; г – MAN L16/24 (Германия)

1 – роликовый толкатель; 2 – шток толкателя; 3 – плунжер; 4 – возвратная пружина; 5 – втулка поворота плунжера с зубчатым сектором; 6 – втулка плунжера; 7 – зубчатая рейка управления подачей топлива; 8 – противокавитационное демпфирующее устройство; 9 – нагнетательный клапан; 10 – наполнительные (сливные) окна; 11 – крышка насоса; 12 – реверсивный клапан; 13 – присоединительный штуцер (отверстие) трубопровода высокого давления; 14 – присоединительное отверстие трубопровода высокого давления вспомогательной форсунки; 15 – нагнетательный клапан магистрали высокого давления вспомогательной форсунки.

Заключение

1. Рассмотрены типы ТНВД и их системы работы в зависимости от типов двигателей, представлены модельные ряды популярный дизелестроительных компаний.

2. Описаны конструктивные особенности исполнения ТНВД в зависимости от размеров ЦПГ двигателей.

3. Для повышения мощности двигателя увеличивают цикловую подачу топлива. Если серийный ТНВД не в состоянии повысить подачу топлива (например, с 200 до 500 мм³/цикл), то обычно увеличивают диаметр плунжера и его активный ход. Увеличение диаметра плунжера приводит к повышению его площади, увеличению силы от давления топлива и повышению контактных напряжений в паре кулачок-ролик толкателя плунжера. Для снижения контактных напряжений до допустимых значений увеличивают диаметр ролика и ширину кулачковой шайбы (увеличивают площадь контакта).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные подходы к конструированию поршневых двигателей: учебное пособие / Г.А. Конкс, В.А. Лашко. – М.: «МОРКНИГА», 2009. – 388 с.

2. История двигателестроения и введение в направление [Электронный ресурс]: практикум/ Ю.П. Макушев, А.Л. Иванов. Омск, СибАДИ, 2018. – 89 с. Режим доступа: <http://bek.sibadi.org/fulltext/esd596.pdf>.

3. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта: учебное пособие / Г.А. Конкс, В.А. Лашко. – М.: Машиностроение, 2005. – 512 с.

4. Судовые дизельные установки. Системы автоматического регулирования: учебное пособие / Г.А. Конкс, В.А. Лашко. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2011. – 462 с.

FEATURES DESIGN OF HIGH-PRESSURE FUEL PUMPS FOR MARINE DIESELS

Zakirov Sarvar Zafarovich, Department "Ship power plants and heat power engineering", postgraduate student

Volkova Larisa Yurievna, Department "Ship power plants and heat power engineering", kand. techn. sciences, associate Professor.

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",

Kaliningrad, Russia, e-mail: larisa.volkova@klgtu.ru; sarvar.zakirov@klgtu.ru

Modern diesel-building companies are considered. Frequency classification of diesel engines is presented. The principle of operation of the high pressure fuel pump is described. The injection pump adjustment is described depending on changes in the parameters of the diesel engine. To increase the engine power, the cyclic fuel supply is increased without changing the injection pump, the diameter of the plunger and its active stroke are increased.

УДК 621.565

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЯ С ТИСНЁНЫМИ РЁБРАМИ

Кошелев Сергей Валерьевич, канд. техн. наук, заведующий лабораторно-исследовательским центром холодильных систем

Сластихин Юрий Николаевич, канд. техн. наук, заведующий кафедрой холодильной, криогенной техники и кондиционирования

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: xktk@bga.gazinter.net

Описывается экспериментальная установка и испытуемый воздухоохладитель холодильной машины. Излагается проблема расчета коэффициента теплоотдачи и теплопередачи воздухоохладителя, имеющего тиснение на внешних алюминиевых ребрах и микрооробрение внутри медных труб. Приводятся экспериментальные и расчетные данные, полученные по результатам 20 экспериментов. Предлагается методика определения искомых величин расчетно-экспериментальным путем с применением разработанной программы.

При проектировании и производстве змеевиковых теплообменных аппаратов стремятся увеличить площадь теплопередающих поверхностей, как внутренней, так и внешней. Этого можно достичь различными способами. В настоящее время широкое применение получило внутреннее микро-оробрение медных труб теплообменного аппарата для увеличения внутренней теплопередающей поверхности и применение тисненых алюминиевых ребер насаженных на медные трубы для увеличения наружной поверхности теплоотдачи. Производители таких теплообменных аппаратов не предоставляют потребителю подробной конструкторской документации, а экспериментальное определение конструктивных размеров как внутреннего, так и наружного оробрения затруднительно из-за необходимости нарушения целостности аппарата, малого размера измеряемых

величин и их вариации от производителя к производителю. Так как для оценки эффективности работы воздухоохладителя и дальнейших тепловых расчетов необходимо определять коэффициент теплоотдачи (КТО) и теплопередачи (КТП), отнесенные как к внутренней теплопередающей поверхности, так и к наружной, было необходимо найти способ определять искомые величины по имеющимся неполным данным. Предварительно был сделан подробный анализ опубликованных работ по экспериментальному исследованию процессов кипения хладагента в плоских змеевиках. Большинство исследований направлено на определение коэффициента теплоотдачи, падения давления и распределения фаз кипящего потока в прямых трубах. Лишь немногие публикации содержат информацию по экспериментальному исследованию кипения хладагентов в плоских змеевиках [1,2,3,4].

Экспериментальная установка

В рамках работы Лабораторно-исследовательского центра холодильных систем Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота проводились испытания полупромышленной сплит-системы Mitsubishi Zubadan при различных тепло-влажностных условиях окружающей среды. Система состоит из двух блоков: в одном находится конденсатор хладагента, компрессор, вентилятор, электронный регулирующий клапан и плата управления, а во втором блоке находится испаритель хладагента (воздухоохладитель) и вентилятор. Для исследования интенсивности теплопередачи и падения давления при циркуляции хладагента в теплообменниках змеевикового типа исследуемый воздухоохладитель (ВО) холодильной машины был модифицирован для получения необходимых данных. Разработанная система измерений предусматривает оснащение теплообменников исследуемой холодильной установки преобразователями температуры и давления. Упрощенная схема системы измерений показана на рисунке 1.

На ней приведены буквенные обозначения основных составляющих элементов установки: КМ – компрессор, ВО - воздухоохладитель, КД - конденсатор, АПР – автоматический переключатель режимов, РТО – ресивер-теплообменник, электронные регулирующие клапаны под буквенными обозначениями «А» и «В». Также приведены обозначения основных датчиков: Т- температуры, Р- давления, F- расхода, S- скорости, М- влажности, D- плотности, L- уровня конденсата в мерной колбе. Буквой М в окружности обозначен электропривод. Одновременное измерение расхода F, плотности D и температуры T хладагента обеспечивает массовый расходомер Optimass 6400С.

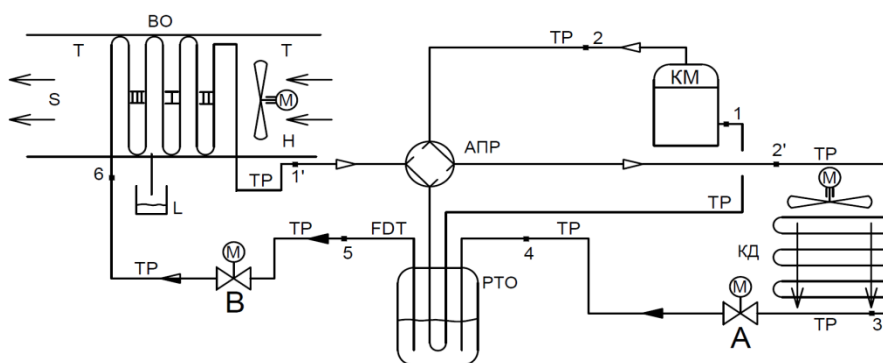


Рис. 1. Упрощенная схема системы измерения исследуемой установки

На ней приведены буквенные обозначения основных составляющих элементов установки: КМ – компрессор, ВО - воздухоохладитель, КД - конденсатор, АПР – автоматический переключатель режимов, РТО – ресивер-теплообменник, электронные регулирующие клапаны под буквенными обозначениями «А» и «В». Также приведены обозначения основных датчиков: Т- температуры, Р- давления, F- расхода, S- скорости, М- влажности, D- плотности, L- уровня конденсата в мерной колбе. Буквой М в окружности обозначен электропривод. Одновременное измерение расхода F, плотности D и температуры T хладагента обеспечивает массовый расходомер Optimass 6400С.

Исследуемый воздухоохладитель представляет собой трубчато-пластинчатый теплообменник, состоящий из 6 змеевиков. (Рис.2) На рисунке также изображены вход жидкости «Ж» в змеевик и выход парожидкостной смеси «ПЖ», расположение которых одинаково для каждого из змеевиков. Стрелкой обозначено направление воздуха. Каждый змеевик состоит из 8 труб с наружным диаметром $d_t = 7,45$ мм, внутренним диаметром $d_i = 6,65$ мм, и 7 калачей (колен). Исполнение змеевиков ВО несколько различается.

При одинаковой длине оребренной части восьми труб в зависимости от ориентации калачей, а также пространственного расположения мест входа и выхода хладагента получаются три разновидности змеевиков. Независимо от исполнения змеевика три калача располагаются горизонтально, а пять вертикально. В двух змеевиках по четырем вертикальным калачам хладагент опускается вниз и по одному поднимается вверх. В четырех змеевиках по трем калачам поток опускается и по двум калачам поднимается. Попарно змеевики этого типа отличаются расположением по высоте трубы, в которую входит парожидкостная смесь. Для двух из них вход хладагента предусмотрен в верхнюю трубу, а для других двух - во вторую трубу сверху. Из нижней трубы каждого змеевика хладагент попадает во всасывающий коллектор большого диаметра. Для повышения интенсивности теплоотдачи медные трубы теплообменника снабжены наружным алюминиевым оребрением с дополнительным фигурным тиснением на плоских ребрах толщиной $\delta_p = 0,15$ мм, а сами ребра имеют маленький шаг S_p равный 1,56 мм, это показано на рисунке 2.

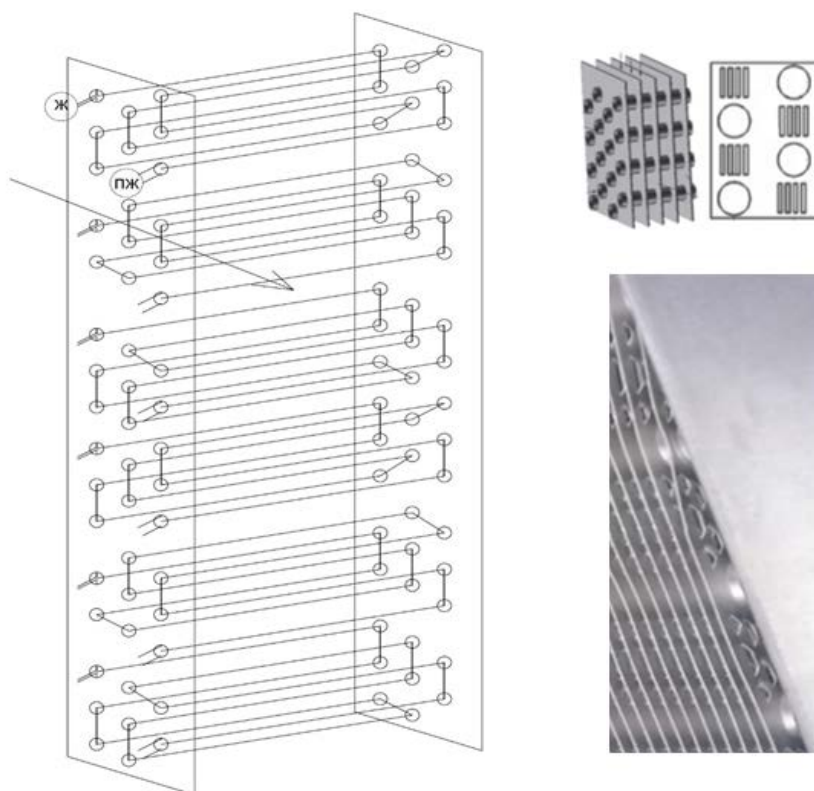


Рис. 2. Теплообменник воздухоохладителя и тисненные алюминиевые ребра

По экспериментально найденному КТП возможно определение КТО на стороне хладагента α_a , если известен КТО на наружной стороне труб. Такой подход нередко применяют некоторые специалисты, используя для обогрева труб однородную жидкость, протекающую в концентрическом пространстве между двумя трубами. Для определения КТО жидкости $\alpha_{ж}$ существуют проверенные формулы. Кроме того, коэффициент $\alpha_{ж}$ можно найти экспериментально. Применительно к испытаниям ВО с тиснеными ребрами не удалось найти и надежных методик расчета КТО со стороны воздуха α_b и коэффициента эффективности ребра E_p . Оказалось, что известные методики определения КТО воздуха и E_p не подходят для случая трубчато-пластинчатой по-

верхности, выполненной из пластин с фигурным тиснением, толщиной $\delta_p = 0,15$ мм и шагом $S_p < 2$ мм. Методики расчета ВО [5] пока что относятся к сплошным плоским ребрам, не имеющим просечек или тиснений.

Обработка результатов опытов

Для определения КТО и КТП необходимо знать холодопроизводительность Q_o , которая находилась двумя независимыми методами: по тепловому балансу на стороне хладагента Q_{oa} и на стороне охлаждаемого воздуха $Q_{ов}$:

$$Q_{oa} = G_a(i'' - i'); \quad (1)$$

$$Q_{ов} = G_b c_b \xi_{вл} (t_{в1} - t_{в2}), \quad (2)$$

где G_a и G_b - массовые расходы циркулирующего хладагента и воздуха соответственно; i'' - энтальпия насыщенного хладагента на выходе из ВО; i' - энтальпия жидкого хладагента на входе в ВО; c_b - удельная теплоемкость воздуха; $\xi_{вл}$ - коэффициент влаговываждения; $t_{в1}$ и $t_{в2}$ - температура воздуха до и после ВО. Расход G_a измеряется с помощью массового расходомера OPTIMASS 6400. Энтальпия i'' находилась в зависимости от давления P_{02} , определяемого по датчику ПД100, который находится на выходе из ВО. Для определения энтальпии i' использовано давление $P_{01} = P_{02} + \Delta P_0$, найденное по показаниям датчиков ПД100 и ПД200. Такой подход оказывается точнее, т.к. совместная погрешность ПД100 и ПД200 меньше суммарной погрешности двух датчиков ПД100.

Расход G_b определяется по средней скорости воздуха w_g с использованием формулы:

$$G_b = w_b \rho_b S_b, \quad (3)$$

где ρ_b - плотность воздуха, зависящая от его температуры t_g ; S_b - площадь сечения потока.

Ввиду отсутствия приборов для точного измерения влажности воздуха, близкой к 100%, коэффициент влаговываждения удобно выражать через расход выпадающей из воздуха влаги:

$$\xi_{вл} = \frac{Q_{п}}{Q_{я}} = 1 + [149,165 \cdot \Delta w / V_b \rho_b (t_{в1} - t_{в2})], \quad (4)$$

где Δw , г/мин - расход отводимого конденсата; V_b , м³/ч - объемный расход воздуха; плотность влажного воздуха ρ_b зависит от средней его температуры.

По $Q_o = (Q_{oa} + Q_{ов})/2$, определяется коэффициент теплопередачи, отнесенный к наружной поверхности теплообмена с плоскими ребрами:

$$k_H = Q_o / \theta_T = 1 / [1 / (\alpha_b E_H \xi_{вл}) + \beta \cdot \delta_3 / \lambda_3 + \beta / \alpha_a], \quad (5)$$

где α_b, α_a - КТО на стороне воздуха и хладагента; E_H - коэффициент эффективности наружной поверхности; $\beta = F_H / F_{вн}$ - степень наружного оребрения; δ_3 и λ_3 - толщина и теплопроводность заграждения.

Средний логарифмический температурный напор θ_T находится как:

$$\theta_T = ((t_{в1} - t_{a1}) - (t_{в2} - t_{a2})) / \ln((t_{в1} - t_{a1}) / (t_{в2} - t_{a2})), \quad (6)$$

где t_{a1} и t_{a2} температуры хладагента на входе и выходе ВО.

Полученные по ряду опытов искомые значения холодопроизводительности Q_o и коэффициента теплопередачи K_H , отнесенного к наружной поверхности теплообменника, приводятся в таблице 1. Там же указаны и параметры, характеризующие условия теплопередачи. К ним относятся: температура воздуха $t_{в1}$ и относительная влажность φ_1 воздуха на входе и $t_{в2}$ на выходе из ВО; температура хладагента t_{a1} и массовое паросодержание x_H на входе хладагента в испаритель и температура t_{a2} на выходе из него; массовый расход G_a хладагента перед электронным регули-

рующим вентиляем, расположенным в наружном блоке, массовый расход воздуха G_B и коэффициент влаговываждения ξ ; температурный напор θ_T , т. е. средняя логарифмическая разность температур. Замеры проводились при полной скорости вентилятора и заданной температуре воздуха в помещении $t_3 = 19^\circ\text{C}$. Разные тепловые нагрузки создавались за счет работы вспомогательной ХМ и изменения мощности электронагревателей. При составлении таблицы 1 использовалась средняя холодопроизводительность Q_0 , полученная по тепловым балансам на стороне хладагента Q_{0a} и на стороне воздуха Q_{0b} . Температурный напор θ_T определяется с учетом понижения температуры насыщения хладагента в змеевиках.

Таблица 1

Данные о тепловых характеристиках воздухоохладителя

№	Q_0 , Вт	t_{a1} , °C	t_{a2} , °C	t_{B1} , °C	t_{B2} , °C	φ_1 , %	θ_T , К	x_H	G_a , кг/ч	K_H , Вт/(м ² · К)	G_B , кг/ч	ξ
1	7195,9	7,4	5,9	25,1	12,1	28,5	10,98	0,1145	140,2	53,81	1914,3	1,00
2	10665,9	9,7	5,9	28,6	13,6	44,6	12,47	0,1246	221,3	70,22	1894,5	1,25
3	8335,8	11,5	9,6	25,6	15,0	45,8	9,07	0,1498	176,4	75,50	1930,2	1,39
4	9902,9	6,3	2,2	27,0	9,7	28,5	13,04	0,1249	200,8	62,36	1811,3	1,05
5	7339,2	9,1	7,5	27,4	14,1	28,5	11,51	0,1267	148,4	52,36	1874,7	1,00
6	7459,7	10,4	8,7	28,0	14,5	26	10,59	0,1292	152,7	57,82	1879,1	1,00
7	7469,1	10,5	8,8	28,2	14,7	26	10,74	0,1307	152,7	57,10	1882,4	1,00
8	7600,1	9,8	8,3	28,8	14,6	39,7	11,58	0,0995	150,8	53,90	1828,7	1,00
9	7490,0	9,4	7,9	27,0	14,1	37,2	10,91	0,1081	148,8	56,38	1932,9	1,02
10	7554,1	10,2	8,6	27,0	14,0	37,2	10,01	0,1043	153,3	61,99	1932,9	1,00
11	7120,3	11,6	9,7	24,7	14,1	49,6	7,97	0,1378	145,3	73,32	1901,3	1,23
12	10699,3	8,9	4,8	29,7	11,4	31	12,41	0,1162	212,7	70,79	1828,3	1,09
13	7804,9	10,7	8,9	29,2	14,7	33,5	10,93	0,1283	152,5	58,62	1924,3	1,00
14	7779,2	11,3	9,6	29,8	15,3	32,2	10,89	0,1300	155,8	58,65	1879,9	1,00
15	7916,4	11,9	10,0	29,8	15,4	34,4	10,47	0,1263	158,6	62,10	1925,8	1,00
16	8079,9	12,2	10,5	30,8	16,0	32,2	10,73	0,1288	160,9	61,80	1927,5	1,00
17	8016,4	10,8	9,2	28,4	14,1	18,6	9,92	0,0903	154,8	66,38	1937,8	1,00
18	7884,6	10,4	8,9	28,4	14,2	18,5	10,43	0,1134	154,2	62,09	1940,0	1,00
19	7878,0	11,1	9,3	29,2	14,7	18,5	10,54	0,1121	156,4	61,38	1881,5	1,00
20	8101,2	11,3	9,7	29,9	15,2	18,5	10,77	0,1135	158,4	61,74	1943,0	1,00

Заметим, что значение коэффициента K_H , найденное по опытными данным, объединяет средние КТО на стороне хладагента α_a и на стороне воздуха α_b по формуле (5).

Опыты по определению гидравлического сопротивления движению воздуха ВО проводились в режиме вентиляции при номинальной (полной) частоте вращения трехскоростного вентилятора. Несмотря на наличие некоторого пространства между вентилятором с горизонтальным ротором и ребристым теплообменником, статическое давление на его входе несколько зависит от положения точки отбора. Средняя разность статических давлений воздуха до и после трехрядного

теплообменника при температуре $t_b = 18^\circ\text{C}$ по данным многократных измерений составила $\Delta P_B = 22$ Па. Такое значение получено при скорости воздуха в лобовом (фронтальном) сечении $W_d = 1,56$ м/с и в живом (наименьшем) сечении $w_{ж} = 2,72$ м/с.

Анализ опытных данных

В процессе проведения испытаний, было установлено, что медные трубы, применяемые при изготовлении воздухоохладителя, имеют внутреннее микро-оребрение. На интенсивность теплоотдачи двухфазного потока в горизонтальных трубах влияют характеристики смачивания стенок труб, обмен моментами между жидкой и паровой фазами, силы поверхностного натяжения и гравитации из-за разности плотностей фаз. Исследования показывают, что спиральное микро-оребрение не только увеличивает площадь контакта жидкости с металлической поверхностью, но и способствует наступлению кольцевого режима потока при более низких значениях массовой скорости w_p . Наличие внутренних ребер малой высоты создает местные флуктуации кольцевой пленки жидкости, что также повышает интенсивность теплоотдачи.

К настоящему времени предложен ряд обобщенных методик расчета локальных КТО при кипении хладагентов в микро-оребрённых трубах (МОТ). Каждая из них опирается на сравнительно небольшой объем экспериментальных данных. Практический интерес представляют методики, по которым результаты расчета наиболее точно совпадают с экспериментальными данными в широком диапазоне условий кипения разных хладагентов. Поэтому выбор методик осуществлялся на основе сопоставления расчетных данных с экспериментальными. Для расчетов предварительно были выбраны девять методик [6,7,8,9,10,11,12,13,14], по ним составлена компьютерная программа расчета локальных α_d и средних α_c КТО при фиксированных условиях кипения выбранного хладагента [15]. Одновременно выполнялся расчет градиентов давления в МОТ по четырем методикам, а также расчет КТО в гладких трубах с внутренним диаметром d_t , равным эквивалентному диаметру d_e соответствующему МОТ. Длина труб каждого змеевика составляет 6,84 м, эквивалентный их диаметр $d_e = 6,834$ мм. После проведенного анализа и сопоставления данных, полученных расчетным путем по девяти методикам с экспериментальными данными других исследователей, было решено дальнейшие расчеты КТО при кипении хладагентов в МОТ производить по двум методикам [13,14]. Они используются для приближенного определения КТО на стороне воздуха и оценки эффективности внутреннего оребрения труб испытываемого ВО.

Формула (5) устанавливает связь между коэффициентом теплопередачи K_H и коэффициентами теплоотдачи α_a и α_b . В случае обогрева трубы, в которой кипит хладагент, за счет циркуляции однородной жидкости в концентрическом пространстве между двумя трубами похожую формулу используют для определения коэффициента α_a по данным о КТП и КТО жидкости $\alpha_{ж}$ [16]. При отсутствии внешнего оребрения трубы, формула (5) несколько упрощается, а для расчета КТО существуют проверенные формулы. Кроме того, возможна постановка несложного эксперимента по определению КТО циркулирующей жидкости $\alpha_{ж}$.

Наличие внешнего оребрения труб ВО в виде насаженных тонких пластин с тиснением нечеткой формы, расположенных с шагом 1,56 мм, препятствует определению КТО на стороне воздуха α_b . Постановка эксперимента оказывается затруднительной из-за большой площади фронтального сечения ВО, малой его длины по ходу воздуха и трудностей измерения температуры наружной поверхности. В многочисленных источниках подходящей методики для расчета КТО α_b для ВО с таким типом оребрения найти не удалось. В связи с трудностью определения площади фигурных ребер F_p в дальнейших расчетах наружной площади теплопередающей поверхности было решено принимать, что ребра плоские. Чтобы по экспериментально полученным значениям КТП K_H и расчетным КТО α_a , найти КТО α_b , преобразуем формулу (5) к виду:

$$\alpha_b = \frac{1}{E_H \xi} \cdot \left(\frac{1}{K_H} + \frac{\beta}{\alpha_a} - \frac{\beta \cdot \delta_3}{\lambda_3} \right)^{-1} \quad (7)$$

Степень оребрения испытываемого ВО $\beta = 8,6194$. Отношение δ_3/λ_3 представляет собой термическое сопротивление стенок труб с учетом загрязнений. Ввиду его малого значения, принимаем $\delta_3/\lambda_3 = 1,036 \cdot 10^{-6}$ (м² · К)/Вт. Коэффициенты влаговываждения $\xi_{вл}$ в каждом опыте определяют

ся по количеству выпадающего из воздуха конденсата. Если использовать осредненный по методикам [13] и [14] КТО α_B , то неизвестной величиной в формуле (7) остается лишь коэффициент эффективности наружной поверхности E_H . Подробному анализу методик его определения посвящена статья [17]. Среди прочего в ней обсуждается порядок определения коэффициента для ВО с тисненными и просечными (жалюзийными) пластинами. Особенность заключается в том, что коэффициент E_H зависит от значения КТО α_B . Поэтому использование формулы (7) предполагает несколько последовательных приближений.

В программу обработки результатов измерения [15] для каждого объекта включена подпрограмма расчета КТО α_B по найденным значениям КТП K_H и КТО α_A . Предварительно можно задать $E_H = 0,9$, а затем заменять его на полученное в результате первого шага расчетное значение $E_{Hр}$. Такую процедуру приходится повторить несколько раз до тех пор, пока после очередной замены расчетное значение $E_{Hр}$ не совпадет с вводимым хотя бы до четвертого знака. Полученные по условиям 20 установившихся режимов значения КТО воздуха α_B приведены в таблице 2. В ней также указаны: холодопроизводительность Q_0 , КТО со стороны хладагента α_A в микрооробренных трубах, коэффициент эффективности наружной поверхности E_H , КТО со стороны хладагента в гладких трубах $\alpha_{гл}$ и коэффициент интенсификации теплоотдачи EF . Нумерация столбцов в данной таблице совпадает с нумерацией строк таблицы 1, где приведены экспериментальные данные, задействованные в расчете.

Таблица 2

Расчетные значения относительных величин

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q_0 , Вт	7195,9	10665,9	8335,8	9902,9	7339,2	7459,7	7469,1	7600,1	7490	7554,1
α_A , Вт/(м ² К)	4640,1	6310,1	5366,2	6026,9	4760	4822,7	4834,9	4737,8	4731,1	4738,4
α_B , Вт/(м ² К)	66,23	70,59	71,03	73,13	63,93	71,87	70,76	66,2	68,35	78,4
E_H	0,9021	0,883	0,8737	0,8943	0,9053	0,8966	0,8977	0,9032	0,8997	0,8917
$\alpha_{гл}$, Вт/(м ² К)	2679,8	3869,04	3293,5	3696,3	2757,9	2804,78	2811,94	2770,47	2757,56	2770,12
EF	1,993	1,877	1,875	1,876	1,986	1,979	1,979	1,968	1,974	1,968
№	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Q_0 , Вт	7120,3	10699,3	7804,9	7779,2	7916,4	8079,9	8016,4	7884,6	7878	8101,2
α_A , Вт/(м ² К)	4693,5	6276,2	4985,4	4978,2	5021,3	5111,6	4883,5	4942,4	4930	5041,7
α_B , Вт/(м ² К)	78,55	81,4	72,77	72,82	77,96	77,33	84,95	78,11	77,04	77,38
E_H	0,8751	0,8821	0,897	0,8969	0,8921	0,8927	0,8857	0,892	0,893	0,8927
$\alpha_{гл}$, Вт/(м ² К)	2725,13	3857,11	2908,91	2907,47	2940,58	3161,94	2874,28	2893,04	2889,29	2960,6
EF	1,982	1,872	1,972	1,97	1,965	1,86	1,955	1,966	1,964	1,96

Как видно из таблицы 2, расчет коэффициента теплоотдачи, отнесенного к внутренней поверхности медных труб проводился как для труб, имеющих внутреннее спиральное микрооробрение (α_A), так и для технически гладких труб ($\alpha_{гл}$) с применением эквивалентного диаметра d_e , что само по себе является непростой задачей и в данной статье не рассматривается. Это позволило определить по формуле $EF = \frac{\alpha_A}{\alpha_{гл}}$ коэффициент интенсификации теплоотдачи, которым характеризуется эффективность микрооробренных труб по сравнению с гладкими [18].

Заключение

По результатам двадцати проведенных испытаний холодильной машины определены коэффициенты теплопередачи хладагента на основании экспериментальных данных. Показана методика определения недостающих величин при нахождении коэффициента теплоотдачи и теплопередачи как со стороны хладагента, так и со стороны воздуха с использованием разработанной программы, получены численные данные об искомых величинах. Оценена эффективность микро-оребрённых труб змеевикового теплообменного аппарата по сравнению с технически гладкими трубами, она показала повышение коэффициента теплоотдачи на 86-97% при использовании труб, имеющих спиральное микро-оребрение. Однако, если учесть повышенные потери давления из-за увеличения гидравлического сопротивления при использовании микро-оребрённых труб, то общее повышение эффективности составит около 20%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутепов, А. М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании / А. М. Кутепов, Л. С. Стерман, Н. Г. Стюшин. – М.: Высшая школа, 1986. – 448 с.
2. Внуков, А. К. Экспериментальные работы на парогенераторах (организация, анализ и планирование.) / А. К. Внуков. – М.: Энергия, 1971. – 296 с.
3. Осипова, В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена Изд. 2-е, переработ. дополн / В. А. Осипова – М.: Энергия, 1969. – 392 с.
4. Стырикович, М. А. Методы экспериментального изучения процессов генерации пара. Учебн. пособие для студентов высш. учебн. заведений. Изд. 2-е, перераб. и доп./ М. А. Стырикович, И. М. Резников. – М.: Энергия, 1977. – 280 с.
5. Емельянов, А. Л. Методика расчета теплообмена при движении воздуха в поверхностных воздухоохладителях / А. Л. Емельянов, А. И. Кожевникова // Вестник Международной академии холода. –2014. – №1. – С. 39–42.
6. Koyama, S. Forced convective flow boiling heat transfer of pure refrigerants inside a horizontal microfin tube / S. Koyama, J. Yu, S. Momoki, T. Fujii, T. H. Honda // Proceedings of Convective Flow Boiling International Conference. –1995. – P. 137–142.
7. Thome, J. R. The Heat Transfer Engineering Data book III / J. C. Chen // PP Publico. –2016. – 628 p.
8. Goto, N. Condensation and evaporation heat transfer of R-410A inside internally grooved horizontal tubes / N. Goto, N. Inoue, N. Ishiwatari // International Journal Refrigeration. –2001. – Vol. 24, No 7. – P. 628–638.
9. Yun, R. A generalized correlation for evaporation heat transfer of refrigerants in micro-fin tubes / R. Yun, Y. Kim, K. Seo, H.Y. Kim // International Journal of Heat and Mass Transfer. –2002. – Vol. 45. – P. 2003–2010.
10. Yu, M. Heat transfer and flow pattern during two-phase flow boiling of R-134a in horizontal smooth and microfin tubes / M. Yu, T. Lin, C. Tseng // International Journal Refrigeration. –2002. – Vol. 25. – P. 789–798.
11. Cavallini, A. Flow boiling inside microfin tubes: prediction of the heat transfer coefficient / A. Cavallini, D. Del Col, L. Rossetto, // Proceedings of 6-th International Conference on Boiling Heat Transfer. –2006. – P. 215–222.
12. Chamra, L. M. Modelling of evaporation heat transfer of pure refrigerants and refrigerant mixtures in microfin tubes / L. M. Chamra, P. J. Mago // Proceedings of IMechE. –2007. – Vol. 221, No. 4. – P. 443–447.
13. Hu, H. Heat transfer characteristics of R410A–oil mixture flow boiling inside a 7mm straight microfin tube / H. Hu, G. Ding, K. Wang // International journal of refrigeration. Elsevier Ltd and IIR. – 2008. – Vol. 31. – P. 1081–1093.
14. Wu, Z. Convective vaporization in micro-fin tubes of different geometries / Z. Wu, Y. Wu, B. Sunden, W. Li // Experimental Thermal and Fluid Science. –2013. – Vol. 44. – P. 398–408.

15. Ейдеюс А.И., Кошелев С.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015663262. «Общая программа расчета коэффициента теплоотдачи и падения давления при кипении десяти хладагентов в плоских змеевиках с разным числом труб». Правообладатель КГТУ. Заявка №2015617969 от 31.08.2015. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 14.12.2015 г.

16. Kim, M. H. Evaporating heat transfer of R22 and R404A in 9,52 mm smooth and microfine tubes / M. H. Kim, J. S. Shin, B. H. Lim // International Refrigeration and Air Conditioning Conference, –2002. – 565 p.

17. Ейдеюс, А.И. Особенности определения эффективности трубчато-пластинчатых поверхностей теплообмена / А. И. Ейдеюс, С. В. Кошелев, Ю. Н. Сластихин // Известия КГТУ. –2018. – №48. – С. 90–99.

18. Filho, E. P. Bandarra. Convective boiling performance of refrigerant R-134a in herringbone and micro-fin copper tubes / Bandarra, E. P. Filho, J. M. Sáiz-Jabardo // Elsevier Ltd and IIR. –2005. – P. 81–91.

CALCULATED - EXPERIMENTAL DETERMINATION OF HEAT TRANSFER AND HEAT CONDUCTIVITY COEFFICIENTS OF AIR COOLER WITH EMBOSSED FINS

Koshelev Sergey Valerjevich, Head of LRCRS
Slastikhin Yury Nikolaevich, Ph.D., Head of Department

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: xtkk@bga.gazinter.net

The authors describe the experimental setup and the tested air cooler of the refrigerating machine. The problem of calculating the heat transfer coefficient and heat conductivity coefficient of an air cooler with embossing on external aluminum fins and micro-fins inside copper pipes is presented. Experimental and calculated data obtained from the results of 20 experiments are presented. A method for determining the required values by calculation and experiment using the developed program is proposed.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ ФУТЕРОВКИ ВТУ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Никифоров Александр Степанович, профессор, д-р техн. наук
Приходько Евгений Валентинович, профессор, канд. техн. наук
Кинжибекова Акмарал Кабиденовна, ассоциированный профессор, канд. техн. наук,
Карманов Амангельды Ерболович, доктор PhD

Торайгыров университет, г. Павлодар, Казахстан, e-mail: aleke4599@mail.ru

В статье приведены результаты исследований процесса охлаждения футеровки печей спекания. Производится анализ состояния футеровки при выводе печи в ремонт. Показана методика и результаты расчёта распределения температур и термических напряжений по сечению футеровки в процессе охлаждения. Показано, что возникающие напряжения превышают допустимый уровень. Разработаны графики охлаждения, которые позволяют сократить время охлаждения агрегата более чем на 2 часа.

Введение

При периодической работе высокотемпературных установок (ВТУ) имеются технологические периоды времени, в течение которых необходимо охладить футеровку из состояния с температурой, равной температуре рабочего тела (на выпуске) до температуры, при которой возможно проведение ремонтных работ (согласно правилам промышленной безопасности – при 40 °С). Эти периоды времени связаны, как правило, с проведением частичных ремонтов – замены части износившейся футеровки.

Практика эксплуатации печей спекания показывает, что основной зоной термического разрушения футеровки при охлаждении является зона кальцинации, перед гарнисажем. Вид разрушений – скалывание кирпича плитками толщиной 1 – 2 см, полями в несколько квадратных метров (рисунок 1). Указанная форма разрушений – результат термических ударов при нестационарных режимах (разогреве и охлаждении).



Рис. 1. Состояние футеровки зоны кальцинации

Необходимо учесть, что снижение температуры кладки при охлаждении идет от горячего конца к холодному, в силу чего в глубине печи воздух всегда горячий, в то время как в зоне охлаждения и кальцинации – воздух холодный и вызывает жесткий термический удар на футеровке. Поэтому охлаждение обычно производят следующим образом – в начале охлаждения тягу на дымососах делают минимальную, вплоть до остановки одного дымососа. При падении температуры кладки до 600 °С и ниже, когда опасность растрескивания кирпича снимается, темп охлаждения увеличивают до рабочих нагрузок на дымососы.

Согласно правилам эксплуатации, градиент температур по высоте кирпича ориентировочно составляет 50 °С / см и поэтому, если предварительно перед интенсивным охлаждением мягко подостудить рабочую поверхность футеровки до температуры 600 – 700 °С, то это гарантирует выравнивание температуры до безопасного градиента по высоте на 3 – 4 см и разрушения практически не будет.

При среднем состоянии печи время подстуживания кладки составляет 3 – 4 часа, однако это время значительно может изменяться на печи со значительным слоем гарнисажа, остановке аварийной без разгрузки и т.д., поэтому назначение режима охлаждения определяется опытом агломератчика и его добросовестностью, т.е. человеческим фактором.

При всех режимах и условиях полного охлаждения печь должна непрерывно вращаться – крепкий спек, плав – обязательно, нормальный спек – как правило, должны выкручиваться на главных приводах с прижатием тяги перед переводом на вращение печи от вспомогательного привода. Вращение печи на вспомогательном приводе должно идти до конца охлаждения.

Среднее время охлаждения печи – 12 часов.

Абсолютное сжатие шва кладки при нагретом состоянии печи может достигать 0,5 мм на каждый шов. Поэтому, если кладку охлаждать очень быстро, не дожидаясь охлаждения корпуса и его сжатия, то можно за одно охлаждение расшатать всю кладку – темп охлаждения печи кроме первого этапа – подстуживания, надо соотносить с охлаждением корпуса, учитывая, что зимой и на ветру темп охлаждения может быть назначен выше, летом – должен быть назначен ниже.

Особенно мягко надлежит охлаждать печи с малым гарнисажем и малым остатком материала в печи, так как при равной тяге и других внешних условиях охлаждения в этом случае теплосъем от футеровки, а значит и напряжения в кладке – максимальные.

Охлаждение печи тягой до предельно низких температур проводить не следует – останавливать охлаждение печи и её вращение надлежит при теплой футеровке.

Методология

Первым этапом разработки графиков охлаждения печи спекания является определение температурных полей футеровки при существующем процессе охлаждения.

В общем случае тепловое состояние рабочего слоя футеровки высокотемпературного агрегата математически описывается следующим уравнением:

$$\frac{dT}{d\tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho \cdot c}, \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

q_v – мощность внутренних источников тепла, Вт/м³;

ρ – плотность вещества, кг/м³;

c – теплоёмкость вещества, Дж/(кг·К).

Для решения задачи внутреннего теплообмена в рабочем слое футеровки примем некоторые допущения. В случае остывания печи спекания будем считать размеры в направлении осей x и z неограниченными, а толщину в направлении оси y конечной; поверхность стены (с учётом диаметра, равного 5 метрам) будем считать плоской. Температура изменяется только по толщине, внутренних источников тепла нет. С учётом того, что $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$, математическая формулировка одномерной задачи теплопроводности будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad 0 < y < H \quad (2)$$

С учётом известных температур на внутренней поверхности футеровки, определяемых интенсивностью работы дымососа, имеем граничные условия 1 рода:

$$T_{y=0} = T_i. \quad (3)$$

На внешней поверхности футеровки граничные условия 3 рода:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y_{y=H}} = \alpha(T_0 - T_{y=H}). \quad (4)$$

Начальные условия будут представлены заданным начальным распределением температур в футеровке. Зная начальную температуру на внутренней поверхности и учитывая стационарный характер распределения теплоты при эксплуатации в печи, имеем:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0, \quad 0 \leq y \leq H. \quad (5)$$

Разобьём всю толщину футеровки H на n конечных элементарных слоёв (шаг по координате), толщина каждого из которых равна Δy , то есть:

$$H = n \cdot \Delta y. \quad (6)$$

Отсчёт времени ведётся с конечными интервалами $\Delta \tau$ (шаг по времени). Примем шаг по времени, равный 600 с., а шаг по координате 50 мм (при толщине слоя 200 мм.).

Введём также ещё одно допущение – примем температуру внутренней поверхности футеровки равной температуре охлаждающей среды, то есть отнесём данную задачу к классу задач по охлаждению тел, обладающих значительным внутренним термическим сопротивлением. Зная начальное распределение температуры в стенке, можно рассчитать распределение температуры в любой момент времени по формуле [1]:

$$\frac{t-t_1}{t_i-t_1} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cdot e^{-(n\pi/2)^2 \cdot \Delta \tau} \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{H}\right) \cdot y,$$

где $n = 1, 3, 5, \dots$;

t – температура поверхности в момент времени τ , °С;

t_i – температура поверхности в начальный момент времени, °С;

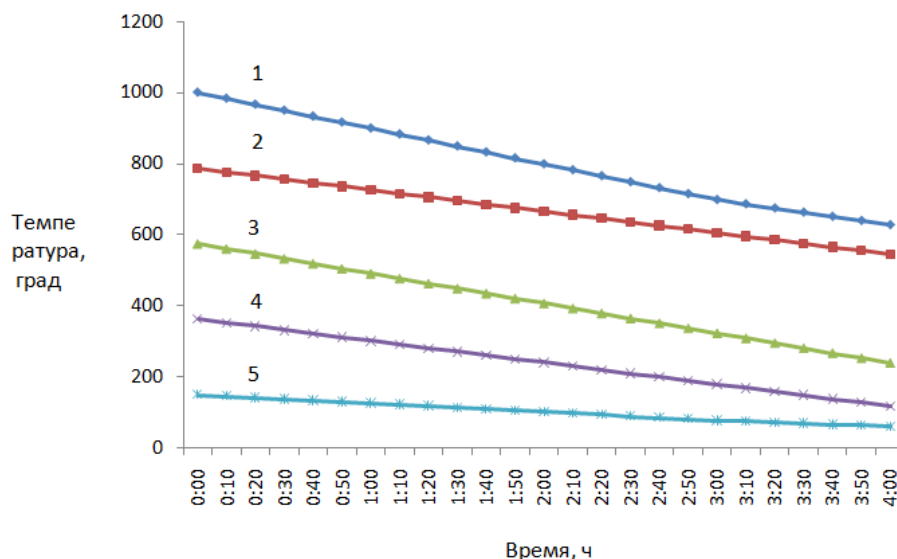
t_1 – температура окружающей среды, °С.

Результаты

Для расчёта возникающих температурных напряжений в футеровке зададимся следующими исходными данными: первоначальная температура поверхности – 1000 °С; «подстуживание» осуществляется в течение 4 часов до температуры 600 °С, то есть со средней скоростью 100 °С/ч. и в дальнейшем процесс охлаждения ведётся со скоростью 73 °С/ч.

Футеровка изготовлена из шамотных кирпичей марки ШЦУ, имеющих предел прочности на сжатие 25 МПа; предел прочности на растяжение 5 МПа [2].

С учётом начальной температуры на внутренней поверхности футеровки и скорости её снижения, произведём расчёт температур по сечению с шагом 10 минут по формуле (7). На рисунке 2 показана динамика изменения температур футеровки печи спекания в разных точках по толщине в процессе охлаждения.

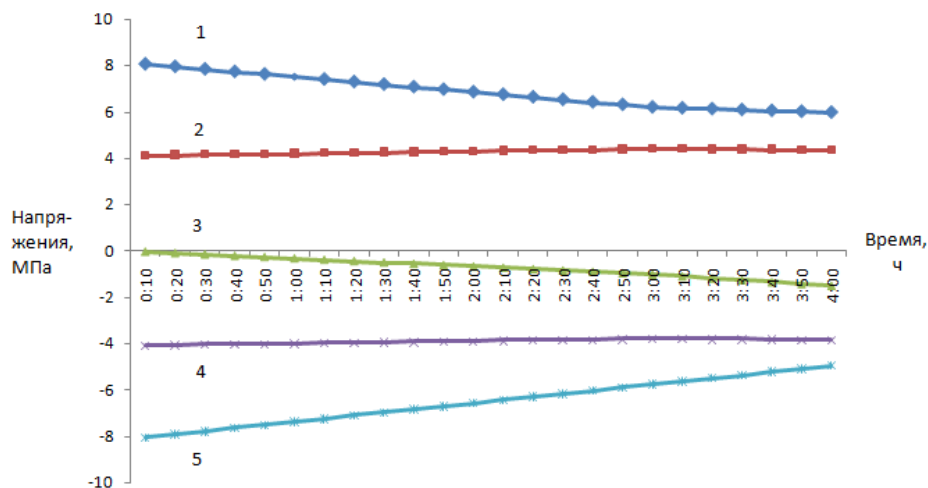


1 – на внутренней поверхности футеровки; 2 – на $\frac{1}{4}$ толщины футеровки (от внутренней поверхности); 3 – на $\frac{1}{2}$ толщины футеровки (от внутренней поверхности); 4 – на $\frac{3}{4}$ толщины футеровки (от внутренней поверхности); 5 – на внешней поверхности футеровки

Рис. 2. Динамика изменения температур футеровки печи спекания в разных точках по толщине в процессе охлаждения

Имея данные по распределению температур в футеровке произведём расчёт температурных напряжений, согласно методике, описанной в [3].

На рисунке 3 показаны графики значений возникающих температурных напряжений в печи спекания в разных точках по толщине в процессе охлаждения.



1 – на внутренней поверхности футеровки; 2 – на $\frac{1}{4}$ толщины футеровки (от внутренней поверхности); 3 – на $\frac{1}{2}$ толщины футеровки (от внутренней поверхности); 4 – на $\frac{3}{4}$ толщины футеровки (от внутренней поверхности); 5 – на внешней поверхности футеровки

Рис. 3. Значения возникающих температурных напряжений в футеровке печи спекания в разных точках по толщине в процессе охлаждения

Анализ полученных данных показывает, что начальный этап процесса охлаждения сопровождается превышением напряжений растяжения. Максимальные значения напряжений растяжения возникают на внешней поверхности слоя футеровки.

При допустимом уровне (пределе прочности на растяжение) равном 5 МПа максимальное напряжение растяжения составляет 8,038 МПа в момент времени 0 ч 10 мин, что в 1,6 раза выше

допускаемого. По мере охлаждения значения напряжений падают и при достижении 4 часов охлаждения они принимают допустимые значения (4,95 МПа). В дальнейшем, на следующем этапе охлаждения (со скоростью 73 °С/ч), напряжения не превышают предела прочности материала.

Напряжения сжатия, при охлаждении по указанному графику, находятся в допустимых пределах. Максимальное возникающее напряжение сжатие в момент времени 0 ч 10 мин составляет 8,063 МПа, что составляет 32,25 % от предела прочности на сжатие используемых материалов. Это, в частности, можно объяснить и значительной разницей в пределе прочности шамота ШЦУ на сжатие и растяжение: 25 МПа и 5 МПа соответственно.

Таким образом, можно сделать вывод, что имеющаяся скорость охлаждения печей спекания в период «подстуживания» (100 °С/ч) не является рациональной с позиции возникающих температурных напряжений. Напряжения растяжения превышают допустимый предел на протяжении всего периода «подстуживания», при этом максимальное значение возникающих напряжений превышает в 1,6 раза предел прочности на растяжение.

Дальнейшие расчёты показывают, что для снижения возникающих температурных напряжений до нормируемого уровня необходимо снизить скорость охлаждения до 60 °С/ч в течение первых 4 часов. Дальнейшее охлаждение можно вести со скоростью 100 °С/ч. Первоначально, согласно заводскому графику, процесс охлаждения печи с температуры 1000 °С до 40 °С идёт: 4 часа со скоростью 100 °С/ч и 9 ч 20 мин со скоростью 60 °С/ч. При замене этого графика на новый: 4 часа со скоростью 60 °С/ч и 7 ч 17 мин со скоростью 100 °С/ч в результате получим, что общее время охлаждения сократится более чем на 2 часа (рисунок 4).

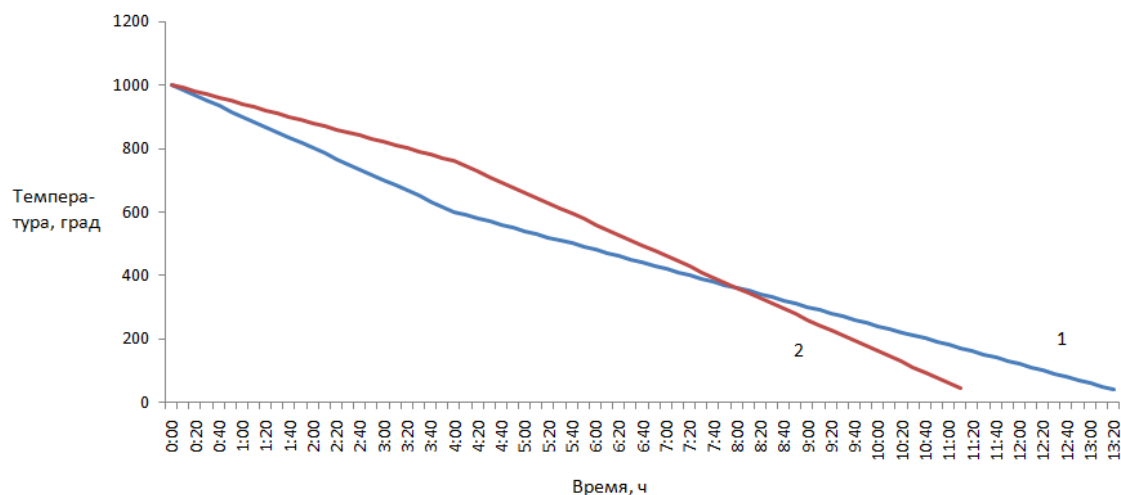


Рис. 4. Графики охлаждения печи спекания: 1 – действующий; 2 – предлагаемый

Выводы

Анализ службы футеровок показывает, что при быстром нагреве футеровки поверхностные слои кладки, обращенные в рабочее пространство, испытывают напряжения сжатия. При быстром охлаждении поверхностные слои находятся под воздействием растягивающих напряжений. При прочих равных условиях для огнеупорной футеровки более опасно быстрое охлаждение, чем быстрый нагрев, вследствие плохой сопротивляемости огнеупоров растяжению и хорошей – сжатию. В практике часто встречаются случаи разрушения футеровки в результате недостаточного предварительного разогрева кладки или отсутствия его [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Шнейдер П. Инженерные проблемы теплопроводности. М. Иностранная литература 1960. – 478 с.

2 Карманов А.Е., Приходько Е.В., Никифоров А.С. Исследование теплофизических параметров теплоизоляционных материалов. Наука. Технологии. Инновации // Сборник научных трудов в 10 ч. / под ред. доц. О.В. Боруш. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – Часть 4. С. 215-219.

3 Никифоров А. С., Приходько Е.В., Кинжибекова А. К., Карманов А. Е. Разработка программы расчёта температурных напряжений в футеровках высокотемпературных агрегатов. Вестник ПГУ, серия «Энергетическая», №2, 2018. С. 253-260

4 Словиковский В.В., Гуляева А. В. Влияние режимов разогрева футеровок тепловых агрегатов и продолжительности хранения огнеупоров на стойкость огнеупорной кладки. Новые огнеупоры №6, 2015, с. 9-13.

RESEARCH OF THE LINING COOLING PROCESS IN HIGH-TEMPERATURE UNITS (HTU) DURING THEIR DECOMMISSION

Nikiforov Aleksandr Stepanovich, prof., doctor of technical sciences

Prikhod'ko Evgenij Valentinovich, prof., Ph.D.

Kinzhibekova Akmaral Kabidenovna, associate prof., Ph.D.

Karmanov Amangeldy Erbolovich, Ph.D.

Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan, e-mail: aleke4599@mail.ru

The article reports on the results of the research of the lining cooling process in sintering furnaces. The analysis of the lining state is carried out when the furnace is taken out for repair. The work conveys the methodology and results of calculating the distribution of temperatures and thermal stresses over the lining cross section during cooling. It demonstrates that the arising stresses exceed the allowable level. Thus, cooling schedules have been developed to reduce the cooling time of the unit by more than 2 hours.

УДК 620.91/.98(470.26)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛОФИКАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ, УТИЛИЗИРУЮЩЕЙ ДРЕВЕСНЫЕ ОТХОДЫ

Селин Виктор Васильевич, канд. тех. наук, профессор

Юрков Сергей Валерьевич, доцент

Беркова Елена Анатольевна, старший преподаватель

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,

Калининград, Россия, e-mail: viktor.selin@klgtu.ru; sergej.yurkov@klgtu.ru; ele-

na.berkova@klgtu.ru

Исследуются возможности повышения эффективности работы теплофикационной установки, утилизирующей отработанные деревянные шпалы. Выполнено теоретическое обоснование ее реконструкции с надстройкой паровой турбины. Разработана принципиальная тепловая схема для предлагаемого варианта реконструкции. Определены параметры, расходы и направления потоков рабочих тел в агрегатах и узлах теплофикационной установки до и после реконструкции.

Заинтересованность руководства предприятий в повышении эффективности производства, снижении энергозатрат, увеличении конкурентоспособности выпускаемой продукции или предоставляемых услуг приводит к внедрению в производственный цикл разного рода инновационного оборудования. Кроме того, возросший интерес государства к экологическим проблемам [1], в частности, к утилизации отходов производства, заставляет искать пути избавления от этих отходов,

что также может быть реализовано при использовании последних разработок в этой сфере. Зачастую это пилотные проекты, которые требуют определенной доработки, усовершенствования, настройки под конкретные условия работы предприятия.

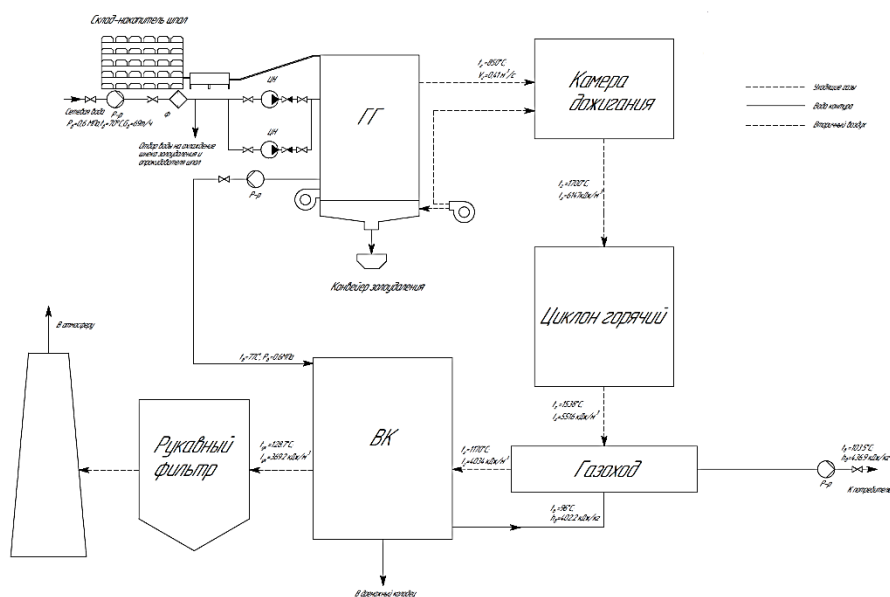
В настоящее время нами выполняется теоретическое исследование возможностей повышения эффективности действующей на объекте Калининградской железной дороги мобильной теплофикационной установки, вырабатывающей тепловую энергию для обеспечения собственных потребностей предприятия. Топливом для рассматриваемой установки являются отработанные деревянные шпалы [2], снятые при текущем содержании железнодорожных путей в Калининградской области. Площадка для хранения шпал оборудована на территории производственной базы ПМ-93 в пос. Луговое-Новое [3].

Следует отметить, что в нашей области нет специализированных предприятий, занимающихся утилизацией отработанных деревянных шпал, а их транспортировка для последующего обезвреживания в другие регионы Российской Федерации нецелесообразна с экономической точки зрения. В связи с этим руководством Калининградской железной дороги было принято решение осуществлять утилизацию шпал на месте [4]. Для этих целей была выбрана мобильная теплофикационная установка производства ООО «БАЛТКОТЛОМАШ» [5].

В состав мобильной теплофикационной установки (МТУ) входит следующее основное оборудование: газогенератор обращенного типа, камера дожигания, горячий циклон, водогрейный котел-утилизатор, охлаждаемый водой газоход, рукавный фильтр, дымовая труба.

В газогенераторе осуществляется газификация деревянных шпал с получением горючих газов, которые затем сжигают в вихревом потоке в адиабатической камере сгорания. После этого продукты сгорания очищаются от сажистых твердых частиц в горячем циклоне. Далее они отдают тепловую энергию в водоохлаждаемом газоходе и водогрейном котле-утилизаторе сетевой воде. Перед поступлением продуктов сгорания в атмосферу происходит их очистка от мелких взвешенных частиц в рукавном фильтре.

Теплофикационная установка включена в тепловую схему действующей котельной предприятия. Часть обратной сетевой воды из общей магистрали подается в водяные экраны газогенератора. Пройдя по его контуру, вода по соединительному трубопроводу попадает в блок водогрейного котла-утилизатора. После нагрева в котле вода переходит в охлаждаемый газоход и выйдя из него направляется к потребителям. Циркуляция теплоносителя обеспечивается сетевыми насосами. Тепловая мощность установки составляет 2 МВт. Температура воды на входе в установку должна поддерживаться не ниже 70 °С, на выходе – не более 115 °С. Принципиальная тепловая схема теплофикационной установки приведена на рисунке 1.



Условные обозначения: ВК – водогрейный котел; ЦН – циркуляционный насос; ГГ – газогенератор; Р-р – преобразователь расхода; Ф – магнитный фильтр

Рис. 1. Тепловая схема теплофикационной установки

Работа теплофикационной установки требует соблюдения определенных условий. Одно из них – постоянный, желательный номинальный, режим работы. Без достаточного теплосъема теплофикационная установка нормально функционировать не может, так как нарушается течение процесса газификации, и получаемый синтез-газ с нестабильными параметрами уже не сжигается в камере сгорания, а выбрасывается в атмосферу. По этой причине в летний период, когда отсутствует необходимая тепловая нагрузка, эксплуатация теплофикационной установки прекращается. Это является основным недостатком установки, который необходимо устранить, чтобы повысить эффективность ее работы.

Для решения этой проблемы нами была проанализирована работы теплофикационной установки, для чего были выполнены расчеты параметров, расходов и направлений потоков рабочих тел в ее агрегатах и узлах.

На начальном этапе был определен состав генераторного газа и объемные доли входящих в него компонентов (см. табл.), а также его плотность и теплота сгорания, которые для сухого генераторного газа равны $1,07 \text{ кг/м}^3$ и $5176,6 \text{ кДж/нм}^3$ соответственно [6]. Также на этом этапе были рассчитаны расходы древесного топлива и генераторного газа при номинальном режиме работы установки.

Далее при расчете процесса горения в камере дожигания [7,8] были определены полный объем дымовых газов, полезное тепловыделение, адиабатическая температура продуктов сгорания.

На следующем этапе проводился поверочный расчет основных элементов тепловой схемы установки. Здесь для каждого агрегата последовательно (по ходу движения газов) были установлены конечные температуры рабочих теплоносителей при имеющейся площади поверхности теплообмена. За основу был взят метод параллельных расчетов с совместным решением уравнений теплопередачи, материального и теплового балансов для каждого элемента схемы [9,10].

Таблица

Состав генераторного газа

CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	N ₂
12,8 %	17,4 %	1,5 %	22,6 %	45,7 %

Были выполнены расчеты циклонной камеры, газоохлаждаемого газохода, водогрейного утилизационного котла. Полученные в результате расчетов значения указаны на тепловой схеме (см. рис. 1). Температура сетевой воды на входе в водогрейный котел получилась равной $77 \text{ }^\circ\text{C}$; на выходе из газоохлаждаемого газохода – $103,5^\circ\text{C}$; температура уходящих газов на выходе из установки – $129 \text{ }^\circ\text{C}$.

Оптимальным решением вопроса по повышению эффективности работы теплофикационной установки является реализация схемы, позволяющей установке работать на номинальном режиме круглый год. Одним из таких вариантов является надстройка теплофикационной установки паровой турбиной, работающей в конденсационном режиме. Для этого потребуется провести реконструкцию теплофикационной установки с заменой водогрейного котла на утилизационный парогенератор. Это позволит обеспечить бесперебойный режим работы установки в течение всего года и продолжать утилизировать отработанные шпалы и в летний период. В случае подключения установки к системе теплоснабжения (в отопительный период) рекомендуется работа по двухконтурной схеме с использованием пароводяного теплообменника в режиме комбинированной выработки тепловой и электрической энергии.

Для предлагаемого варианта, чтобы оценить возможную паропроизводительность установки при полученных ранее значениях параметров продуктов сгорания и выбрать паровую турбину, был выполнен конструктивный тепловой расчёт парового котла-утилизатора. В качестве исходных данных для выполнения расчета были приняты следующие параметры перегретого пара: абсолютное давление $0,6 \text{ МПа}$, температура $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Для газов на входе в котел-утилизатор использовались полученные при поверочном расчете теплофикационной установки значения температуры и расхода продуктов сгорания после горячего циклона.

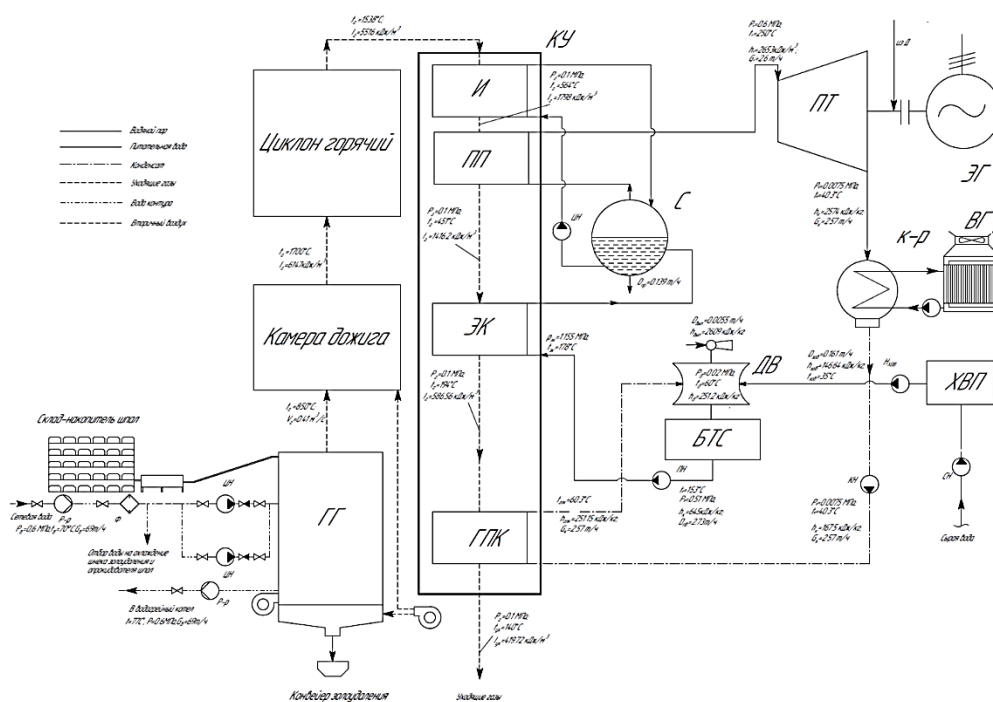
Задача конструктивного теплового расчета парогенератора заключалась в определении площади каждой поверхности нагрева и выборе такой их компоновки в газоходах, чтобы можно было обеспечивать номинальную паропроизводительность котла при наименьших значениях площадей этих поверхностей нагрева. Для этого был проведен сравнительный анализ двух вариантов компоновки парового котла-утилизатора. В первом варианте принималась следующая последовательность размещения поверхностей змеевиковых пакетов: пароперегреватель, испарительная поверхность, экономайзер, газовый подогреватель конденсата. Во втором варианте рассматривалась установка испарительной поверхности нагрева первой по ходу газов.

После последовательных расчетов теплопередачи от газов к воде, пару или пароводяной смеси от одной поверхности нагрева к другой по ходу движения газов была определена температура уходящих газов, которая составила 140 °С и паропроизводительность парогенератора. Она получилась равной 0,72 кг/с или 2600 кг/ч. По найденным значениям площадей поверхностей теплообмена был выбран более компактный вариант компоновки утилизационного парогенератора. Им оказался второй вариант с расположением испарительной поверхности нагрева первой по ходу газов.

Для полученной в результате расчетов производительности парового котла-утилизатора в качестве теплового двигателя паротурбинной части предложено использовать турбогенератор ТГУ 500К производства компании ОАО «Калужский турбинный завод» [11]. Значение мощности паровой турбины при этом составит 360 кВт.

Решение технических вопросов потребовало разработки тепловой схемы для рассматриваемого варианта реконструкции теплофикационной установки с детальным расчетом параметров рабочих тел в узловых точках. Предлагаемая принципиальная тепловая схема с полученными в результате расчетов значениями представлена на рисунке 2.

На основании расчетов тепловой схемы был выполнен выбор вспомогательного оборудования, а также его поверочные расчеты, подтверждающие эффективность работы установки в реальных условиях.



Условные обозначения: ГГ – газогенератор; КУ – паровой котел-утилизатор; И – испарительная поверхность; ПП – пароперегреватель; ЭК – экономайзер; ГПК – газовый подогреватель конденсата; С – сепаратор; ПТ – паровая турбина; ЭГ – электрогенератор; к-р – конденсатор; ВГ – вентиляционная градирня; ДВ – деаэратор вакуумный; БТС – бак подпиточной воды; ПН – питательный насос; КН – конденсатный насос; ЦН – циркуляционный насос; СН – насос исходной воды; ХВП – химводоподготовка; Р-р – преобразователь расхода; Ф – магнитный фильтр

Рис. 2. Тепловая схема теплофикационной установки после надстройки паротурбинной установкой

Оценка экономической эффективности проекта показала, что себестоимость электроэнергии составит 1,02 руб./кВт·ч при годовой выработке 2,7 млн. кВт·ч, простой срок окупаемости проекта – 9 лет.

Еще один вариант повышения эффективности работы теплофикационной установки – это совмещение ее с так называемым органическим циклом Ренкина (ОЦР) [12]. Рабочими телами, используемыми в таких циклах, могут быть имеющие низкую температуру кипения органические или синтетические вещества. А так как рабочее тело испаряется при относительно низкой температуре, то в качестве источника теплоты можно использовать низкопотенциальную тепловую энергию.

Исследования в этом направлении нами еще ведутся. После их завершения будет проведено сравнение полученных результатов по двум предлагаемым схемам и сделаны выводы о более рациональном варианте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад об экологической обстановке в Калининградской области в 2018 году // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://www.ecatk.ru/index.php> (дата обращения: 20.08.2020).

2. ГОСТ Р 58255-2018 Топливо твердое из старогодных деревянных шпал. Технические условия // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200161017> (дата обращения: 20.08.2020).

3. Селин В.В. Теоретические и прикладные аспекты распределенной энергетики Калининградской области на базе местных и возобновляемых топливно-энергетических ресурсов. Примеры разработки инновационных теплоэнергетических технологий и установок / В.В. Селин, С.В. Юрков, Е.А. Беркова // БАЛТИЙСКИЙ МОРСКОЙ ФОРУМ: материалы VI Международного Балтийского морского форума 3-6 сентября 2018 года [Электронный ресурс]: В 6 томах. Т. 2. «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», VI Международная научная конференция. – Электрон. дан. – Калининград: Изд-во БГАРФ ФГБОУ ВО «КГТУ», 2018. – С. 331-344.

4. Башканова, В. Шпалы горят чисто / В. Башанова // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://gudok.ru/content/infrastructure/1487227/> (дата обращения: 22.08.2020).

5. Утилизация железнодорожных шпал // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://www.bkm-spb.ru/prensa/utilizatsiya-zheleznodorozhnyh-shpal.html> (дата обращения: 29.08.2020).

6. Алешина, А.С. Газификация твердого топлива: учеб. пособие / А.С. Алешина, В.В. Сергеев. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 202 с.

7. Расчет процессов горения и взрыва: учебное пособие / В.А. Портола, Н.Ю. Луговцова, Е.С. Торосян; Юргинский технологический институт. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 108 с.

8. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – С-Пб., 1998. – 258 с.

9. Карякин, С.К. Котельные установки и парогенераторы. Тепловой расчет котлов: учебное пособие / С.К. Карякин; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 156 с.

10. Цветков, Ф.Ф. Тепломассообмен: учебник для вузов / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 562 с.

11. Паровые турбины малой и средней мощности производства КТЗ (Базовые) // Электрон. дан. Режим доступа URL: <http://oaoktz.ru/customers/steam-turbine/> (дата обращения: 02.09.2020).

12. Белов Г. В. Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике / Г.В. Белов, М.А. Дорохова // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2014. – № 2. – С. 99-124.

EXPLORING OPPORTUNITIES TO IMPROVE WORK EFFICIENCY OF HEAT POWER SYSTEM UTILIZING WOOD WASTE

Selin Viktor Vasilyevich, Ph.D., Professor
Yurkov Sergey Valeryevich, Associate Professor
Berkova Elena Anatolyevna, Senior Teacher

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university", Kaliningrad, Russia,
e-mail: viktor.selin@klgtu.ru; sergej.yurkov@klgtu.ru; elena.berkova@klgtu.ru

The opportunities to improve work efficiency of the heat power system utilizing waste wooden sleepers are explored. The theoretical substantiation of the heat power system reconstruction with adding a steam turbine is completed. Thermal circuit diagram for the proposed reconstruction is developed. Parameters, coolants flows and directions of flows of working fluids in the heat power system units and assemblies before and after reconstruction are determined.

УДК 629.124.72-843.6

РАЦИОНАЛЬНАЯ РЕГУЛИРОВКА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Толмачёв Александр Викторович, канд. техн наук, доцент кафедры
судовых энергетических установок и теплоэнергетики

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: avtol03071952@mail.ru

Регулировка рабочего процесса в цилиндрах дизельного двигателя выполняется для предотвращения механических и термических перегрузок, а также повышения эксплуатационной экономичности. В работе представлены теоретические исследования получения эмпирических зависимостей регулируемых параметров рабочего процесса судовых дизелей от регулировочных параметров. Регулировка дизельного двигателя представляет собой длительный и затратный процесс, описываемый в технической литературе лишь словесными указаниями. Это вызывает значительные технические трудности. Большей частью регулировка выполняется методом проб и ошибок. Это связано с комплексным влиянием отдельных регулировочных параметров на регулируемые параметры рабочего процесса. На основе представления регулируемых параметров (давления сжатия, давления сгорания, температуры выпускных газов) в виде линейных зависимостей от регулировочных параметров (высота камеры сжатия, угол опережения подачи топлива, положение рейки топливного насоса высокого давления) составляется система уравнений, содержащая неизвестные эмпирические коэффициенты. Решение переопределенной системы уравнений выполняется с помощью матричного исчисления методом наименьших квадратов. В результате решения получены эмпирические коэффициенты, позволяющие установить количественные изменения регулировочных параметров, позволяющие с наименьшими временными затратами выполнить качественное регулирование рабочих процессов во всех цилиндрах. В работе приведен пример выполнения регулировки по описанной методике.

Введение

Качественно отрегулированный дизельный двигатель должен обладать идентичностью параметров во всех цилиндрах, при этом во время эксплуатации не допускаются перегрузки по механической и термической напряженности. При достижении такого состояния регулировки экономичность дизельного двигателя будет наивысшей. К этому стремятся все механики в процессе эксплуатации, однако объективные причины не позволяют достичь идеальной регулировки. В первую очередь

неидентичность процессов в цилиндрах возникает в связи с технологическими допусками на изготовление деталей, как цилиндропоршневой группы, так и топливной аппаратуры. В связи с этим требуется индивидуальная корректировка отдельных параметров каждого цилиндра. Вторая причина разрегулировки возникает из-за неизбежных неравномерных износов деталей в период эксплуатации, что требует периодической корректировки параметров рабочего процесса. Существенную долю в качестве регулировки вносят измерительные приборы и приспособления, предназначенные для осуществления регулировки, их конструктивное разнообразие и несовершенство.

1. Регулируемые и регулирующие параметры

Каждый двигатель имеет индивидуальные особенности в подходе к регулировке для обеспечения идентичности рабочих процессов в цилиндрах. В технической литературе [1], [3], [4], [5], [6] [7], имеются лишь словесные описания принципов выполнения регулировки. Как правило, исходя из рассмотрения цикла двигателя, для целей регулировки рассматривают давление сжатия - P_c , давление сгорания - P_z и температуру выпускных газов по цилиндрам - t_z . Идентичности этих регулируемых параметров достаточно чтобы среднее индикаторное давление в цилиндрах - P_i было так же идентичным [2], [10], [11]. При ограничениях по давлению сгорания $P_z \leq [P_z]$ и температуре выпускных газов по цилиндрам $t_z \leq [t_z]$ меньших, чем на номинальном режиме не возникают механические и термические перегрузки. Идентичность этих параметров или допуск на их отклонение задают в заводских инструкциях и Правилах технической эксплуатации [9]. В идеальном варианте параметры во всех цилиндрах должны быть равными (или допуски равны нулю), однако, как уже отмечалось, в силу объективных причин достижение такой регулировки практически не возможно. Эталонном качественной регулировки может выступить регулировка двигателя при его выпуске с завода. В условиях завода при наличии опытных специалистов, специализированного оборудования, приборов и оснастки, минимальных технологических допусках в новых деталях ЦПГ, а также новых скомплектованных плунжерных парах ТНВД и распылителей форсунок можно добиться очень качественной регулировки, которую можно считать эталонной. Параметры заводской регулировки заносят в паспорт и формуляр двигателя.

2. Способы выполнения регулировки

В судовых условиях при ограниченности времени, зачастую при применении кустарных приспособлений, выполнить качественную регулировку под силу только опытному механику. Как правило, выполнение регулировки начинают с параметра имеющего наибольшее, критическое отклонение. Существенное воздействие на рабочий процесс регулируемого цилиндра вызывает изменение нагрузки и, соответственно, изменение параметров в других цилиндрах, что часто приводит к возникновению существенных и даже околокритических отклонений параметров в других цилиндрах. Поэтапная регулировка методом проб и ошибок представляет собой длительный и напряженный процесс приведения всех параметров рабочих процессов во всех цилиндрах в допускаемые пределы. Каждый этап, как правило, не обходится без остановки двигателя, его последующего запуска, вывода на номинальный режим (по частоте вращения и мощности) и тщательных измерений, что оборачивается многочасовыми потерями промышленного времени и незапланированным расходом топлива. Дело в том, что регулирующие параметры: степень сжатия - ε , угол опережения подачи топлива - φ_o , цикловая подача топлива - g_u , комплексно влияют на регулируемые параметры: P_c , P_z и t_z . В самом деле:

$$P_c = f(P_k, t_k, \varepsilon, t_w); \quad (1)$$

$$P_z = f(P_c, \varphi_o, g_u, t_w); \quad (2)$$

$$t_z = f(P_z, g_u, t_w). \quad (3)$$

Введение в зависимость (1) давления наддува обусловлено тем, что P_k является не только параметром, напрямую влияющим на давление сжатия, но и тем, что оно характеризует режим нагружения.

В зависимости (2) и (3) эту роль выполняет цикловая подача топлива g_u . Таким образом, регулирование одного параметра обязательно в какой-то мере затрагивает другие. Облегчает решение задачи то обстоятельство, что степень влияния регулирующих параметров на регулируемые параметры различна. Например, влияние температуры системы охлаждения t_w оказывает заметное влияние только при существенном различии охлаждения отдельных цилиндров, а давление и температура надвучного воздуха Pk и tk являются одинаковыми для всех цилиндров. Регулирование одного цилиндра приводит к перераспределению нагрузки остальных цилиндров и, соответственно, изменению регулируемых параметров. Чем меньше цилиндров в двигателе, тем степень влияния возрастает.

Как было показано выше, проблема регулировки двигателей существует, но она решаема за счет длительного и тщательного подхода, что неизбежно сопровождается потерями промышленного времени.

3. Рациональный подход к выполнению регулировки

Для повышения эффективности регулировки, сокращения простоев и повышения её качества, целесообразно разработать легкодоступный алгоритм регулировки, повышающий качество и сокращающий потери промышленного времени. Для реализации такого алгоритма выберем наиболее существенные регулирующие параметры: $Pc = f(Pk, \varepsilon)$; $Pz = f(Pc, \varphi_0, g_u)$; $tz = f(Pz, g_u)$. Цикловую подачу топлива в цилиндр целесообразно заменить её механическим аналогом – перемещением рейки топливного насоса высокого давления – hp , а степень сжатия – геометрическим аналогом – высотой камеры сжатия – hc . Так как изменения регулируемых параметров Pc , Pz и tz в процессе регулировки имеют достаточно узкий диапазон, то эти изменения могут быть с достаточной для практической реализации точностью выражены линейными зависимостями

$$Pc = Pc_0 + Ac_1 \times Pk + Ac_2 \times hc; \quad (4)$$

$$Pz = Pz_0 + Az_1 \times Pc + Az_2 \times \varphi_0 + Az_3 \times hp; \quad (5)$$

$$tz = tz_0 + At_1 \times Pz + At_2 \times hp. \quad (6)$$

Следует отметить естественную временную связь параметров цикла, поэтому в зависимость (4) входит давление наддува, в зависимость (5) – давление сжатия, а в зависимость (6) – давление сгорания. Для единообразия регулирующих параметров целесообразно в первом уравнении давление наддува, косвенно отражающем нагрузку двигателя, заменить перемещением рейки ТНВД – hp – главным параметром задающим нагрузку двигателя. В этой замене есть несущественная погрешность – то, что давление наддува одинаково для всех цилиндров, а ход рейки различен. При последовательной подстановке зависимости (4) в зависимость (5), а зависимости (5) в зависимость (6), получаем систему уравнений с одинаковыми регулируемыми параметрами:

$$Pc = Pc_0 + Ac_1 \times hp + Ac_2 \times hc; \quad (7)$$

$$Pz = Pz_0 + Az_1 \times (Pc_0 + Ac_1 \times hp + Ac_2 \times hc) + Az_2 \times \varphi_0 + Az_3 \times hp; \quad (8)$$

$$tz = tz_0 + At_1 \times (Pz_0 + Az_1 \times (Pc_0 + Ac_1 \times hp + Ac_2 \times hc) + Az_2 \times \varphi_0 + Az_3 \times hp) + At_2 \times hp. \quad (9)$$

После раскрытия скобок и приведения подобных членов в новых обозначениях получаем:

$$Pc = Pc_0 + \alpha_{c1} \times hc + \alpha_{c2} \times hp + 0 \times \varphi_0; \quad (10)$$

$$Pz = Pz_0 + \alpha_{z1} \times hc + \alpha_{z2} \times hp + \alpha_{z3} \times \varphi_0 \quad (11)$$

$$tz = tz_0 + \alpha_{t1} \times hc + \alpha_{t2} \times hp + \alpha_{t3} \times \varphi_0 \quad (12)$$

Каждая строка системы включает количество уравнений соответствующих числу цилиндров двигателя. Определение неизвестных свободных членов и коэффициентов системы уравнений « α » может быть выполнено совместным решением системы уравнений по всем цилиндрам. В результате преобразований получим три совместные системы уравнений для каждого цилиндра. Каждая система имеет четыре неизвестных, а число уравнений соответствует числу цилиндров, то есть система обычно получается переопределенной и её решение необходимо выполнять методом наименьших квадратов.

4. Метод наименьших квадратов

Наиболее эффективно решение переопределенной системы методом наименьших квадратов реализуется с применением матриц [3].

Обозначив численные значения параметров через L_{ji} , получим в общем виде систему уравнений с неизвестными $K_1 - K_3$ (вектор свободных членов перенесён в правую часть уравнений).

$$\left\{ \begin{array}{l} K_1 \cdot L_{11} + K_2 \cdot L_{21} + K_3 \cdot L_{31} = V_1 \\ \text{-----} \\ K_1 \cdot L_{1i} + K_2 \cdot L_{2i} + K_3 \cdot L_{3i} = V_i \\ \text{-----} \\ K_1 \cdot L_{1n} + K_2 \cdot L_{2n} + K_3 \cdot L_{3n} = V_n \end{array} \right. \quad (13)$$

В матричном виде система (13) запишется более компактно: $L \times K = V$.

Как известно, матрицу и вектор свободных членов можно умножить на одно и то же число (матрицу). Для решения переопределённой матрицы L умножим систему уравнений на тождество в виде транспонированной матрицы $L^T \equiv L^T$. При перемножении матриц её элементы в столбцах умножаются на элементы в строках (возводятся в квадрат) и суммируются.

$$L^T \times L = L_{\square}; \quad L^T \times V = V_{\square}; \quad (14)$$

В итоге получится квадратная матрица и новый вектор свободных членов, при этом число уравнений и число неизвестных становятся равными. В [3] доказано, что такое преобразование эквивалентно решению при условии минимизации отклонения методом наименьших квадратов.

$$L_{\square} \times K = V_{\square} \quad (15)$$

Решение системы (15) выполняется с помощью обратной матрицы, т.е.

$$K = (L_{\square})^{-1} \times V_{\square} \quad (16)$$

Алгоритм такого решения удобен для реализации в пакете прикладных программ *MathCad*.

Полученные коэффициенты позволяют установить численную зависимость регулируемых параметров от регулировочных. Подставив в полученные три уравнения значения регулируемых параметров, соответствующие их наилучшему (номинальному) значению, получим систему из трех уравнений с тремя неизвестными (регулирующими параметрами):

$$\left\{ \begin{array}{l} Kc_0 + Kc_1 \cdot h_{CR} + Kc_2 \cdot \varphi_{OR} + Kc_3 \cdot h_{PR} = Pc_H \\ Kz_0 + Kz_1 \cdot h_{CR} + Kz_2 \cdot \varphi_{OR} + Kz_3 \cdot h_{PR} = Pz_H \\ Kt_0 + Kt_1 \cdot h_{CR} + Kt_2 \cdot \varphi_{OR} + Kt_3 \cdot h_{PR} = t\tilde{a}_i \end{array} \right. \quad (17)$$

Решением системы (17) получим три регулирующих параметра: h_{CR} ; φ_{OR} ; h_{PR} , которые согласованы между собой и дают наименьшее отклонение регулируемых параметров от номинального значения. По отклонению полученных оптимальных регулирующих параметров: h_{CR} – высоты камеры сжатия, φ_{OR} – угла опережения подачи топлива, h_{PR} – положения рейки ТНВД от первоначальных значений каждого цилиндра получим величину индивидуальной корректировки по каждому регулируемому параметру каждого цилиндра:

$$\begin{aligned} \Delta h_{Ci} &= h_{CR} - h_{Ci} \\ \Delta \varphi_{Oi} &= \varphi_{OR} - \varphi_{Oi} \\ \Delta h_{Pi} &= h_{PR} - h_{Pi} \end{aligned} \quad (18)$$

В результате комплексного воздействия на каждый цилиндр (в пределах точности его воспроизведения) отклонения регулируемых параметров должны стать минимальными.

5. Численный пример регулировки

Рассмотрим реализацию предлагаемой методики на примере регулировки главного судового дизельного двигателя 8ZD72/48.AL-2 (8ДРН48/72) мощностью $N_e = 2855$ кВт при постоянной частоте вращения $n = 214$ об/мин., установленного на БМРТ типа «Прометей» [2]. Номинальные (допускаемые) параметры цикла составляют: давление сжатия - $P_c = 55 \pm 3$ бар, максимальное давление сгорания - $P_z = 80 \pm 1$ бар, температура выпускных газов - $t_z = 365 \pm 15$ °С. Оптимальный (конструктивный) угол опережения подачи топлива до ВМТ составляет 9° поворота коленчатого вала.

В процессе эксплуатации были зафиксированы регулируемые параметры, представленные в таблице 1. Гистограмма давлений сжатия и максимального давления сгорания представлена на рис.1, а гистограмма распределения температуры выпускных газов по цилиндрам приведена на рис.2.

Таблица 1

Регулируемые параметры

Параметр	Размерн.	1	2	3	4	5	6	7	8
P_c	бар	50	54	53	52	51	53	54	52
P_z	бар	75	78	77	79	82	80	78	76
t_z	°С	340	355	345	375	375	345	365	370

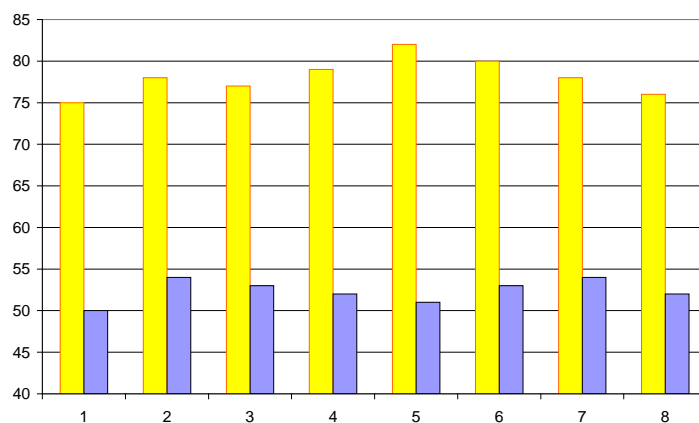


Рис.1. Гистограмма давлений сжатия и сгорания

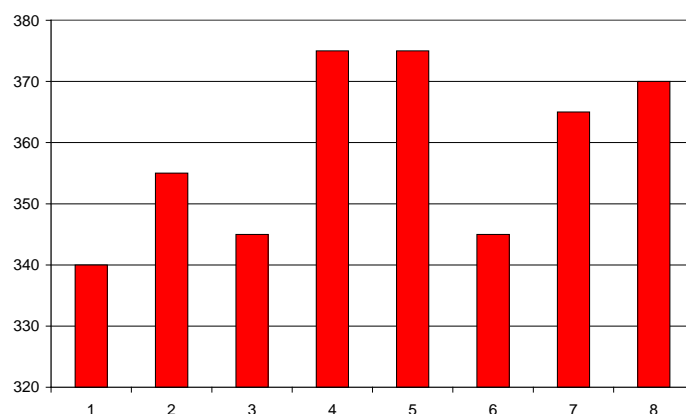


Рис.2. Гистограмма распределения температуры выпускных газов по цилиндрам

Как следует из приведенных регулировочных значений, двигатель имеет отклонения, превышающие допустимые и нуждается в проведении регулировки. Кроме того, среднее значения температуры выпускных газов меньше среднего номинального значения из чего следует, что двигатель не нагружен до номинальной мощности. В случае повышения мощности (нагрузки) возникнет термическая перегрузка в 4-м и 5-м цилиндрах, кроме того 5-й цилиндр перегружен по максимальному давлению сгорания. Измеренные текущие регулировочные параметры приведены в таблице 2.

Измеренные текущие регулировочные параметры

Параметр	Размерн.	1	2	3	4	5	6	7	8
hc	мм	11,5	13,0	12,5	12,0	12,0	12,5	13,0	12,0
φo	град	9,0	8,5	8,5	9,5	10,0	9,0	8,5	8,5
hp	мм	5,5	9,0	8,5	10,5	10,0	9,0	9,5	10

Для проведения регулировочных мероприятий сформируем матрицу известных регулирующих значений:

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 11.5 & 9.0 & 5.5 \\ 1 & 13.0 & 8.5 & 9.0 \\ 1 & 12.5 & 8.5 & 8.5 \\ 1 & 12.0 & 9.5 & 10.2 \\ 1 & 12.0 & 10.0 & 10.0 \\ 1 & 12.5 & 9.0 & 9.0 \\ 1 & 13.0 & 8.5 & 9.5 \\ 1 & 12.0 & 8.5 & 10.0 \end{bmatrix}$$

и три вектора регулируемых значений:

$$V_{pc} = \begin{bmatrix} 50 \\ 54 \\ 53 \\ 52 \\ 51 \\ 53 \\ 54 \\ 52 \end{bmatrix} \quad V_{pz} = \begin{bmatrix} 75 \\ 78 \\ 77 \\ 79 \\ 82 \\ 80 \\ 78 \\ 76 \end{bmatrix} \quad V_{ia} = \begin{bmatrix} 340 \\ 355 \\ 345 \\ 375 \\ 375 \\ 345 \\ 365 \\ 370 \end{bmatrix}$$

Далее, умножим транспонированную матрицу на исходную, Аналогично умножим транспонированную матрицу на вектор. Получим матричное уравнение вида $L^T \times K = V$, из которого методом умножения на обратную матрицу получим значения коэффициентов уравнений:

для давления сжатия

$$K_{pc} = [L_{\pi}]^{-1} \times [V_{\pi pc}] = \begin{bmatrix} 30.45 \\ 2.067 \\ -0.576 \\ 0.182 \end{bmatrix}$$

для давления сгорания

$$K_{pz} = [L_{\pi}]^{-1} \times [V_{\pi pz}] = \begin{bmatrix} 4.868 \\ 2.869 \\ 4.023 \\ 0.220 \end{bmatrix}$$

для температуры газов

$$K_{ia} = [L_{\pi}]^{-1} \times [V_{\pi ia}] = \begin{bmatrix} 362.29 \\ -8.047 \\ 2.358 \\ 8.273 \end{bmatrix}$$

Решением уравнений с полученными коэффициентами рассчитаны величины давлений сжатия, давлений сгорания и температуры газа по цилиндрам. Согласование расчетных и исходных данных приведено на рис. 3, 4, 5.

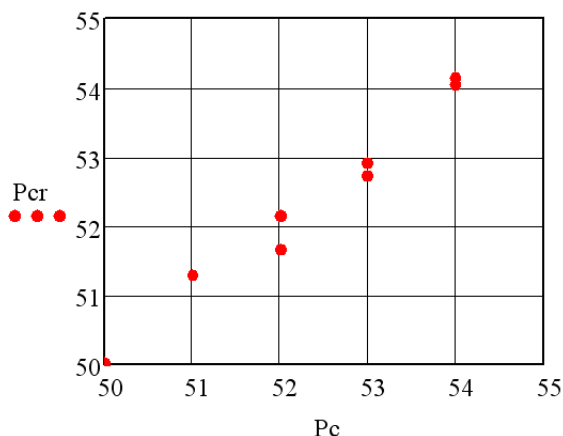


Рис.3. Согласование расчетных и измеренных значений давлений сжатия по цилиндрам

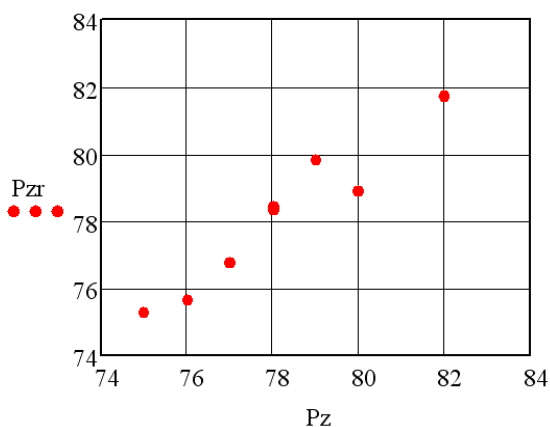


Рис.4. Согласование расчетных и измеренных значений давлений сгорания по цилиндрам

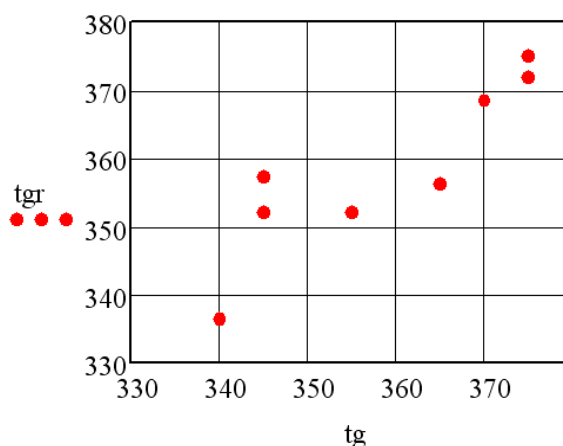


Рис.5. Согласование расчетных и измеренных значений температур выпускных газов

Подставим в расчётные уравнения значения номинальных регулируемых параметров:

$$Kc_0 + Kc_1 \cdot hc_R + Kc_2 \cdot \varphi\omega_R + Kc_3 \cdot hp_R = Pc_H \quad Kz_0 + Kz_1 \cdot hc_R + Kz_2 \cdot \varphi\omega_R + Kz_3 \cdot hp_R = Pz_H$$

$$Kt_0 + Kt_1 \cdot hc_R + Kt_2 \cdot \varphi\omega_R + Kt_3 \cdot hp_R = t\bar{a}_H$$

Решением системы определим оптимальные значения $hc_R = 13.32$, $\varphi_{oR} = 8.583$, $hp_R = 10.84$ и, наконец, получим корректирующие значения регулирующих параметров по каждому цилиндру (таблица 3)

Таблица 3

Корректирующие значения регулирующих параметров

№ цилиндра	Δhc	$\Delta \varphi_o$	Δhc
1	1.8	-0.4	5.3
2	0.3	0.1	1.8
3	0.8	0.1	2.3
4	1.3	-0.9	0.3
5	1.3	-1.4	0.8
6	0.8	-0.4	1.8
7	0.3	0.1	1.3
8	1.3	0.1	0.8

Из регулировочной таблицы 3 следует, что в первую очередь корректировке подлежат высоты камер сгорания 1, 4, 5 и 8 цилиндров, углы опережения подачи топлива в 4 и 5 цилиндрах. Рейка ТНВД должна быть сдвинута в сторону увеличения подачи для общего повышения нагрузки. Рейку 1 цилиндра целесообразно индивидуально сдвинуть на 5 мм, а рейку 3 цилиндра – на 2 мм. Корректировка остальных параметров может быть отложена до следующего профилактического мероприятия.

Заключение

Предлагаемая методика даёт численные указания о проведении согласованных регулировочных мероприятий по всем цилиндрам одновременно, позволяет повысить уверенность механиков в своих действиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брук М.А. Инженерные основы эксплуатации ДВС. Л.: СЗПИ, 1976. – 250 с.
2. Кузькин В.Г., Минько А.А. Регулировка дизелей промысловых судов. - М.: Агропромиздат, 1988. - 225 с.
3. Королёв Н.И. Эксплуатация судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1974. – 256 с.
4. Королёв Н.И. Регулирование судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1969. – 153 с.
5. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. Справочное руководство. - М.: Гос.изд.Ф.М.Л., 1961. - 524 с.
6. Олейников Б.И. Техническая эксплуатация дизелей судов флота рыбной промышленности. -М.: Агропромиздат, 1986. - 269 с.
7. Осташенков В.Ф. Теплотехнические испытания судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1967. – 243 с.
8. Петровский Н.В. Судовые двигатели внутреннего сгорания и их эксплуатация. -М.: Транспорт, 1966. – 504 с.
9. Правила технической эксплуатации судовых дизелей (утв. приказом Госкомрыболовства РФ от 05.05.1999 № 107. – С-Пб - М.: Гипрорыбфлот-Сервис, «Русская панорама», 1999. - 168 с.
10. Регулировка судовых дизелей. Под общ.ред. В.Г. Кузькина. - Калининград. Кн.изд-во, 1977. - 228 с.
11. Теоретические основы эксплуатации судовых дизелей. В.Ю. Гиттис, В.А. Бондаренко, Г.П. Ефимов и др. – М.: Транспорт, 1965. – 376 с.

ADJUSTING THE DIESEL ENGINE

Tolmachev Alexander Viktorovich, PhD, associate professor of the department of ship power plants and heat power engineering

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russia, e-mail: avtol03071952@mail.ru

Adjustment of the working process in the diesel engine cylinders is performed to prevent mechanical and thermal overloads, as well as to increase operational efficiency. The paper presents theoretical studies of obtaining empirical dependences of the regulated parameters of the working process of marine diesel engines on the adjusting parameters. The adjustment of the diesel engine is a long and costly process, described in the technical literature only by verbal instructions. This causes significant technical difficulties, most of the adjustment is carried out by trial and error. This is due to the complex influence of individual adjustment parameters on the adjustable parameters of the working process. The solution of the overridden system of equations is performed using the matrix calculus by the least squares method. The solution of the obtained empirical coefficients-you, allows you to set the amount of change of the adjustment parameters, allowing with the least time cost to perform a qualitative adjustment of work processes in all cylinders. The paper gives an example of adjustment according to the described method.

СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО»

SECTION "COMMERCIAL FISHING"

УДК 639.2.081.117.21

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАЛА НА ФОРМУ ЕГО УСТЬЯ

Капчанов Алексей Сергеевич, бакалавр по специальности «Промышленное рыболовство», лаборант кафедры промышленного рыболовства

Суконнов Анатолий Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораториями кафедры промышленного рыболовства

Суконнова Татьяна Евгеньевна, инженер-механик по специальности "Промышленное рыболовство", заместитель декана по учебной работе, доцент кафедры промышленного рыболовства

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: franciscusmariadeval@gmail.com

Статья посвящена исследованию формы устья трала в зависимости от факторов реальных условий эксплуатации системы «судно-трал». Для этого, авторами предложена, экспериментальная установка, представляющая из себя систему блоков, шкивов, закреплённых на вертикальных и горизонтальных каркасах, а также модель трала. Для систематизации исследований был применён метод планирования эксперимента, который позволил получить математическую зависимость влияния исследуемых параметров на форму устья трала, на основании которой можно выделить приоритет каждого из этих параметров.

Введение

Траловый лов является самым результативным способом лова в мире, на его долю приходится около 70% от мирового вылова гидробионтов. Успешность тралового лова, в большинстве случаев, зависит от соответствия формы устья трала форме облавливаемого косяка.

На промысле часто встречаются косяки, вытянутые как по вертикали, так и по горизонтали. Форма скопления зависит от объекта лова, гидрологических условий и множества других факторов. В связи с этим промысловику необходимо уметь управлять формой устья трала, с целью достижения наилучшего облова скоплений.

Как показывает практика на форму устья трала оказывают влияние распорная сила траловых досок, заглубляющая сила нижней подборы и грузов углубителей, подъёмная сила верхней подборы, скорость движения судна.[1]

Влияние взаимосвязи этих факторов на форму устья трала, в полной мере, ещё не известно. Получение подобных данных на промысле не представляется возможным из-за отсутствия измерительного оборудования, особенностей режимов работы промыслового судна, а также экономической составляющей.

Поэтому нами была предпринята попытка провести подобные эксперименты в статике, с помощью метода механической имитации, на экспериментальной установке. Данная установка представляет из себя систему блоков, шкивов, закреплённых на вертикальных и горизонтальных каркасах, а также модель трала.



Рис. 1 - Установка механической имитации, вид сбоку



Рис. 2 - установка механической имитации, вид спереди

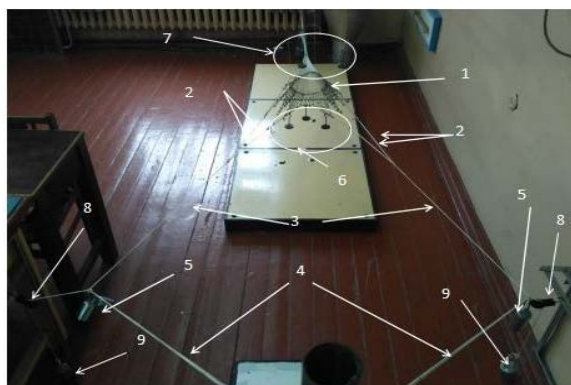


Рис. 3 - схема установки механической имитации, вид сверху, где: 1 - трал, 2 - голые концы, 3 - кабели, 4 - ваера, 5 - груза эмитирующие траловые доски, 6 - груза, эмитирующие загрузку нижней подборы и грузов-углубителей, 7 - груза эмитирующие подъёмную силу верхней подборы, 8 - блоки, 9 - груза эмитирующие распорную силу траловых досок, 10 - штатив.

Экспериментальная часть

Установка позволяет нам, с помощью гибких нитей и разновесов осуществлять имитацию различных сил, действующих на устье трала. Имитация работы траловой системы осуществляется следующим образом: груза 9 и 5 (груза под номером 5 имитируют массу траловых досок, а груза 9 гидродинамическую распорную силу досок), через кабели 3 и голые концы 2, воздействуют на

трал 1, увеличивая или уменьшая горизонтальное раскрытие устья трала, в зависимости от массы грузов 5 и 9. Груза 6, закреплённые непосредственно к нижней подборе и груза 7, закреплённые через систему блоков и гибких нитей к верхней подборе имитируют загрузку нижней и верхней подбор и изменяют вертикальное раскрытие устья трала, в зависимости от их массы. Ваера 4, соединяющиеся с кабелями 3 в месте установки грузов имитирующих массу траловых досок 5, противоположными своими концами прикреплены к штативу 10 и создают усилие, отражающее взаимодействие трала с судном, его буксирующим.

Для проверки работоспособности установки была проведена серия экспериментальных исследований. С целью снижения количества экспериментов и установления взаимосвязей между факторами, влияющими на форму устья трала был применён метод планирования эксперимента. [2] Форма устья трала определяется соотношением горизонтального раскрытия к вертикальному (В/Н), на первом этапе исследований, были отобраны несколько факторов, на наш взгляд, оказывающие наибольшее влияние на форму устья трала. Их три, это: распорная сила траловых досок (R), заглубляющая сила нижней подборы и грузов углубителей (P) и подъёмная сила верхней подборы (Q).

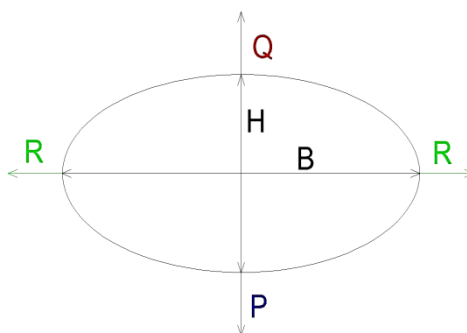


Рисунок 4 - схема приложения сил к устью трала, где: (R) -распорная сила траловых досок; (P) - заглубляющая сила нижней подборы и грузов углубителей; (Q) - подъёмная сила верхней подборы; (B) - вертикальное раскрытие устья трала; (H)- горизонтальное раскрытие устья трала

Объектом исследования является модель трала, изготовленная в масштабе $L=1\backslash 100$ исходя из возможностей установки, в качестве прототипа был выбран трал фирмы «Fishiringserves» 63/318м.[3] Исходя из проведённого обзорасправочных данных по тралам и возможностей установки был выбран силовой масштаб $C=1/1000$. На основе этих данных были определены диапазоны изменения рассматриваемых факторов: (R) -распорная сила траловых досок, (P) - заглубляющая сила нижней подборы и грузов углубителей, (Q) - подъёмная сила верхней подборы, (B) - вертикальное раскрытие устья трала,(H)- горизонтальное раскрытие устья трала.

Для модели диапазон распорной силы траловых досок (R) составил от 1кг до 3кг, заглубляющей силы нижней подборы и грузов углубителей (P) от 0,1кг до 0,35кг, подъёмной силы верхней подборы (Q) от 0,05кг до 0,15кг. Далее была составлена матрица 3-х факторного эксперимента на двух уровнях. [4] Она представлена в виде таблицы, где + и -, это максимальное и минимальное значения исследуемых факторов, соответственно.

Таблица 1

Матрица эксперимента

№	R	P	Q	RP	RQ	PQ	RPQ
1	+	+	+	+	+	+	+
2	+	+	-	+	-	-	-
3	+	-	-	-	-	+	+
4	+	-	+	-	+	-	-
5	-	-	-	+	+	+	-
6	-	-	+	+	-	-	+
7	-	+	+	-	-	+	-
8	-	+	-	-	+	-	+

Экспериментальные исследования проводились в соответствии со строками матрицы, которые учитывали сочетания исследуемых факторов в процессе эксперимента [5]. Экспериментальные работы заключались в изменении загрузки ветвей, в соответствии с каждой строкой матрицы, измерении полученных значений вертикального и горизонтального раскрытий устья трала и дальнейшем расчёте соотношения В/Н. Результатом проведенных экспериментов являлись вертикальное и горизонтальное раскрытия устья трала. Эксперименты проводились десятикратно, среднеарифметические значения результатов данных работ занесены в таблицу №2

Таблица 2

Экспериментальные данные горизонтального и вертикального раскрытий трала

№	R	P	Q	Экспериментальные данные		
				Ср. арифметическое горизонтальное раскрытие, см	Ср. арифметическое вертикальное раскрытие, см	В/Н
1	3	0,35	0,15	18	36	0,5
2	3	0,35	0,05	15	33	0,45
3	3	0,1	0,05	12	30	0,4
4	3	0,1	0,15	14	30	0,46
5	1	0,1	0,05	21	26	0,8
6	1	0,1	0,15	21	23	0,9
7	1	0,35	0,15	26	20	1,3
8	1	0,35	0,5	28	21	1,3

Аналитическая часть

В результате математической обработки полученных данных были рассчитаны коэффициенты регрессии, и тогда зависимость отношения вертикального раскрытия к горизонтальному раскрытию устья трала (В/Н), от факторов распорной силы траловых досок (R), заглубляющей силы нижней подборы и грузов углубителей (P) и подъёмной силы верхней подборы (Q) выглядит следующим образом [6]:

$$\frac{B}{H} = 0,76 - 0,31x_1 + 0,12x_2 + 0,03x_3 - 0,1x_1x_2 \quad (1)$$

В данной зависимости x_1, x_2, x_3 – кодированное значение факторов R, P, Q в интервале от -1 до 1. Для проверки адекватности полученной модели проведены сравнения экспериментальных данных с расчётными, полученными с помощью формулы 1.

Таблица 3

Сравнение экспериментального и расчётного отношения вертикального раскрытия к горизонтальному

В/Н экспериментальное	0,5	0,45	0,4	0,46	0,8	0,9	1,3	1,3
В/Н расчётное	0,5	0,44	0,4	0,46	0,8	0,89	1,3	1,28
Отклонение В/Н расчётного от В/Н экспериментального	0	0,01	0	0	0	0,01	0	0,02
Отклонение В/Н расчётного от В/Н экспериментального, %	0	1%	0	0	0	1%	0	1%

Как видно из таблицы 3 отклонение расчётных данных от экспериментальных не превышает 1%, что говорит о адекватности полученной зависимости, то есть она описывает процесс изменения раскрытия устья трала от факторов распорной силы траловых досок (R), заглубляющей силы нижней подборы и грузов углубителей (P) и подъёмной силы верхней подборы (Q) в их диапазоне.

Применяя полученную зависимость можно оценить степень влияния исследуемых факторов на устье трала. Так, например, при увеличении распорной силы досок в 3 раза от 10 до 30Н, при прочих равных условиях, соотношение В/Н изменяется от 1.3 до 0.5, тоесть уменьшается на 61,5%

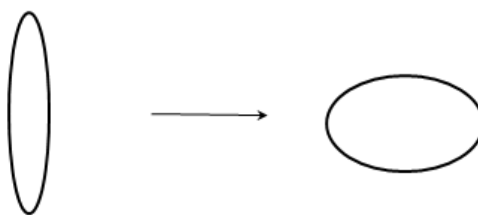


Рис. 5 - Изменение формы устья трала, при увеличении распорной силы траловых досок в 3 раза

При увеличении подъёмной силы гидродинамического щитка в 3 раза от 0.5Н до 1.5Н, при прочих равных условиях, соотношение В/Н изменяется с 0.45 до 0.5, тоесть возрастает на 11%

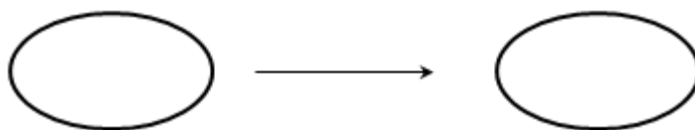


Рис.6 - Изменение формы устья трала, при увеличении подъёмной силы гидродинамического щитка в 3 раза

При увеличении заглубляющей силы нижней подборки и грузов углубителей в 3.5 раза от 1 до 3.5Н, соотношение В/Н изменяется с 0.9 до 1.3, тоесть возрастает на 44%

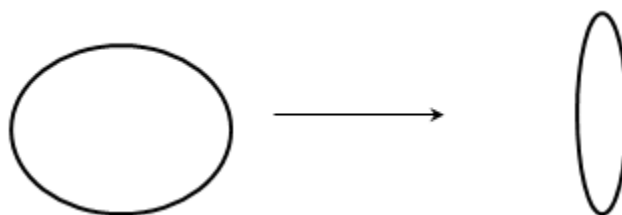


Рис. 7 - Изменение формы устья трала, при увеличении заглубляющей силы нижней подборки в 3.5 раза

Заключение

Анализирую данную модель можно сказать, что степень влияния факторов R, P, Q на соотношение вертикального и горизонтального раскрытия следующая: наибольшее влияние оказывает распорная сила траловых досок, второе по силе влияние оказывает заглубляющая сила нижней подборки, а наименьшее подъёмная сила верхней подборки.

В будущем, предполагается установить связь между полученными результатами и силовым масштабом, с целью дальнейшего пересчёта на натурный трал.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области в рамках научного проекта № 19-48-390004

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дверник А.В., Шеховцкв Л.Н. Устройство орудий рыболовства. - М.: Колос, 2007. - 272 с.
2. Долин Г. М. Планирование экспериментов в промышленном рыболовстве. Учебное пособие. / Г.М. Долин. – Калининград: ФГБОУ «КГТУ» 1996г.
3. Официальный сайт компании «Fishering servise»[Электронный ресурс]. URL:<http://fishering.com>(дата обращения: 09.07.2018).

4. Долин Г.М. Пространственная имитация канатных тралов/ Труды КТИРПиХ, вып. 84, 1979.
5. Фридман А.Л. Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства: учеб. для вузов, 1981г.
6. Розенштейн М.М., Недоступ А.А. Механика орудий рыболовства. Учебник для высших учебных заведений : МОРКНИГА, 2011. - 528с.

EXPERIMENTAL STUDIES ON ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF THE OPERATION FACTORS OF THE TRAVEL ON THE FORM OF ITS STREAM

Карчанов Алексей Сергеевич, Bachelor in Industrial Fishing; Laboratory Assistant
Sukonnov Anatoly Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, assistant professor;
Head of industrial fishing laboratories
Sukonnova Tatiana Evgenievna, Mechanical Engineer with a degree in Industrial Fishing;
deputy dean for academic affairs, associate professor of the department of Industrial fishing

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russia, e-mail: franciscusmariadeval@gmail.com

The article is devoted to the research of a trawl mouth's shape in relation to factors of actual conditions in "vessel – trawl" system operating. To do so, authors offer test setup: system of blocks, wheels fixed in vertical and horizontal frames and a model of a trawl. To systemize the results experiment's planning method was used. It allowed to get a mathematical relationship of how examined criteria influence on trawl mouth's shape, on the basis of which is possible to separate the priority of each one.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗГИБНОЙ И ПОПЕРЕЧНОЙ ЖЕСТКОСТЕЙ РЫБОЛОВНЫХ КРУЧЕНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Коновалова Карина Витальевна, магистрант

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Российская Федерация, e-mail: karina.konvalova@klgtu.ru

В статье рассматривается проблема прогнозирования рыболовных крученых нитевидных изделий при действии изгибающего момента. В работе применяется программа для ЭВМ «Моделирование изгиба крученых рыболовных ниток, веревок и канатов» на основании которой, приводятся результаты моделирования изгиба, иллюстрирующие напряжение протекающее, в изделии с учетом изгибной жесткости. Для оценки достоверности результатов проведено сравнение основных физико-механических и конструктивных свойств изделий с известными данными.

Введение

Определение физико-механических характеристик материалов до сих пор остается актуальной задачей, в частности изучения жесткости изделий. Закон Гука, в рамках которого получены важные результаты упругих свойств материалов, тем не менее, не учитывает особенности изделий, применяемых в промышленном рыболовстве.

Орудия промышленного рыболовства изготовлены из рыболовных крученых изделий – ниток, веревок и канатов (нитяные изделия (НИ) и канатно-веревочные (КВИ)) с точки зрения механики представляют собой гибкие нити.

Как известно, любая гибкая нить в той или иной мере обладает изгибной жесткостью (ЕJ). Например, при расчете НИ и КВИ: изделия как конструктивный элемент орудий рыболовства закреплено концами в узлах, или одним концом соединено с орудием рыболовства, а другим с механизмом образуя переходы в виде провисающих нитей, которые в качестве расчетной модели нужно рассматривать, как нить конечной жесткости, учитывая деформацию изгиба.

Ряд вопросов расчета жесткости НИ уже решены и обстоятельно представлены, например, в работе [1] Б. И. Герман изучал жесткость сетного полотна в потоке. Жесткость системы при задеве трала исследовала В. Н. Стрекалова [2]. В данный момент в области промышленного рыболовства доминируют работы по изучению EJ вариационными способами [3-5] и методами конечных элементов [6]. Но несмотря на многообразие методик, они обычно не связаны между собой и применяются для решения частных задач, в связи с неполнотой исследования поперечной и изгибной жесткости, а также отсутствием экспериментальных данных. Например, в статьях «Критерии изгибной жесткости сетеснастных материалов при моделировании орудий лова» [7] и [8] А. Л. Фридман, также поднимает вопрос о проведении систематических опытов по изучению изгибной жесткости EJ канатно-веревочных изделий (КВИ).

Для решения поставленной задачи построим методику изучения физико-механических свойств (ФМС) КВИ на основании статей [9], [10] для получения данных дающих возможность в дальнейшем спрогнозировать поведение, свойства синтетических нитевидных материалов на этапе их проектирования.

В данной работе используется программа для ЭВМ «Моделирование изгиба крученых рыболовных ниток, веревок и канатов» созданная Ражевым А.О. и Недоступом А.А. на основании которой, приводятся результаты моделирования изгиба крученых рыболовных нитевидных изделий, иллюстрирующие напряжение протекающие в КВИ под действием внешних сил с учетом изгибной жесткости.

В качестве примера для моделирования поведения изделий определения модуля поперечной упругости мы воспользовались экспериментальными данными EJ синтетических НИ из полиамида (длиной 0,08; 0,1; 0,12; 0,16; 0,2 и 0,24 м при диаметре 1,1; 2,0; 3,1; 4,0 мм) различной длины

и диаметра, рассматриваемых на штырях диаметром $D=2,0$ мм, 6 мм и 10 мм. Для оценки достоверности результатов работы программы проведено сравнение основных ФМС и конструктивных свойств изделий с известными данными.

Практическое применение программы весьма актуально в связи с внедрением новых технологий во все промышленные отрасли. Такие программы могут быть взяты за основу вычислительной платформы и позволят спрогнозировать поведение и орудий рыболовства еще на этапе их создания (проектирования).

Постановка задачи

При проектировании орудий рыболовства, разработчикам часто необходимо изучить поведение и закономерности действующие в процессе изготовления, что практически невозможно путем натурального эксперимента (НЭ).

В тех случаях, когда НЭ невозможны, убыточны или опасны, знания об изучаемом объекте получают с помощью моделирования. При построении модели, выделяют особенности изучаемого объекта, которые содержат основную информацию и допускают его математическое построение. Это означает, что особенности нужно поставить в подходящие математические понятия, тогда связи и отношения, между деталями можно записать с помощью различных математических отношений. В итоге получается математическая модель. Она позволяет целесообразно подходить к выбору параметров и схем нового орудия рыболовства, выявлении предельных возможностей и поиске путей модернизации.

В настоящее время производство сложных изделий, в большинстве случаев, сопровождается компьютерным трёхмерным имитационным моделированием, что позволяет строить модели, описывающие процессы так, как они проходили бы в действительности.

Но при детальном изучении вопроса моделирования орудий рыболовства мы столкнулись с нехваткой информации о базовых элементах изделий – нитка, веревка и канат. Это связано с тем, что моделирование нитевидных изделий отличается большой сложностью, в связи с разнообразием их физико-механических и конструктивных свойств.

На основании расчетов, представленных в статьях [9], [10] становится возможным создать целостную методику для изучения физико-механических свойств (ФМС) КВИ, в частности жесткости изделий при изгибе, для получения данных позволяющих в дальнейшем спрогнозировать поведение и их основные свойства еще на этапе их создания (проектирования).

Также следует отметить, что моделирование должно строиться на рассмотрении физически подобных явлений. Если два объекта подобны, то при пересчете переходных коэффициентов по данным одного можно получить данные другого. В тех случаях, когда невозможно выполнить равенство по какому-либо критерию подобия, возникает опасность расхождения в ФМС и конструктивных свойствах модели и натурального объекта - масштабный эффект. Таким образом, большинство исследований, проведенных с помощью моделей, необходимо дополнять исследованиями на масштабный эффект.

1.1 Статическая сторона задачи

Для исследования процессов, возникающих при изгибе, рассмотрим нитевидное изделие (НИ и КВИ) со следующими параметрами: длина - L (примем $L = 1$ км); T_p – линейная плотность; M – масса, г., постоянное поперечное сечение в форме окружность, материал анизотропный с модулем упругости E и коэффициентом Пуассона ν .

Проанализируем деформации модели, для этого нанесем на боковую поверхность продольные и поперечные риски (рис. 1). Поперечные риски при изгибе остаются прямыми и перпендикулярными к продольным, это позволяет сделать вывод, что изгиб сводится к растяжению (на рис. 1 это – нижние волокна), или сжатию (верхние волокна) продольных волокон. Волокна разделены нейтральным слоем ($n-n$), не меняющим длины и напряжения, в котором равны нулю.

Рассмотрим слой, подвергшийся растяжению: $L_1 = L + \Delta L$ – длина, где ΔL – приращение длины., M – масса не изменяется т. е. $M = \text{const}$.

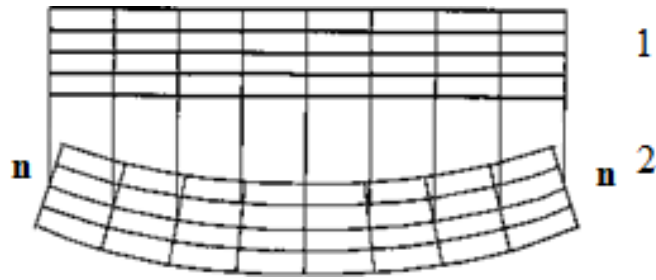


Рис. 1 Нитевидное изделие до изгиба (1) и после (2)

Так как при растяжении-удлинении НИ меняется не только его длина, но и диаметр, то воспользовавшись расчетами, представленными в статье [11], получим значение относительно поперечной деформации:

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta d}{d} \quad (1)$$

где Δd – изменение диаметра НИ и КВИ.

А Коэффициент Пуассона примет вид:

$$\mu = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon} = \left| -\frac{\Delta d}{d} \frac{L}{\Delta L} \right| = \frac{\Delta d}{\Delta L} \frac{L}{d} \quad (2)$$

где ε - относительная продольная деформация; ε_p - относительная поперечная деформация; d - диаметр; L - длина; Δd , ΔL - приращение диаметра и длины соответственно.

Для определения модуля упругости каната в расчетах можно воспользоваться формулами из теории стальных канатов [12]. Условный модуль упругости определяется по формуле:

$$E_{yc} = \frac{T_1}{\varepsilon A} \quad (3)$$

Жесткостью НИ и КВИ, C называют произведение поперечного сечения профиля (A_c) на модуль упругости E_{yc} . Приравняем жесткость к выражению (3) E_{yc} :

$$\frac{T_1}{\varepsilon A} = \frac{C}{A} \rightarrow \varepsilon = \frac{T_1}{C} \quad (4)$$

Необходимо отметить, что большое число факторов, находящихся в сложном взаимодействии и одновременно влияющих на упругие свойства канатов, не позволяет точно определить величину модуля упругости [12]. В связи с этим за основу анализа безразмерной жесткости НИ и КВИ возьмем методику Ю. Ф. Соколова, М. Н. Пахнова и А. И. Вощанкина «Методика оценки жесткости канатов» [13]

Для начала необходимо отметить, что по физическому смыслу изгибная жесткость EJ является интегральной характеристикой сухого трения скольжения и упругих сопротивлений в НИ. EJ зависит от модуля поперечной упругости E (НИ и КВИ) и момент инерции сечения J . Момент инерции для цилиндрической гибкой нити выражается формулой: $J = \frac{\pi d^4}{64}$.

Определим отношение изгибной к продольной жесткости:

$$\theta = \frac{EJ}{EA} = \frac{J}{A} = \frac{d^2}{16} = \frac{EJ_{экс}}{EA} \quad (5)$$

где EJ и EA - изгибная и продольная жесткость; $EJ_{\text{экс}}$ и $EA_{\text{экс}}$ - экспериментальные значения EJ и EA , соответственно.

Отношение изгибной жесткости находится на основании расчетов [11]:

$$\theta = \frac{d^2}{16} \left(\frac{1}{1+\varepsilon} \right) \quad (6)$$

Из формулы (6) стало возможным оценить жесткость изделия:

Угол кручения φ НИ и КВИ при нагрузке T обеспечивается раскручиванием изделий. Его величина определяется по формуле

$$\varphi = \frac{M_k L}{G J_p} \quad (7)$$

где M_k - крутящий момент.

Модуль упругости при сдвиге G определяется выражением

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (8)$$

тогда крутильная жесткость GJ_p равна

$$GJ_p = \frac{E J_p}{2(1+\mu)} \quad (9)$$

На основании выше изложенных формул получаем безразмерную комбинацию отношения EJ к GJ_p

$$v = \frac{EJ}{GJ_p} = 2 \frac{J}{J_p} (1 + \mu) = 1 + \mu \quad (10)$$

Вышеуказанные формулы справедливы для всех НИ и КВИ.

1.2 Физическая сторона задачи

За основу исследования жесткости НИ и КВИ мы взяли методику, представленную в статье [9], где поставленная задача - расчет формы и напряжения изделия с учетом изгибной жесткости решается при помощи метода точечных масс. Изделие рассматривается в виде графа, состоящего из n узлов и связей, описывающих взаимодействие между ними. Для учета внутренних сил противодействия изгибу авторы записывают для каждого узла графа, дифференциальные уравнения, связывающие деформацию с EJ . Решение указанных уравнений находится методом итерации, Он позволяет решать системы линейных уравнений находя по приближенному значению величины следующего приближения. Алгоритм решения, состоит из двух вложенных циклов, вычисляющих узловые перемещения под действием внешних и внутренних сил, условия завершения итерационного процесса во внешнем цикле вытекают из условия стационарности системы в задачах равновесия, при котором равнодействующая сила, приложенная к каждому узлу, равна нулю, либо меньше заданной минимальной невязки.

Мы воспользовались созданной на основании и для реализации вышеизложенных математических зависимостей программой для ЭВМ «Моделирование изгиба крученых рыболовных ниток, веревок и канатов» (Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ №2020612966 (06 марта 2020 г.) Правообладатель: ФГБОУ ВПО «КГТУ»), созданная Ражевым А.О. и Недоступом А.А. Она позволяет после ввода исходных данных произвести прогнозирование рыболовных крученых изделий, а также наглядно показать силы напряжения, проходящие вдоль всего НИ.

Программа позволяет в частности решить, следующие задачи:

1. Определить модуль поперечной упругости;
2. Определить толщину, усредненную плотность и длину пряжи;
3. Построить модель изгиба на штыре, заданного диаметра.

При запуске на экране отобразится главное окно программы (рис. 2).

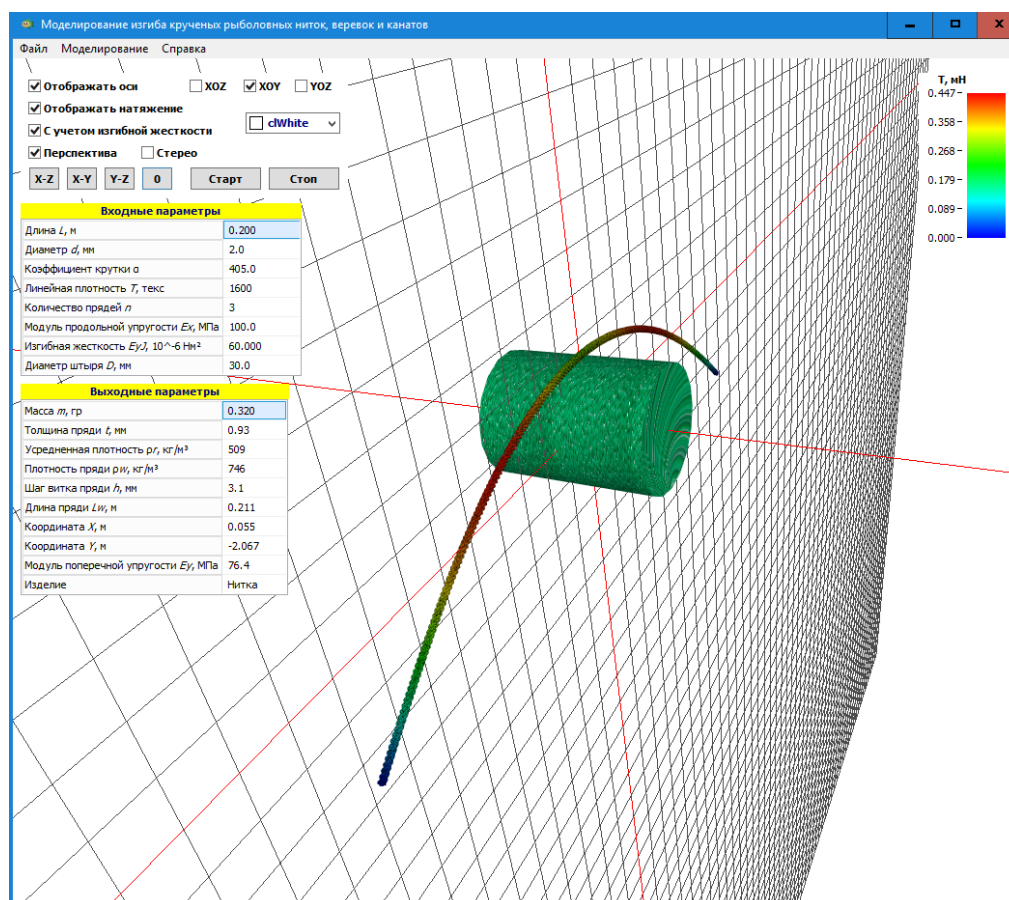


Рис. 2 Главное окно программы

Вверху окна располагается главное меню программы:

- Файл - сохранение и загрузка входных параметров;
- Моделирование - управление процессом моделирования;
- Справка – сведения о программе; расшифровка сокращенных обозначений.

В левой части программы расположены таблицы с полями для ввода параметров модели (рис. 3), также таблица для изменения перспективы и осей, плоскостей (рис. 4).

Перед началом моделирования необходимо ввести входные параметры модели. Запуск процесса моделирования осуществляется нажатием кнопки «Старт», расположенной в левом верхнем углу программы, или командой меню «Моделирование» → «Старт».

Входные параметры	
Длина L , м	0.200
Диаметр d , мм	2.0
Коэффициент крутки α	405.0
Линейная плотность T , текс	1600
Количество прядей l	3
Модуль продольной упругости E_x , МПа	100.0
Изгибная жесткость $E_y J$, 10^{-6} Нм ²	60.000
Диаметр штыря D , мм	30.0

Выходные параметры	
Масса m , гр	0.320
Толщина пряди t , мм	0.93
Усредненная плотность ρ_r , кг/м ³	509
Плотность пряди ρ_w , кг/м ³	746
Шаг витка пряди h , мм	3.1
Длина пряди L_w , м	0.211
Координата X , м	0.000
Координата Y , м	-2.525
Модуль поперечной упругости E_y , МПа	76.4
Изделие	Нитка

Рис. 3 Входные параметры и Выходные параметры

Отображать оси XOZ XOY YOZ
 Отображать натяжение
 С учетом изгибной жесткости
 Перспектива Стерео

Рис. 4 Таблица для изменения перспективы, осей, и плоскостей

Для имитации трехмерного пространства использует оси (XYZ), плоскости (XY, XZ, YZ) (рис. 5-7) и положение «0» - нейтральное (рис. 2).

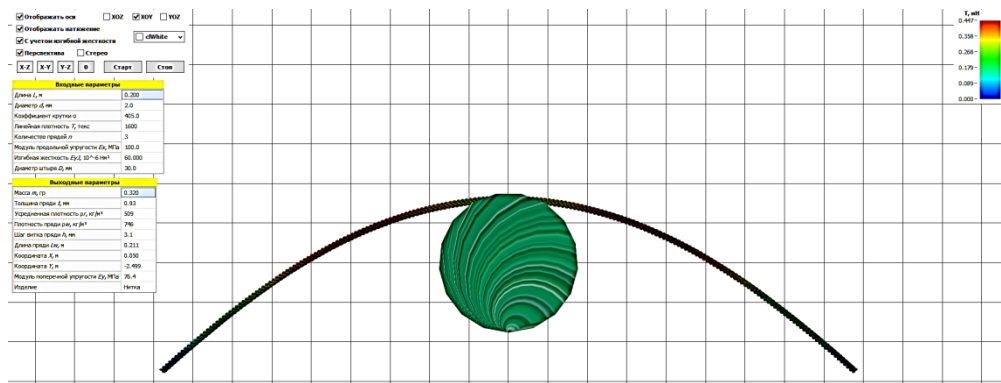


Рис. 5 Перспектива X-Y

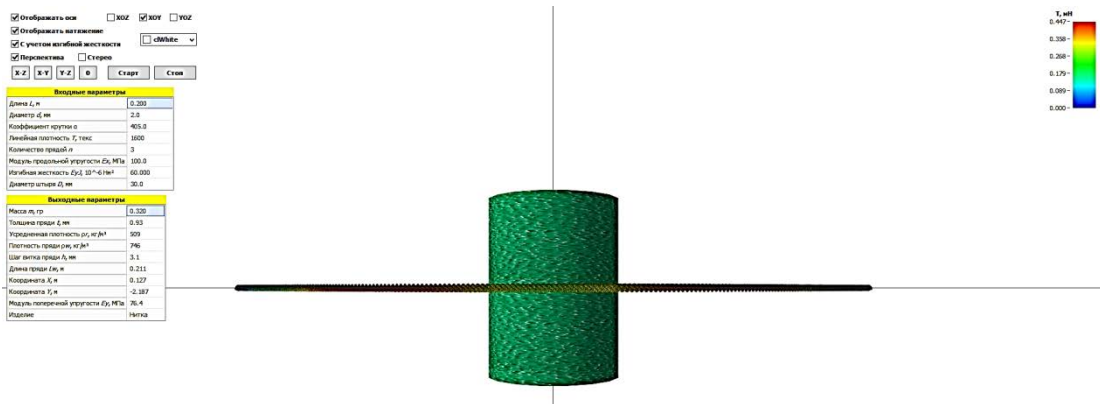


Рис. 6 Перспектива X-Z

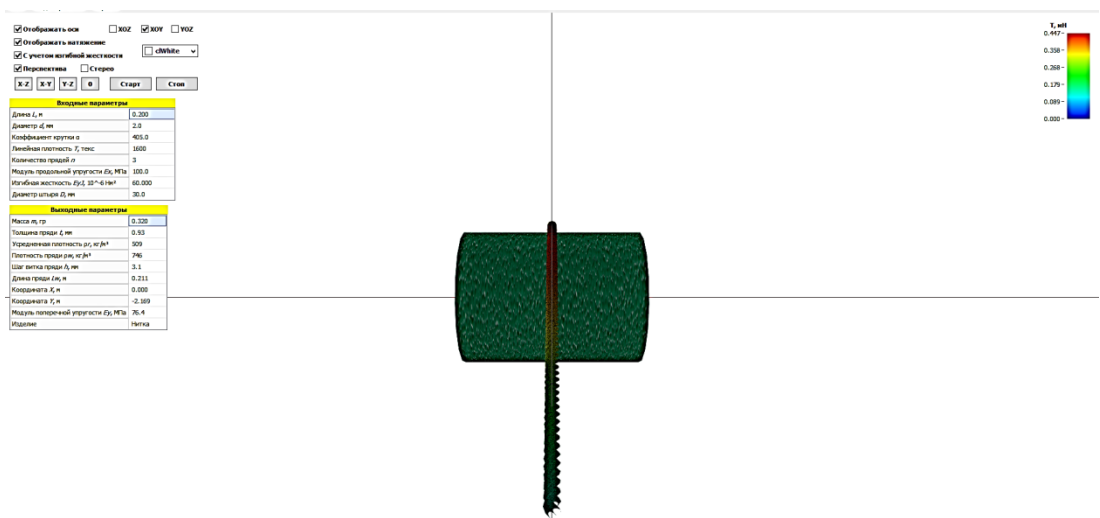


Рис. 7 Перспектива Y-Z

Также таблица (рис.4) позволяет осуществлять моделирование изгиба с учетом изгибной жесткости и без нее (рис. 8).

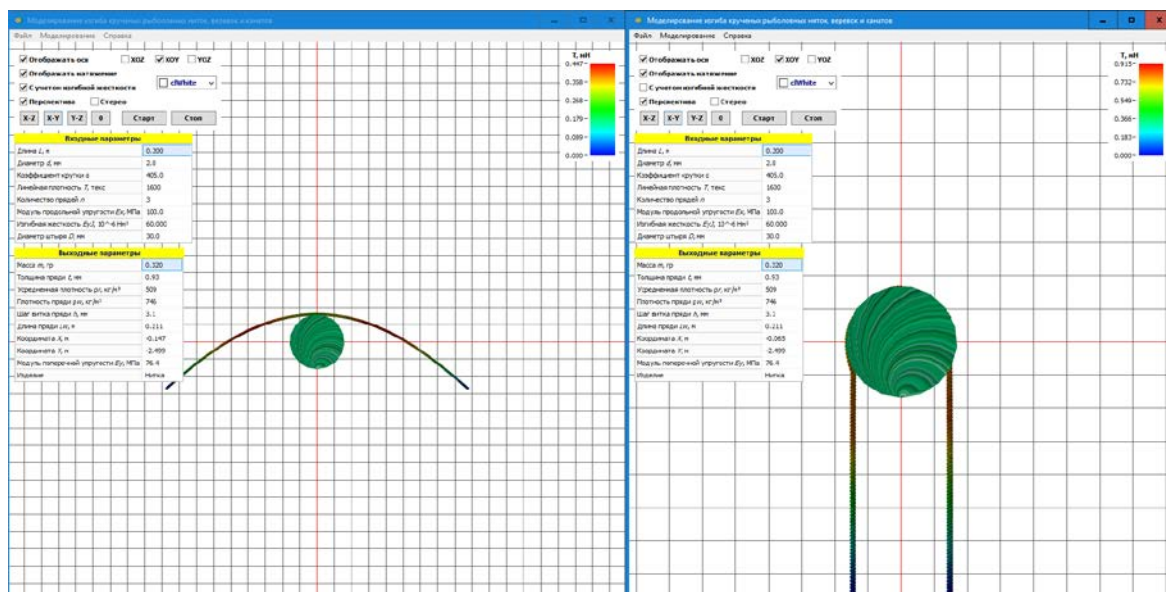


Рис. 8. Образец ($d=2\text{мм}$ на $D=30\text{мм}$ $l=0,2\text{м}$) в первом случае с учетом изгибной жесткости, во втором – без учета изгибной жесткости

Во время моделирования на графике схематично отображается натяжение в ветвях изделия, цветом соответствующих отрезков на схеме (рис. 9).

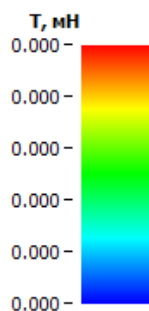


Рис. 9. Спектр силы натяжения

Цветовая школа HSV, расположена в правом верхнем углу страницы.

Материалы исследования

Для сопоставления результатов численных экспериментов с натурными, мы воспользовались данными экспериментов по исследованию EJ, выполненного в 2019 г. на кафедре промышленного рыболовства, с нитевидными изделиями (НИ) из различного синтетического сырья часть из них представлены в таблице 2.

Экспериментальные данные, часть из которых представлены в таблице 2 занесены на координатные плоскости для нитевидных изделий из полиамида, различного диаметра и длины от значения EJ определенной на штырях диаметром D=2,0 мм, 6 мм и 10 мм для ПА.

Необходимо отметить, что сопоставлялись как силовые, так и геометрические характеристики.

Характеристики двух образцов приведены в таблице 1. Результаты натуральных экспериментов по образцам приведены в таблице 2.

Таблица 1

Экспериментальные значения изгибной жесткости EJ НИ

Образец	Длина образца l_m , м	Масса образца m_m , кг	EJ * 10 ⁻⁶ Нм ²		
			Диаметр штыря D, мм		
			2,0	6,0	10,0
ПА d = 1,1 мм	0,08	0,04	14	13	5
	0,1	0,05	24	17	6
	0,12	0,06	31	21	12
	0,16	0,08	117	41	19
	0,2	0,1	173	41	24
	0,24	0,12	362	98	43
ПА d = 2 мм	0,08	0,13	79	132	66
	0,1	0,16	177	160	82
	0,12	0,19	319	-	104
	0,16	0,26	1087	179	108
	0,2	0,32	1125	255	228
	0,24	0,38	2068	375	277
ПА d = 3 мм	0,08	0,3	250	139	-
	0,1	0,38	571	159	-
	0,12	0,45	797	326	243
	0,16	0,6	1055	365	258
	0,2	0,75	1557	585	297
	0,24	0,9	3188	940	483
ПА d = 4 мм	0,08	0,5	-	-	-
	0,1	0,63	-	-	334
	0,12	0,75	1202	137	348
	0,16	1	1696	631	355
	0,2	1,25	2160	714	719
	0,24	1,5	5499	1823	962

Так как установлено, что основным - главным параметром КВИ обычно является диаметр, то рассмотрим на его примере изменение модуля поперечной упругости и EJ. Для этого сведем Входные и Выходные данные численных экспериментов в таблицу 2 для значения диаметра НИ d=2 и 4 мм и покажем его на штыре D=10мм.

Таблица 2

Данные численных экспериментов

ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ												
Диаметр штыря D,мм	10											
Длина L,м	0.08	0.1	0.12	0.16	0.2	0.24	0.08	0.1	0.12	0.16	0.2	0.24
Диаметр d,мм	2						4					
Коэффициент крутки a	405,06						525,38					
Линейная плотность T, текс	1600						6250					
Количество прядей n												
Изгибная жесткость EJ *10 ^{^(-6)} , Нм ^{^2}	65,86	82,07	153,6	108,1	228,4	277	-	334,5	347,6	354,7	719,5	961,5
ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ												
Масса m, гр	0,128	0,16	0,192	0,256	0,32	0,384	0,5	0,625	0,75	1	1,25	1,5
Толщина пряди t,мм	0,93						1,86					
Усредненная плотность	509						497					
Плотность пряди	746						702					
Шаг витка пряди	3,1						4,8					
Длина пряди	0,085	0,106	0,127	0,169	0,211	0,254	0,088	0,11	0,132	0,175	0,219	0,263
Модуль поперечной упругости	83,9	104,5	195,6	137,6	290,8	352,7	-	26,6	29,3	28,2	57,3	76,5

Необходимо отметить, что при больших и близких к разрывам нагрузках, а также при значительных изгибах изделий увеличивается погрешность результатов в следствии их нелинейной природы.

На рисунке 10 показана форма образца - ПА d=2мм на D=10мм l=0,2м, а на рисунке 11 - ПА d=4мм на D=10мм l=0,2м при натурном и при численном эксперименте.

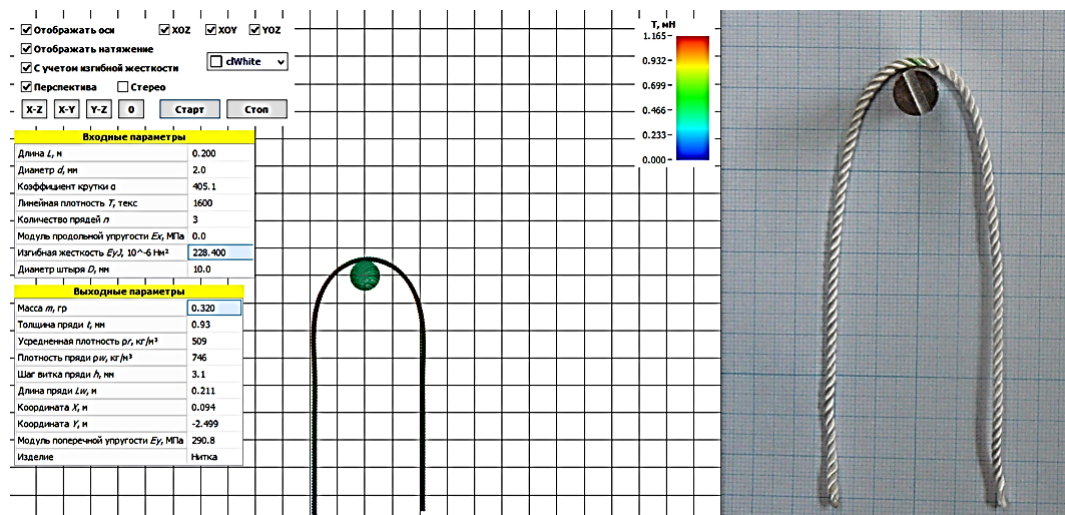


Рис. 10 Пример изогнутости образца (ПА $d=2$ мм на $D=10$ мм $l=0,2$ м) при численном и натурном эксперименте

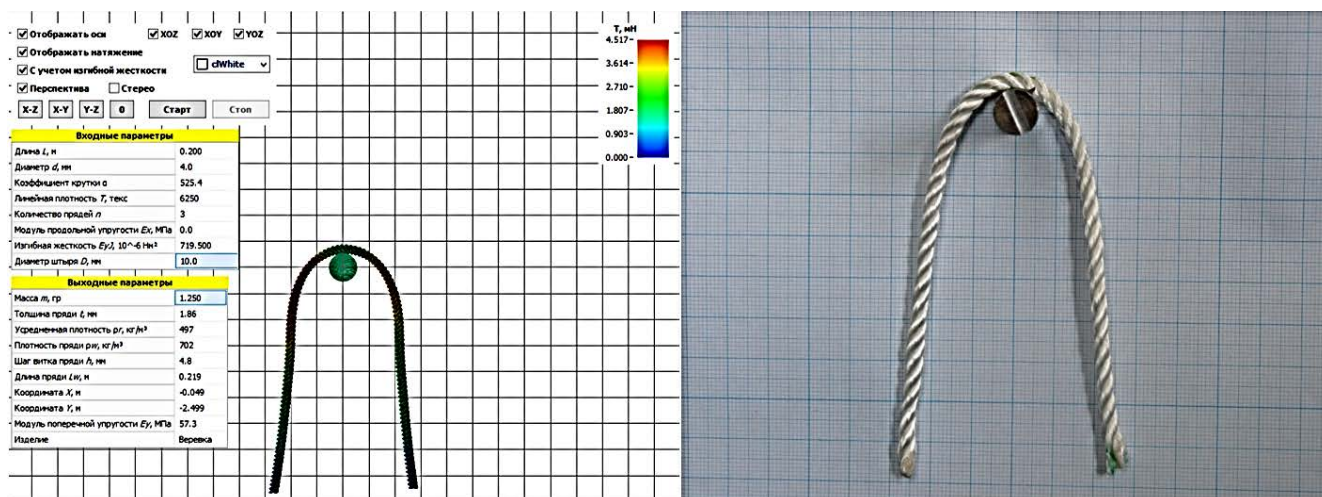


Рис. 11 Пример изогнутости образца (ПА $d=4$ мм на $D=10$ мм $l=0,2$ м) при численном и натурном эксперименте

При численных экспериментах цветами обозначены силы напряжений в нитке согласно цветовой шкале.

Заключение

В заключении необходимо отметить, что при совмещении программы «Моделирование изгиба крученых рыболовных ниток, веревок и канатов» и данных экспериментов по исследованию E_I , выполненного в 2019 г. на кафедре промышленного рыболовства, с нитевидными изделиями из различного синтетического сырья получается общая методология прогнозирования жесткости рыболовных крученых изделий, основанная на принципах математического моделирования с учетом изменяющейся изгибной жесткости изделий.

Данная методология прогнозирования подходит для реализации на ее основании имитационных моделей для задач предварительного расчета геометрических характеристик КВИ на современных ЭВМ широкого применения. Вследствие чего проведенное исследование диктует необходимость дальнейшего изучения изгибной и продольной жесткости крученых рыболовных изделий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области в рамках научного проекта № 19-48-390004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние жесткости сетного полотна на форму рыболовной сети в потоке / Б.И. Герман. // Сборник трудов кафедры промышленного рыболовства, Калининград. Вып. 62. - 1977. - С. 116-120.
2. Жесткость системы при задеве трала/ В.Н. Стрекалова. // Сборник трудов кафедры промышленного рыболовства, Калининград. Вып. XXI. - 1969. - С. 163-168.
3. Чаюн, И.М., Непомнящий А.В., Чаюн, М.И. Связь изгибной жесткости подъемного кабель-каната с его деформированно-напряженным состоянием// Hebezeuge und
4. Романова Н. М., Устинов Ю.А. Построение новой теории изгиба канатов // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. - 2009. - № 2. - С. 25–28. - 13.
5. Кошкин А. П., Трифанов Г.Д. Канаты для подъемных установок: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, - 2014. - 107 с.
6. Недоступ А. А., Ражев А.О., Коротков В. К. Моделирование напряжений в жестких сетных конструкциях методом конечных элементов // Морские интеллектуальные технологии. -2018. - № 4 (42). - Т. 4. - С. 259–264.
7. Критерии изгибной жесткости сетеснастных материалов при моделировании орудий лова Герман, Б.И., Фридман, А.Л., Юпик, В.Е. / Сборник трудов кафедры промышленного рыболовства, Калининград. Вып. 65. - 1977. - С. 64-69.
8. О моделировании упругости канатов в динамических рыболовных системах В.Н. Стрекалова, А.Л. Фридман. / Сборник трудов кафедры промышленного рыболовства, Калининград. Вып. 65. - 1977. - С. 59-63.
9. Расчет прогиба композитного ваера численным методом точечных масс при компьютерном моделировании / Недоступ А.А., Ражев А.О., Наумов В.А., Дятченко С.В., Коновалова К.В., Соколова Е.В. // Морские интеллектуальные технологии. - 2020. - Т. 1. - № 2. - С. 210–215.
10. Недоступ А.А., Коновалова К.В., Насенков П.В. Обоснование правил подобия изгибной жесткости рыболовных крученых изделий // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. - 2020. - № 1. - С. 77-85
11. Относительная жесткость рыболовных крученых изделий / Недоступ А.А., Коновалова К.В., Насенков П.В., Ражев А.О., Альтшуль А.Б., Федоров С.В. // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. - 2020. - № 1. - С. 46-60
12. Ильский А. Л. Расчет и конструирование бурового оборудования и инструмента М.: Гостоптехиздат, - 2004. - 636 с.
13. Соколов Ю. Ф., Пахнов М. Н., Воцанкин А. И. Методика оценки жесткости канатов // Рыбное хозяйство. - 1987. - №2. - С. 58-60.

FORECASTING BENDING RIGIDITY AND TRANSVERSE RIGIDITY OF FISHING TURNED FABRIC

Konovalova Karina Vitalievna, undergraduate

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russian Federation, e-mail: karina.konovalova@klgtu.ru

The article discusses the problem of forecasting fishing twisted thread-like fabrics under the action of a bending moment. In this work, a computer program "Modeling the bending of twisted fishing threads, ropes and ropes" is used, on the basis of which the results of bending modeling are presented, illustrating the stress flowing in the fabric, taking into account the bending stiffness. To assess the reliability of the results, a comparison is made of the main physicomechanical and structural properties of fabrics with known data.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЫСЛА ТРЕСКИ В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ

Лесникова Елена Геннадьевна, канд. биол. наук,
ст. преподаватель кафедры промышленного рыболовства
Журавлева Анна Дмитриевна, студентка кафедры промышленного рыболовства

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: elena.lesnikova@mail.ru; anna0411.d@mail.ru

Целью данных исследований является оценка эффективности промысла трески в акватории Балтийского моря.

Научная новизна заключается в том, что в результате проделанной работы была подсчитана рентабельность работы нескольких судов за период 2015-2018 гг. За последние годы не было произведено расчёта таких показателей.

Введение

Многие десятилетия промысел трески ведется очень активно в акватории Балтийского моря. А также идет освоение выделенных квот на лов данного объекта. Ловом трески в Балтике занимается более 40 рыбодобывающих компаний. Причем одни компании осваивают квоты практически целиком (на 90%). Другие же не осваивают и на 20%.

Цель исследований

Освоение квот рыбодобывающими компаниями Калининградской области по треске в уловах резко колебалось в период с 2015 до 2018гг. Именно поэтому назрела необходимость оценки промысла данного объекта с экономической точки зрения и, соответственно, расчета рентабельности работы некоторых рыбодобывающих компаний.

Поэтому, целью нашей работы явилось оценить эффективность промысла трески в данной акватории Балтийского моря.

Чтобы достичь данную цель, нами были определены следующие задачи:

- провести анализ выборки судовых суточных донесений (ССД);
 - оценить степень освоения квот различными рыбодобывающими кампаниями;
 - рассчитать рентабельность работы некоторых компаний;
- произвести SWOT анализ.

Основные показатели, влияющие на производительность судов

Одним из основных и очень важных эксплуатационных показателей, определенно влияющим на производственные показатели работы судов - это степень использования количества времени в году и, соответственно, режим работы судна и орудий лова [1].

Степень использования годового календарного времени рассчитывается по формуле (1):

$$T_{\text{общ.к}} = T_{\text{экспл.}} + T_{\text{внеэк.}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{общ.к}}$ – календарное время судна, сут;

$T_{\text{экспл}}$ – эксплуатационный период, сут.;

$T_{\text{внеэк.}}$ – внеэксплуатационный период (ремонт, отстой, консервация и т.д.).

Стандартный расчет эксплуатационного периода производится по следующей формуле (2):

$$T_{\text{экспл}} = \sum t_{\text{ч}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{ч}}$ – время, необходимое на один рейсообразот, сут.

Обычно одну запись в ССД принимаем за 1 траление и поэтому учитываем, как единственное на промысловые сутки. Таким образом, получают данные: по количеству календарных судов-суток промысла и судов-суток лова в году.

К еще не менее важному показателю можно отнести общее время, которое необходимо судну для промысла. Данный показатель зависит от некоторых факторов: во-первых, задания, определенного для конкретного промысла, во-вторых, организационная составляющая промысла, в-третьи, типовых рейсовых режимов работы судов и т.д.

Формула для расчета представлена ниже:

$$t_{\text{пр}} = t_{\text{л}} + t_{\text{п.п}} + t_{\text{г.м}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{л}}$ – время, используемое на лов;

$t_{\text{п.п}}$ – время, необходимое для переходов к базе, чтобы сдать сырца или полуфабриката;

$t_{\text{г.м}}$ – время, необходимое на производство различных грузовых операций в море.

Производственный цикл, в который включен весь спектр работ для конкретного судна, и есть рейсооборот. Одной из характеристик рейсооборота является промысловый рейс. Он включает в себя такие операции как: грузовые, вспомогательные и различные обслуживающие в период нахождения судна в порту. Сюда же относятся переходы, которые осуществляет судно на промысел и обратно, сам промысел, выпуск продукции и ее доставку в пункт назначения.

Эффективность использования промыслового времени добывающих судов зависит от длительности нахождения судна на лову.

Например, зная число циклов работы с орудиями лова и, соответственно, средние показатели вылова рыбы сырца за один цикл, можно определить среднесуточный вылов промыслового судна по формуле (4):

$$V_c = n_{\text{ц.л}} \times q, \quad (4)$$

где V_c – вылов за сутки лова;

q – средний вылов рыбы сырца за одно траление

Также, общий годовой вылов рассчитывается по формуле (5).

$$\sum_{i=1}^n Q_{\text{вылов}} = \sum q \times t_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где Q – вылов рыбы сырца в определенный год, т;

q – суточная норма вылова на промысле, т;

$t_{\text{пр}}$ – продолжительность промыслового времени, сут.

Расчет выручки проводится по формуле (6):

$$P_t = \sum Q_i \times C_i, \quad (6)$$

где: P_t – полезный результат за t-период (рейс, год) в стоимостном выражении;

Q_i – объем вылова (выпуска), т;

C_i – усредненная оптовая цена выловленной продукции, в руб;

I – ассортимент рыбопродукции.

Заработная плата рассчитывается по формуле (7).

$$\sum Z_{\text{з.п}} = Z_{\text{осн.}} + Z_{\text{доп}} + N_{\text{начисл на з/п}}, \quad (7)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная зарплата экипажа, которая зависит от определенной системы оплаты труда, численности экипажа, режима работы судна и полезного результата.

Например, на переходе или стоянке в порту будет действовать повременная оплата труда, соответственно с должностным окладам и доплатами за переработку нормативного рабочего времени для тех лиц, которые работают вахтовым методом по восемь часов (15%).

В период всего промысла существует сдельная форма оплаты по определенным расценкам, или же повременно, согласно должностным окладам и премиям, сюда же относятся все виды иных доплат, предусмотренных за определенный вид работ [2].

В последнее время используется долевая система оплаты труда. Такая система оплаты не только усиливает заинтересованность плавсостава в конечных результатах труда, но и в целом упрощает систему начисления заработной платы.

Формирование основной заработной платы производится по нормативу (доле) в % от общей стоимости товарной продукции [3].

Данный норматив можно определить по формуле (8).

$$\alpha_{з.п} = \frac{\Sigma T_{\phi} + D_{н.в} + D_{н} + D_{у.т} + D_{п} + D_{р.к}}{\Sigma Q_i \times C_i}, \quad (8)$$

где $\alpha_{з.п}$ - норматив заработной платы (доля) в % от товарной продукции;

T_{ϕ} – суточный тарифный фонд экипажа, руб.;

$D_{н.в.}$ – суточные доплаты за переработанные часы от нормативного рабочего времени (в среднем по судну), руб.;

$D_{н.}$ – дополнительная оплата за выход в ночное время, руб. К ночному относится время с 22:00 до 6:00. Данная выплата соответствует 35% от тарифа за каждый час работы;

$D_{у.т}$ – доплаты за вредность условий работы (в среднем по всему судозападу за сутки), руб. Колеблется от 4 до 12% от основного тарифа;

$D_{п}$ – премия за 100% выполненное задание, возможно до 20% к сумме предшествующих величин;

$D_{р.к}$ – доплаты по районному коэффициенту, руб. (Обычно 0,7 – в летний период и 0,8 – в зимний). Начисляется дополнительно ко всей сумме;

Q_i – количество прогнозируемого выпуска продукции, т.е. в i -м видовом составе и ассортименте;

C – оптово-отпускная цена за 1 т вырабатываемой продукции.

Величина $\Sigma Q_i C_i$ приводится также по суточному значению.

Дополнительная заработная плата может быть начислена в пределах от 11 до 14% от основной зарплаты. К дополнительной заработной плате относится, например, отпуск.

Еще одним начислением является единый социальный налог (Н) – 26% от заработной платы.

Рентабельность (от нем. *Rentabel* – доходный, полезный, прибыльный), относительный показатель экономической эффективности [4].

Рентабельность показывает насколько эффективно используются ресурсы: материальные, трудовые и денежные, сюда же относятся и природные богатства.

Коэффициент рентабельности рассчитывается как отношение прибыли к активам, ресурсам или потокам, её формирующим. Может выражаться как в прибыли на единицу вложенных средств, так и в прибыли, которую несёт в себе каждая полученная денежная единица [4].

Рассчитывается по формуле (9):

$$P = \frac{\Pi}{\Sigma Z_{\text{тек.}}} \times 100\%, \quad (9)$$

где P – рентабельность, в %;

Π – прибыль среднегодовая, руб.;

$\Sigma Z_{\text{тек.}}$ – текущие затраты, руб.

Рентабельность по капитальным затратам вычисляется по формуле (10):

$$P = \left(\frac{\Pi}{K} \right) \times 100\%, \quad (10)$$

где K – капитальные затраты (стоимость судна), руб.

Общая рентабельность вычисляется по формуле (11):

$$P = \left(\frac{\Pi}{K+O} \right) \times 100\%, \quad (11)$$

где O – оборотные фонды (стоимость орудий лова), руб.

Объем капитальных затрат (K) или стоимость судна, был принят, по оценочной характеристике судна из интернет ресурса. Для того, чтобы рассчитать стоимость судна, необходимо знать курс доллара на определенный год и конвертировать стоимость судна из доллара в рубли. Цена

судна по интернет источникам в среднем составило 180 000 USD. Таким образом, при курсе доллара 62,93 стоимость судна составит 11 327 400,00 руб.

Точка безубыточности определяет, каким должен быть объем продаж для того, чтобы предприятие могло покрыть все свои расходы, не получая прибыли. Степень превышения объемов продаж над точкой безубыточности определяет запас устойчивости (запас прочности) предприятия [5].

Для расчета данного показателя применяем формулу (12). Расчет ведется в денежном выражении [6]:

$$T_{бд} = \frac{B \times Z_{пост}}{B - Z_{пер}} \quad (12)$$

где B – выручка от продаж;

$Z_{пост}$ – постоянные затраты;

$Z_{пер}$ – переменные затраты.

В таб.1 показана рассчитанная точка безубыточности предприятий за 4 года.

Таблица 1

Точки безубыточности предприятий по годам, 2015-2018гг.

Год	МРТП «Залесье»			
	2015	2016	2017	2018
Точка безубыточности, руб.	12 015 070,00	12 826 157,87	13 605 432,58	15 289 858,32
Год	МРТП «Матросово»			
	2015	2016	2017	2018
Точка безубыточности, руб.	12 127 800,67	12 931 986,62	13 952 988,65	15 110 935,62

Таким образом, исходя из табличных данных, можно сделать вывод о том, что точка безубыточности меняется пропорционально обороту компании.

Также по данным таблицы 1 можно безошибочно сказать о стабильности нашей компании.

SWOT анализ изображен в таб. 2.

Таблица 2

Матрица SWOT

		Сильные стороны	Слабые стороны
		<ul style="list-style-type: none"> - ориентирование промысла на более ценные виды рыб; - опыт промысла; - большая емкость внутреннего рынка; - большой спрос на рыбопродукцию, при условии низкой стоимости за килограмм 	<ul style="list-style-type: none"> - изношенность судов; - растущие издержки промысла; - устаревшие технологии, применяемые для промысла; - высокая конкурентность; - маленькая площадь Балтийского моря со стороны РФ
Возможности		Стратегия при сопоставлении Сильных сторон и Возможностей	Стратегия при сопоставлении Слабых сторон и Возможностей
			<ul style="list-style-type: none"> - необходимость в покупке новых судов; - уменьшение издержек промысла; - аренда судов
Угрозы	<ul style="list-style-type: none"> - сокращение промыслового размера популяции объекта лова; - уменьшение численности популяции вылавливаемого объекта; - изменение погодных условий, из-за которых простаивает судно в порту; - неисправность судна 	Стратегия при сопоставлении Сильных сторон и Угроз	Стратегия при сопоставлении Слабых сторон и Угроз
		<ul style="list-style-type: none"> - необходимо в более полном объеме осваивать квоту осваивать квоту; - импортозамещение; - разработка специальных государственных программ, нацеленных на поддержание рыбохозяйственного комплекса в России 	<ul style="list-style-type: none"> - уход с промысла

Заключение

В подведении итогов проделанных расчетов, связанных с затратами, рентабельностью работы данных судов, можно сказать, что компания не работает себе в убыток. На рынке сбыта продукция компании пользуется, определенно, хорошим спросом, что подтверждается продукцией определенных торговых точек. Несмотря на это, при подведении итогов в виде SWOT анализа, были определены как сильные, так и слабые стороны промысла в Балтийском море. В связи с этим была определена дальнейшая стратегия, направленная на развитие промысла по данному виду промыслового объекта.

Для освоения квот в более полном объеме необходимо, в первую очередь, провести модернизацию всего рыбодобывающего флота. Главным образом, заменить старые суда на более новые, модернизированные. Только тогда промысел будет проходить на более высоком технологическом уровне, и выделенные квоты для той или иной организации будут осваиваться практически целиком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанова Л.А. Экономическое обоснование при проектировании техники промышленного рыболовства и организации промысла/ Л.А. Степанова – Калининград, 2005г. (дата обращения: 03.05.2019).
2. Уровень Инфляции в России (по годам) [Электронный ресурс]// URL: <http://bankirsha.com/uroven-inflyacii-v-rossiyskoj-federacii-po-godam.html>.
3. Семерка. Российский правовой портал. [Электронный ресурс] // Приказ Росрыболовства от 05.08.2010 № 676 / «О внесении изменений в Минимальный состав экипажа судна рыбопромыслового флота Российской Федерации, утвержденный Приказом Федерального агентства по рыболовству от 21 сентября 2009 г. №836» / Текст правового акта по состоянию на август 2012 года. URL: <http://7law.info/zakonodatelstvo/legal6p/n577.htm>.
4. Википедия [Электронный ресурс] // Рентабельность URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Рентабельность>
5. Расчет точки безубыточности [Электронный ресурс] URL: <http://openbusiness.ru/raschet-tochki-bezubytochnosti.htm>
6. Федеральное агентство по рыболовству [Электронный ресурс] // Обзор правил рыболовства в части отечественного промысла трески западной части Балтийского моря URL:<http://fish.gov.ru/component/tags/tag/pravila-rybolovstva>.

SOME ASPECTS OF THE EFFICIENCY OF COD FISHING IN THE BALTIC SEA

Lesnikova Elena Gennadyevna, Candidate of Biology Sciences
Senior Lecturer of Industrial Fishing
Zhuravleva Anna Dmitrievna, student

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russia, e-mail: elena.lesnikova@mail.ru; anna0411.d@mail.ru

The purpose of these studies is to assess the state and prospects of cod fishing in this area.

The scientific novelty lies in the fact that the profitability of several vessels for the period 2015-2018 was calculated. An economic assessment of the activity of the company that owns the data of the court is given. Such indicators have not been calculated in the past few years.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА НЕВОДОВЫБОРОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Мартынов Алексей Николаевич, аспирант
Недоступ Александр Алексеевич, канд. техн. наук, доцент,
заведующий кафедрой промышленного рыболовства

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: ajiex94@gmail.com; nedostup@klgtu.ru

В статье выполнен анализ методов расчета неводовыборочных комплексов, точная методика которых приведет к увеличению показателя конструктивной надежности, закладываемом при проектировании механизмов и снижению количества отказов в процессе эксплуатации. Данная работа показывает актуальность исследований в области фрикционного взаимодействия в системе «орудие рыболовства – тяговый барабан» и тяговых характеристик неводовыборочных промысловых механизмов.

Введение

Операция по выборке невода относится к наиболее трудоемким и продолжительным, занимая более 40% времени цикла лова. Неводовыборочный комплекс (НВК) является вспомогательным технологическим оборудованием судна, состоящим из нескольких неводовыборочных машин, работающих совместно, техническое состояние которого, непосредственно влияет на его безопасную эксплуатацию. Согласно статистике, около 40% всех отказов по судну приходится на НВК. Этим объясняется вызываемый большой интерес к проблемам его надежности.

Надежность НВК – способность неводовыборочного комплекса обеспечивать эффективную и безопасную выборку невода, сохраняя при этом установленные параметры работы при соблюдении регламентированных требований к эксплуатации, техническому обслуживанию, ремонтам и хранению. Надежность закладывается при проектировании, обеспечивается при изготовлении и реализуется при эксплуатации [1, с. 15]. Она обеспечивается прежде всего за счет приведения конструктивных решений в соответствии с нагрузками, характером взаимодействия звеньев, возможностями материалов. Современное качество материалов и способы изготовления механизмов дают возможность конструировать качественные и надежные устройства, при условии, что во время проектирования будут учтены все необходимые требования и критерии этого устройства. Это показывает актуальность проблемы оптимального выбора критериев неводовыборочного комплекса.

Значимость проведения исследований в области модернизации способов добычи и в частности, обеспечения безопасности и эффективности работы промысловых судов подтверждается рядом постановлений Федерального агентства по рыболовству Российской Федерации.

Актуальность работ по совершенствованию методов расчета НВК связана с широким использованием метода лова кошельковым неводом [2, с. 33-34]. В некоторых странах и районах мирового океана лов кошельковым неводом составляет серьезную конкуренцию тралам. Он дает примерно пятую часть мирового улова и занимает второе место после тралового лова. Кошельковый лов наиболее развит в Японии, США, Перу, Норвегии, Исландии, Канаде и т.д. В России кошельковыми неводами вылавливают до 15% от общей добычи рыбы. Преимущества кошелькового лова, такие как возможность механизации процессов лова и высокая уловистость, способствовали тому, что кошельковый невод занял прочное место в мировом промышленном рыболовстве.

Основным недостатком исследований в данной области является их прогностический характер, ошибки, связанные с оценкой динамических нагрузок, возникающих во время выборки невода (волнение и качка судна), остаются малоизученными. Это связано, в первую очередь с большим количеством факторов влияния, невозможности проведения достаточного количества натуральных экспериментов и сложностью вопроса теории работы и расчета неводовыборочных машин, из которых состоит НВК.

Основы теории работы и расчета неводовыборочных машин

Основы теории работы и расчета неводовыборочных машин были описаны в работах В.П. Карпенко и С.С. Торбана [3, с. 59-60, 4, с. 170-171].

Несмотря на широкое распространение различных неводовыборочных машин, до настоящего момента нет полной научно обоснованной методики их расчета.

Большинство машин и механизмов, предложенных для выборки кошельковых неводов, имеют в качестве рабочих органов фрикционные барабаны. Таким образом, несмотря на конструктивное различие машин, принцип их работы одинаков. Он состоит в том, что при огибании фрикционного барабана неводом возникает сила трения, из-за которой при вращении барабана происходит выборка невода. Обычно, когда рассматривают движение гибкой нити, ремня, транспортной ленты на шкиве (барабане) пользуются известным уравнением Эйлера. При рассмотрении тяги орудий лова при помощи фрикционных барабанов применяется это же уравнение с известными допущениями.

$$\frac{S_1}{S_2} = e^{\mu\alpha}, \quad (1)$$

где S_1 – сила набегающей ветви невода; S_2 – сила сбегающей ветви невода; μ – коэффициент трения; α – угол обхвата неводом барабана.

Для того, чтобы механизм для выборки невода работал нормально (без буксования), необходимо, чтобы соблюдалось условие $\frac{S_1}{S_2} < e^{\mu\alpha}$.

Из уравнения Эйлера видно, что соотношение сил на набегающей и сбегающей ветвях невода определяется величиной коэффициента трения μ и углом обхвата α неводом барабана.

Угол обхвата неводом барабана

В работе С.С. Торбана [4, с. 171-175] показано, от чего будет зависеть величина угла обхвата неводом барабана.

Уравнение, характеризующее работу одного фрикционного барабана (рис. 1а), остается правомерным для случая обхвата неводом двух, трех и многих барабанов.

На рис. 1б, изображена схема обхвата неводом двух барабанов. Для первого барабана можно написать

$$S_1 = S_2 e^{\mu\alpha_1}. \quad (2)$$

Для второго барабана уравнение Эйлера примет вид

$$S_2 = S_3 e^{\mu\alpha_2}. \quad (3)$$

Подставляя значение S_2 из уравнения (3) в уравнение (2), получим

$$S_1 = S_3 e^{\mu(\alpha_1 + \alpha_2)} = S_3 e^{\mu\alpha}, \quad (4)$$

где $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$

Аналогично для случая трех барабанов с углами обхвата $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ (рис. 1в)

$$S_1 = S_4 e^{\mu(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)} = S_4 e^{\mu\alpha}, \quad (5)$$

где $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$

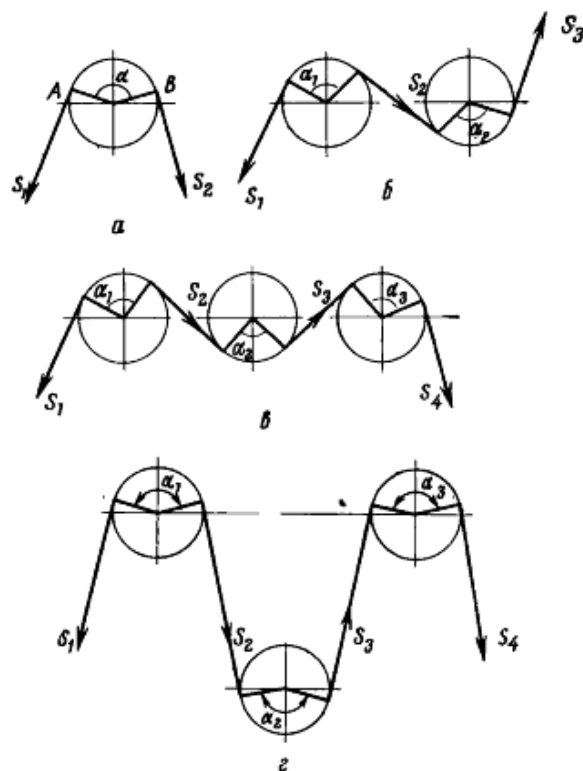


Рис. 1. Схема обхвата неводом барабанов: а – одного, б – двух, в – трёх, г – трёх со смещением одного относительно другого

Отсюда можно сделать вывод, что увеличение угла обхвата α жгутом невода рабочих барабанов связано в первую очередь с увеличением количества рабочих барабанов. Это приводит к более сложной, громоздкой конструкции машин, усложняет их техническую и промысловую эксплуатацию, требует больше места для установки. При всем при этом, значительно увеличивается тяговое усилие неводовыборочного механизма.

Необходимо учитывать, что при одном и том же количестве барабанов угол обхвата может отличаться. Это видно из сравнения угла обхвата неводом трех барабанов при различном их взаимном расположении. Очевидно, что при расположении барабанов, изображенном на рис. 1г угол обхвата α значительно больше, следовательно при прочих равных условиях тяговое усилие машины с таким расположением барабанов выше.

Так же угол обхвата неводом двух барабанов α зависит от расстояния между осями барабанов. Он увеличивается по мере уменьшения расстояния этого расстояния. Отсюда следует, что для увеличения тягового усилия машины с фрикционными барабанами надо стремиться расположить их как можно ближе друг к другу, на столько, на сколько могут позволить конструкция машины и размеры жгута невода для нормального его прохождения между барабанами.

На практике, механизмы фрикционного типа различной конструкции осуществляют выборку различных орудий рыболовства в интервале угла $40^\circ \leq \alpha \leq 1080^\circ$. В табл. 1 представлены наиболее распространенные из них.

Таблица 1

Значение углов обхвата некоторых неводовыборочных механизмов

№ п/п	Наименование механизма	Число рабочих барабанов	Угол обхвата, град
1	Машина конструкции Баранова	4	520-560
2	Машина «Гриплекс» (Норвегия)	3	350-450
3	Подвесная неводовыборочная машина (ПМВК)	1	140-160

При выборке кошелькового невода с помощью машины ПМВК и формирующего устройства угол обхвата имеет наибольшее значение в указанных пределах, а при выборке невода непосредственно из воды без этого – минимальное. В случае применения формирующего устройства, формиратель играет роль направляющего ролика. Следовательно, угол α можно увеличить не только установкой дополнительного барабана, но и путем применения свободно вращающегося направляющего ролика, однако его установка вызывает потери тягового усилия машины на преодоление трения в нем. Следовательно, установка направляющего ролика является целесообразной только в том случае, если дополнительный выигрыш тягового усилия от увеличения угла обхвата выше, чем потери на трение в нем.

Полагая, что потери от трения в ролике пропорциональны нормальному давлению со стороны невода, целесообразно размещать ролик не со стороны набегающей ветви, где усилие S_1 значительно, а со стороны сбегающей ветви, в которой действует усилие S_2 .

Скольжение жгута невода на барабане

При рассмотрении сил, действующих в системе жгут невода – барабан, полагали, что сила трения проявляется по всей дуге контакта жгута с барабаном, характеризуемой углом обхвата α . Сила трения удерживает невод на поверхности вращающегося барабана и обеспечивает их совместное перемещение без буксования (скольжения). Такое взаимодействие жгута невода и неводо-выборочной машины соответствует условию предварительного смещения, которое является начальной фазой трения скольжения. Предварительное смещение характеризуется неполной силой трения $F_{\text{тнп}}$, которая превосходит сдвигающую силу (окружную силу), создаваемую на поверхности тягового барабана приводом промышленного механизма. Максимальная величина неполной силы трения $F_{\text{тнп}}$ – сила трения покоя $F_{\text{п}}$ и ей соответствует статический коэффициент трения $\mu_{\text{ст}}$.

Опыт эксплуатации механизмов фрикционного типа (МФТ) показывает, что процесс фрикционного взаимодействия с орудиями рыболовства не всегда протекает устойчиво, сдвигающая сила может превзойти силу трения покоя, и тогда может проявляться буксование (скольжение) жгута невода по поверхности тягового барабана.

При исследовании аналогичных условий работы ремённых передач Н.Е. Жуковским было сделано предположение о том, что предварительное смещение реализуется не по всей дуге контакта. Дуга контакта состоит из дуги упругого скольжения ремня по поверхности блока и дуги их относительного покоя.

Таким образом, разделение дуги охвата на дугу покоя и дугу скольжения обеспечивает одновременно решение двух задач:

- на дуге покоя с центральным углом $\alpha_{\text{п}}$ жгут невода удерживается на поверхности вращающегося тягового барабана без проскальзывания;
- на дуге скольжения с центральным углом $\alpha_{\text{ск}}$ обеспечивается (реализуется) тяговое усилие механизма фрикционного типа.

Основной причиной проскальзывания является изменение характеристик фрикционного взаимодействия орудия рыболовства с тяговым барабаном: статического коэффициента трения, дуги покоя, дуги скольжения и нормального давления на тяговый барабан, создаваемого орудием рыболовства.

Исследованиями фрикционного взаимодействия орудия рыболовства и механизма фрикционного типа занимались Баранов Ю.Б., Глазунов О.И., Гройсман М.Я., Гиренко В.Н., Торбан С.С., Полуляк С.И., Кириллов В.М., Курапцев П.А., Гукало Я.М., Розенштейн М.М., Фёдоров С.В., Зеброва Е.М., Суконнов А.В. и др.

В настоящее время изучение этого вопроса активно продолжается в Калининградском Государственном Техническом Университете на кафедре Промышленного рыболовства. В работах Орлова Е.К. и Недоступа А.А. были проведены различные исследования статического коэффициента трения.

Так, например в одной из работ с помощью экспериментальной установки, изображенной на рис. 2 проводились исследования по изучению статического коэффициента трения рыболовных канатно-веревочных изделий (КВИ) на стальном барабане механизма фрикционного типа (МФТ) [5, с. 406-410].

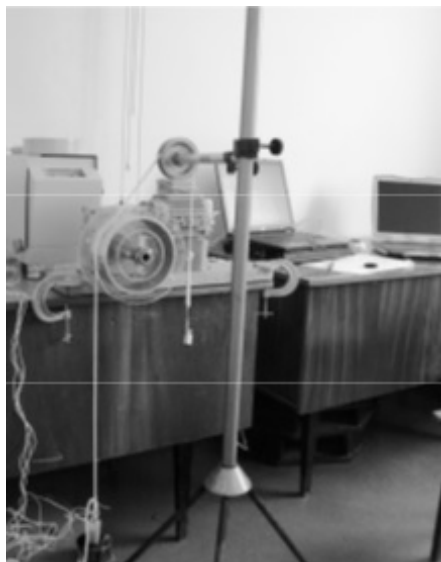


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Эксперименты проводились с несколькими образцами КВИ при угле обхвата барабана МФТ $40^\circ \leq \alpha \leq 720^\circ$ и угловой скорости барабана $\omega = 0,43\text{с}^{-1}$. Основное требование, которое было поставлено для каждого эксперимента, это воспроизведение одинакового давления, т.е. $p = \text{const}$. При этом давление рассматривалось как:

$$p = \frac{N}{An} = q/d, \quad (6)$$

где $q = N/l$ – нормальная нагрузка, приходящаяся на единицу длины КВИ в пределах дуги контакта; N – нормальная нагрузка; l – длина контакта дуги КВИ с барабаном МФТ; $An = ld$ – номинальная площади контакта; d – диаметр КВИ.

Для экспериментов с образцами КВИ был выбран диапазон значений $3468 \leq p \leq 25500$ Н/м², полученный в результате экспериментов с одним из образцов.

В ходе эксперимента были зафиксированы максимальные значения натяжения набегающей ветви ($S_{1\text{max}}$) для каждого образца КВИ. По полученным данным с использованием формулы (7) выполнялся расчет статического коэффициента трения.

$$\mu_{\text{ст}} = (S_{1\text{max}} - S_2)/(S_{1\text{max}} + S_2), \quad (7)$$

где $S_{1\text{max}}$ – предельное значения натяжения набегающей ветви; S_2 – натяжение сбегающей ветви.

Исходя из полученных экспериментальных данных, Орлов и Недоступ сделали следующие выводы: - статический коэффициент трения $\mu_{\text{ст}}$ зависит от отношения q/d .

Далее в ходе работы, в ходе исследований, авторы предлагают формулу (8) для расчета статического коэффициента трения капроновых крученых КВИ по стальной поверхности МФТ с учетом дуги охвата барабана МФТ α с точностью 95%.

$$\mu_{\text{ст}} = 0,6 \sqrt{\frac{(\zeta_1 - 1)}{\alpha}}, \quad (8)$$

где - $\zeta_1 = S_1/\Phi$ – напряжение в набегающей ветви; S_1 – натяжение набегающей ветви; Φ – площадь поперечного сечения КВИ.

Тяговый комплекс

В уравнении Эйлера $S_1 = S_2 e^{\mu\alpha}$ величина S_2 – усилие, прилагаемое к сбегающему концу невода [4, с. 233-236]. В общем виде натяжение, действующее на сбегающий конец невода, будет

$$S_2 = S_2' + S_2'' = pn + qH, \quad (9)$$

где p – среднее усилие, развиваемое одним рыбаком в процессе выборки кошелькового невода; n – число рыбаков, участвующих в процессе тяги сбегающего конца невода; q – вес каждого метра оснащенного кошелькового невода; H – расстояние от оси барабана до палубы.

При современных условиях механизации тяга невода происходит без участия ручного труда, следовательно $S_2' = pn = 0$.

С увеличением размеров кошельковых неводов возникает необходимость увеличения тягового усилия неводовыборочных машин. Для того, чтобы сохранить условия работы машины необходимо увеличить силу $S_2 = qH$. При этом искусственно увеличивать вес невода не целесообразно, q при этих условиях изменяется незначительно. Следовательно, остается возможность – значительно увеличить высоту подвески машины. На некоторых судах высота подвески достигает 18-20 м. Однако следует учитывать два фактора: во-первых, нельзя еще существенно увеличить высоту подвески машин, так как для этого нет соответствующих грузоподъемных средств, или они слишком громоздки, во-вторых, повышение высоты подвески обходится весьма дорого. Для поддержания остойчивости судна на заданном уровне укладывают большое количество балласта, что уменьшает полезную грузоподъемность судна.

В этих условиях возникла идея – заменить необходимый вес сбегающей ветви невода qH равнозначной силой S_2 , которую развивал бы какой-либо дополнительный механизм. В этом случае высота подвески выборочной машины уже не имеет существенного значения.

Из схемы (рис. 3) видно, что второй барабан развивает тяговое усилие S_2 , благодаря чему улучшаются условия тяги. При рассмотрении влияния угла обхвата на тяговые характеристики машины отмечалась большая роль второго, третьего и n -го барабанов. Но в том случае речь шла о многобарабанных машинах. Однако вовсе нет необходимости объединять барабаны одним приводом. Если второй барабан отделен от первого и каждый имеет самостоятельный привод, то такое сочетание неводовыборочных машин называется тяговым комплексом.

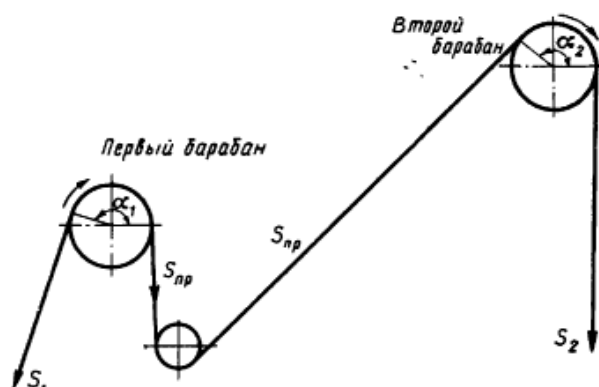


Рис. 3. Схема тягового комплекса

Рассмотрим схему работы двух неводовыборочных машин (рис. 3), имеющих индивидуальные приводы, и выявим основные данные для их расчета. На барабане первой машины угол обхвата α_1 , натяжение, действующее в набегающей ветви, S_1 , натяжение сбегающей ветви $S_{пр}$. На барабане второй неводовыборочной машины угол обхвата α_2 , натяжение набегающей ветви жгута $S_{пр}$, а сбегающей S_2 . Для этих условий можно записать

$$\frac{S_1}{S_{пр}} = e^{\mu\alpha_1}, \quad (10)$$

$$\frac{S_{пр}}{S_2} = e^{\mu\alpha_2}, \quad (11)$$

Из сопоставления этих формул следует, что нет необходимости размещать первую машину на большой высоте, поскольку усилие $S_{пр}$ на сбегающей ветви жгута после первой машины обеспечивается второй машиной. Поскольку $S_2 < S_{пр}$, то для нормальной работы второй машины достаточно, чтобы величина силы $S_2 = qH$ была небольшой, а поэтому вторую машину можно подвешивать на относительно небольшой высоте.

Как показали испытания тягового комплекса 2ПМВК-7 на РТ-212, при выборке кошелькового невода бывали случаи, когда вследствие уменьшения угла обхвата неводом первой машины (волнение, качка) нагрузка на второй машине резко возрастает, становится равной или превышает усилия тяги первой.

Интересны случаи, когда скорости тяги машин не равны между собой. Первый вариант, когда скорость тяги у первой машины выше, чем у второй, т.е. $v_1 > v_2$, и второй – когда скорость тяги у первой машины меньше, чем у второй, т.е. $v_1 < v_2$.

В первом случае $S_{\text{пр}} = qH$, т.е. нагрузка на сбегавшей ветви равна ее весу. Вторая машина подбирает невод с палубы судна и ее тяговое усилие в этом примере мало по сравнению с тяговым усилием первой машины, т.е. $P_1 > P_2$, следовательно $S_1 - S_{\text{пр}} > S_{\text{пр}} - S_2$. Обе машины работают не как тяговый комплекс, а отдельно и независимо одна от другой; вторая машина не способствует увеличению тягового усилия первой машины. На первой машине при этом жгут будет скорее всего пробуксовывать по барабану, т.к. натяжение сбегавшей ветви будет недостаточно из-за низкой высоты установки.

Второй случай – более сложный. Иногда для того, чтобы подобрать слабину или не допустить затягивание на нерабочий сектор барабана первой машины, форсируют скорость тяги второй машины. При этом происходит следующее: поскольку скорость тяги v_2 возросла, то натяжение в промежуточной ветви жгута достигает значения $S'_{\text{пр}} > S_{\text{пр}}$. Так как внешняя нагрузка S_1 остается постоянной, то передаваемое окружное усилие на рабочем барабане первой машины уменьшится, т.е. $P' > P$, поскольку $S_1 - S'_{\text{пр}} < S_1 - S_{\text{пр}}$. Уменьшится так же крутящий момент и мощность, необходимая для осуществления процесса тяги. На второй машине окружное усилие возрастает до величины $P' = S'_{\text{пр}} - S_2$, вследствие чего возрастают крутящий момент и мощность. Таким образом, увеличение скорости тяги второй машины вызывает перераспределение тягового усилия и мощности между машинами.

Выводы

Из проанализированной литературы [3-5] можно сделать выводы, что для обеспечения безотказной работы неводовыборочного комплекса, в зависимости от поставленной задачи (размер орудия лова, материал, из которого оно изготовлено и т.д.), необходимо, на этапе проектирования, учитывать огромное количество показателей механизмов, входящих в его состав (коэффициенты трения, углы обхвата барабанов и т.д.).

Таким образом, для обеспечения конструктивной надежности неводовыборочных комплексов необходима точная методика расчетов НВК в особенности, при влиянии динамического изменения нагрузки в процессе выборки. Поэтому исследования в области фрикционного взаимодействия в трибопаре «орудие рыболовства – тяговый барабан» и тяговых характеристик неводовыборочных промысловых механизмов являются актуальными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Детали машин основы конструирования: Учебное пособие / П.В. Гордин, Е.М. Росляков, В.И. Эвелеков. – СПб.: СЗТУ, 2006. – 186 с.
2. Ивановская А.В., Богатырева Е.В. Анализ факторов, влияющих на эффективность работы неводовыборочного комплекса // Современные проблемы теории машин – 2015. - №3 - С. 34–38.
3. Карпенко В.П., Торбан С.С. Механизация и автоматизация процессов промышленного рыболовства. – М.: Агропромиздат, 1990. – 464 с.
4. Торбан С.С. Промысловые механизмы для комплексной механизации кошелькового лова рыбы. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 384 с.
5. Недоступ А.А., Орлов Е.К. Исследование статического коэффициента трения рыболовных канатно-веревочных изделий на барабане механизма фрикционного типа // Трение и износ – 2010. – Т. 31. - №4. – С. 403-411.

ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATION OF NON-WATER-SAMPLING COMPLEXES

Martynov Alexey Nikolaevich, post-graduate student
Nedostup Aleksander Alekseevich, candidate of technical science, associate professor,
head of the industrial fisheries department;

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russia, e-mail: ajiex94@gmail.com; nedostup@klgtu.ru

In article the analysis of methods for calculating seine raising complexes has been made. Accurate methodic of these calculations will lead to an increase in the indicator of constructive reliability in the design stage of mechanisms and decrease the number of failures during exploitation. Also, this project show relevance of researches in area of friction interaction in the system "fishing gear – tractive drum" and traction characteristics of seine raising fishing mechanisms.

УДК 639.2.081.7

ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРЫВНОГО УСИЛИЯ И ОТНОСИТЕЛЬНОГО УДЛИНЕНИЯ РЫБОЛОВНЫХ КРУЧЕНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Насенков Павел Владимирович, специалист по УМР в УИЛ САПР техники
промышленного рыболовства

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: pavel.nasenkov@klgtu.ru

В статье представлены экспериментальные результаты крученых рыболовных материалов при их исследовании на разрывное усилие и относительное удлинение. Эксперименты проводились на современном высокоточном оборудовании, а также обработка выявленных математических зависимостей проведена с использованием усовершенствованных методик в среде MathCad. В ходе работы был установлен процесс зависимости разрывной нагрузки и относительного удлинения материалов при различной их длине как в сухом, так и мокром виде. Результатом проведенных работ стало создание инструментов прогнозирования данных процессов.

Орудия рыболовства имеют сложные конструкции, способные изменять свои формы при эксплуатации за счет перераспределения нагрузок в канатно-сетных частях, что связано с перераспределением сил натяжения в нитках, веревках и канатах, которые в свою очередь испытывают максимальные нагрузки в орудиях рыболовства, вплоть до разрыва, а также подвержены растяжению и удлинению, что приводит к асимметричности форм различных частей орудий рыболовства.

В настоящее время для орудий рыболовства используются современные нитевидные материалы, состоящие из синтетических волокон. Их наработка осуществляется на предприятиях в различных странах мира, в том числе и в России. В нашей стране подобных относительно крупных предприятий насчитывается не больше 5. Однако материалом для наработки волокон служит зарубежное сырье, выпускаемое в большей степени странах Азии.

Исследование на определение физико-механических свойств новых наработанных нитевидных материалов, используемых для постройки орудий промышленного рыболовства, необходимо для правильного применения в том или ином элементе орудия лова, что в дальнейшем будет влиять на уловистость.

Нормативные документы, определяющие методики проведения исследований на основные физико-механические свойства, такие как разрывная нагрузка и относительное удлинение, созда-

вались во второй половине XX века, когда использование в орудиях рыболовства синтетических материалов только начинало свое развитие. Как известно, свойства натуральных и синтетических материалов очень сильно отличаются.

Разрывную нагрузку и относительное удлинение можно определить несколькими способами:

- при помощи справочной литературы, однако данная информация будет лишь об известном и изученном материале;

- при помощи специализированного разрывного оборудования.

В начале XVIII века в нашей стране было осуществлено ряд мер по развитию полотняного и канатного производства из натуральных волокон, и соответственно начинаются исследования по определению свойств данных материалов. Основоположником исследований нитевидных материалов для постройки орудий лова, как и вообще науки о промышленном рыболовстве, был Ф.И. Баранов в начале XX века.

В середине прошлого столетия своё развитие начинают научные исследования на определение прочностных характеристик нитевидных материалов.

В 1947 году канд. техн. наук Житковым Д.Г. были описаны исследования волокнистых материалов на крепость, в своей работе он провел исследования канатов из пеньки, манилы, сизаля, а также хлопчатобумажные.[1] Целью этих испытаний было, во-первых, помочь производственникам в правильном выборе размера каната и величины отношения определения влияния исходных материалов (пенька, хлопок, манила и сизаль) на крепость и срок службы канатов. В ходе исследования были определены материалы с лучшими и худшими показателями прочности.

Исследования Засосовым А.В. из "Калининградрыбвтуза", Студенецким С.А. и Бекаревич В.Л. "Балтрыбтреста" в 1961 году были проведены сравнительные прочностные испытания хлопчатобумажных и пеньковых канатов.[2] Данные испытания проводились в целях исследования целесообразности использования данных канатов для подбор дрейфтерных сетей и подтвердили целесообразность применения хлопчатобумажных канатов.

В 1967 году М.Н. Пахнов, из Московского текстильного института, провел испытания капроновых канатов на растяжение при одно- и многократном нагружении.[3] В результате исследования определен предел прочности при растяжении канатов и их составных элементов, установлено изменение упругости каната при многократном нагружении. Коэффициент прочности отдельных элементов каната понижается с увеличением диаметра каната. Прочность каната составляет 50-60 % от прочности всех волокон и 65-70 % от прочности всех каболок. Относительное удлинение повышается с увеличением сечения элементов и числа переходов при изготовлении каната. Относительное удлинение впервые нагружаемого каната составляет 45-50%. При повторном нагружении остается постоянным и не превышает 8-10 % при нагрузке, близкой к разрывной.

В 1972 году, канд. техн. наук Мамцевым Е.Н. и Пахновым М.Н. из Московского текстильного института, были проведены исследования по прочности канатов и механическим свойствам капроновых нитей. [4] В данной статье рассматривается влияние исходных нитей на прочность канатов и веревок.

Также в это время Крамской Л.М. и Кулагин В.Д. из Калининградского высшего инженерного морского училища проводят исследовательскую работу по физико-механическим свойствам сетных материалов. [5] Данная статья была посвящена перемещению ячей сетного полотна, вызванным их деформацией и растяжением нитей.

В дальнейшем также были некоторые исследования физико-механических свойств нитевидных рыболовных изделий, однако все они являются недостаточно достоверными, в силу изменения технологий изготовления данных изделий, а также развития химической промышленности, на смену природным растительным волокнам пришли синтетические.

Характеристики современных рыболовных материалов имеют обсуждение во многих научных статьях, так например в статье Евсеевой С.С.[6] была предпринята попытка сравнения прочностных характеристик различных синтетических канатов без учета их конструкций. При этом определение прочности нитевидных рыболовных материалов возможно различными способами, что описано в научной статье Лобанова Д.С. и Темерова М.С.[7] Немаловажным вопросом является не только материал для изготовления конструкций орудий рыболовства, но и методы его исследования. Так в статьях Степашина А.А. [8] и Наумова В.А. [9], были рассмотрены результаты испытаний прочности нитей и относительного удлинения, однако, за основы был принят материал, не от-

носящийся к изготовлению орудий рыболовства. Также к анализу методических вопросов механических испытаний нитей относится ряд научных публикаций.

Учитывая вышесказанное, в данном исследовании ставились следующие задачи:

- разработать методику проведения многофакторных испытаний на рыболовных крученых нитевидных материалах;
- провести данные испытания на современном разрывном оборудовании;
- провести статистическую обработку проведенных испытаний;
- разработать компьютерную программу на основании проведенных экспериментов, способную в трехмерной проекции визуализировать процессы, проходящие с материалом в момент его нагружения.

Экспериментальные исследования на определение разрывной нагрузки и относительного удлинения были проведены в лаборатории рыболовных материалов ФГБОУ ВО «Дальрыбвтуз». Испытания проводились на универсальных разрывных машинах Shimadzu Autograph AGS-X10 настольного типа с программным обеспечением, которые имеют возможность проведения стандартных испытаний по контролю качества, механических испытаний, как для общего назначения, так и для проведения научно-исследовательских работ. Данные машины позволили провести серии испытаний выбранного материала по стандартным методикам определения прочностных характеристик, но с различными длинами образцов и различными скоростями разрыва, в сухом и мокром виде. Погрешность результатов испытаний составляет $\pm 0,5\%$ от полученных данных - согласно паспортным данным машины.

Для проведения исследований были выбраны следующие образцы материалов:

- полиамид диаметрами 1,1, 2,0 мм;
- полипропилен диаметрами 1,1, 2,0, 3,1, 4,0 мм;
- полиэфир диаметрами 1,1, 2,0, 3,1, 4,0 мм;

Выбор данных материалов обусловлен частым их использованием припостройки сетной и канатно-сетной части современных орудий промышленного рыболовства.

Отбор и подготовка материала проводилась по стандартной методике согласно ГОСТ 6611.2-73 [10]. Были определены фактические диаметры образцов при помощи измерительного микроскопа с ценой деления 0,1 мм, а также линейная плотность, с применением мерного приспособления с линейкой и креплением для груза, применяемого для предварительного натяжения, и применением лабораторных весов, с погрешностью не более 0,5% от взвешиваемой массы.

Все образцы перед началом испытаний были выдержаны сутки в расправленном виде в помещении лаборатории, для разглаживания и принятия исходной структуры. Испытания для определения разрывной нагрузки и удлинения, как в сухом, так и в мокром виде, проводились в соответствии с ГОСТ 6611.2-73.

Испытания проводились при различных скоростях движения подвижной траверсы разрывной машины: 10 см/мин, 50 см/мин и 100 см/мин. Расстояние между улиточными креплениями, применяемыми для испытаний нитевидных материалов, составляло 100 мм, 175 мм и 250 мм соответственно. Данный вид параметров необходим для более детального исследования поведения ФМС нитевидных материалов, используемых в сетных и канатно-сетных элементах конструкций орудий промышленного рыболовства.

По каждому испытанию, при помощи компьютерного обеспечения разрывной машины, были построены графические зависимости с детальным процессом испытания (рис.1), а также был проведен расчет среднеквадратичного отклонения по каждой серии испытаний, который не превышал 10%.

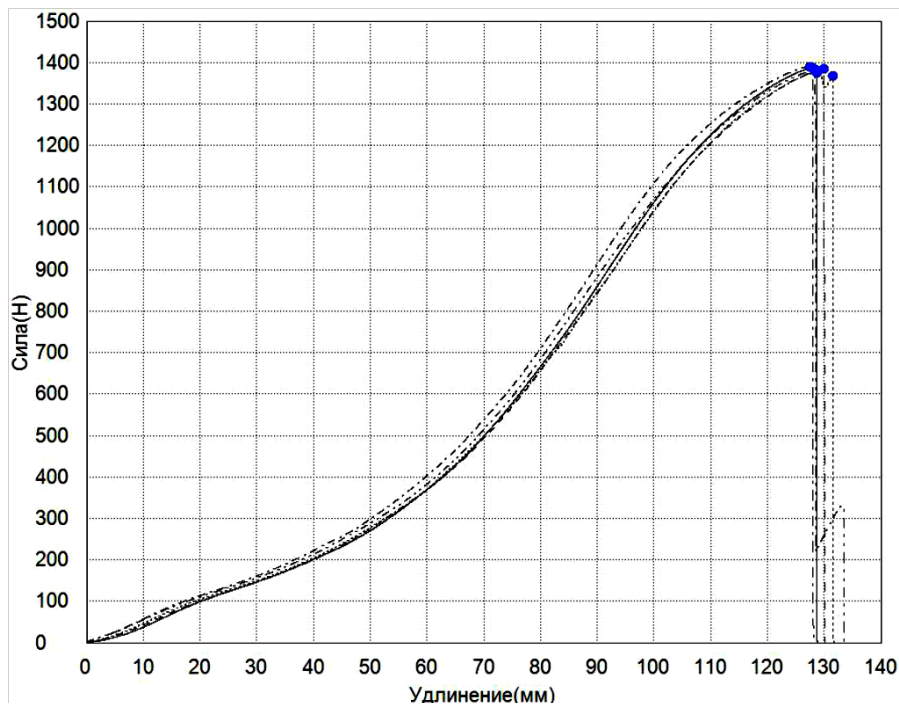


Рис.1 Зависимость разрывного усилия от удлинения ПА, длина 175 мм, скорость 10 см/мин

Результаты испытаний были статистически обработаны с применением модифицированных программ из учебного пособия по решению профессиональных задач в среде MathCad.[11] Для каждого материала с разными диаметрами, как в сухом, так и в мокром виде, были рассчитаны матрицы парной корреляции (для ПП см. табл. 1, 2).

Таблица 1

**Матрица парной корреляции результатов испытаний
ПП в сухом виде**

№ пп	Фактор	1	2	3	4	5
		P	ϵ	d	L	V
1	P	1	0,414	0,979	-0,012	0,024
2	ϵ	0,414	1	0,414	-0,825	-0,109
3	d	0,979	0,414	1	0	0
4	L	-0,012	-0,825	0	1	0
5	V	-0,024	-0,109	0	0	1

Таблица 2

**Матрица парной корреляции результатов испытаний
ПП в мокром виде**

№ пп	Фактор	1	2	3	4	5
		P	ϵ	d	L	V
1	P	1	0,336	0,985	-0,011	0,002
2	ϵ	0,336	1	0,34	-0,845	0,15
3	d	0,985	0,34	1	0	0
4	L	-0,011	-0,845	0	1	0
5	V	0,002	0,15	0	0	1

где: d - диаметр образцов (мм);

L - длина испытываемых образцов (мм);

V - скорость движения траверсы (см/мин);

P - разрывная нагрузка (Н);

ϵ - относительное удлинение образцов (%).

Корреляция между величинами d , L , V отсутствует, так как это аргументы, которые задавались независимо друг от друга. $P = f(d, L, V)$ и $\varepsilon = f(d, L, V)$ являются случайными функциями. По табл. 1, 2 видно, что зависимость разрывной нагрузки от диаметра близка к линейной функциональной (корреляция положительная), так как коэффициент парной корреляции r_{13} немногим меньше единицы. Коэффициенты r_{14} и r_{13} близки к нулю. Значит, в исследованном диапазоне аргументов зависимость P от L и от V не обнаружена.

Относительное удлинение наиболее тесную стохастическую связь имеет с длиной образца (для $\text{ППг}_{24} = -0,825$ и $-0,845$), корреляция отрицательная. Значительно слабее стохастическая связь ε и d ($r_{23} = 0,414$ и $0,34$), корреляция положительная. В исследованном диапазоне аргументов стохастическая связь между относительным удлинением в момент разрыва и скоростью не обнаружена. При всех условиях испытаний были получены матрицы парной корреляции аналогичного характера.

В исследованном диапазоне аргументов разрывное усилие P зависит от одного аргумента – d . Найдем уравнение регрессии $P = \varphi(d)$. Уравнения степенной регрессии 1-го, 2-го и 3-го порядка имеют вид:

$$\varphi_1(d) = a_{10} + a_{11} * d, \quad (1)$$

$$\varphi_2(d) = a_{20} + a_{21} * d + a_{22} * d^2, \quad (2)$$

$$\varphi_3(d) = a_{30} + a_{31} * d + a_{32} * d^2 + a_{33} * d^3, \quad (3)$$

В качестве регрессионной зависимости использовалась показательная функция

$$\varphi_e(d) = A * d^\gamma, \quad (4)$$

где a_{ij} , A , γ – эмпирические коэффициенты, которые определяются методом наименьших квадратов для заданных условий испытаний.

На рис. 2 результаты расчетов по формулам (1)-(4) сравниваются с экспериментальными данными. Видно, что линейная аппроксимация (1) хорошо согласуется с данными испытаний при $d > 1$ мм. При $d \leq 1$ мм зависимостью (1) пользоваться нельзя, т.к. не выполняется фундаментальное требование: если диаметр стремится к нулю, то и разрывная нагрузка должна стремиться к нулю.

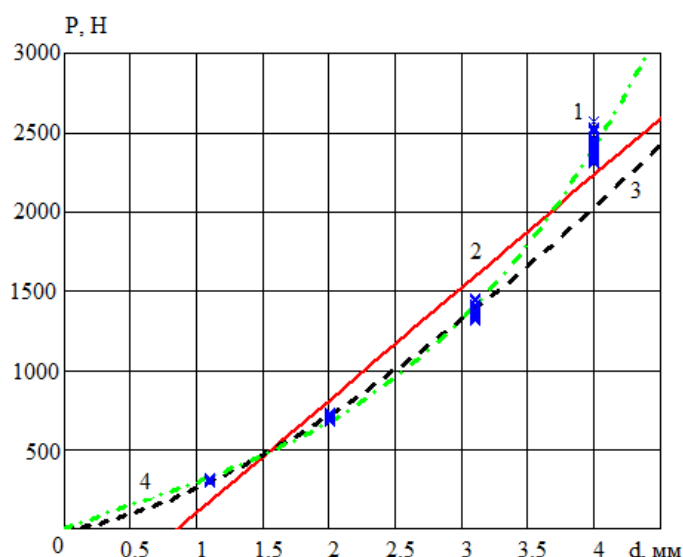


Рис. 2. Зависимость разрывного усилия от диаметра ПП в сухом виде: 1 – экспериментальные точки; 2 – результат расчета по формуле (1), 3 – по (4), 4 – по (3)

Рассчитаем значения индекса детерминации и поместим в табл. 3. В исследованном диапазоне d самое большое значение R^2 у зависимости (3). Однако при увеличении диаметра более 3 мм

в соответствии с физическим смыслом ведет себя зависимость (4), а (3) имеет точку перегиба. Поэтому в дальнейшем в качестве регрессионной зависимости будем использовать показательную функцию (4).

Таблица 3

Значения индекса детерминации R^2 (разрывное усилие)

№ пп	Материал (условия)	Регрессионная зависимость			
		(1)	(2)	(3)	(4)
1	ПП в сухом виде	0,958	0,992	0,997	0,990
2	ПП в мокром виде	0,970	0,996	0,998	0,994

На рис. 3 представлены графики регрессионных зависимостей (4) для сухих и мокрых образцов ПП. По построенным границам доверительных интервалов случайной функции, видно что отличие линии 2 от 1 не столь значительно, чтобы выйти за границу доверительного интервала.

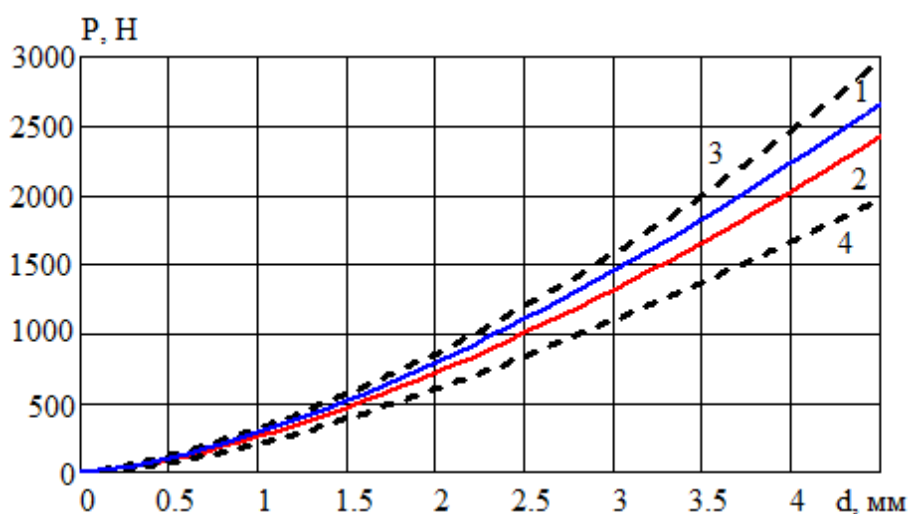


Рис. 3. Зависимость разрывного усилия от диаметра ПП:

1 – в сухом виде; 2 – в мокром виде; 3, 4 – границы доверительных интервалов случайной функции (4)

Найдем уравнение степенной регрессии k -го порядка $\varepsilon = f_k(L, d)$. В табл. 4 внесены значения индекса детерминации. Достаточно использовать многочлен 2-го порядка.

Таблица 4

Значения индекса детерминации R^2 (относительное удлинение)

№ пп	Материал (условия)	Порядок уравнения регрессии			
		1	2	3	4
1	ПП в сухом виде	0,852	0,915	0,959	0,961
2	ПП в мокром виде	0,830	0,907	0,942	0,945

На рис. 4,5 видно, что с увеличением длины образцов, во всех случаях относительное удлинение падает, зависимость же относительного удлинения от диаметра - имеет возрастающий вид.

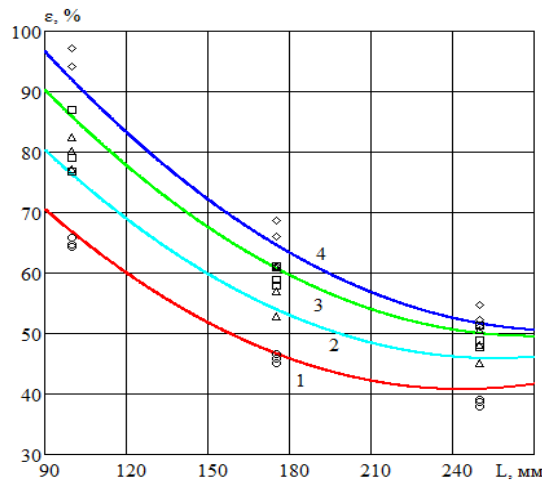


Рис. 4. Зависимость относительного удлинения ПП (в сухом виде) от L при различных d :
 1 – $d = 1,1$ мм; 2 – $d = 2,0$ мм; 3 – $d = 3,1$ мм.
 Точки – экспериментальные данные

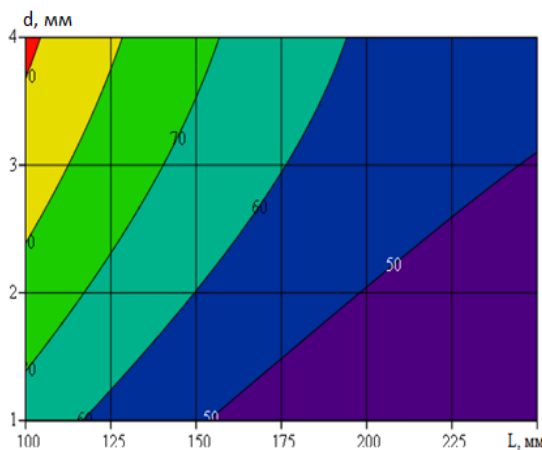


Рис. 5. Зависимость относительного удлинения ПП (в сухом виде) от L и d

Аналогичная зависимость была выявлена и с остальными исследуемыми материалами.

Аппроксимирующая точность проведенных исследований составляет не менее 95%.

Исследования, представленных рыболовных материалов, позволили в полной мере проследить взаимозависимости, одних из самых важных физико-механических свойств, при различных факторах, влияющих на структуру данных материалов, работающих в сложных условиях, вызванных непосредственной эксплуатацией орудий промышленного рыболовства.

Серия проведенных испытаний с синтетическими рыболовными изделиями, позволила разработать компьютерную программу "Анализ нагружений и формоизменений крученых нитевидноверевочных изделий (НВИ)", на основе универсальной программной системе конечно-элементного численного анализа ANSYS. Данная программная система существует и развивается на протяжении 30 лет и является довольно популярной у специалистов в сфере автоматизированных инженерных расчетов и решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого тела и механики конструкций. Решения ANSYS позволяют проектировать изделия для трехмерной печати из различных материалов. Моделирование и анализ в некоторых областях промышленности позволяет избегать дорогостоящих и длительных циклов разработки новых материалов.

Разработанная программа предназначена для анализа таких данных как: силовые, формаопределяющие, временные и другие физико-механические характеристики ниток, веревок и канатов, полученных с разрывной машины, что позволяет в четырехмерной области безразмерных значений, графически анализировать формоизменения физико-механических свойств нитевидных материалов в виде трехмерной поверхности в прямоугольной трехмерной декартовой системе ко-

ординат с отражением четвертого измерения Н в цветовой модели HSV. На рис. 6 приведен рабочий лист компьютерной программы «Анализ нагрузений и формоизменений крученых НВИ»

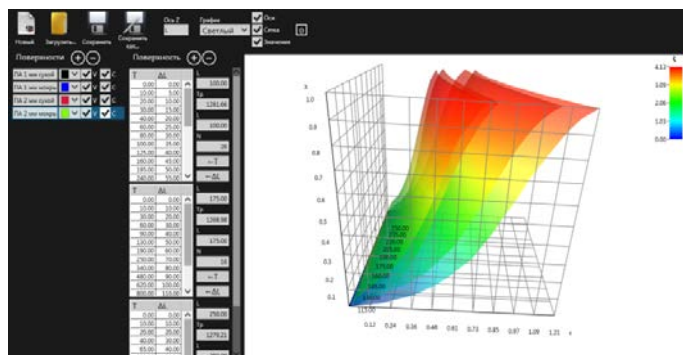


Рис. 6. Рабочий лист компьютерной программы «Анализ нагрузений и формоизменений крученых НВИ»

Данная компьютерная программа является эффективным инструментом при работе над проблемами не только исследования физико-механических свойств рыболовных изделий, но и при математическом и физическом моделировании физико-механических свойств НВИ.

На рис. 7 и 8 приведены зависимости для капроновых крученых ниток $\zeta = f(\varepsilon, L)$ диаметрами, $d = 1$ мм и $d = 2$ мм (в сухом и мокром виде).

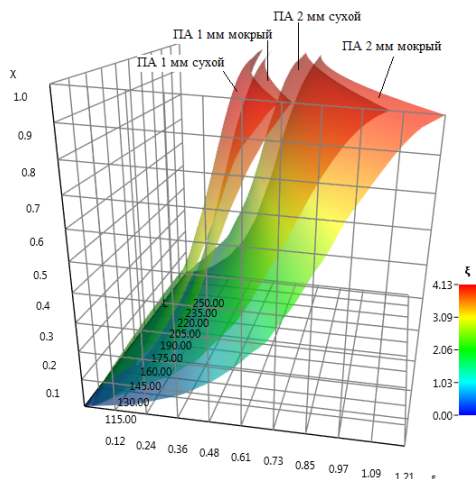


Рис. 7. График зависимости $\zeta = f(\varepsilon, L)$

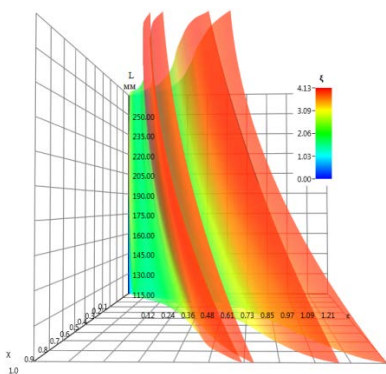


Рис. 8. График зависимости $\zeta = f(\varepsilon, L)$

Где: ζ - значение отношения модулей упругости, ε - безразмерное удлинение, L - длина образца, χ - безразмерная сила.

$$\chi = \frac{T_i}{T_p}, \quad (5)$$

где: T_i - натяжение (Н); T_p - разрывная нагрузка (Н).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (6)$$

где: ΔL - относительное удлинение образца (%), L - длина образца (мм).

$$\xi = \frac{E}{E_p} = \chi \times \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon} \times \frac{1+\varepsilon}{1+\varepsilon_p}, \quad (7)$$

где: E - модуль продольной упругости НВИ, E_p - модуль продольной упругости НВИ в момент разрыва, ε_p - безразмерное удлинение в момент разрыва.

Данный пример визуально представляет необходимые физико-механические свойства представленного образца, а также позволяет определить свойства данного материала (ПА), в пределах испытанных образцов.

Представленная компьютерная программа является эффективным инструментом для анализа и прогноза основных физико-механических свойств рыболовных материалов. В область ее применения входят не только научные исследования, проектирование и эксплуатация орудий рыболовства, но и также данная программа может стать неотъемлемой частью процесса обучения студентов и курсантов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области в рамках научного проекта № 19-48-390004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крепость канатов из волокнистых материалов // Рыбное хозяйство, Москва. № 5. 1947 г. - с. 20-24
2. Испытания хлопчатобумажных и пеньковых канатов // Рыбное хозяйство, Москва. № 11. 1967 г. - с. 59-65
3. Прочность капроновых канатов // Рыбное хозяйство, Москва. №5. 1969 г. - с. 44-46
4. Прочность канатов и механические свойства капроновых нитей // Рыбное хозяйство, Москва. №9. 1972 г. - с. 58-60
5. Физико-механические свойства сетных материалов // Рыбное хозяйство, Москва, № 9. 1972 г. -с. 61-62
6. Сравнительный анализ технических характеристик синтетических канатов // Вестник АГТУ. Промышленное рыболовство. – 2008. – № 3. – С. 90-92
7. Особенности квазистатических испытаний нитей и тканей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – № 2. – С. 96–109
8. Опыт исследования механических свойств высокопрочного волокна на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена / А.А. Степашкин, А.В. Максимкин, Д.И. Чуков, В.В. Чердынцев // Современные проблемы науки и образования: электронный журнал. – 2013. – № 6.
9. Анализ результатов испытания прочности трехрядных канатов из полимерных материалов / В.А. Наумов, Н.Р. Ахмедова, И.М. Ахмедов // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2015. – № 36. – С. 43-51
10. Наумов, В. А. Прикладная математика: учеб.пособие по решению профессиональных задач в среде MathCad / В. А. Наумов. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2014. – 144 с.
11. ГОСТ 6611.2-73 Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве. - Москва, 1997. - 35 с.

RESEARCH OF THE BREAKING FORCE AND RELATIVE ELONGATION OF FISHING TURNED MATERIALS

Nasenkov Pavel Vladimirovich, specialist in UMR of the CAD laboratory of the Department of commercial fisheries

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russia, e-mail: pavel.nasenkov@klgtu.ru

This article presents the results of experimental studies of twisted fishing materials, when they are studied for breaking force and elongation. The experiments were carried out on modern high-precision equipment, and the processing of the identified mathematical dependencies was carried out using advanced methods in the MathCad environment. In the course of research, the process of dependence of the breaking load and the relative elongation of materials at different lengths, both in dry and wet form, was established. The result of this work was the creation of tools for predicting these processes.

УДК 639.2.081; 531.001.362

О ГИПОТЕЗЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ «ВРЕМЯ-ТЕМПЕРАТУРА» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ КАНАТНО-ВЕРЕВОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Недоступ Александр Алексеевич, доцент, канд. техн. наук,
заведующий кафедрой промышленного рыболовства
Коновалова Карина Витальевна, магистрант
Ражев Алексей Олегович, младший научный сотрудник
Насенков Павел Владимирович, специалист по учебно-методической работе

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, nedostup@klgtu.ru; kova.rina4382@mail.ru; progacpp@live.ru;
pavel.nasenkov@klgtu.ru

В данной работе проанализированы особенности влияния операций деформаций – растяжение, сжатие и изгиб, на скорость разрушения рыболовных синтетических канатно-веревочных изделий (КВИ). Результаты теоретических изысканий использованы в построении гипотезы динамического подобия «время-температура» для исследования длительной прочности КВИ.

Введение

В научно-исследовательской работе, в области промышленного рыболовства часто встречаются ситуации, которые требуют построения новой гипотезы. Сложность гипотезы зависит от характера задачи, вставшей перед исследователем, но при этом, необходимо отметить, что любая гипотеза важна, для развития области знаний.

Из курса физики нам известно, что для всех видов материалов, существуют критические пределы температуры, длительное воздействие которых приводит к старению материалов, но все эти факторы учитывают лишь внешнее воздействие. В то время как изменение температуры, вызванные деформацией изделия, до сих пор мало изучены, а в связи с тем, что старение полимерных материалов происходит чаще всего по причине распада, изменения основных молекулярных цепей, то этот вопрос требует детального изучения.

В настоящее время с появлением новых технологий появилась возможность фиксировать мало заметные колебания температуры при деформации тела, которые в единичных случаях не

несут значительного изменения в физико-механических свойств (ФМС), но цикличность нагрузок, длительность воздействия, в теории имеют сильное влияние на прочность изделия.

Ввиду того, что:

- первичные элементы орудия рыболовства - это крученые и плетенные изделия - нитяные (НИ) и канатно-веревочные (КВИ), которые с позиции механики представляют собой гибкие нити;
- существенную долю среди эксплуатации НИ и КВИ составляют операции деформации - изгиб, сжатие, растяжение.

Вследствие этого становится необходимым отметить, что в качестве расчетной модели для гибкой нити, нужно рассматривать нить конечной жесткости, то есть учитывать деформацию изгиба. Эти факторы значительно осложняют расчет НИ и КВИ.

Поэтому, при изучении и конструировании орудий рыболовства широкое применение, получила теория физического моделирования динамических процессов [1, 2]. Модели демонстрируют протекающие в реальности процессы, и позволяют изучать влияние отдельных факторов на течение этих процессов. Необходимо отметить, что модель должна не только воспроизводить явление, но и моделировать его так, чтобы можно было перейти к реальному объекту.

В данной статье авторами проводится анализ теоретического влияния внутренней температуры изделия, вызванной его деформацией, на продолжительность его эксплуатации, и предлагается построение новой гипотезы динамического подобия «время-температура» для исследования длительной прочности КВИ, применяемых в промышленном рыболовстве.

Все тела состоят из молекул и атомов, между которыми, постоянно действуют силы притяжения и отталкивания, вследствие чего они находятся в постоянном хаотичном движении, а их средняя величина кинетической энергии определяет температуру тела. Еще из школьных уроков нам известно, что при повышении температуры окружающей среды, увеличивается средняя скорость хаотичного движения частиц, а при понижении наоборот. Кинетическая энергия движения частиц, вместе с потенциальной энергией взаимодействия частиц составляет внутреннюю энергию (ВЭ) тела. Необходимо отметить, что ВЭ тела не является постоянной величиной. При повышении температуры ускоряется движение молекул и ВЭ увеличивается, с понижением температуры энергия - уменьшается.

Следует также отметить, что ВЭ тела зависит от состояния самого тела. С изменением состояния: перехода из одного агрегатного состояния в другое; деформация; раздробление тела, меняется и его энергия. ВЭ тела можно изменять двумя путями: совершения работы и теплопередачей.

В данной статье нас интересует изменения ВЭ при деформации тела, то есть при совершении работы. При снятии упругой деформации, упругие силы за счет добавочной энергии совершают работу и вследствие этого не происходит значительного нагревания изделия. При пластической - температура в изделии заметно увеличивается, так как происходит увеличение ВЭ, за счет работы сил, обуславливающих деформацию.

Привычной иллюстрацией данного явления является случай нагревания многократно сгибаемой проволоки.

Во время изучения ФМС КВИ, авторами были замечены изменения температурного слоя в области силового воздействия на синтетическом НИ. При изгибе изучаемого образца происходило практически незаметное, нагревание в области изгиба изделия под собственным весом, в отличие от испытания на прочность, где изделие подвергалось внешнему воздействию, путем натяжения с помощью дополнительного веса и рассматривалось до момента разрыва. В области разрыва температура возрастала до такой степени, что концы изделия оплавливались.

Из вышеизложенного можно сделать следующий вывод, что для практического применения материалов важно знать, как влияет на материал изделия воздействие внешних сил - деформация.

В связи с тем, что крученые и плетенные изделия в промышленном рыболовстве, состоят из полимеров, то необходимо изучить влияние ВЭ при продолжительной, циклической деформации на прочность синтетических изделий.

Для описания снижения молекулярной массы полимеров при деформации, в следствие которой может произойти разрыв основной цепи макромолекул применяют понятие - механическая деструкция [3, С.401].

В процессе деформации полимеров формируются внушительные внутренние напряжения, превышающие прочность химической связи, которые могут привести к разрыву макромолекул. В полимере напряжения выстраиваются на межмолекулярные связи, между цепями и на основной цепи,

если все макромолекулы параллельно уложены и распрямлены, то при деформации они одинаково нагружены, вследствие чего для их разрыва потребовались бы большие напряжения. Тем не менее на практике макромолекулы расположены в различных направлениях касательно приложенной силы, из-за чего при деформации элементы испытывают различное напряжение и в какой-то точке оно может превысить критическое - равное прочности химической связи, вследствие происходит разрыв.

Анализ литературы показал [4-5], что проблема процесса деформации изделия рассматривалась многими учеными, но в основном вся имеющаяся информация, касается стальных канатов [6], которые в корне отличаются по строению от синтетических изделий.

И даже при составлении паспорта на изделие, обычно учитывают лишь информацию о разрушении прочности под воздействием внешних источников тепла, и не учитывают влияние внутренних факторов.

Опираясь на выше приведенные факты, становится заметна необходимость детального анализа изменения ВЭ в процессе деформации изделия, а также построения гипотезы динамического подобия «время-температура» для исследования длительной прочности КВИ, применяемых в промышленном рыболовстве, на основании этого авторы статьи пришли к выводу, что лучше всего для решения поставленной задачи - подходит теория динамического подобия А. А. Недоступа [7, 8], которая предоставляет возможность полностью рассмотреть процессы деформации.

Необходимо учесть тот факт, что орудия рыболовства и его первичные элементы, целесообразно рассматривать в водной среде, учитывая все явления теплового переноса, которые преимущественно обозначаются системой уравнений: энергии, неразрывности и движения фазы. В статье нас интересуют случаи, когда для решения таких задач возникает необходимость применения коэффициента переноса - позволяющего определить плотности теплового потока.

Для описания потока тепла - измеряемого через единицу площади раздела фаз между телом-средой, используется следующая формула:

$$\varphi = \beta(T_f - T_g) \quad (1)$$

где T_f - температура водной среды; T_g - температура тела; β - коэффициент переноса.

На основании формулы (1), видно, что для решения задач необходимо ввести безразмерные параметры - описывающие процесс.

При φ определяющий, плотность потока тепла, используют число Нуссельта:

$$Nu = \frac{\beta l}{\lambda} \quad (2)$$

где l - характерный размер тела; λ - коэффициент теплопроводности.

Одним из видов теплообмена является конвекция, при котором ВЭ передается потоками самого вещества. Разделяют естественную и вынужденную конвекции, при этом для нахождения характеристики водной среды применяют число Прандтля (Pr) - соотношения кинематической вязкости (ν) к коэффициенту температуропроводности жидкости (a).

Для описания тепловых условий внутри рассматриваемой системы:

При естественной конвекции - число Грасгофа:

$$Gr = \frac{\alpha}{\nu^2} l^3 g \Delta t \quad (3)$$

где α - коэффициент теплового расширения; Δt - разность температур в слое; l - толщина слоя.

Свободная конвекция - Число Релея (Ra), определяет поведение жидкости под воздействием градиента температуры и его можно записать как произведение Pr на Gr .

Число Фурье - характеризует отношения между скоростью изменения тепловых условий в среде и скоростью перестройки температурного поля внутри изделия:

$$Fo = \frac{a \tau}{l^2} \quad (4)$$

где τ - время протекания нестационарного процесса теплопроводности.

Число Пекле:

$$Re = \frac{vl}{a} = RePr \quad (5)$$

где v - характерная скорость потока.

Число Био - критерий краевого подобия, характеризующие теплообмен между охлажденным/нагретым телом и окружающей средой:

$$Bi = \frac{\beta l}{\lambda} \quad (6)$$

где λ - теплопроводность твердого тела; l - линейный размер твердого тела.

Стоит уточнить, что равенство чисел Био для геометрически подобных изделий определяет подобие распределения температуры.

Тепловой критерий фазового превращения:

$$K_{\phi} = \frac{r}{\Delta t c_p} \quad (7)$$

где r – теплота испарения; Δt – разность температур переохлаждения/перегрева и насыщения фазы.

Число Фруда – критерий гравитационного подобия, характеризует меру отношения сил инерции к тяжести в потоке:

$$Fr = \frac{v^2}{gl} = \frac{Re^2}{Ga} \quad (8)$$

Число Эйлера – критерий подобия полей давления:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v^2} \quad (9)$$

где Δp – перепад давления на участке движения.

Для полноты анализа рассмотрим преобразование физических характеристик тела в водной среде при построении задач термодинамического подобия. Основные масштабы представлены в таблице 1.[9].

Таблица 1

Основные масштабы подобия термодинамических величин

Масштабы физических характеристик		Преобразование через масштаб C_l
Физические характеристики	Обозначение	
Количество теплоты	C_Q	$C_l^{5/2}$
Удельное количество теплоты	C_h	$C_l^{-1/2}$
Тепловой поток	C_{II}	$C_l^{5/4}$
Поверхностная плотность потока	C_q	$C_l^{-3/4}$
Объемная плотность потока	C_{qv}	$C_l^{-7/4}$
Температуропроводность	C_{α}	$C_l^{3/4}$
Удельная теплопроводность	C_{χ}	$C_l^{-5/4}$
Удельная теплоёмкость	C_c	C_l^{-2}
Теплоёмкость	C_C	C_l
Объемная теплоёмкость	$C_{c'}$	C_l^{-2}
Температурный градиент	C_{gradK}	$C_l^{-1/4}$
Температурный коэффициент	$C_{\alpha\gamma}$	$C_l^{-3/2}$
Коэффициент лучеиспускания	C_{ck}	$C_l^{-27/4}$
Коэффициент теплообмена	$C_{C\alpha}$	$C_l^{-9/4}$
Универсальная газовая постоянная	C_k	C_l^{-2}
Количество вещества	C_v	C_l^3
Молярная масса	C_M	1
Молярная внутренняя энергия	C_{Um}	$C_l^{-1/2}$
Удельная молярная энтальпия	C_i	C_l^{-4}
Молярная теплоёмкость	C_{Cm}	C_l^{-2}

Отметим, что для работ в промышленной сфере характерна чрезмерная лаконичность описания постановок, обусловленная унификацией используемых методик моделирования. Подобные исследования находят применения в практике и становятся нормой. Гипотеза, описанная в данной статье, позволит рассмотреть НИ при длительных и циклических операциях, превращая модель в инструмент предсказания о длительности использования синтетических материалов.

Заключение

При рассмотрении изменений температурного слоя деформированного изделия, состоящего из полимеров, авторы статьи отметили, что протекающие превращения ВЭ не могут быть полностью описаны при помощи масштабов физических характеристик, так как они не учитывают все

факторы, поэтому возникает необходимость подробного исследования процессов деформации в жидкой среде с использованием чисел - критерий подобия.

В статье рассматривается построение новой гипотезы динамического подобия «время-температура» для исследования длительной прочности КВИ при растяжении, сжатие и изгибе, применяемых в орудиях рыболовства.

Вследствие чего, становится очевидна не хватка практических данных, что приводит нас к необходимости проведения ряда экспериментов, для дальнейшего изучения влияния деформации на прочность изделия.

Все эти исследования помогут в дальнейшем создать программу - реализации имитационных моделей для задач предварительного расчета силовых и геометрических характеристик КВИ на современных ЭВМ широкого применения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области в рамках научного проекта № 19-48-390004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Недоступ А. А. Физическое моделирование гидродинамических процессов движения орудий рыболовства // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2012. № 3 (19). С. 55–67.
2. Недоступ А. А. Физическое моделирование орудий и процессов рыболовства: моногр. Калининград: Изд-во КГТУ, 2012. 375 с.
3. Геллер Б.Э. Практическое руководство по физикохимии волокнообразующих полимеров, 1996, 432 с.
4. Лаврушин Г. А., Лаврушина Е.Г. Закономерность накопления повреждений в твердых телах при циклическом нагружении // Вест. ДВО РАН. – 2005. - № 6. – с. 41-45
5. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты. Киев: Техника, 1966. 328 с.
6. Воронцов А.Н., Волоховский В.Ю., Каган А.Я., Сухоруков В.В. Вероятностный подход к оценке прочности стальных канатов на основ данных магнитной дефектоскопии// Стальные канаты. – Вестник 3. Одесса: Астропринт. – 2003. – С. 200-210.
7. Недоступ А.А., Насенков П.В., Ражев А.О., Коновалова К.В., Федоров С.В. Обоснование правил подобия разрывной нагрузки рыболовных крученых изделий //Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. Астрахань. АГТУ. №1. 2020. - С. 38-45.
8. Недоступ А.А., Коновалова К.В., Насенков П.В., Ражев А.О., Федоров С.В. Обоснование правил подобия изгибной жесткости рыболовных крученых изделий //Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. Астрахань. АГТУ. №1. 2020. - С. 77-85.
9. Недоступ А.А., Ражев А.О., Хрусталева Е.И., Бедарева О.М.К теории термодинамического подобия установок замкнутого водоснабжения для выращивания гидробионтов. Известия КГТУ. №57, 2020. - С. 40- 53.

ON THE HYPOTHESIS OF DYNAMIC SIMILARITY "TIME - TEMPERATURE" FOR RESEARCHING THE LONG-TERM STRENGTH OF ROPE AND ROPE PRODUCTS

Nedostup Aleksandr Alekseevich, associate professor, PhD in Technical Sciences

Kononova Karina Vitalievna, undergraduate

Razhev Aleksey Olegovich, research scholar

Nasnikov Pavel Vladimirovich, educational and methodological specialist

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",

Kaliningrad, Russia, e-mail: nedostup@klgtu.ru; kova.rina4382@mail.ru, progacpp@live.ru;

pavel.nasnikov@klgtu.ru

This paper analyzes the features of the influence of various deformation operations - tension, compression and bending with prolonged exposure to the rate of destruction of fishing synthetic rope and rope products (RRP). The results of theoretical studies were used to construct a hypothesis of dynamic similarity "time-temperature" for the study of the long-term strength of RRP.

АППРОКСИМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ВЫБОРКЕ СТЯЖНОГО ТРОСА МОДЕЛИ КОШЕЛЬКОВОГО НЕВОДА

Недоступ Александр Алексеевич, доцент, канд. техн. наук,
заведующий кафедрой промышленного рыболовства
Макаров Вячеслав Валерьевич, заведующий УИЛ САПР

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: nedostup@klgtu.ru

В данной статье рассмотрен пример аппроксимации экспериментальных данных по выборке стяжного троса с моделью кошелькового невода. На следующих этапах работы будет уточнен коэффициент аппроксимирующей функции и проведен расчет с остальными данными эксперимента. Полученные зависимости в дальнейшем лягут в основу компьютерного моделирования работы кошелькового невода.

В 2014 году в гидроканале ОАО «МариНПО» были проведены эксперименты с моделями кошельковых неводов [1]. Целью эксперимента было исследование зависимости натяжения в стяжном тросе от скорости течения, скорости выборки и загрузки нижней подборки невода. Эксперименты проводились с двумя моделями, основные характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики моделей кошелькового невода

Модель	a, мм	d, мм	Лп, м	Лж, м	Нп, м	Нж, м	U _x	U _y	F0
1	6	0,4	6	8,57	1,6	2,24	0,7	0,714	0,133
2	10	0,95	7	10	1,5	2,1	0,7	0,714	0,190

В ходе экспериментов с помощью тензостанции МС-200 измерялось натяжение в стяжном тросе.

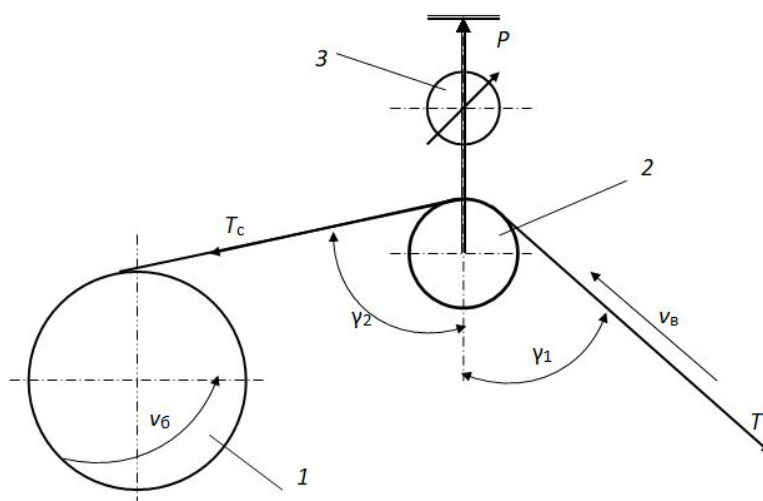


Рис. 1. Схема установки блока и подключения тензостанции

где 1 – барабан лебедки;

2 – блок;

3 – тензодатчик;

T – натяжение в стяжном тросе в набегающей ветви, Н;

T_c – натяжение в стяжком троса в сбегающей ветви, Н;

P – усилие, возникающее на блоке, Н;

V_b – радиальная скорость вращения барабана, c^{-1} ;

V_v – скорость выборки, м/с;

γ_1 – угол между вертикалью и направлением набегающей ветви троса;

γ_2 – угол между вертикалью и направлением сбегающей ветви троса.

По результатам экспериментов были получены графики натяжения в стяжном тросе (рис. 1) в зависимости от времени выборки при различной скорости выборки.

Натяжение в урезе T (набегающей ветви) определялось по формуле, в которой значение P брали из показаний тензостанции в результате проводимого эксперимента:

$$T_T = \frac{\eta_6 P}{\cos \gamma_2 + \eta \cos \gamma_1} = \frac{P}{0,193 + \cos \gamma_1}, \quad (1)$$

где T_T – натяжение в урезе, Н;

P – максимальное усилие на блоке, Н;

γ_1 – угол между вертикалью и направлением набегающей ветви троса;

γ_2 – угол между вертикалью и направлением сбегающей ветви троса;

$\eta_6 = \eta_c^2$ - КПД блока ($\eta_c = 0,95$ – КПД подшипника скольжения).

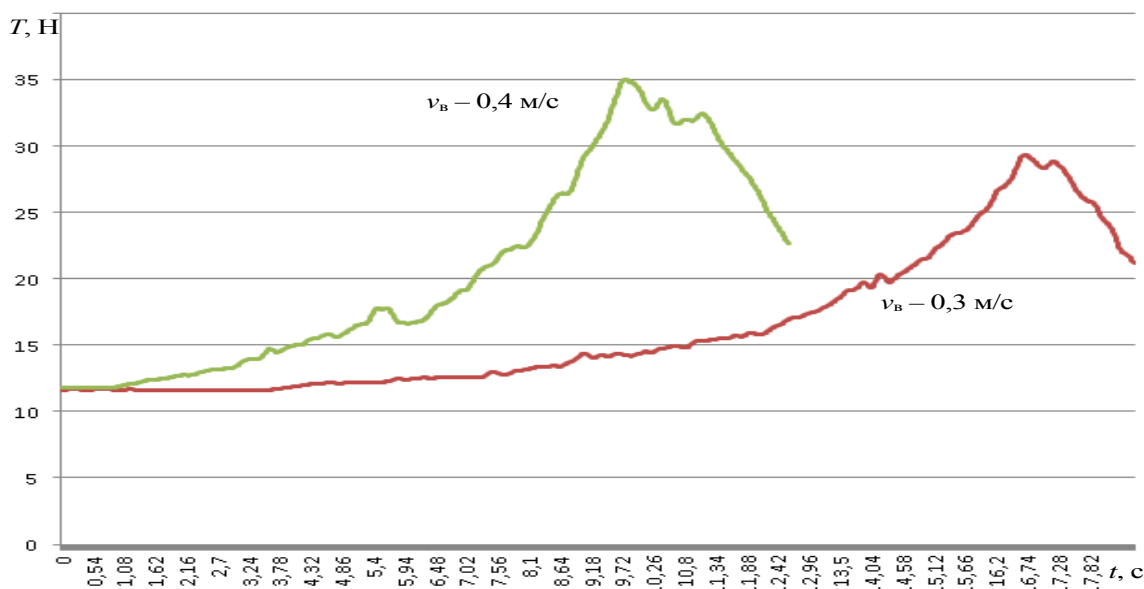


Рис. 2. График натяжения модель 1 при скорости течения $V_T = 0$ м/с, скорости выборки $V_v = 0,3$ м/с, $V_b = 0,4$ м/с и нагрузке нижней подборы $q = 0,5$ Н

В этой статье рассмотрим обработку экспериментальных данных на примере модели 1 при скорости течения $V_T = 0$ м/с; скорости выборки $V_v = 0,3$ м/с; нагрузке нижней подборы $q = 0,5$ Н/м.

Обработка проводилась при помощи системы Mathcad 15.

На рис. 2 видно что, график доходя до $T_{T_{max}}$ обрывается, это связано с выключением лебедки, поэтому для расчетов был выбран отрезок времени от 0 до $T_{T_{max}}$.

Для стандартизации графиков было решено произвести обнуление начальной точки. Для этого был произведен расчет:

$$T_i = T_{Ti} - T_{T_0} \quad (2)$$

Исходные данные для расчета представлены в табл. 2:

Исходные данные эксперимента

Время выборки t , с	Усилие в стяжном тросе при выборке T , Н
0	0
1	0*
2	0,013
3	0*
4	0,248
5	0,586
6	0,792
7	0,998
8	1,514
9	2,695
10	2,724
11	3,727
12	4,243
13	5,823
14	7,757
15	9,957
16	13,531
17	16,706
$t_{max} = 17c$	$T_{max} = 16,706H$

* - Отрицательные значения были приведены к 0.
Все значения были приведены к безразмерному виду:

Таблица 3

Безразмерные величины

$\tau = \frac{t}{t_{max}}$	$\chi = \frac{T}{T_{max}}$
0	0
0,059	0
0,118	0,0008
0,176	0
0,235	0,0148
0,294	0,0351
0,353	0,0474
0,412	0,0597
0,471	0,0906
0,529	0,1613
0,588	0,1631
0,647	0,2231
0,706	0,254
0,765	0,3486
0,824	0,4643
0,882	0,596
0,941	0,8099
1	1

Для аппроксимации был выбран способ регрессией, она аппроксимирует функцию таким образом, чтобы она усредняла опытные данные.

Наиболее приближенной аппроксимирующей функцией является $f(\chi) = \tau^x$, где x – коэффициент.

На рисунке 3 представлен аппроксимирующий график для модели 1 при скорости течения $V_T = 0$ м/с, скорости выборки $V_B = 0,3$ м/с, $V_B = 0,4$ м/с и загрузки нижней подборы $q = 0,5$ Н/м.

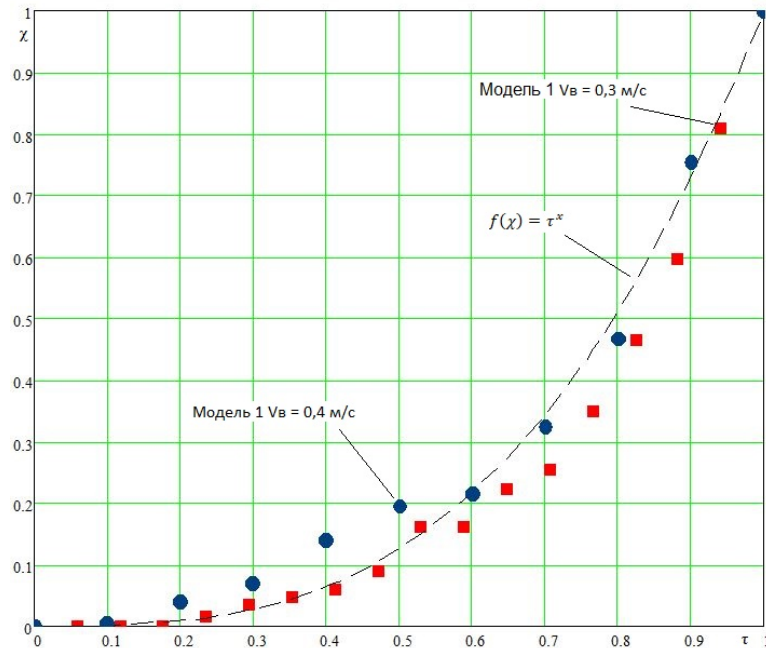


Рис. 3. График аппроксимации модель 1 при $V_m = 0$ м/с, $q = 0,5$ Н/м

Для данной зависимости аппроксимирующая формула имеет вид: $f(\chi) = \tau^3$.
 Ошибка аппроксимации экспериментальных данных рассчитывалась по формуле (3):

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T - \chi)^2} \quad (3)$$

Для эксперимента с моделью 1 при скорости выборки $V_b = 0,3$ м/с ошибка аппроксимации составила 0,049, для скорости выборки $V_b = 0,4$ м/с – 0,041.

Аппроксимирующая функция $f(\chi) = \tau^x$ позволяет с минимальной погрешностью предсказать промежуточные значения между заданными точками. В последующих работах будет рассмотрен выбор коэффициента x от дополнительных параметров. Это позволит определить натяжение стяжного троса в любой момент времени. Полученные зависимости в дальнейшем лягут в основу компьютерного моделирования работы кошелькового невода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров С.В. Экспериментальные исследования процесса выборки стяжного троса моделей кошелькового невода С.В. Петров, А. А. Недоступ, В. В. Макаров Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия Рыбное хозяйство – 2015. – № 4. – С. 53-61

APPROXIMATION OF THE EXPERIMENTAL DATA FROM A SAMPLE PURSELINE MODEL PURSE SEINE

Nedostup Aleksandr Alekseevich, associate professor, PhD in Technical Sciences
 Makarov Vyacheslav Valeryevich, head of the educational research laboratory CAD

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
 Kaliningrad, Russia, e-mail: nedostup@klgtu.ru

This article presents an example of the approximation of experimental data on the choice of a lashing cable with a purse seine model. At the next stages of work, the coefficient of the approximating function will be refined and the calculation will be carried out with the rest of the experimental data. The resulting dependencies will further form the basis for computer modeling of the purse seine operation.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КАНАТНО-ВЕРЕВОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Недоступ Александр Алексеевич, доцент, канд. техн. наук,
заведующий кафедрой промышленного рыболовства
Ражев Алексей Олегович, младший научный сотрудник
Насенков Павел Владимирович, специалист по учебно-методической работе
Коновалова Карина Витальевна, магистрант кафедры промышленного рыболовства

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: nedostup@klgtu.ru

В статье рассмотрены теоретические исследования физико-механических свойств канатно-веревочных изделий канатно-сетной части трала. К основным физико-механическим свойствам канатно-веревочных изделий относятся: диаметр, линейная плотность, разрывное усилие.

Исследования физико-механических свойств (ФМС) канатно-веревочных изделий (КВИ) находятся на этапе интенсивного развития, чему способствует создание более современных нитевидных изделий, изготавливаемых из различных типов синтетических смешанных материалов. Тем более актуальным становится теоретическая часть исследования данных свойств.

Диаметр КВИ является одним из самых важных ФМС КВИ. С увеличением диаметра возрастает не только прочность изделия, но и его масса, поэтому при изготовлении канатно-сетной части трала, необходимо выбирать подходящее соотношение диаметра изделия и его массы. Так как КВИ не имеют четкой цилиндрической формы (на изделии присутствуют впадины и выступы), то возникают трудности определения диаметра. В связи с этой проблемой, различают 2 понятия: номинальный и ориентировочный диаметр. Номинальный диаметр прописывается в стандартах и паспортных данных изделий и характеризуется размером поперечного сечения нитевидного материала с легко изменяемой формой сечения. Ориентировочный – определяют через длину окружности описанную вокруг наиболее выступающих точек поперечного сечения изделия (см. рис. 1). Длина окружности изделия измеряется в миллиметрах [1].

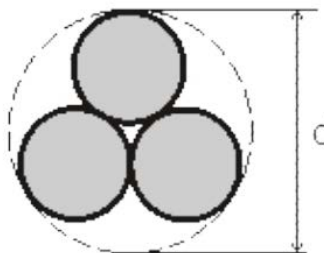


Рис. 1. Определение ориентировочного диаметра

Различают несколько методов определения диаметра:

- на трубу (стержень), диаметром от 50 мм и более, плотно наматываются 11 шлагов. Затем штангенциркулем измеряют расстояние от 1 до 11 шлага и делят полученное значение на 10. Таких измерений делают несколько и берут среднюю величину;
- используя микроскоп с микрометрическим объективом;
- нитевидное изделие обертывают в несколько слоев полоской бумаги шириной 10 мм, делают прокол иглой и с помощью штангенциркуля измеряют расстояние между проколами, а полученное значение делят на число π [2];

- при известной структуре нитки, ее диаметр можно рассчитать по формуле (1):

$$d = A \times \sqrt{\frac{T \times n}{1000}} \quad (1)$$

где: A - коэффициент, зависящий от структуры нитки и ее материала. T – линейная плотность (Текс). n – число текстильных нитей, которые образуют КВИ [3].

Линейная плотность прямо пропорциональна площади поперечного сечения КВИ, и из этого следует, что чем больше линейная плотность, тем толще само изделие. В соответствии с ГОСТ, линейная плотность характеризуется отношением массы изделия на единицу его длины (2) [4]:

$$T = \frac{m}{L} \quad (2)$$

где: m - масса КВИ (гр.). L - длина КВИ (км.).

Линейную плотность КВИ используют при обозначении структуры изделия скрученного из нескольких нитей. Структура выражается следующим образом (3):

$$T = m/L_{\text{Текс}} \times n_1 \times n_2 \times n_3 \quad (3)$$

где: m/L – линейная плотность первичных нитей (Текс). n_1 – число первичных нитей в первом кручении; n_2 – число групп во втором кручении; n_3 – число групп или ниток в третьем, окончательном кручении [5].

Помимо большой прочности, при низкой плотности, синтетические изделия имеют еще одно ценное ФМС - способность удлиняться под нагрузкой, на которой основаны амортизационные свойства изделий. Удлинение – увеличение длины изделия под нагрузкой при растяжении. Выражается в единицах длины. Удлинение находят для определения дальнейших условий эксплуатации КВИ. Например, при постройке орудий лова необходимо учитывать удлинение ячей под нагрузкой, чтобы избежать его деформации. Принято выделять несколько видов удлинения:

- абсолютное полное удлинение зависит от состояния и структуры образца, длины и от величины прилагаемой нагрузки.

- абсолютное разрывное удлинение – это приращение длины нити к моменту ее разрыва [6].

- относительное удлинение - это отношение абсолютных значений удлинений (деформаций) к первоначальной длине испытуемых КВИ.

Относительное удлинение материалов определяет способность сохранять заданную длину под прилагаемой нагрузкой. Относительное удлинение (ε) - представляет собой отношение абсолютного полного удлинения к первоначальной расчетной длине (l_0) и выражается в процентах (4) [7]:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (4)$$

где: l_1 – длина образца в момент нагрузки или в момент разрыва (мм.). l_0 – первоначальная длина КВИ (мм.). Удлинение КВИ определяется с помощью разрывных машин.

Разрывная нагрузка (прочность) КВИ – это одно из основных ФМС. Прочность КВИ зависит от многих факторов: от материала, толщины, обработки, влажности, способа изготовления и ряда других факторов, а от прочности полученного изделия зависит его разрывная нагрузка. Разрывной нагрузкой называется максимальное усилие, приложенное к образцу, при котором он разрывается. Измеряется в ньютонах и вычисляется отношением разрывного усилия к коэффициенту запаса прочности. Выбираемый при расчетах коэффициент запаса прочности зависит от условий эксплуатации и назначения изделия [8].

Для получения данных о разрывной нагрузке применяют разрывные машины. [9]

Рассмотрим задачу деформирования идеально гибких КВИ, из которых изготовлены разноглубинные тралы (канатные связи, элементы сетных пластин). КВИ по своей структуре анизотропны. Необходимо понимать важные проблемы удлинения и растяжения КВИ. При удлинении КВИ изменяется их длина и диаметр, и, в таком случае, изменяется гидродинамический коэффициент сопротивления канатно-сетной оболочки трала [10].

Коэффициент Пуассона μ для материала КВИ представим в виде (5):

$$\mu = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon} = \left| -\frac{\Delta d}{d} \frac{L}{\Delta L} \right| = \frac{\Delta d}{\Delta L} \frac{L}{d} = \frac{\Delta d}{\Delta L} \lambda \quad (5)$$

где ε - относительная продольная деформация; ε_d - относительная поперечная деформация; Δd - приращение диаметра; d - диаметр; L - длина; ΔL - приращение длины; λ - конструктивное удлинение (6):

$$\lambda = \frac{L}{d} \quad (6)$$

На основании исследований [11] рассмотрим систему уравнений физико-механических свойств КВИ (7):

$$\begin{cases} ke=\alpha \\ e=\alpha^2 \\ \chi = \mu\alpha \\ ek^2=1 \\ \alpha k=1 \end{cases} \quad (7)$$

где: k - коэффициент пропорциональности (8); $e = H_y/H_x = E_y/E_x$ (9), H_x - производительность продольных сил; H_y - производительность поперечных сил; E_x - модуль упругости в продольном направлении; E_y - модуль упругости в поперечном направлении; $\alpha = T_y/T_x$ (10), T_x - продольные силы (сила растяжения); T_y - поперечные силы (силы сжатия), $\alpha^2 = H_y/H_x$ (11); $\chi = T_y^d/T_x^L$ (12), T_y^d - компенсационная сила (противодействия T_y) в поперечном направлении, оси OY; T_x^L - компенсационная сила (противодействия T_x) в продольном направлении (вдоль оси OX);

$$k = 4\mu\lambda \frac{(1+\varepsilon)}{(1-\mu\varepsilon)} \quad (8)$$

$$e = \frac{H_y}{H_x} = \frac{E_y}{E_x} \quad (9)$$

$$\frac{T_y}{T_x} = \frac{(1-\sqrt{\frac{1}{1+\varepsilon}})}{\varepsilon\lambda} = \alpha \quad (10)$$

$$\frac{H_y}{H_x} = \left(\frac{(1-\sqrt{\frac{1}{1+\varepsilon}})}{\varepsilon\lambda} \right)^2 = \alpha^2 \quad (11)$$

$$\chi = (1 - \sqrt{\frac{1}{1+\varepsilon}}) \frac{\alpha}{\varepsilon} \quad (12)$$

$$\mu = (1 - \sqrt{\frac{1}{1+\varepsilon}}) \frac{1}{\varepsilon} \quad (13)$$

где ε - относительная продольная деформация.

Так как КВИ условную окружность, то примем, что ось OZ совпадает при вращении КВИ (см. рис. 1).

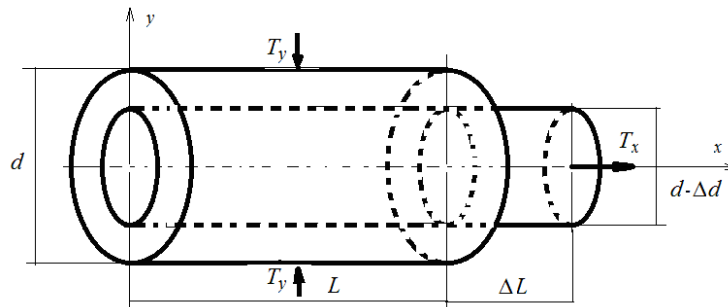


Рис. 2. КВИ при растяжении

Получены зависимости вида (14,15):

$$\varepsilon = \frac{T_x^l}{T_x} \quad (14)$$

$$\varepsilon_d = \frac{T_y^d}{T_y} \quad (15)$$

где ε_d - относительная поперечная деформация.

На основании опытных данных, а также зависимостей (10) и (11) сделаем выводы, для стали $T_x > T_x^l$, для КВИ может быть любое равенство или неравенство, аналогично для стали $T_y > T_y^d$, для КВИ может быть любое равенство или неравенство.

Отобразим графически зависимость вида $\chi = f(\varepsilon, \lambda)$, причем $\alpha = f(\varepsilon, \lambda)$ на рис. 3.

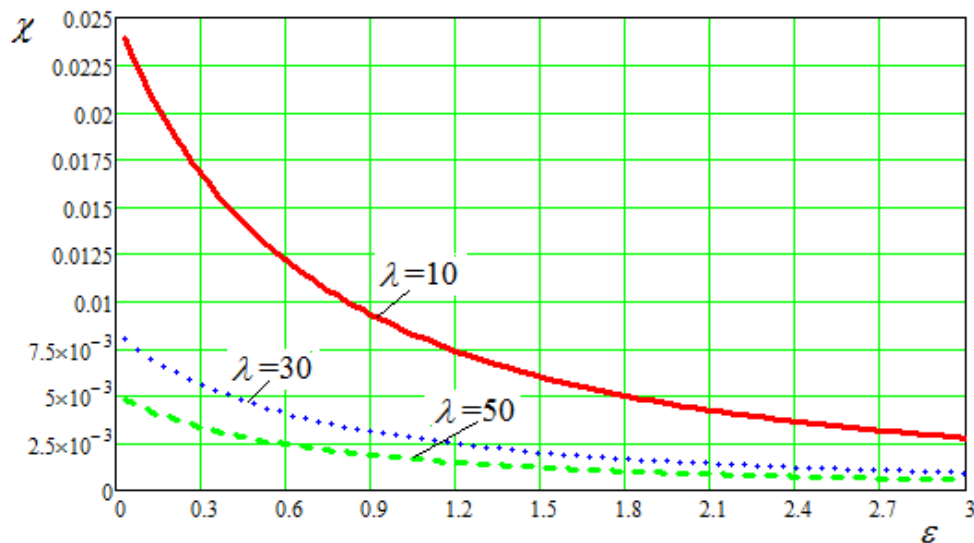


Рис. 3. Зависимость вида $\chi=f(\varepsilon, \lambda)$

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Калининградской области в рамках научного проекта № 19-48-390004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев А. П., Корчагина И. В., Суконова Т. Е. Материалы рыболовные текстильные. Методы испытаний, РД-15-191-91 – Калининград: «МИНРЫБХОЗ СССР», 1991
2. ГОСТ 24104-2001 Весы лабораторные. Общие технические требования. - Москва, 2007. - 8 с.
3. Лапина Е.А. «Рыболовные материалы. Методические указания к лабораторным работам для студентов специальности 311800 «промышленное рыболовство»». – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2004. – 60 с.

4. ГОСТ 10878-70 Материалы текстильные. Линейная плотность в единицах текс и основной ряд номинальных линейных плотностей. - Москва, 1972. - 4 с.
5. Перепелкин К.Е. Структура и свойства волокон. М.: Химия, 1985. - 208 с.
6. Энциклопедия по машиностроению XXL // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://mash-xxl.info/info/46811/> (дата обращения 25.07.2020).
7. Определение одноцикловых характеристик - составных частей деформации нитей при растяжении // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://studfiles.net/preview/3287804/page:4/> (дата обращения 25.07.2020).
8. ГОСТ 6611.2-73 (ИСО 2062-72, ИСО 6939-88) Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве. - Москва, 1997. - 35 с.
9. Анализ разрывного оборудования для исследования рыболовных нитевидных материалов / Насенков П.В. // Материалы II национальной научно-технической конференции "Инновационное развитие рыбной отрасли в контексте обеспечения продовольственной безопасности РФ", г. Владивосток, 14 декабря 2018. - Владивосток, 2018. - С. 66-72.
10. Недоступ А.А., Ражев А.О. Производительность сил траловой системы - I. (Постановка задачи) // Известия КГТУ. - 2020. (в печати).
11. Недоступ А.А., Ражев А.О. Производительность сил траловой системы - III. (Математическое моделирование. Часть I) // Известия КГТУ. - 2020. (в печати).

THEORETICAL STUDIES OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ROPE-THREAD PRODUCTS

Nedostup Aleksandr Alekseevich, associate professor, PhD in Technical Sciences,
Head of the Department of commercial fishing
Razhev Aleksey Olegovich, research scholar
Nasenkov Pavel Vladimirovich, specialist in educational and methodical work
Konovalova Karina Vitalievna, master of the Department of commercial fishing

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",
Kaliningrad, Russia, e-mail: nedostup@klgtu.ru

This article discusses theoretical studies of the physical and mechanical properties of rope-thread products of the rope-netting part of the trawl. The main physical and mechanical properties of the rope-thread products include: diameter, linear density, breaking strength.

РЫБОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС МУРМАНСКОГО РЕГИОНА КАК ГАРАНТ БЕЗОПАСНОСТИ СТРАНЫ

¹Пашеева Татьяна Юрьевна, канд. техн. наук, доцент кафедры Технологии материалов и судоремонта Мурманского государственного технического университета

²Чечурина Майя Николаевна, д-р экон. наук; профессор кафедры экономики и управления морехозяйственной деятельностью Мурманского государственного технического университета

³Кузьменко Алексей Валерьевич, заместитель руководителя внешнеэкономического отдела Рыболовецкого колхоза им. М.И. Калинина, г. Мурманск

⁴Тамбовцев Артём Артурович, заместитель председателя по эксплуатации флота Рыболовецкого колхоза им. М.И. Калинина, г. Мурманск

^{1,2}ФГАОУ ВО Мурманский государственный технический университет,
г. Мурманск, Россия, e-mail: tatjana-pasheeva@rambler.ru

^{3,4}Рыболовецкий колхоз им. М.И. Калинина, г. Мурманск, e-mail: rkkalinina.cs@gmail.com

Рыбная отрасль – важнейшая отрасль экономики России, которая обеспечивает продовольственную безопасность страны, определяет качество жизни людей, а также экономическое благополучие регионов. Влияние внутренних и внешних факторов оказало значительное воздействие на изменение численности и структуры добывающего флота Северного бассейна, его технические, производственные и возрастные характеристики. Решить проблему технического перевооружения отрасли можно только на государственном уровне.

Рыбные богатства Мурмана еще с конца XVI столетия привлекали к себе внимание русского правительства. На развитие рыбных промыслов положительное воздействие имело создание в 1895 году Комитета для помощи поморам Русского Севера. В 1898 году при нем была открыта Экспедиция для научно-промысловых исследований у берегов Мурмана. Экспедиция была оснащена специально оборудованным научно-исследовательским судном «Андрей Первозванный». В работе экспедиции с 1898 по 1902 год принимал участие известный ученый – ихтиолог профессор Николай Михайлович Книпович. Экспедиция занималась научно-промысловыми исследованиями, изданием промысловых карт, оценкой промысловых характеристик новых типов судов.

Вдоль Мурманского побережья и в Белом море рыбный промысел запасов трески и пикши велся с давних времен. Архангельск в то время стал центром рыбной торговли в стране. В 1924 году промышленное рыболовство в Баренцевом море начали вести из Мурманска [1].

Спор о том, чей флот главнее и старше – Мурманский или Архангельский, идет с послевоенных лет. 29 июня 1920-го началось историческое «летоисчисление» Мурманского и Архангельского траловых флотов. Именно в этот день из устья Северной Двины первым вышел в промысловый рейс траулер Т-30, за ним в море пошли другие суда национализированной траловой флотилии. По сути, начался государственный промысел рыбы в России [2].

Траловый флот до 1924 года базировался на Архангельск, до 1930 года – и на Архангельск, и на Мурманск, а с 1930 года, после окончания строительства порта в Мурманске, – полностью на Мурманск. Развитие советского рыбопромыслового флота было приостановлено Великой Отечественной войной. Квалифицированные и физически здоровые рыбаки ушли в военный флот. На промысловые суда пришли люди преклонного возраста, женщины и подростки. В Военно-морском флоте промысловые суда отлично проявили себя в различных видах боевой деятельности: они тралили и уничтожали вражеские мины, несли дозорную службу и службу противовоздушной обороны, охраняли гавани от неприятельских подлодок, конвоировали суда, высаживали десанты, мелкие суда использовались для снабжения боеприпасами и продовольствием армии.

В послевоенный период основной задачей для рыбной промышленности стало восстановление разрушенного во время войны хозяйства и увеличение объема добычи рыбы, была поставлена задача: обеспечить средний вылов рыбы на душу населения 19,3 кг. Для организации океани-

ческого рыболовства необходимо было создать крупный рыбопромысловый флот с совершенными орудиями лова для комплексной механизации добычи рыбы, холодильной техникой и технологией для комплексной механизации и автоматизации процессов обработки рыбы.

Повышение эффективности работы флота рыбной промышленности осуществлялось за счет следующих мероприятий:

- повышения эффективности использования существующих производственных мощностей судов;

- увеличения численности добывающего, рыбообрабатывающего, рефрижераторного транспортного и обслуживающего флотов с увеличением автономности плавания и мощности судов, оснащения флота передовой техникой лова рыбы и совершенными радио – и гидроакустическими приборами;

- организации механизированной обработки рыбы в открытом море на рефрижераторных судах, плавбазах и плавучих консервных заводах.

За период с 1946 по 1957 годы была произведена замена деревянных сейнеров стальными, деревянных траловых ботов композитными, а затем стальными. В 1957 году впервые в практике отечественного судостроения корпуса ботов типа «Дори» были построены из алюминий-магниевого сплава вместо дерева. Для отделки и оборудования судов использовались пластические массы, новые виды изоляции, краски. На отдельных типах судов для большей маневренности были применены дизель – электрические установки на базе быстроходных дизелей. Основным типом двигателей на судах стали гребные винты, внедрение винтов с регулируемым шагом позволило улучшить маневренность судов, более экономно использовать моторесурс двигателей и обеспечить управление судном из рулевой рубки. На рыбопромысловом флоте стала внедряться поисковая аппаратура, приборы и устройства, контролирующие работу орудий лова. К концу 1957 года произошло техническое переоснащение флота рыбной промышленности.

В последующие годы были достигнуты значительные успехи в развитии флота рыбной промышленности. За счет обновления флота, систематической модернизации судов, совершенствования организации производства на судах флота регулярно увеличивались объемы поставок рыбной продукции.

Рыболовство было и будет оставаться важнейшим поставщиком пищевой рыбной продукции в России. Доля пищевой рыбопродукции в общем вылове, при увеличивающихся объемах промысла малоценных видов рыб, к 2020 году составит около 2 млн. т. При этом дефицит отечественного пищевого рыбного белка, даже при прогнозируемом уменьшении численности населения к 2020 году до 131 млн. человек, составит более 0,5 млн. т [3].

Федеральный закон «О потребительской корзине населения в Российской Федерации» 2006 года устанавливает норму потребления рыбы и других морских и пресноводных организмов в размере 15,7 кг/год на душу населения в Российской Федерации. Рациональная норма потребления для населения России, установленная Российской академией медицинских наук в 1994 году составляет 18,6 кг/год на человека. Биологическая норма для населения Российской Федерации, установленная Институтом питания Российской академии наук в 1976 году составляет 23,7 кг/год на человека.

Потребность населения России в рыбопродукции в зависимости от норм душевого потребления представлена в таблице 1.

Рыбное хозяйство является источником обеспечения населения России продуктами питания и играет важнейшую роль в продовольственном комплексе прибрежных регионов, в том числе Мурманской области. Высокая пищевая ценность рыбной продукции объясняется большой концентрацией белков животного происхождения с нужным набором незаменимых аминокислот в единице массы. Биологическая ценность белков рыбы не ниже, чем мяса, но они быстрее перевариваются и усваиваются организмом.

**Потребность населения России в рыбопродукции
в зависимости от норм душевого потребления [3]**

Федеральный закон «О потребительской корзине населения в Российской Федерации» 2006 года – 15,7 кг/человека/год	Удовлетворяется с 2009 года
Рациональная норма потребления для населения России, установленная Российской академией медицинских наук в 1994 году – 18,6 кг/человека/год	Дефицит рыбопродукции – 487 тыс.т
Биологическая норма для населения Российской Федерации, установленная Институтом питания Российской академии наук в 1976 году – 23,7 кг/человека/год	Дефицит рыбопродукции – 1635 тыс.т

Пищевая и товарная ценность рыбы зависит от ее калорийности, и в первую очередь от содержания жира. В мясе различных видов рыб содержание жира колеблется от 0,3 до 30%. Энергетическая ценность рыбы ниже, чем мяса, зерновых и бобовых растений. Благоприятное влияние рыбной диеты объясняется содержанием в морских гидробионтах жира, богатого полиненасыщенными кислотами, снижающими содержание холестерина в крови, жирных кислот, липопротеинов низкой плотности как основных факторов риска. Рыба является источником не только жира и белка, но и некоторых необходимых для человеческого организма минеральных веществ и многих витаминов. Рыбные продукты используются как лечебные, лечебно-профилактические, диетические.

Рыбное производство является крупным поставщиком кормовой продукции: рыбной муки, рыбьего жира, заменителя цельного молока, мороженой кормовой рыбы, химически консервированной кормовой рыбы, аминокислотного кормового концентрата, муки крилевого кормовой, фарша крилевого кормового, сыромороженого криля для кормовых целей.

«Потребление рыбы – жизненно важный фактор сохранения здоровья и долголетия нации, поскольку именно рыба является основным источником омега-3 жирных кислот, которые необходимы для профилактики неинфекционных заболеваний населения, что напрямую влияет на увеличение продолжительности жизни человека», – говорится в сообщении Рыбного союза [4].

По данным отраслевой организации, за пять лет, с 2013 по 2018 год, россияне стали есть рыбы меньше почти на 30%. В среднем россияне в настоящее время потребляют около 13,5 килограммов рыбы в год при норме потребления в 22 килограмма. Рыбный союз высказал обеспокоенность снижением потребления рыбы в России. Чтобы насытить внутренний рынок, необходимо ежегодно добывать 4,8 миллиона тонн рыбы в год. Уровень добычи составляет около пяти миллионов тонн в год, что достаточно для того, чтобы обеспечить потребности россиян в свежей и замороженной рыбе и рыбной продукции, но при этом большая часть уходит на экспорт [4].

В своей книге «Проверено жизнью: воспоминания старого капитана» автор книги Абакумов Александр Викторович написал: «На все сто процентов уверен, что с учетом опыта наших предков и с учетом нашего опыта работы у берегов Мурмана можно во много раз увеличить поставку свежей и охлажденной рыбы населению. Подчеркиваю, догматический, негосударственный подход к защите интересов России, без учета исторического опыта, особенно после введения российской экономической зоны, привело к тому, что мы потеряли производственный потенциал во всех наших традиционных районах Баренцева моря»

Россия имела опыт развития производства и торговли совершенно иной. Недаром Петр I, чтобы развивать торговлю с западными странами, заставлял купцов возить туда готовую продукцию. И пошлины царь для готовой продукции отменил, чтобы только не ослаблять государство экономически. У нас же все происходит с точностью до наоборот. Ослаблено производство – оно гонит за рубеж «кругляк». А для своего народа – либо готовая продукция втридорога, либо «остатки роскоши» [5].

В 90-е годы мы наблюдали, как были полностью разрушены отраслевая система управления и вертикальные управленческие связи, и сейчас видим последствия этих «реформ». Реформы идут неудовлетворительно, и какой-то отдачи, особенно для населения, от этих реформ нет. Во всяком случае, количество произведенного в стране рыбного белка не увеличивается. Здравый смысл всех управленческих новаций был и есть один: увеличить потребление рыбы на душу населения в стране. Это вопрос безопасности и независимости страны [5].

В 1990 году в состав «Севрыбы» входило 37 производственных объединений, предприятий и организаций. Промысловый флот насчитывал 397 единиц, в том числе в Мурманской области – 269 единицы. Переработка рыбы на берегу осуществлялась Мурманским рыбокомбинатом, в ко-

торый входило 8 рыбозаводов, в Архангельской области и в Карелии действовало 10 рыбоперерабатывающих предприятий. Общий вылов в 1990 г. составлял 1,6 млн. т, в том числе флотом Мурманской области – 1,2 млн. т. В региональном продукте Мурманской области рыбная отрасль составляла свыше 30%, численность занятых – 48,7 тыс. человек.

Что мы имеем на сегодняшний день? Рыба в Мурманской области продолжает дорожать, а ее потребление снизилось примерно вдвое, несмотря на то, что объемы вылова в последние годы достаточно высоки. Основная причина этого – дороговизна рыбопродукции в розничной торговле. По сравнению с 2013 годом цены на рыбу выросли в $2,5 \div 3$ раза. Чем можно объяснить такой рост цен?

Сегодня вновь рассуждаем о том, что надо увеличить потребление рыбы и морепродуктов на душу населения в нашей стране. В последнее время на эту тему говорят на уровне правительства. Осталось решить, как это сделать практически [5].

Книга «Проверено жизнью: воспоминания старого капитана» автора Абакумова Александра Викторовича была издана в 2008 году. Прошло 12 лет, что изменилось с тех пор в судьбе рыбной промышленности России, рыболовного флота?

Промышленный потенциал претерпел коренные изменения. Численность промысловых судов с 269 единиц сократилась до 170 единиц, средний срок службы судов составляет около 24 лет, что выше нормативного [6].

Негативное влияние внутренних и внешних факторов оказало значительное воздействие на изменение численности и структуры добывающего флота Северного бассейна, его технические, производственные и возрастные характеристики. Эти изменения с начала 90-х годов прошлого века снизили его промыслово-производственный потенциал. Одновременно происходило старение, рост физического износа по всем группам и типам судов.

В Концепции федеральной целевой программы «Повышение эффективности использования и развития ресурсного потенциала рыбохозяйственного комплекса в 2009–2013 годах» и в «Концепции развития рыбного хозяйства Российской Федерации до 2020 года» были поставлены следующие задачи: обеспечение устойчивого развития рыбохозяйственного комплекса; обеспечение перехода развития рыбохозяйственного комплекса от экспортно-сырьевого типа к инновационному; создание новых технологий добычи водных биологических ресурсов, глубокой и комплексной переработки сырья; развитие рыбоперерабатывающих мощностей и укрепление позиций России на мировом рынке рыбной продукции на основе повышения степени ее переработки [7].

В декабре 2010 года была утверждена Стратегия морской деятельности Российской Федерации до 2030 года. Важность документа определяется тем обстоятельством, что именно в море реализуется стратегическая роль и значение Северного флота, экстенсивное развитие аквакультуры и интенсификация добычи и переработки традиционных и новых биоресурсов [8].

Основные проблемы рыбной отрасли заключаются непосредственно в неэффективности промысла. Отсутствие новых рыбопромысловых судов, большая степень износа основных фондов, эксплуатация морально устаревших судов, сокращение выпуска молоди водных биологических ресурсов – все эти факторы приводят к снижению объемов добычи рыбы [9].

За прошедшие 30 лет российские рыбаки попали в полную зависимость от иностранных поставщиков, при этом средний возраст флота достиг 35 лет, износ перешагнул 90%. Старение рыбного флота – огромная проблема. Отечественные судостроительные компании не справляются с объемом строительства, который заявлен под инвестиционные квоты, не могут отстроить то, что заложено [10].

Рассмотрим работу рыболовецкого колхоза им. М. И. Калинина, одного из ведущих экспортеров рыбопродукции в России. Основными видами деятельности компании являются ведение рыбного промысла, переработка и продажа рыбопродукции. Компания осуществляет свою деятельность через филиалы в Мурманске, Архангельске и Москве, и реализует свою продукцию по всему миру. Квота на 2020 год: треска 9100 тонн, пикша 2800 тонн.

Выделим основные проблемы, с которыми сталкивается рыболовецкий колхоз им. М. И. Калинина в своей деятельности:

- отсутствие условий для докования судов;
- отсутствие производственной базы для ремонта основных узлов силовых установок, агрегатов иностранного производства;

- отсутствие запасных частей, инструментов, приспособлений для ремонта основных узлов силовых установок и агрегатов иностранного производства (огромные сроки поставки из-за рубежа, сложности с таможенным оформлением);
- нехватка высококвалифицированного персонала.

Новые суда рыболовецкий колхоз не приобретал, самое новое судно АК-0777 «Изумруд», 1996 года постройки, было приобретено в 2017 году. Рыболовные суда, которыми располагает рыболовецкий колхоз им. М. И. Калинина и даты их постройки указаны в таблице 2.

Таблица 2

Рыболовные суда рыболовецкого колхоза им. М. И. Калинина

Наименование судна	Дата постройки
Рыболовное судно «Сапфир»	1987
Рыболовное судно Изумруд»,	1996
Рыболовное судно «Антиас»,	1993
Рыболовное судно «Капеллан»	1994
Рыболовное судно «Капродон»	1993

Рыболовецкое судно является сложной технической системой, в связи с чем выделить экономическую составляющую судоремонта в Мурманске достаточно сложно по ряду причин, как то разные виды работ, разные механизмы, узлы, агрегаты и т.д. Одно можно сказать точно: хоть в Норвегии стоимость работ выше (примерно на 10÷20%), но производство ремонтов, сроки выполнения работ гораздо меньше, чем в России, что в свою очередь позволяет судам проводить больше времени на промысле, и, как следствие, повысить уловы и прибыль компаний. Время производства работ и четко соблюдаемые сроки зачастую являются одними из основополагающих факторов выбора подрядчика, потому как известно, что судно «зарабатывает» только тогда, когда ведет промысел и перерабатывает уловы, все остальное время, включая время перехода на выгрузку, простои в портах, связанные с различными проверками, ремонтными работами и т.д. приводит к дополнительным издержкам судовладельца и как следствие к увеличению себестоимости рыбопродукции и снижению конкурентоспособности рыбодобывающего предприятия на рынке. Существенное влияние на эффективность работы рыбопромыслового флота оказывает повышение эксплуатационного времени за счет уменьшения различных простоев. Наибольший вес в структуре общего внеэксплуатационного времени судов занимает время, затрачиваемое на судоремонт. Время простоя отдельного судна в ремонте тем больше, чем хуже его техническое состояние. Судоремонт нельзя рассматривать в отрыве от действующей системы эксплуатации судов. Износ деталей машин, систем и конструкций корпуса судна неизбежен, но величина его в значительной степени зависит от качества технической эксплуатации.

Физический износ вначале не вызывает видимого ухудшения технического состояния, расходы на эксплуатацию остаются определенное время без существенных изменений, затем наступает период сначала медленного, а затем более быстрого увеличения эксплуатационных расходов и наступает такой момент, когда эксплуатация судна становится экономически нецелесообразной. Достигнув допустимого предела, дальнейший износ машин, агрегатов и устройств может привести к их аварии, а в случае непредвиденного выхода из строя рабочих машин – вызвать невыполнение производственного плана, сверхплановые затраты на ремонт. Потери от вывода судов из эксплуатации весьма значительны. Уменьшается объем транспортной продукции, уменьшаются прибыль и эффективность капитальных вложений. С увеличением физического износа возрастает вероятность аварийных повреждений, ухудшаются технико-экономические показатели.

Моральный износ характеризует экономическую невыгодность эксплуатации судов по сравнению с более современными. По имеющимся данным, в настоящее время около 60% рыбопромысловых судов России эксплуатируются сверх нормативного срока службы. При этом средний возраст судов данной категории составляет более 18 лет. Устойчивый рост физического износа рыбопромыслового флота и приближение его к предельному уровню требуют активизации воспроизводственного процесса, реализации кардинальных форм и методов обновления на основе строительства (приобретения) новых судов.

Основные проблемы развития морской деятельности Российской Федерации:

- отставание от принятых норм уровня удовлетворения физиологических потребностей граждан Российской Федерации в протеине морского происхождения, что отрицательно влияет на качество и продолжительность жизни населения;
- высокие экономические потери от незаконного оборота водных биологических ресурсов, добытых в акваториях, находящихся под юрисдикцией Российской Федерации;
- физическое и моральное старение рыбопромыслового флота;
- недостаточный объем строительства и модернизации судов рыбопромыслового флота на отечественных судостроительных предприятиях;
- недостаточный уровень развития инфраструктуры терминалов морских портов, предназначенных для комплексного обслуживания судов рыбопромыслового флота;
- несовершенство законодательства Российской Федерации, регулирующего отношения в области рыболовства и сохранения водных биологических ресурсов;
- недостаточный уровень внедрения систем дистанционного контроля за промысловой деятельностью;
- низкий уровень промысла рыбы и других морепродуктов судами, плавающими под Государственным флагом Российской Федерации, и судами российских рыбопромысловых компаний в исключительных экономических зонах иностранных государств и открытых районах Мирового океана [11].

По данным Росрыболовства из 19 основных показателей предыдущей «Стратегии 2020» развития рыбохозяйственного комплекса, выполнены лишь два, причем не выполненными остались все три приоритетных показателя, а именно: по объему вылова; объему производства товарной пищевой продукции; среднелюдскому потреблению [12].

Мировой океан всегда занимал важное место в жизни человека. Научно-технический прогресс открыл новые возможности освоения его богатств. В последнее время проблемы исследования и использования естественных морских ресурсов имеют актуальнейшее значение, так как эти ресурсы призваны восполнить продовольственный, сырьевой и энергетический дефицит, который характерен для подавляющего большинства стран мира. Океаническая рыба является продуктом питания «от бога», так как ее не надо выращивать. Морской промысел не зависит от засухи, дождей и других природных условий. Увеличение доли биоресурсов моря в решении продовольственной проблемы предопределяется тем, что 90% животного белка нашей планеты содержится в океане. Морские биологические ресурсы являются и будут оставаться основным источником пополнения возрастающей потребности человечества в водных животных и растениях [13].

Рыболовство, традиционный вид использования биоресурсов, остается одной из важнейших сфер морской деятельности. Морской промысел биоресурсов призван сыграть существенную роль в решении продовольственной проблемы человечества.

Проблему технического перевооружения рыбной отрасли можно решить только на государственном уровне. В 2019 году правительством РФ утверждена Стратегия развития рыбохозяйственного комплекса 2030, цели и задачи которой направлены на лидерство России в мировом рыболовстве, насыщение внутреннего рынка качественной доступной продукцией, сохранение занятости населения на прибрежных территориях. Восстановление потенциала рыбной отрасли – острая необходимость, для этого нужен новый флот, новые технологии добычи и переработки рыбы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РК им. М. И. Калинина // Cold Waters: сайт. URL: <http://coldwaters.ru/ru/o-hac/> (дата обращения: 03.09.2020).
2. Георги В. Как создавалась «рыбья флотилия» / беседу вела Н. Антонян // БЕЗФОРМАТА : сайт. URL: <https://murmansk.bezformata.com/listnews/kak-sozdavalas-ribya-flotiliya/77677134/> (дата обращения: 03.09.2020).
3. Васильева Л. М. Аквакультура реальный путь насыщения российского потребительского рынка рыбопродуктов // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. Воронеж, 2013. № 1. С. 57–62. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21567725_33401925.pdf (дата обращения: 04.09.2020).

4. Рыбный союз зафиксировал снижение потребления рыбы на треть // FISHRETAIL : сайт. URL: <https://fishretail.ru/news/ribniy-soyuz-zafiksiroval-snigenie-potrebleniya-ribi-na-tret-412423> (дата обращения: 04.09.2020).
5. Абакумов А. В. Проверено жизнью: воспоминания старого капитана. Мурманск : [б. и.], 2008. 191 с. (Рыбацкие мемуары).
6. Васильев А. М. Рыбное хозяйство Мурманской области в системе экономической безопасности региона // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2011. № 5. С. 78–87.
7. Васильев А. М., Куранов Ю. Ф. Социально-экономическое значение развития прибрежного рыболовства на Мурмане // Вестник Кольского научного центра РАН. 2010. № 3. С. 78–84.
8. Васильев А. М., Денисов В. В. Проблемы и перспективы комплексного подхода к организации морской деятельности в прибрежно-морском пространстве Мурманской области // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2012. № 24. С. 2–10.
9. Вотинова Е. М., Вотинов М. В. Оценка современного состояния рыбной промышленности: статистический обзор и анализ ситуации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. 2017. № 2. С. 50–58.
10. Развитие рыбохозяйственного комплекса региона обсудили на встрече губернатора Андрея Чибиса с рыбопромышленниками // Правительство Мурманской области : сайт. URL: <https://gov-murman.ru/info/news/374898/> (дата обращения: 03.09.2020).
11. О Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года : Распоряжение Правительства Рос. Федерации № 1930-р : от 30 августа 2019 г. // ГАРАНТ.РУ : информ.-правовой портал. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72573254/#1000> (дата обращения: 03.09.2020).
12. Братухин О. И. Еще раз о необходимости государственной политики в области обновления рыболовного флота (инфографика) // FISHNET : сайт. URL: https://www.fishnet.ru/news/novosti_otrasli/92715.html (дата обращения: 03.09.2020).
13. Рогачева И.А. Рыбопромысловый флот России. Санкт–Петербург : 1996. 362 с.

FISHING COMPLEX OF THE MURMANSK REGION AS A GUARANTEE OF THE COUNTRY'S SECURITY

¹Pasheeva Tatyana Yurievna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Materials and Ship Repair, Murmansk State Technical University

²Chechurina Maya Nikolaevna, Doctor of Economics; Professor of the Department of Economics and Management of Marine Economic Activities, Murmansk State Technical University

³Kuzmenko Alexey Valerievich, Deputy Head of the Foreign Economic Department of the Fishing Collective Farm named after M.I. Kalinin, Murmansk

⁴Tambovtsev Artyom Arturovich, Deputy Chairman for Fleet Operation of the Fishing Collective Farm named after M.I. Kalinin, Murmansk

^{1,2}FGAOU VO Murmansk State Technical University, Murmansk, Russia, e-mail: tatjana-pasheeva@rambler.ru

^{3,4}Fishing collective farm im. M.I. Kalinina, Murmansk, e-mail: rkkalinina.cs@gmail.com

The fishing industry is the most important branch of the Russian economy, which ensures the country's food security, determines the quality of life of people, as well as the economic well-being of regions. The influence of internal and external factors had a significant impact on changes in the size and structure of the Northern basin mining fleet, its technical, production and age characteristics. The problem of technical re-equipment of the industry can only be solved at the state level.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОМЫСЛОВЫХ СКОПЛЕНИЙ КИЛЕК В СРЕДНЕМ КАСПИИ У ДАГЕСТАНСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ В ОСЕННИЙ ПЕРИОД

Помогаева Татьяна Васильевна, аспирант

Волжско-Каспийский Филиал ФГБНУ «ВНИРО» (КаспНИРХ),
г.Астрахань; аспирантура ФГБНУ «ВНИРО», г. Москва, e-mail: pomogtatyana@mail.ru

В настоящее время состояние запасов и районы формирования скоплений каспийских килек вызывают большой интерес рыбной промышленности. Каспийская килька является резервным объектом промысла [1; 2]. В работе представлены результаты исследований района северо-западной части Среднего Каспия у дагестанского побережья, где формируются предзимовальные и зимовальные скопления килек в осенне-зимний период.

Ключевые слова: плотность скоплений килек, гидроакустические исследования, каспийские кильки, Средний Каспий, северо-западная часть Каспийского моря, эхограмма.

Цель работы – определение перспективного района промысла килек в осенне-зимний период в северо-западной части Среднего Каспия.

Методы исследований. Исследования каспийских килек проводились на НИС «Исследователь Каспия» гидроакустическим комплексом ЕК-60 фирмы «Simrad» (Норвегия) со стационарно установленными антеннами с расщепленным лучом на 38 и 120 кГц. Обработка гидроакустической информации осуществлялась в программе постобработки «Simrad BI-60» [3]. Используемая для обработки гидроакустических файлов данная постпроцессинговая программа дает подробную детализацию распределения каспийских килек в различных горизонтах. Карты распределения построены в ArcView Gis 3.1.

Гидроакустические исследования проводились в ноябре 2019 г в северо-западной части Среднего Каспия, у Дагестанского побережья над глубинами от 30 до 70 м (рис.1).

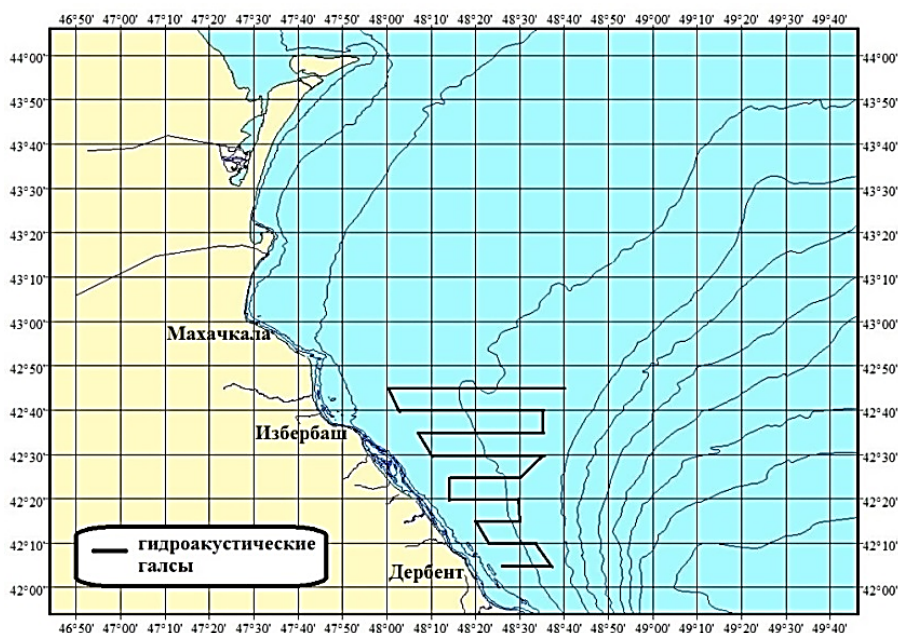


Рис. 1. Район исследований, ноябрь 2019г.

Плотные скопления килек формировались преимущественно до 50-метровой изобаты (рис.2). Средняя плотность скоплений составляла 12,8 т/миля². Биомасса – 8,4 тыс.т.

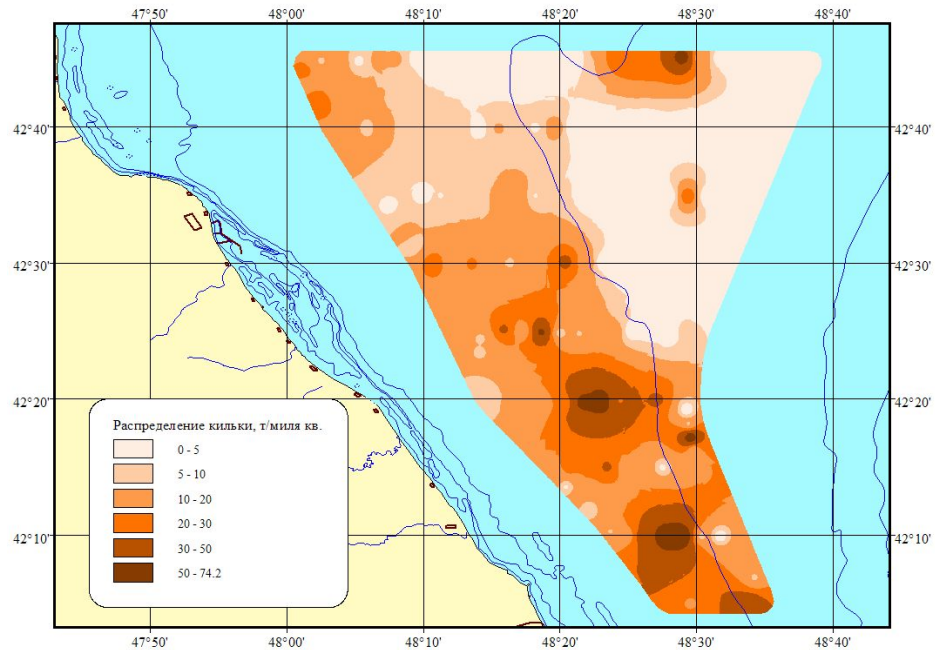


Рис. 2. Распределение каспийских килек, ноябрь 2019г.

Используя для постобработки гидроакустических файлов программу «Simrad BI-60» определялись наиболее плотные места концентраций и распределения каспийских килек в различных горизонтах моря.

Оптимальным являлось разделение концентраций по горизонтам через 10 м.

В поверхностном слое килек практически отсутствовали.

В слое 10-20 м на большей части акватории плотность скоплений килек не превышала 5 т/миля² (рис.3). Температура воды колебалась от 15,5° до 16,5°С. Было отмечено несколько небольших косячков с плотностью свыше 20 т/миля².

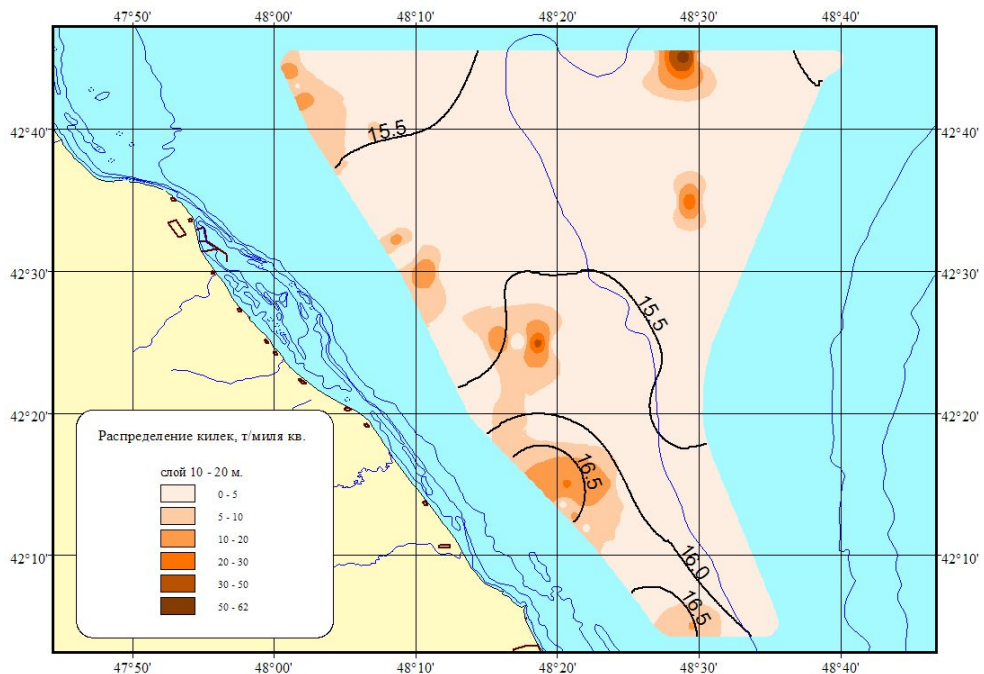


Рис. 3. Распределение каспийских килек, слой 10-20 м.

В слое 20-30 м на большей части акватории плотность скоплений килек также не превышала 5 т/миля² (рис.4), температура воды варьировала от 9,0° до 16,0°С. Максимальная плотность скоплений не превышала 28 т/миля².

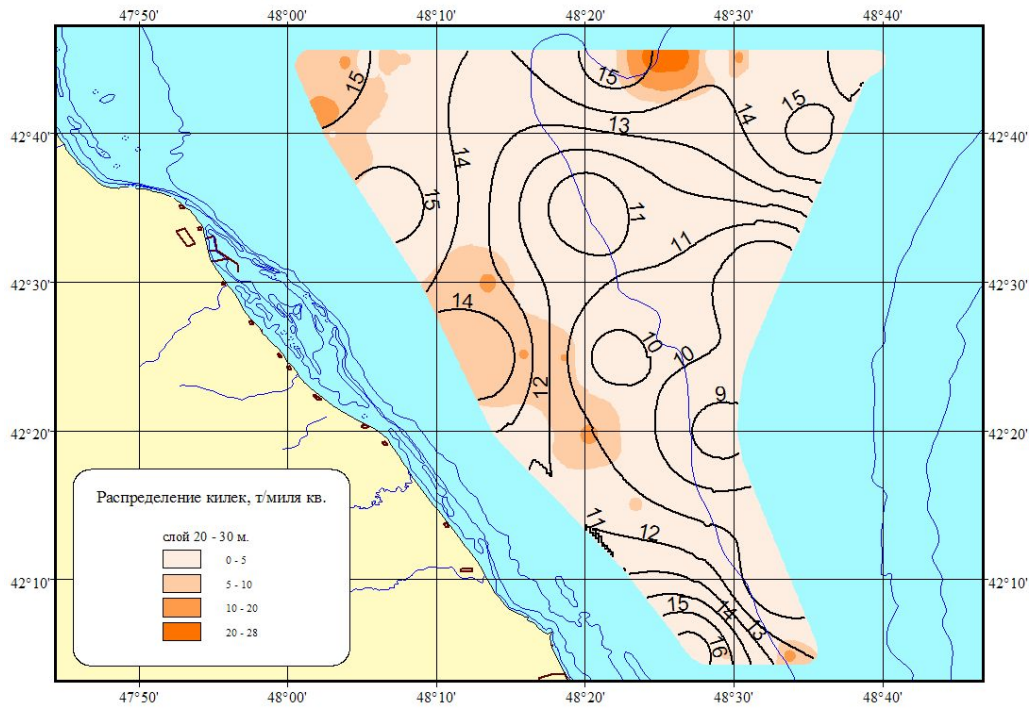


Рис. 4. Распределение каспийских килек, слой 20-30 м.

В слое 30-40 м в центральной и южной частях исследуемого района отмечены четко выраженные скопления килки с плотностью свыше 50 т/м^2 (рис.5). Температура воды варьировала от $8,5^\circ$ до $9,5^\circ\text{C}$, и являлась наиболее оптимальной для формирования зимовальных скоплений килек.

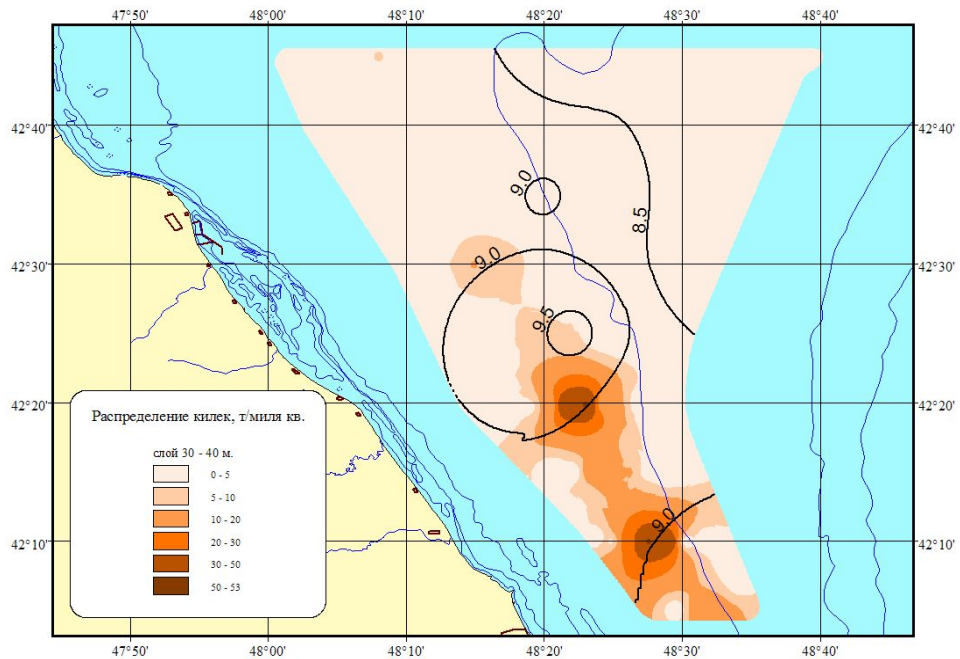


Рис. 5. Распределение каспийских килек, слой 30-40 м.

Горизонт 40-50 м не дал ясной картины распределения скоплений килек, чему мешала близость дна (рис.6).

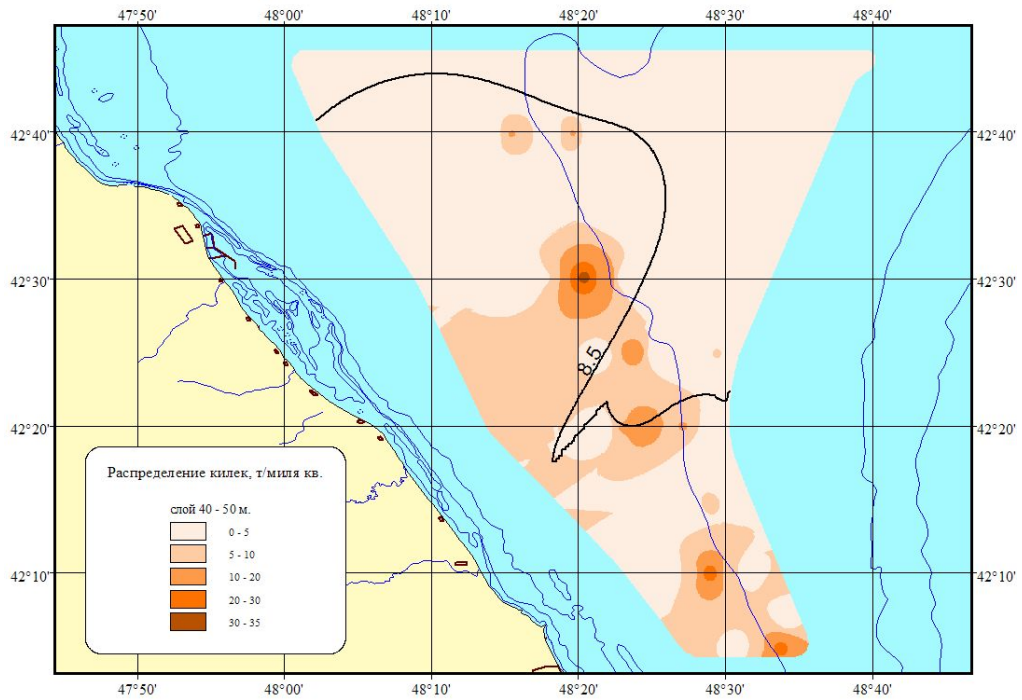


Рис. 6. Распределение каспийских килек, слой 40-50 м.

Для изучения формирования скоплений килек в разное время суток были проведены съемки в дневное и ночное время. Это показало, что днем скопления распределяются у дна, а ночью происходит формирование более плотных скоплений.

На рисунке 7 показана типичная эхограмма дневной съемки с встречаемостью килек у дна. В ночное время скопления «салятся» на грунт, становясь еще плотнее (рис.8).

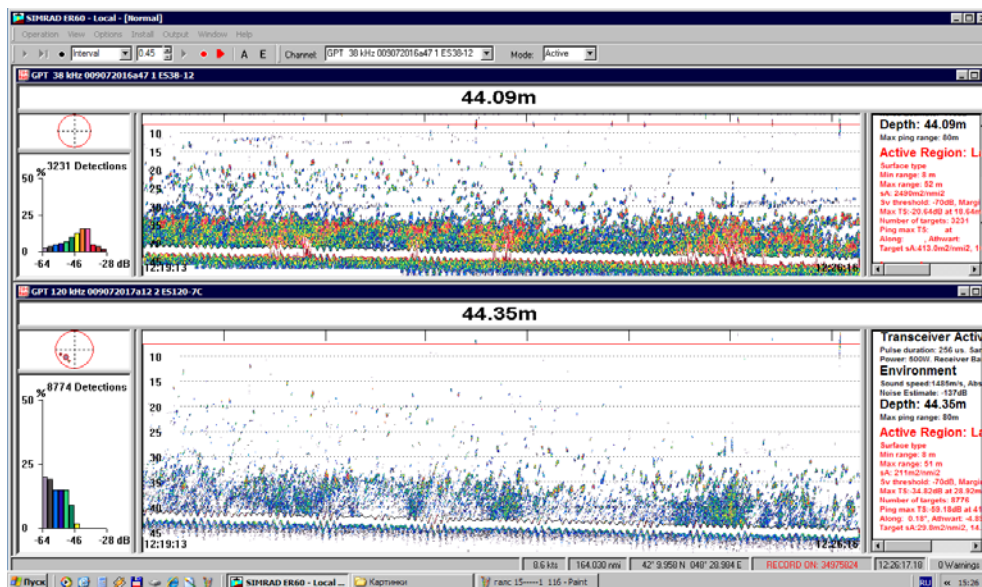


Рис. 7. Эхограмма записи килек. Дневное время.

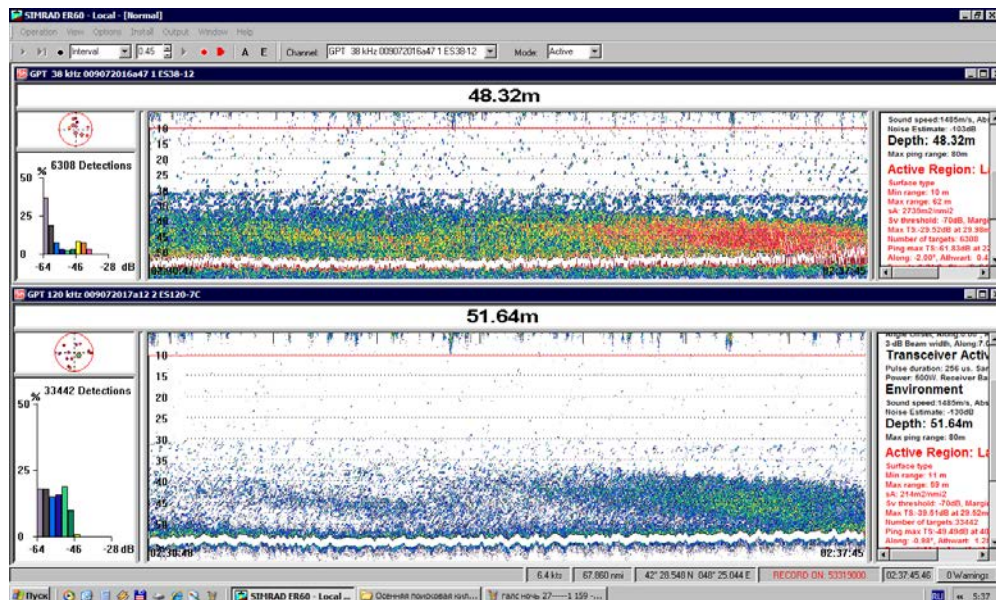


Рис. 8. Эхограмма записи килек. Ночное время.

Предзимовальные скопления килек по характеру распределения располагаются обычно в придонном слое. В программе постобработки был выделен придонный слой толщиной 10 метров.

На рисунке 9 представлено распределение килек в 10-метровом слое от грунта. Наибольшая часть рыб, со средней плотностью 7,4 т/миля², преобладала в придонном слое, и доля этой биомассы составляла 58% от общей.

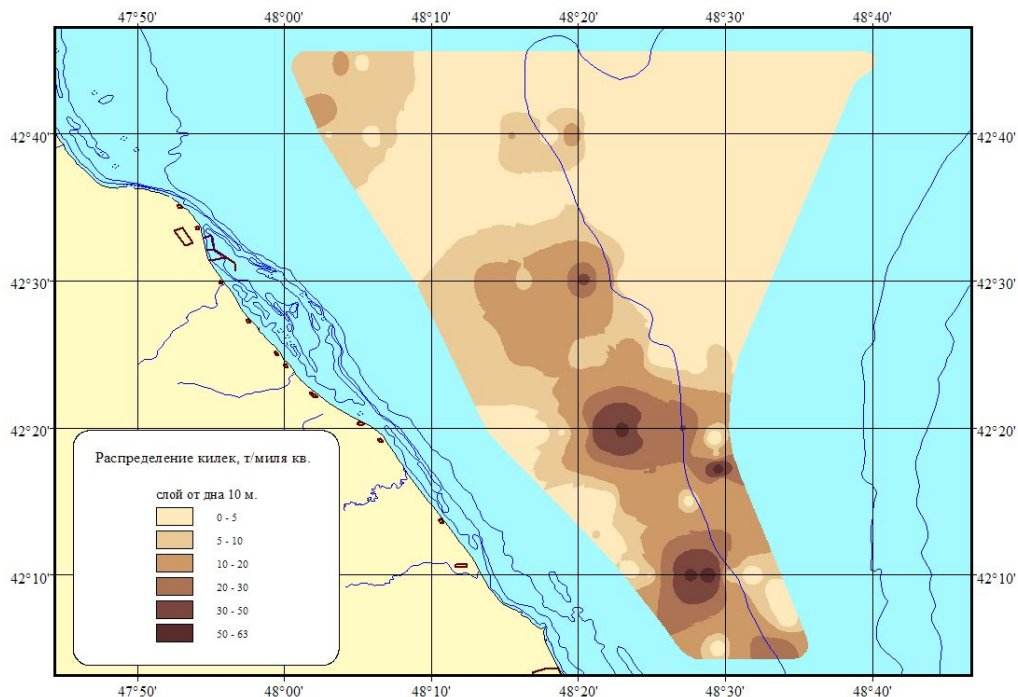


Рис. 9. Распределение каспийских килек, придонный слой 10м от дна.

Аналогичные исследования, проведенные в ноябре 2018 г, также подтверждают, что в поверхностном слое скопления килек практически отсутствуют. Максимальное значение средней плотности (8,7 т/миля²) отмечалось в слое 40-50 м [4].

Таким образом, гидроакустическая съемка, проведенная в ноябре 2019 г в северо-западной части Каспийского моря у дагестанского побережья, еще раз подтверждает, что данный район является перспективным районом для промысла каспийских килек.

В сентябре 2019 г. на промысел каспийской кильки в северо-западную часть Среднего Каспия впервые вышло 4 судна типа ПТР. Лова проводились разноглубинными тралами с горизонтальным раскрытием 38 м, вертикальным раскрытием 15-16 м. Скорость траления составляла 3,5 миль/час. Среднесуточный улов одного судна варьировал от 9 до 30 тонн.

Промысловыми скоплениями принято считать скопления килек с плотностью свыше 50 т/миля² [5]. В этих скоплениях должна отсутствовать молодь и неполовозрелые рыбы. Лова, проведенные на зимовальных концентрациях с плотностью ниже 50 т/миля², также показали свою результативность.

Полученные результаты могут быть использованы при организации российского килечного промысла в Каспийском море.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канатъев С.В., Помогаева Т.В., Разинков В.П. Перспективы морского тралового промысла обыкновенной кильки в российской части Северного Каспия // Сохранение биологических ресурсов Каспия // Межд. науч.-практ. конф. Астрахань, 18-19 сентября 2014 г. : Материалы и доклады. Изд-во АГТУ, 2014, с. 62-71.

2. Разинков В.П., Парицкий Ю.А., Асейнова А.А., Помогаева Т.В., Грозеску Ю.Н. Современное состояние промысловых запасов килек в Каспийском море // 63-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета, посвященная 25-летию АГТУ. Астрахань, 22-26 апреля 2019 г. Материалы. Секция: Рыбное хозяйство и аквакультура. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2019.

3. Помогаева Т.В., Балченков И.Б., Смирнов А.В. - Особенности использования постпроцессинговой программы VI-60 (SIMRAD) для определения биомассы каспийских килек по горизонтам в северо-западной части Каспийского моря.- Современное состояние биоресурсов внутренних вод // Мат-лы докл. II Всерос. конф. с межд. участием. 6-9 ноября 2014 г., Борок, Россия: В 2 т. М.: ПОЛИГРАФ-ПЛЮС, 2014.– Т. 2. – С. 458-463.

4. Помогаева Т.В. Распределение каспийских килек в северо-западной части Среднего Каспия (по результатам гидроакустических исследований в ноябре 2018 года) // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. 2019 № 3. С. 41-51.

5. Методические рекомендации по проведению гидроакустических съемок запасов килек в Каспийском море.- Мурманск: ПИНРО - КаспНИРХ, 1990. – 90 с.

FEATURES OF DISTRIBUTION OF COMMERCIAL ACCUMULATIONS OF SPRAT IN THE MIDDLE CASPIAN SEA NEAR THE DAGESTAN COAST IN THE AUTUMN PERIOD

Pomogaeva Tatiana Vasilievna, graduate student

Volga-Caspian branch of "VNIRO" ("CaspNIRKH"),
Astrakhan; graduate school "VNIRO", Moscow, e-mail: pomogatyana@mail.ru

At present, the state of the reserves and the areas of formation of the accumulations of Caspian sprat are of great interest to the fishing industry. The Caspian sprat is a reserve target of the fishery. The paper presents the results of studies of the area of the North-Western part of the Middle Caspian sea near the Dagestan coast, where pre-winter and winter accumulations of sprat are formed in the autumn-winter period.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УСИЛИЯ ПОДЪЁМА ТРАЛОВЫХ МЕШКОВ С УЛОВОМ ОТ ТЯГОВО-СКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫСЛОВОЙ ЛЕБЁДКИ

Суконнов Анатолий Владимирович, канд. техн. наук,
доцент кафедры промышленного рыболовства, заведующий лабораториями
Суконнова Татьяна Евгеньевна, канд. техн. наук,
доцент кафедры промышленного рыболовства, заместитель декана по учебной работе
Скураатов Николай Александрович, аспирант ФПР
Быков Алексей Александрович, аспирант ФПР

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия, e-mail: sukonova@mail.ru; snikal@tut.by; bykov@intechfuture.ru

Целью настоящих исследований является экспериментальное определение зависимости усилия выборки траловых мешков с уловом на палубу судна от условий и режимов эксплуатации системы «судно-трал». Научная новизна заключается в установлении закономерностей изменения усилия выборки траловых мешков с уловом по слипу судна от факторов реальных условий эксплуатации рыболовных систем «судно-трал». В результате проведённых исследований получены зависимости усилия выборки траловых мешков с уловом от скорости выборки для различных форм слипа и углов наклона в диапазоне их изменения.

Введение

Траловый промысел уже давно стал основным средством добычи. Такое широкое распространение стало возможным из-за его экономической эффективности, универсальности, высокой производительности и автономности.

На сегодняшний момент наиболее распространённым является метод тралового промысла с поднятием уловов по слипу, во время которого возникают критические (пиковые) нагрузки и резкое повышается усилия во время выборки. Данное обстоятельство приводит к повреждению промысловых механизмов, порывам тралов, а также снижению общего качества уловов.

Цель исследований

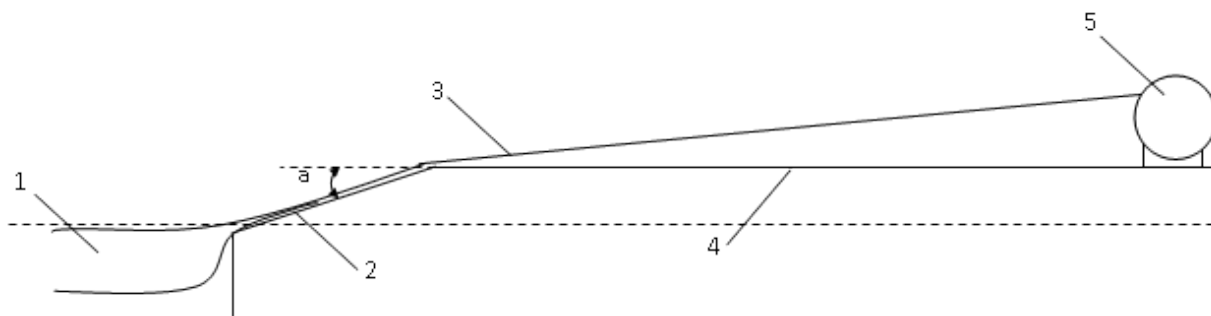
Работы по решению проблемы пиковых нагрузок и высокого общего усилия во время выборки ведутся учёными уже не один десяток лет [1, с. 68; 2, с. 139-159; 3, с. 10-15; 4, с. 40-43; 5, с. 188-190].

Но не смотря на данное обстоятельство, за последние время, подвижки получены не были. Это обуславливается как сложностью самой физической картины процесса вытягивания траловых мешков на палубу судна используя слип, так и отсутствием промысловых данных для сравнения.

Поэтому, целью нашей работы является установление экспериментальным путём закономерностей связей усилия выборки траловых мешков с уловом по слипам судов от факторов, характеризующих систему судно трал в процессе эксплуатации.

Влияющие факторы и методика проведения экспериментов

Исследования [6, с. 67-76] проводились на макете промысловой палубы судов РТМС (рис.1), изготовленной в масштабе 1:25.



1- мешок с уловом; 2- слип; 3- вытяжной конец и канатно-сетная часть; 4- промысловая палуба; 5- лебедка (кабельно-сетной барабан); а- угол наклона слипа.

Рис. 1. Схема установки

Измерения усилия в вытяжном конце лебёдки при подъёме мешка с уловом по слипу судна осуществлялось силоизмерительным комплексом «Міс 200».

Объектом исследования являлись модели траловых мешков, выполненных в масштабе 1:25. В качестве прототипа был выбран траловый мешок пр. В-408 тралов судов типа БМРТ Общей длиной в 57 метров.

Для обеспечения корректности имитации заполнения мешка уловом, применялись полиамидные гранулы с утяжелителями, по плотности соответствующие плотности воды. Мешок заполнялся на 50%, что в пересчёте с модели на натуре соответствовало 30,9 т.

Выбор влияющих факторов проводился по критериям, характеризующим: корпусную часть судна и тягово-скоростные параметры промысловых вытяжных лебёдок – это:

1. Угол наклона слипа.
2. Форма слипа.
3. Скорость выборки.

Диапазоны изменения факторов были выбраны исходя из практического опыта:

- угол наклона слипового настила изменяется от 30-45 градусов.
- форма слипа: сферический, прямой и прямой с удлинённым порогом.
- скорость выборки модели мешка зависит от возможностей тяговых элементов установки и составляет 0,031 м/с, 0,045 м/с 0,064 м/с.

Порядок проведения экспериментальных работ следующий:

1. Осуществляем установку слипового настила.
2. Регулируем и устанавливаем угол наклона слипа (α°) согласно таблице проведения экспериментов. Изменение угла осуществляется за счёт стопоров, установленных на расстоянии 5 градусов друг от друга.
3. Регулируем скорость выборки за счёт изменения числа оборотов вала электродвигателя согласно определённой строчке в таблице проведения экспериментов.
4. Ванна заполняется водой до подхода её к порогу слипа.
5. Для корректности проведения опытов, замачиваем модели мешков в воде.
6. Прежде чем начать проведение опытов, необходимо подключить датчик к линии вытяжного конца, он замерит силу, которая будет возникать в вытяжном конце. После выполнения данного действия подключаем датчик также к станции МІС 200 (4).
7. Одновременно с включением лебёдки начинаем запись на силоизмерительной станции, которая в режиме реального времени выводит получаемые данные о проходящем эксперименте на экран.
8. Все полученные результаты переводятся и сохраняются в Microsoft Excel, для удобства дальнейшей обработки.
9. Измерения повторем по 10 раз для каждой комбинации влияющих факторов и форм слиповых поверхностей.
10. Расчёты проводим в программах Microsoft Excel и MathCad, в которых обрабатываем данные и их отображаем для большей наглядности, попутно сравнивая с результатами визуального наблюдения.

Результаты исследований

1.1 Первый этап исследований

Экспериментальные работы проводились десять раз по каждому сочетанию факторов плана [7, с. 20-48].

На первом этапе экспериментальных работ проведены исследования по установлению зависимости усилия в вытяжном конце от скорости выборки для различных слипов с углами наклона 30 и 45 градусов (рис. 2, 3).

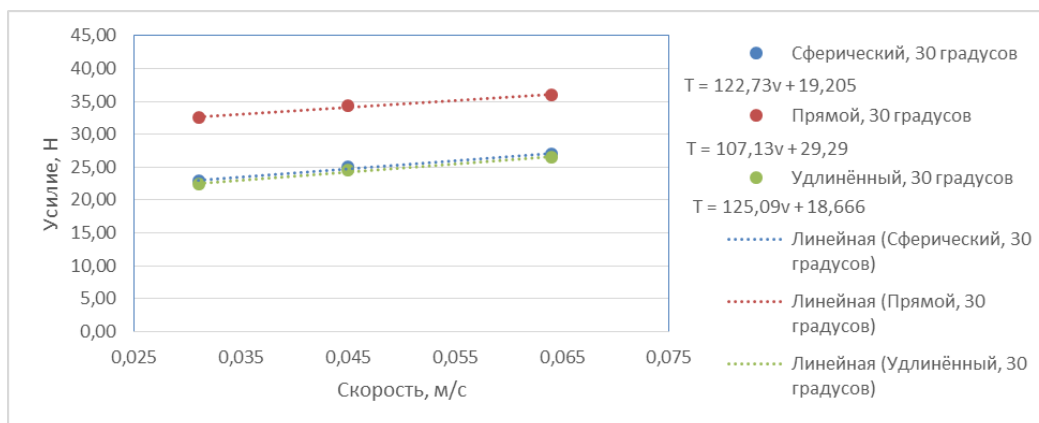


Рис. 2. Зависимость усилия в вытяжном конце, при угле наклона 30 градусов (в уравнениях аппроксимации T – усилие во время выборки, v – скорость выборки)

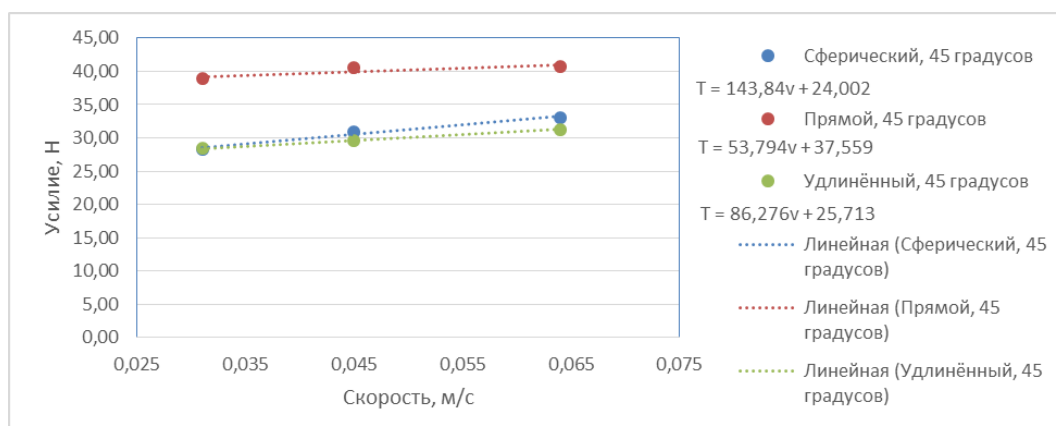


Рис. 3. Зависимость усилия в вытяжном конце, при угле наклона 45 градусов (в уравнениях аппроксимации T – усилие во время выборки, v – скорость выборки)

В результате анализа экспериментальных данных усилия от скорости выборки можно сделать следующие выводы:

- вид зависимости линейно-возрастающий.
- у всех слипов наблюдается рост усилия от скорости при угле наклона в 30 градусов и он составляет 16% для прямого и 10% для удлиненного и сферического.
- для углов наклона слипа в 45, у прямого и удлиненного слипа рост усилия от скорости сохраняется и составляет 5% и 9% соответственно. У сферического слипа усилие возрастает на 15% с увеличением скорости.
- на прямом слипе увеличение угла наклона слипа от 30° до 45° с увеличением скорости выборки в 2-а раза приводит к увеличению усилия выборки в среднем на 16%.
- на удлиненном слипе увеличение угла наклона слипа от 30° до 45° с увеличением скорости выборки в 2-а раза приводит к увеличению усилия выборки в среднем на 21,5%.
- на сферическом слипе увеличение угла наклона слипа от 30° до 45° с увеличением скорости выборки в 2-а раза приводит к увеличению усилия выборки в среднем на 23,5%.

Полученные зависимости усилия выборки от скорости адекватно описывают изменения усилия выборки тралового мешка с уловом, т. к. отклонение не превышает 5%.

1.2 Второй этап исследований

На втором этапе исследований по оценке физической сущности процесса подъёма траловых мешков с уловом по слипам судов было проведено сравнение силовых динамограмм (рис. 4, 5).

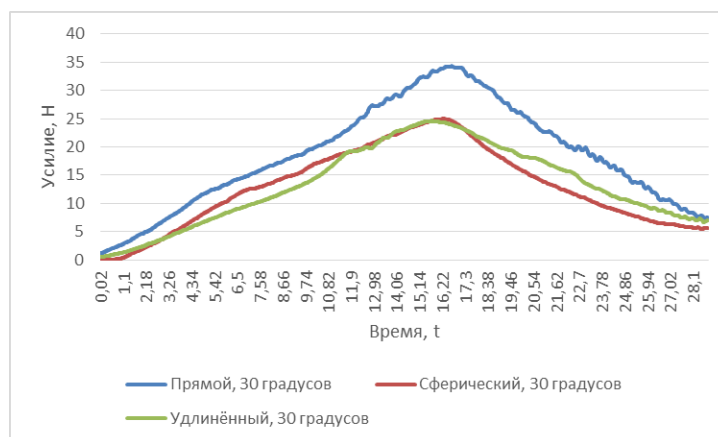


Рис. 4. Динамограммы усилия во время выборки мешков с уловом при угле наклона 30 градусов, при скорости выборки (0,045 м/с)

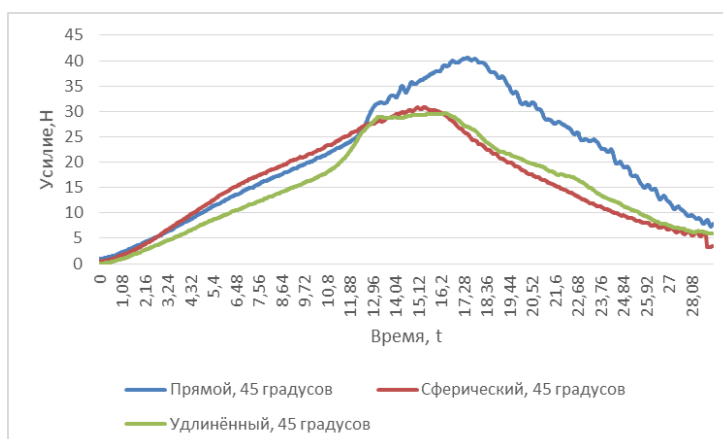


Рис. 5. Динамограммы усилия во время выборки мешков с уловом при угле наклона 45 градусов, при скорости выборки (0,045 м/с)

По которым можно сделать следующие выводы:

У сферического и удлинённого слипов динамограммы практически совпадают, причём максимальное усилие выборки при угле наклона в 45 градусов, увеличивается в 1,2 раза по сравнению с углом в 30 градусов.

У прямого слипа максимальное усилие выборки при угле наклона в 45 градусов, увеличивается в 1,16 раза по сравнению с углом в 30 градусов.

Стоит отметить, что максимальные усилия возникает в месте перехода мешком слиповой канавки (положение мешка в этот момент указано на фотографии), данное обстоятельство справедливо для всех форм слипов.

1.3 Третий этап исследований

На третьем этапе нашей работы с целью установления закономерностей степени влияния факторов, обусловленных конструктивными особенностями систем судно-трал на усилие выборки, был применён метод планирования экспериментов. Для этого составлена матрица трёх факторного экспе-

римента на двух уровнях (таб. 1). В соответствии с данной матрицей проводилась серия экспериментальных работ. По каждой строке матрицы выполнялось до 10 повторных испытаний.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента

№ п/п	Форма поверхности слипа (x_1)	Угол наклона слипа, α° (x_2)	Скорость выборки тралового мешка, v м/с (x_3)	Вытяжное усилие T_{cp} в Н
1.	Сферический (+)	45° (+)	0,064 (+)	33,04
2.	Сферический (+)	45° (+)	0,031(-)	28,23
3.	Сферический (+)	30° (-)	0,064 (+)	23,95
4.	Сферический (+)	30° (-)	0,031 (-)	22,86
5.	Прямой (-)	30° (-)	0,031 (-)	32,36
6.	Прямой (-)	30° (-)	0,064 (+)	36,07
7.	Прямой (-)	45° (+)	0,031 (-)	38,91
8.	Прямой (-)	45° (+)	0,064 (+)	40,77

После математической обработки экспериментальных данных [8, с. 3-87] была получена зависимость (1) усилия выборки траловых мешков с уловом по слипам различной формы, их углов наклона и скорости выборки.

$$T = 32,04 - 5,02x_1 + 3,19x_2 + 1,42x_3 + 0,42x_1x_2 + 0,68x_1x_2x_3 \quad (1)$$

где x_1 , x_2 , x_3 – кодированные значения формы поверхности слипа, угла наклона слипа и скорости выборки мешка соответственно.

Диапазоны изменения выбранных факторов определены в предыдущих исследованиях первого этапа и составляют:

- форма слипа: прямой – сферический;
- угол наклона слипа: 30° – 45°;
- скорость выборки: 0,031 – 0,064 м/с.

Для подтверждения адекватности полученной зависимости проведена сравнительная оценка расчётных и экспериментальных данных, которая показала, что отклонение не превышает 5%.

Анализ полученной зависимости усилия выборки траловых мешков позволил определить приоритет исследуемых факторов: по значимости наибольшее влияние оказывает форма поверхности слипового настила, а незначительное влияние из рассмотренных факторов, оказывает скорость выборки.

Выводы

Подводя итог выполненным исследованиям можно сделать следующие выводы:

- увеличение скорости выборки в два раза, на слипе с прямой формой поверхности, приводит к возрастанию усилия в среднем на 7,8%, а на слипе с сферической формой поверхности, рост усилия составляет 17,4%.
- усилие выборки на слипах с прямой формой поверхности в среднем в 1,36 раза выше, чем на слипах со сферической и удлинённой формах поверхностей, вне зависимости от скорости выборки и угла наклона.
- увеличение угла наклона слипового настила с 30 до 45 градусов, приводит к возрастанию усилия выборки мешков с уловом в среднем на 18% для прямого и на 23,6% для сферического, при скорости выборки модели тралового мешка в диапазоне исследований.

При выборке мешков с уловом по слипу со сферической и удлинённой поверхностями распределение усилия в вытяжном конце более равномерные и пиковые нагрузки практически отсутствуют.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суконнов, А.В. Скуратов, Н.А. К вопросу сохранения качества выливаемых уловов из траловых мешков // Инновационное развитие рыбной отрасли в контексте обеспечения продовольственной безопасности российской федерации. Материалы I Национальной заочной науч.-техн. конф. (Владивосток, 22 декабря 2017 года): материалы – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2017. С. 261-265.
2. Фридман, С.Л. Взаимодействие трала и судна при подъеме улова на кормовом траулере: дис. канд. техн. наук / науч. рук.: А.И. Трещев – Мурманск: Мурман. высш. мореход. училище, 1960. – 242 с.
3. Фридман, А.Л. Исследование взаимодействия системы «судовая слиповая установка». – Калининград: КТИРПиХ, 1985. – 135 с.
4. Скуратов, Н.А. Суконнов, А.В. Экспериментальное определение зависимости тягового усилия выборки трала с уловом на палубу судна от параметров системы «судно-трал» на модели промысловой палубы судов типа РТМ-С. // Известия КГТУ. – Калининград, 2018. - №48 – С. 39-46.
5. Скуратов, Н.А. Суконнов, А.В. Экспериментальное исследование процесса подъема траловых мешков с уловом по слипу судна. // Известия КГТУ. – Калининград, 2019. - №54 – С. 187-195.
6. Скуратов, Н.А. Суконнов, А.В. Суконнова, Т.Е. Экспериментальные исследования по оценке влияния скорости подъема траловых мешков с уловом по различным формам слипов судов на усилие в вытяжном конце промысловой лебедки. // Известия КГТУ. – Калининград, 2020. - №57 – С. 67-76.
7. Планирование экспериментов в промышленном рыболовстве: учеб. пособие / Г. М. Долин. – Калининград: Изд-во КГТУ, 1996. – 119 с.
8. Прикладная математика: учеб. пособие по решению проф. задач в среде MathCad / В. А. Наумов – Калининград: Изд-во КГТУ, 2014. – 144 с.

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE DEPENDENCE OF THE EFFORT OF LIFTING BAGS WITH A CATCH ON THE TRACTION-SPEED PARAMETERS OF THE FISHING WINCH

Sukonnov Anatoly Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Fishing, Head of Laboratories

Sukonnova Tatiana Evgenievna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Fishing, Deputy Dean for Academic Affairs

Skuratov Nikolay Aleksandrovich, postgraduate student

Bykov Aleksey Aleksandrovich, postgraduate student

FSBEI HE "Kaliningrad state technical university",

Kaliningrad, Russia, e-mail: sukonova@mail.ru; snikal@tut.by; bykov@intechfuture.ru

The purpose of these studies is to experimentally determine the dependence of the effort of sampling trawl bags with the catch on the deck of the vessel on the conditions and operating modes of the vessel-trawl system. The scientific novelty lies in the establishment of patterns of change in the effort of hauling trawl sacks with a catch on the slip of the vessel from the factors of the actual operating conditions of the fishing trawl systems. As a result of the research, the dependences of the hauling effort of trawl bags with the catch on the hauling speed for various slip shapes and tilt angles in the range of their variation were obtained.

СЕКЦИЯ «ПРИКЛАДНАЯ РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

SECTION "APPLIED RADIOPHYSICS, RADIO ENGINEERING AND INFORMATION SECURITY"

УДК 621.37

ОБНАРУЖЕНИЕ СОВОКУПНОСТИ СИГНАЛОВ МЕТОДОМ МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ

¹Власова Ксения Валерьевна канд. физ.-мат. наук, доцент

²Пахотин Валерий Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор,
профессор Института физико-математических наук и информационных технологий

²Симонов Роман Валерьевич, аспирант института физико-математических наук и информационных технологий

²Бессонов Владимир Александрович, кандидат физ.-мат. наук,
доцент Института физико-математических наук и информационных технологий

¹ Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: p_ksenia@mail.ru

²ФГБОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта»,
Калининград, Россия, e-mail: VPakhotin@kantiana.ru; VBessonov@kantiana.ru

Представлено решение задачи обнаружения совокупности сигналов в области их неортогональности. Основой решения является метод максимального правдоподобия с высоким разрешением. Полученное решение не зависит от разности фаз между сигналами. При определенных значениях разности фаз, когда сигналы подавляют друг друга, вероятность обнаружения оказывается существенно больше, чем вероятность обнаружения корреляционным приемником. Показана возможность представления на экране индикатора вероятности обнаружения совокупности сигналов в скользящем режиме работы.

Введение

Основы решения задачи обнаружения сигнала изложены в ряде работ [1÷7] и хорошо известны. Математически точно задача обнаружения сигнала решается при полностью известных параметрах сигнала. Неизвестен лишь факт наличия сигнала в принятом сообщении. Конечным результатом является вероятность обнаружения сигнала с пороговым уровнем, установленным по критерию идеального наблюдателя или по критерию Неймана-Пирсона [1÷5] и вероятности ошибок первого и второго рода (пропуск цели, ложная тревога). Однако на практике параметры сигнала часто являются постоянными и неизвестными. В этом случае задача обнаружения сигнала до настоящего времени не имеет удовлетворительного решения. Не имеет она удовлетворительного решения и при наличии в принятой реализации совокупности сигналов. Как правило, задача обнаружения сигнала решается на основе двух альтернативных гипотез: в принятом сообщении присутствует сигнал, в принятом сообщении сигнала нет. Это приводит к функционалу отношения правдоподобия и далее к оптимальному корреляционному приемнику [2, 4]. Если критерий Рэлея выполняется для отдельных пар сигналов, то корреляционный приемник их различает, и тогда задача обнаружения оказывается связана с условием преодоления установленного порогового уровня. Однако для неортогональных сигналов, когда критерий Рэлея не выполняется, задача обнаружения становится неопределенной. Она зависит от соотношения фаз сигналов в принятой реализации. В настоящей работе задача обнаружения совокупности сигналов решается методом максимального правдоподобия с высоким разрешением, разработанным в БФУ им. И.Канта [6÷7]. В

этом случае основной является задача оценки параметров совокупности сигналов с высоким разрешением. Ее решение позволяет получить статистику амплитуд сигналов и статистику шума и разделить эти статистики с помощью порогового уровня.

Основной целью настоящей работы является представление метода решения задачи обнаружения совокупности сигналов и оценка его потенциальных возможностей.

Основы теории

Анализ решения задачи обнаружения одиночного сигнала в принятой реализации [6, 7] позволяет раскрыть основы решения задачи обнаружения совокупности сигналов, содержащихся в принятой реализации. Перейдем от отношения функций правдоподобия к функционалу, содержащему аргумент отношения функций правдоподобия. При наличии в принятой реализации в качестве простого примера двух сигналов, это выражения записывается в виде

$$\Delta(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2, \hat{U}_1, \hat{U}_2) = \int_0^T |\hat{y}(t)|^2 dt - \int_0^T \left| \hat{y}(t) - \hat{U}_1 \hat{S}(\vec{\lambda}_1, t) - \hat{U}_2 \hat{S}(\vec{\lambda}_2, t) \right|^2 dt, \quad (1)$$

где $\hat{y}(t) = \hat{U}_1 \hat{S}(\vec{\lambda}_1, t) + \hat{U}_2 \hat{S}(\vec{\lambda}_2, t)$ - принятая реализация;

$\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2$ - оцениваемые параметры первого и второго сигналов;

\hat{U}_1, \hat{U}_2 - комплексные оцениваемые амплитуды первого и второго сигналов.

Дифференцируя (1) по комплексным амплитудам и приравнявая дифференциалы к нулю, получим уравнения правдоподобия. Их решения относительно амплитуд

$$\begin{aligned} \hat{U}_1(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2) &= \frac{\int_0^T \hat{y}(t) \hat{S}^*(\vec{\lambda}_1, t) dt - \hat{R}(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2) \int_0^T \hat{y}(t) \hat{S}^*(\vec{\lambda}_2, t) dt}{1 - |\hat{R}(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2)|^2}, \\ \hat{U}_2(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2) &= \frac{\int_0^T \hat{y}(t) \hat{S}^*(\vec{\lambda}_2, t) dt - \hat{R}^*(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2) \int_0^T \hat{y}(t) \hat{S}^*(\vec{\lambda}_1, t) dt}{1 - |\hat{R}(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2)|^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\hat{R}(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2)$ - коэффициент корреляции между двумя сигналами.

Подставляя выражения (2) в (1), получим преобразованный функционал правдоподобия

$$\Delta(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2) = \int_0^T |\hat{y}(t)|^2 dt - \int_0^T \left| \hat{y}(t) - \hat{U}_1(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2) \hat{S}(\vec{\lambda}_1, t) - \hat{U}_2(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2) \hat{S}(\vec{\lambda}_2, t) \right|^2 dt. \quad (3)$$

Функционал (3) является поверхностью в пространстве совокупности оцениваемых параметров $\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2$. Его можно использовать для решения задачи обнаружения двух сигналов, содержащихся в принятой реализации, в скользящем режиме обработки (в режиме мониторинга). Математическое ожидание от первого слагаемого определяет энергию совокупности двух сигналов и энергию шума при наличии двух сигналов в реализации. При наличии в реализации одного сигнала математическое ожидание определяет энергию одного сигнала и энергию шума. При отсутствии сигналов в реализации математическое ожидание определяет энергию шума. Второе слагаемое в (3) более важное. Оно определяет процесс подстройки параметров сигналов, содержащихся в реализации (нештрихованных) к оцениваемым (штрихованным) параметрам этих сигналов. Это процесс минимизации функции потерь. Функция потерь будет минимальная, если второе слагаемое в (3) будет иметь минимум. Математическое ожидание от второго слагаемого в (3) будет определять энергию шума. Пусть $\hat{y}(t)$ содержит лишь шумовую составляющую. В этом случае оценки амплитуд $\hat{U}_1(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2)$ и $\hat{U}_2(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2)$ будут на уровне шумовых максимумов и

$$M \left(\int_0^T \left| \hat{y}(t) - \hat{U}_1(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2) \hat{S}(\vec{\lambda}_1, t) - \hat{U}_2(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2) \hat{S}(\vec{\lambda}_2, t) \right|^2 dt \right) = \sigma^2 T. \quad (4)$$

Если $\hat{y}(t)$ содержит один сигнал, то амплитуда второго сигнала будет на уровне шумового максимума, и математическое ожидание также будет равно $\sigma^2 T$. Если $\hat{y}(t)$ содержит два сигнала, то математическое ожидание от второго слагаемого будет также равно энергии шума $\sigma^2 T$. Таким образом, математическое ожидание от разности слагаемых в (3) определяет оценку совокупности энергии двух сигналов. В области неортогональности, когда сигналы частично перекрываются во времени, в зависимости от разности фаз и соотношения амплитуд (явление интерференции), сигналы или усиливают друг друга, или ослабляют. В результате вероятность обнаружения меняется. При изменении разности фаз совместная корреляционная функция для двух сигналов меняет свою форму. При этом энергия сигналов может изменяться в широких пределах, в результате чего вероятность обнаружения сигналов меняется. На рисунке 1 показан случай взаимного подавления сигналов в принятой реализации (верхняя реализация). Отмечается лишь наличие в реализации части первого и части второго сигнала. Совместная часть двух сигналов исчезает.

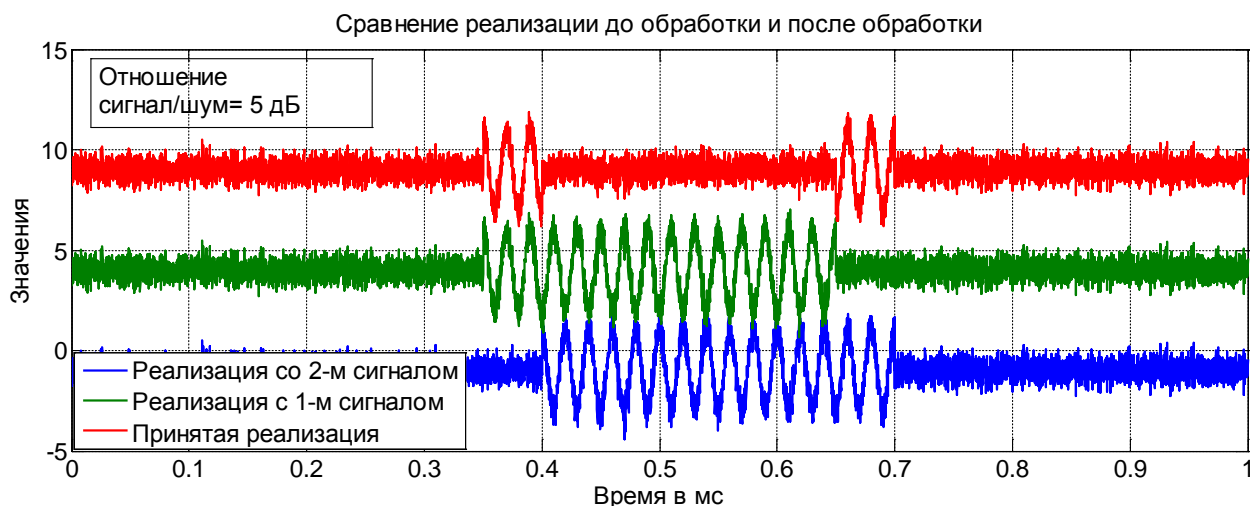


Рис. 1. Сравнение принятой реализации, содержащей совокупность двух сигналов, и двух реализаций после обработки с подавлением одного из сигналов.

В этом случае, оценивая амплитуды сигналов и времена их приема в точке минимума функционала правдоподобия, можно получить отдельные реализации $\hat{y}_1(t)$ (средняя реализация на рисунке 1) и $\hat{y}_2(t)$ (нижняя реализация на рисунке 1)

$$\begin{aligned}\hat{y}_1(t) &= \hat{y}(t) - \hat{U}_2(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2) \hat{S}(\vec{\lambda}_2, t), \\ \hat{y}_2(t) &= \hat{y}(t) - \hat{U}_1(\vec{\lambda}_1, \vec{\lambda}_2) \hat{S}(\vec{\lambda}_1, t).\end{aligned}\quad (5)$$

Рисунок 1 иллюстрирует преимущество предлагаемого метода обработки. В результате решения задачи оценки параметров двух неортогональных сигналов, энергия сигналов в реализациях $\hat{y}_1(t)$ и $\hat{y}_2(t)$ оказывается больше, чем энергия сигналов в реализации $\hat{y}(t)$. Следовательно, задача обнаружения будет решена более эффективно. При проведении корреляционной обработки трех реализаций $\hat{y}(t)$ и $\hat{y}_1(t)$, $\hat{y}_2(t)$ преимущество предлагаемого метода обработки становится очевидным (рисунок 2).

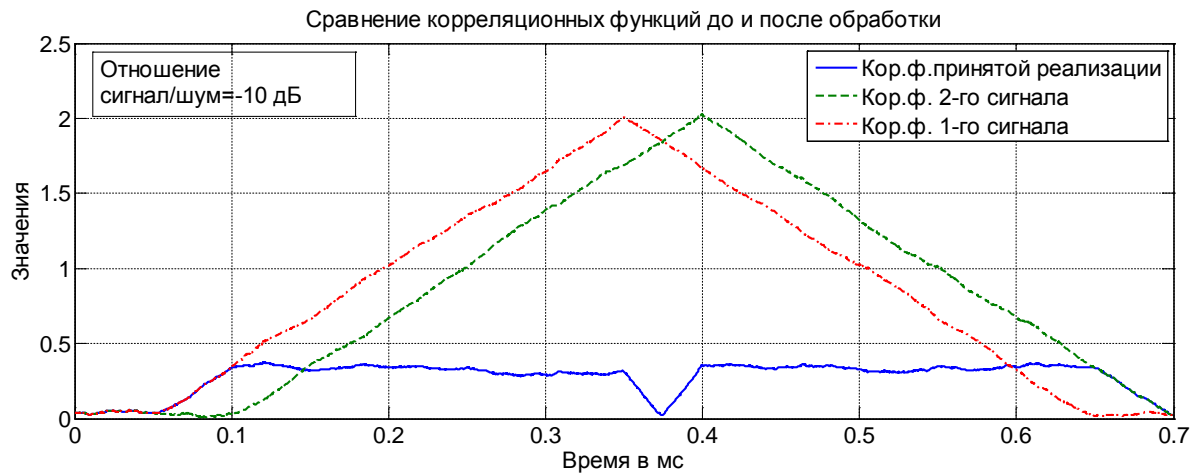


Рис. 2. Сравнение корреляционных функций трех реализаций $\hat{y}(t)$ и $\hat{y}_1(t)$, $\hat{y}_2(t)$

Максимум корреляционной функции $\hat{y}(t)$, содержащей два неортогональных сигнала, оказывается много ниже, чем максимумы корреляционных функций реализаций $\hat{y}_1(t)$ и $\hat{y}_2(t)$, содержащие эти сигналы по отдельности. На рисунке 3 корреляционные функции трех реализаций показаны при отношении сигнал/шум -20 дБ. На этом же рисунке отмечен пороговый уровень $h = 3\sigma$, определенный по уровню шума (СКО шума σ). Максимум корреляционной функции принятой реализации $\hat{y}(t)$ практически не дает возможности обнаружить наличие сигналов. Максимумы корреляционных функций реализаций $\hat{y}_1(t)$ и $\hat{y}_2(t)$ существенно превышают пороговый уровень. Задача раздельного обнаружения первого и второго сигналов решается вполне успешно.

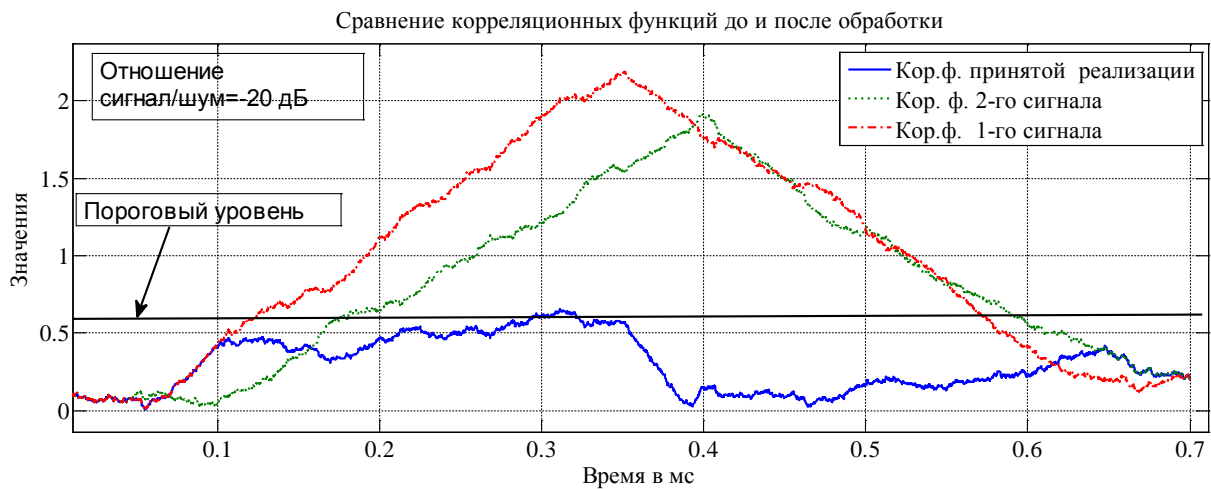


Рис. 3. Корреляционные функции трех реализаций $\hat{y}(t)$ и $\hat{y}_1(t)$, $\hat{y}_2(t)$ при решении задачи обнаружения совокупности двух сигналов.

На рисунке 4 представлена статистика времени приема сигналов и статистика амплитуд сигналов, оцененных по реализациям $\hat{y}(t)$ и $\hat{y}_1(t)$, $\hat{y}_2(t)$. Статистика лучше отображает возможность решения задачи раздельного обнаружения сигналов.

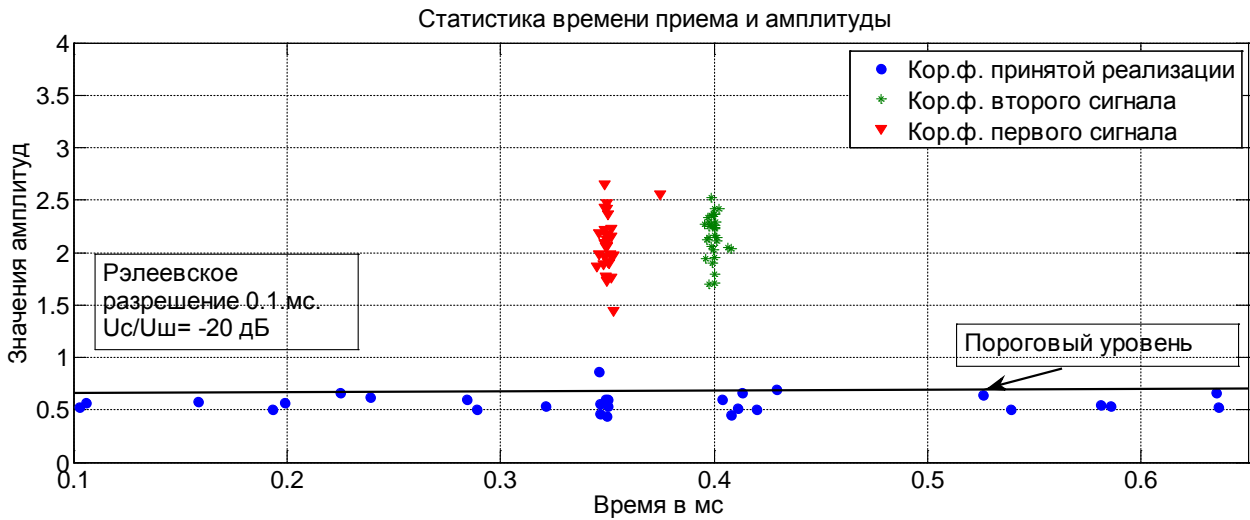


Рис. 4. Статистика времен приема и статистика амплитуд, полученная по реализациям $\hat{y}_1(t)$ и $\hat{y}_2(t)$

Как следует из рисунка, вероятность обнаружения сигналов в реализациях $\hat{y}_1(t)$ и $\hat{y}_2(t)$ практически 100%. Вероятность обнаружения совокупности сигналов по реализации $\hat{y}(t)$ не превышает 10%. На рисунке 5 представлена вероятность обнаружения двух сигналов в зависимости от линейно изменяющейся амплитуды второго сигнала.

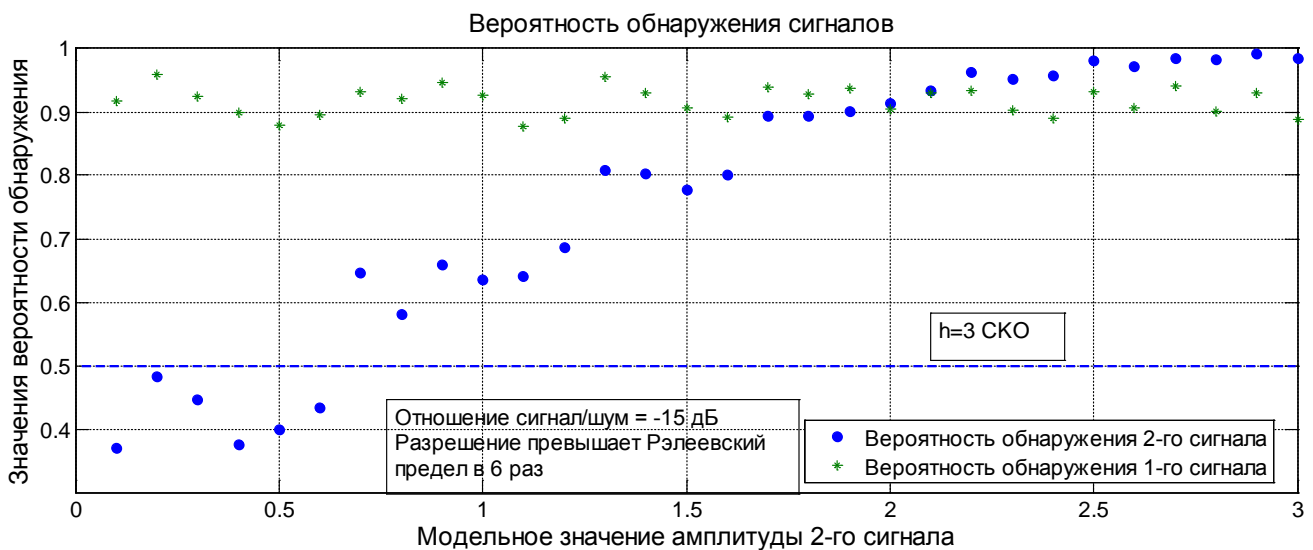


Рис. 5. Вероятность обнаружения двух сигналов в принятой реализации

В результате на экране индикатора информация о решении задачи обнаружения двух сигналов представляется в виде вероятности обнаружения сигналов. Линия на уровне 0,5 определяет значение вероятности обнаружения 50%. Точки выше этой линии указывают на обнаружение сигналов с соответствующей вероятностью. Разброс значений вероятности обнаружения можно считать незначительным. Первый сигнал имеет модельное значение амплитуды $U_1 = 2$ и вероятность его обнаружения не ниже 0,85. Второй сигнал меняет свою амплитуду от 0,1 до 3. В результате сигнал обнаруживается при амплитуде $U_2 = 0,75$ с вероятностью 0,6. Следует отметить, что сигналы в данной реализации неортогональны по времени приема. Рэлеевское разрешение определяется временем 300 мкс. Сигналы в реализации имеют различие во времени приема 50 мкс. Разрешение увеличено в 6 раз по сравнению с Рэлеевским разрешением.

Заключение

Таким образом, задача обнаружения двух сигналов, содержащихся в принятой реализации, успешно решена. Решение основано на основе анализа поверхности преобразованного функционала правдоподобия. Вероятность обнаружения является случайной величиной. Однако при допустимых вариациях ее значение можно определять на индикаторе при режиме мониторинга (скользящей обработки).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов. К.; Изд-во: М.: Иностранной литературы, 1963.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Советское радио, 1968.
3. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983.
4. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.
5. Ширман Я. Д. Разрешение и сжатие сигналов. М.: Сов. радио, 1974. –360 с.
6. Пахотин В.А., Власова К.В., Симонов Р.В., Петров С.В. Оптимальная обработка сигналов с высоким разрешением. Журнал «Мягкие измерения и вычисления», №4- 2019 (1), Изд. Дом «Научная библиотека», стр.56-70.
7. Пахотин В.А., Власова К.В., Бессонов В.А., Молостова С.В., Симонов Р.В., Пешегорин Е.Е. Технология обработки информации, основанная на анализе преобразованного функционала правдоподобия. Наука.Общество.Оборона.2019.№1 (18).С.10

SIGNAL TRAP DETECTION BY MAXIMUM LIKELYHOOD METHOD

¹Vlasova Kseniya Valerievna, PhD in Physico-mathematical sciences, the associate professor of department of ship radio engineering systems

²Pakhotin Valeriy Anatolievich, Dr. of Phys.-Math. Sciences, Professor, Professor of the Institute of Physi-Mathematical Sciences and Information Technologies

²Simonov Roman Valerievich, postgraduate of the Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies

²Bessonov Vladimir Alexandrovich, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies

¹ Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia, e-mail: p_ksenia@mail.ru

²FSBEI HE "Baltic Federal University named after I. Kant", Kaliningrad, Russia, e-mail: VPakhotin@kantiana.ru; VBessonov@kantiana.ru

The solution to the problem of detecting a set of signals in the area of their non-orthogonality is presented. The basis of the solution is a method of maximum plausibility with high resolution. The obtained solution does not depend on phase difference between signals. At certain values of phase difference, when the signals suppress each other, the probability of detection is much greater than the probability of detection by a correlation receiver. Shows the possibility of displaying on the screen of the indicator probability of detection of a set of signals in a sliding mode.

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРАВЛЕННЫХ СВОЙСТВ ДВУХДИАПАЗОННЫХ ЛОГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ОБЛУЧАТЕЛЕЙ БОЛЬШИХ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН В СРЕДЕ MATHCAD

Волхонская Елена Вячеславовна, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры судовых радиотехнических систем

Коротей Евгений Владимирович, доцент кафедры судовых радиотехнических систем

Власова Ксения Валерьевна, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры судовых радиотехнических систем

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru; eugeny_korotey@mail.ru; p_ksenia@mail.ru

В работе предложены варианты исполнения двухдиапазонных облучателей больших зеркальных антенн, основанные на микрополосковой логопериодической структуре. На основе метода наведенных ЭДС и теории электрических цепей с распределенными параметрами построены математические модели поля излучения таких облучателей и проанализированы их направленные свойства и электрические параметры. По результатам модельных исследований направленных свойств двухзеркальной антенны Кассегрена осуществлен выбор оптимальной конструкции логопериодического облучателя, функционирующего в С и Х диапазонах.

Постановка задачи

С каждым годом перечень телекоммуникационных услуг, предоставляемых с использованием систем спутниковой связи, расширяется и включает передачу голосовых сообщений и данных, доступ в интернет, телевизионное вещание, навигационные услуги. По состоянию на 2019 год на геостационарной орбите задействовано 379 активных спутников связи, имеющих транспондеры, функционирующие в L, S, C, X, Ku и Ka диапазонах. Также планируется ввод в эксплуатацию еще 28 спутников в 2020-2022 годах [1].

Увеличение числа спутников-ретрансляторов приводит к необходимости уменьшения ширины диаграммы направленности антенны и перехода на более высокочастотные диапазоны [2], что подтверждается темпами роста количества спутников ретрансляторов (прирост их числа за последние пять лет составляет порядка 25% от общего количества) [1].

Около 10% всех спутников связи функционирует в нескольких диапазонах, например С и Ku, Ku и Ka. Поэтому освоение новых частотных диапазонов выдвигает на первый план задачу синтеза многодиапазонных облучателей. Однако традиционные облучатели зеркальных антенн, как правило, функционируют в каком-либо одном рабочем диапазоне, а попытка совмещения нескольких диапазонов зачастую приводит либо к серьезному усложнению конструкции [3], либо к непостоянству направленных свойств [4].

В работе [5] в ходе моделирования характеристик излучения зеркальной антенны было показано, что использование в качестве облучателя микрополосковой логопериодической антенны (ЛПА) [6] вместо рупорного облучателя приводит к существенному увеличению коэффициента направленного действия (КНД) и коэффициента использования поверхности (КИП) рефлектора в заявленном рабочем диапазоне частот рупорного облучателя.

В данной работе было проанализировано три подхода в построении двухдиапазонной ЛПА, функционирующей в смежных диапазонах С и Х, проведены модельные исследования их направленных свойств и электрических параметров, а также направленные свойства двухзеркальной антенны Кассегрена при использовании данных антенн в качестве облучателей.

Конструкции исследуемых антенн

Все три исследованных варианта конструктивного исполнения двухдиапазонных ЛПА основывались на прототипе в виде микрополосковой логопериодической антенны [6].

Первый тип конструкции (антенна №1) предполагает выполнение двух микрополосковых антенн С и Х диапазонов на единой подложке с введением между ними защитного интервала и питанием обеих антенн от отдельных коаксиальных фидеров (рис. 1).

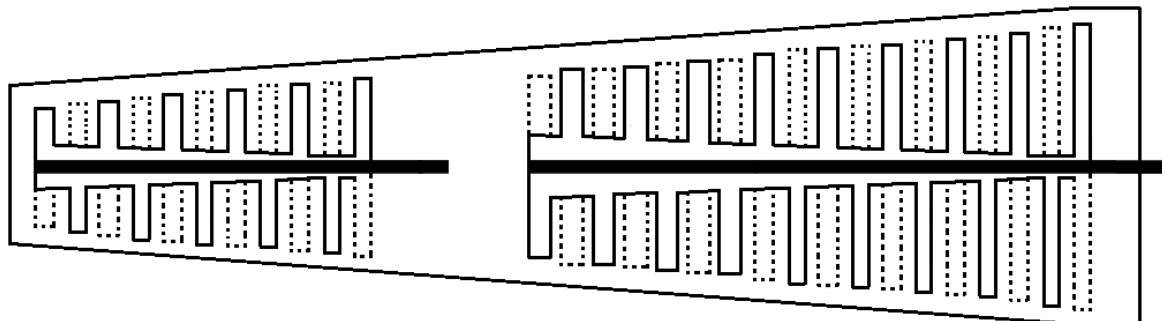


Рис. 1. Конструктивное исполнение антенны №1

Второй тип конструкции (антенна №2) предполагает выполнение двух микрополосковых антенн С и Х диапазонов на единой подложке с введением между ними защитного интервала и питанием обеих антенн от одного коаксиального фидера (рис. 2).

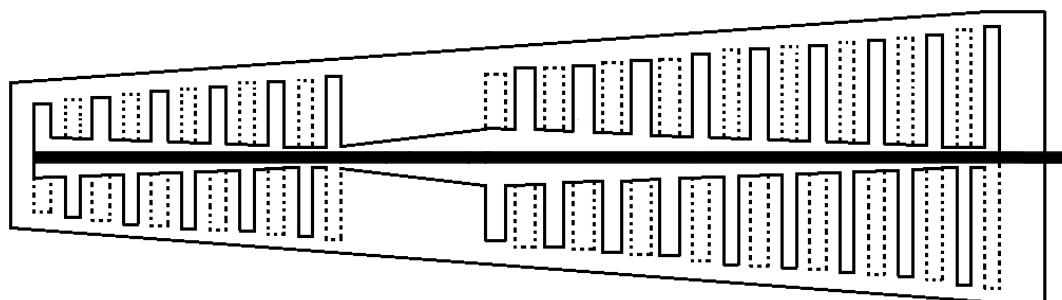


Рис. 2. Конструктивное исполнение антенны №2

Третий тип конструкции (антенна №3) предполагает выполнение «монолитной» конструкции, рабочий диапазон которой простирается от минимальной частоты С-диапазона до максимальной частоты Х-диапазона (рис. 3).

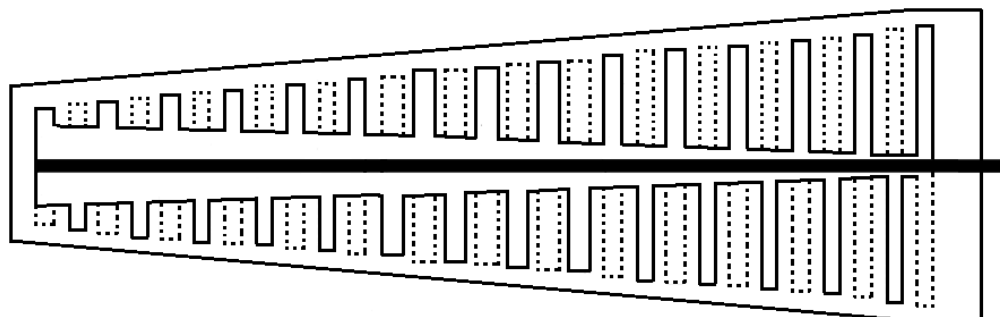


Рис. 3. Конструктивное исполнение антенны №3

Методика проведения исследований

Математическая модель однодиапазонной антенны подробно описана в [7] и построена на основе метода наведенных ЭДС, учитывающего пространственную электромагнитную связь излу-

чающих элементов, а также теории цепей с распределенными параметрами, позволяющей учесть их электрическую связь через распределительный фидер.

Для каждой из приведенных конструкций была проведена оптимизация логопериодических структур С и Х диапазонов в соответствии с программой оптимизации [8], а также ширины защитного интервала в антеннах №1 и №2. В качестве оптимизационного критерия использовалась стабильность направленных свойств в пределах рабочих диапазонов частот.

Для полученных оптимизированных структур проведено исследование их характеристик на предмет стабильности направленных свойств в соответствии с программой [9].

В предыдущих работах авторов [10, 11] было показано, что применение метода поверхностных токов предпочтительнее применения более простого апертурного метода, так как последний дает завышенные оценки максимального уровня боковых лепестков (УБЛ), КНД и КИП, а также заниженную оценку ширины диаграммы направленности (ДН).

Результаты

По результатам проведенной оптимизации были выбраны относительные скорости изменения геометрических параметров печатных ЛПА (поперечных размеров излучающих элементов и толщины распределительного фидера в месте их установки) вдоль ее структуры для каждого из диапазонов.

В результате проведенных модельных исследований оптимизированных структур получены следующие значения основных параметров: ширины ДН по уровню 0,707, КНД, максимального УБЛ и коэффициента стоячей волны (КСВ) в питающем фидере (табл. 1).

Таблица 1

Направленные свойства и электрические параметры оптимизированных логопериодических структур С и Х диапазонов

Диапазон	Ширина ДН, град.	КНД, дБи	УБЛ, дБ	КСВ
С (5721 – 7006 МГц)	48.69 – 67.57	9.56 – 12.53	-25.40 – -16.70	1.14 – 1.70
Х (7245 – 8434 МГц)	54.48 – 69.51	9.25 – 11.55	-24.94 – -16.46	1.14 – 1.73

С ростом значения рабочей частоты наблюдался рост ширины ДН, максимального УБЛ и КСВ, а также спад КНД, однако данные изменения не выходили за пределы нормы [12].

Результаты модельных исследований направленных свойств и электрических параметров оптимизированных двухдиапазонных антенн приведены в табл. 2.

Таблица 2

Направленные свойства и электрические параметры оптимизированных двухдиапазонных антенн

Тип антенны	Ширина ДН, град.	КНД, дБи	УБЛ, дБ	КСВ
Антенна №1	49.91 – 72.10	7.20 – 12.32	-22.21 – -10.60	1.09 – 1.80
Антенна №2	41.46 – 67.69	9.43 – 12.66	-25.90 – -16.50	1.15 – 1.75
Антенна №3	46.03 – 69.27	9.40 – 12.94	-26.03 – -10.51	1.08 – 1.69

По результатам сравнительного анализа параметров антенн трех вариантов конструктивного исполнения из дальнейших исследований был исключен вариант антенны №1 ввиду ее более худших диапазонных свойств по сравнению с другими вариантами конструктивного исполнения: более сильный спад КНД и рост УБЛ и ширины ДН с увеличением значения рабочей частоты.

Два оставшихся варианта конструктивного исполнения были использованы в качестве облучателей двухзеркальной антенны Кассегрена с диаметром раскрыва 16 метров. Прочие геометрические параметры зеркальной антенны, определяющие глубину основного зеркала, а также размеры и расположение контррефлектора приведены в работе [11].

На рис. 4-7 приведены результаты модельных исследований направленных свойств двухзеркальной антенны (ДЗА) Кассегрена с выбранными типами облучателей.

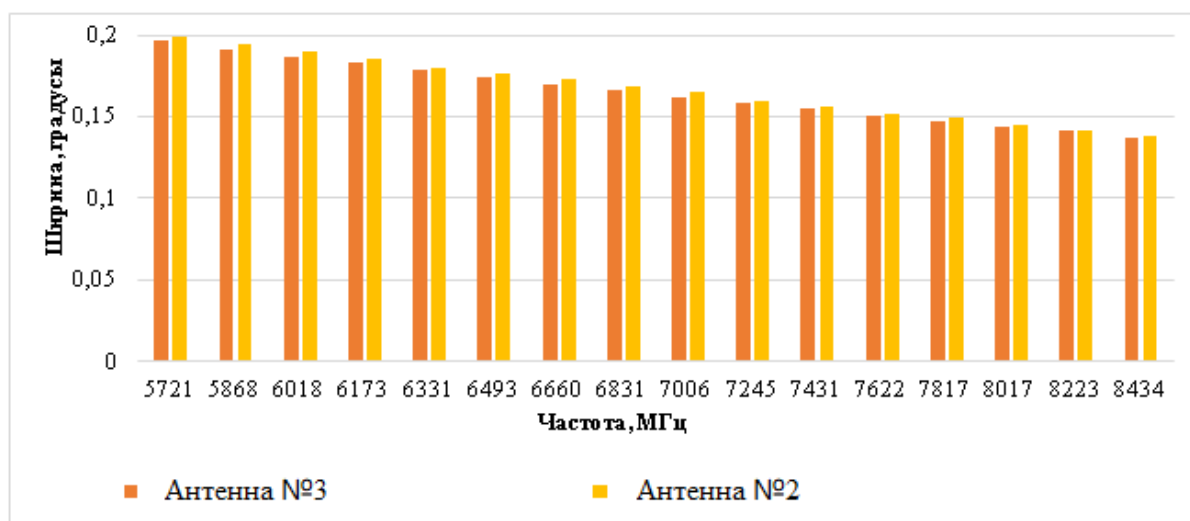


Рис. 4. Зависимость ширины ДН ДЗА Кассегрена от значения рабочей частоты

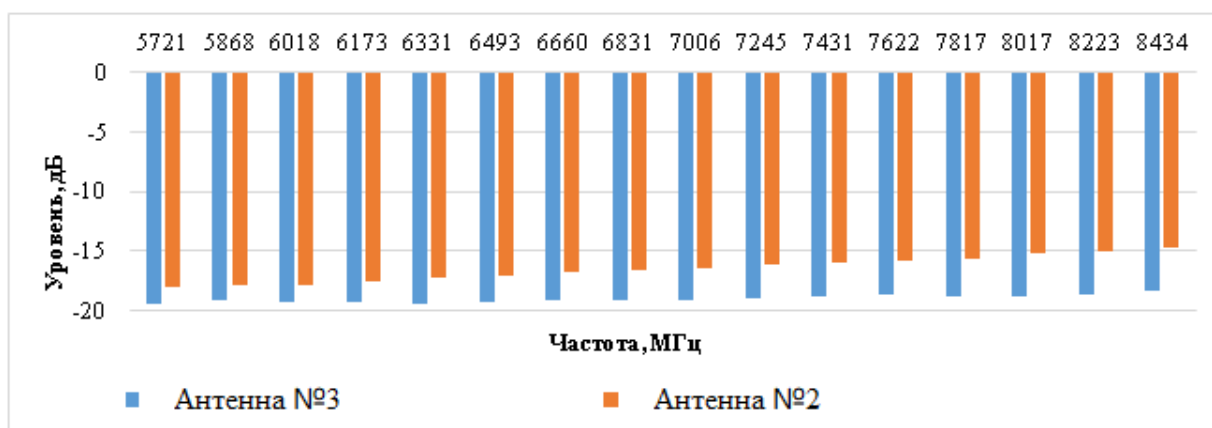


Рис. 5. Зависимость максимального УБЛ ДЗА Кассегрена от значения рабочей частоты

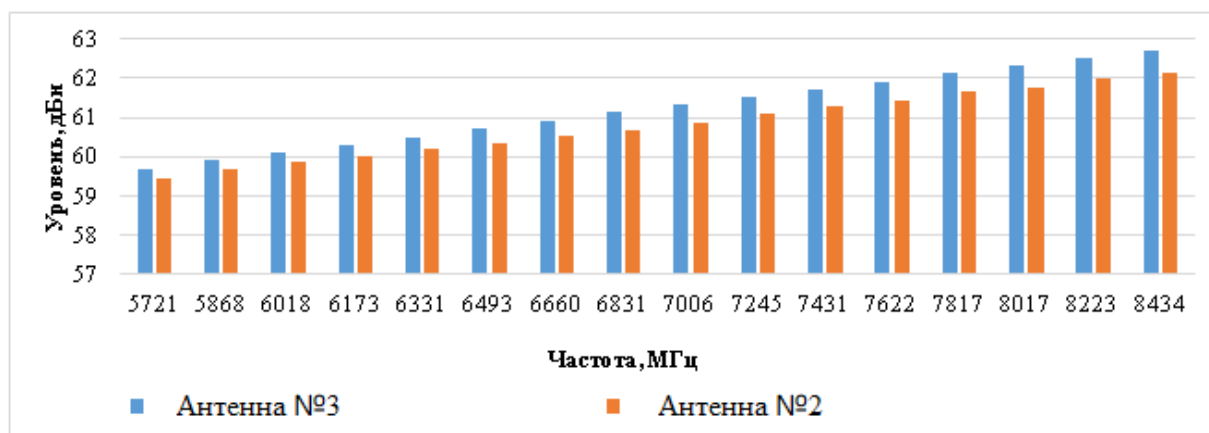


Рис. 6. Зависимость КНД ДЗА Кассегрена от значения рабочей частоты

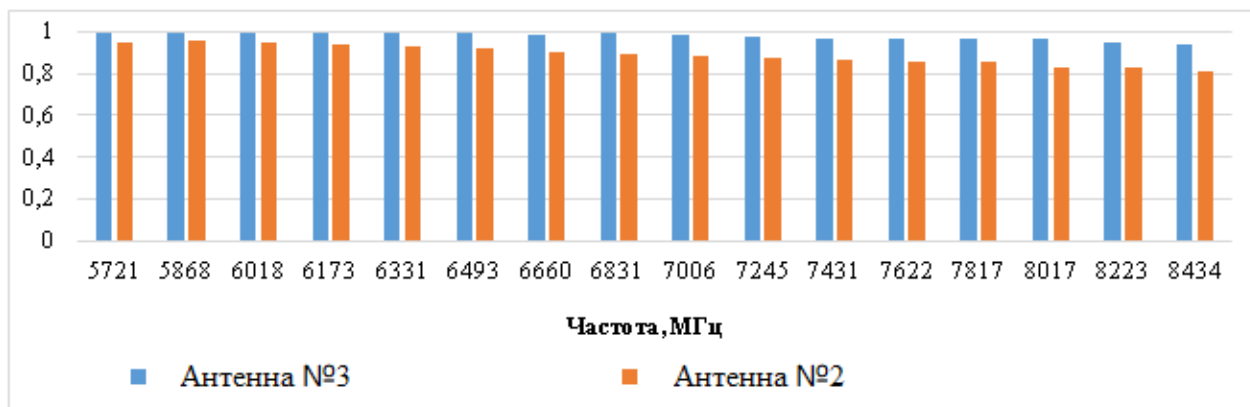


Рис. 7. Зависимость КИП ДЗА Кассегрена от значения рабочей частоты

Оба рассмотренных варианта ДЗА Кассегрена имеют характеристики направленности, удовлетворяющие требованиям к зеркальным антеннам [13] и демонстрируют близкие значения ширины ДН, однако по остальным параметрам излучения использование в качестве облучателя антенны №3 имеет серьезные преимущества: максимальный УБЛ ниже на 1,5 – 4,3 дБ, КНД выше на 0,25 – 0,55 дБи, КИП больше на 5 – 15%.

Заключение

Таким образом, в работе показано, что использование структуры микрополосковой логопериодической антенны [6] позволяет создавать облучатели больших зеркальных антенн, функционирующие в смежных диапазонах рабочих частот. Получаемые при этом характеристики излучения зеркальных антенн соответствуют предъявляемым к ним требованиям.

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием на выполнение НИОКР «Разработка электродинамических моделей облучателей больших зеркальных антенн в составе системы ГМССБ для исследования качества решения задач спутниковой радиосвязи и радионавигации», приказ № 69 от 04.03.2019 г., п.п. 1.19.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SATBEAMS // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://www.satbeams.com/satellites> (дата обращения 05.09.2020)
2. Волхонская Е.В., Коротей Е.В. Разработка математической модели поля излучения двухзеркальной антенны Грегори в рамках метода поверхностных токов // Морские интеллектуальные технологии. Труды VII Международного Балтийского морского форума. Вып. 4 (46) – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2019. – Т. 2. – С. 188 – 193.
3. Двухдиапазонный облучатель с комбинированным преобразователем мод: пат. RU 2680424 С1 МПК H01Q 5/00 (2015.01) / Бойчук С.И., Демченко В.И., Коровкин А.Е., Раздоркин Д.Я., Шипулин А.В. - № 2018102630: заявл. 23.01.2018; опубл. 21.02.2019, Бюл. №6, Приоритет 23.01.2018
4. Сверхширокополосная логопериодическая антенна: пат. RU 2663264 С2 МПК H01Q 11/00 (2006.01) / Кохнюк Д.Д., Боровик И.А., Коробейников Н.В., Лило Г.Я., Федоров Я.В., Павлов И.Д. - №2017101490: заявл. 17.01.2017; опубл. 03.08.2018, Бюл. №22, Приоритет 17.07.2018
5. Сравнительный анализ характеристик излучения зеркальной антенны с использованием в качестве облучателя рупорной и логопериодической антенн по результатам модельного эксперимента / Е.В. Коротей, Д.В. Кужекин // III Международный Балтийский морской форум [Электронный ресурс]: материалы Международного морского форума. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. С. 378-387.
6. Микрополосковая логопериодическая антенна: пат. RU 2571607 С1, МПК H01Q 10/11 (2006.01) / Е. В. Волхонская, Е. В. Коротей, Д. В. Кужекин. – № 2014129990/08; заявл. 21.07.2014; опубл. 20.12.2015, Бюл. №35, Приоритет 21.07.2014

7. Коротей Е.В., Волхонская Е.В. Математическое моделирование микрополоскового облучателя зеркальной антенны спутниковой системы связи ИНМАРСАТ-С // Морские интеллектуальные технологии. Труды V Международного Балтийского морского форума. Вып. 3 (37) – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2017. – Т. 1. – С. 149 – 153

8. Оптимизация геометрических параметров логопериодической антенны микрополоскового исполнения для С и Ku диапазонов: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015619811 Российская Федерация / Е.В. Коротей, Е.В. Волхонская, Д.В. Кужекин. - № 2015615296; заявл. 15.09.15; опубл. 20.10.15

9. Анализ направленных свойств и электрических параметров логопериодической вибраторной антенны: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015619459 Российская Федерация / Е.В. Коротей, Е.В. Волхонская, Д.В. Кужекин. - № 2015615388; заявл. 04.09.15; опубл. 20.10.15

10. Сравнительный анализ оценки поля излучения параболической зеркальной антенны апертурным методом и методом поверхностных токов / Е.В. Волхонская, Е.В. Коротей, Д.В. Кужекин // IV Международный Балтийский морской форум [Электронный ресурс]: материалы Международного морского форума. Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. С. 401-407.

11. Коротей Е.В., Карлов А.М., Волхонская Е.В. Сравнительный анализ апертурного и токового методов при оценке поля излучения двухзеркальной антенны Кассегрена // Радиосистемы «Территориально-распределенные системы охраны». - №2. – М.: Радиотехника, 2019. – С. 4-9.

12. ROHDE&SCHWARZ measurement antennas HL50s7 // Электрон. дан. Режим доступа URL: <https://www.rohde-schwarz.ru/hl50s7> (дата обращения 05.09.2020)

13. 8 Фролов О. П. Антенны для земных станций спутниковой связи. М.: Радио и связь, 2008. 376 с.

MODELING OF THE DUAL-BAND LOG-PERIODIC IRRADIATOR FOR LARGE REFLECTOR ANTENNAS DIRECTIONAL PROPERTIES WITH MATHCAD

Volkhonskaya Elena Vyacheslavovna, Grand PhD in Engineering sciences,
the associate professor, the professor of department of ship radio engineering systems
Korotey Evgeniy Vladimirovich, the associate professor of department
of ship radio engineering systems
Vlasova Kseniya Valerievna, PhD in Physico-mathematical sciences,
the associate professor of department of ship radio engineering systems

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: volkhonskaya_e@mail.ru; eugeniy_korotey@mail.ru;
p_ksenia@mail.ru

Variants of dual-band log-periodic irradiator for large reflector antennas design, based on microstrip log-periodic structure, are proposed in this paper. Mathematical models of irradiation field of these irradiators were built on the basis of the method of induced EMFs and theory of electric circuits with distributed parameters and their directional properties and electrical parameters were analyzed. On the results of Kassegrain two-mirror antenna directional properties modeling the optimal design of log-periodic irradiator, operating in the C and X bands, was selected.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИЛУЧШЕЙ МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ОБНАРУЖЕНИЯ СЕТЕВЫХ АТАК

Куделка Денис Васильевич, инженер-программист

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: kudelka.dv@bgarf.ru

Целью работы является разбор моделей машинного обучения для наиболее точного определения сетевых атак в задачах. В ходе работы были рассмотрены 7 моделей классификации с предоставлением сводных данных по каждой из них. В процессе был разработан программный модуль для апробации выбранной модели. Решение показало свою эффективность и может являться дополнением к уже интегрированной системе обнаружения вторжений как консультант с последующим созданием правил нивелирования угрозы.

Методы машинного обучения

Сущность алгоритма машинного обучения (МО) заключается в приеме на входе тренировочного набора данных и выдаче на выходе модели. Модель – это алгоритм, принимающий новые элементы (порции) данных в той же форме, что и тренировочные данные, и выдающий итоговый прогноз. Все алгоритмы машинного обучения определяются по трем взаимозависимым компонентам:

- семейство моделей, определяющее пространство моделей, из которого можно выбрать наиболее подходящую;
- функция потерь, позволяющая сравнивать различные модели в числовом выражении;
- процедура оптимизации, позволяющая выбрать наилучшую модель в семействе.

1.1. Семейства моделей

Каждый анализируемый сетевой пакет, можно представить как точку в n -мерном векторном пространстве, где размерность n определяется количеством признаков.

Определение атаки можно представить как задачу классификации целью которой является разделить это пространство на области легитимного и нелегитимного трафика (Если не принимать во внимание разделение на классы атак). Модель, полученная как результат работы выбранного алгоритма машинного обучения, представляет собой описание такого разделения векторного пространства.

На практике большинство алгоритмов создает границу решения представляющую собой некоторую поверхность в исследуемом векторном пространстве. С одной стороны, от границы решения находятся точки, помеченные как положительные (легитимный трафик), на другой стороне – отрицательные точки (нелегитимный трафик). Граница может быть простой линией (или гиперплоскостью в измерениях с более высокой размерностью) или сложной комбинацией из нескольких кривых линий, ограничивающих не связанные между собой области [1, с.28-29].

Для более точной детализации, вместо установления соответствия между каждой точкой векторного пространства и одним из возможных значений определяется связь каждой точки с вероятностью того, является ли она зловредной. В этом случае выбранный алгоритм машинного обучения выдаст функцию, которая присваивает каждой точке векторного пространства значение от 0 до 1.

В любом алгоритме машинного обучения существуют внутренние ограничения при определении конкретного типа границы решений или функции вычисления вероятности. Эти ограничения могут быть описаны конечным числом параметров модели или гиперпараметров. Самой простой является линейная граница решения, т. Е. гиперплоскость в векторном пространстве.

Ориентированная гиперплоскость H в n -мерном векторном пространстве может быть описана n -мерным вектором θ , ортогональным к этой гиперплоскости, и дополнительным вектором β определяющим, насколько далеко эта гиперплоскость удалена от начала координат:

$$H: \theta \cdot (x - \beta) = 0 \tag{1}$$

Это описание позволяет разделить векторное пространство на две части. Для присваивания вероятностей необходимо определить расстояние точки x от гиперплоскости H . Следовательно, можно вычислить «оценку» как действительное число:

$$s(x) = \theta \cdot (x - \beta) = \theta \cdot x + b, \tag{2}$$

где b – компенсирующий параметр равный, $b = -\theta \cdot \beta$

Таким образом, модель вычисления оценки может быть описана $n + 1$ параметрами модели: n параметров для описания вектора θ и один «компенсирующий» параметр b . Для преобразования оценки в классификацию просто выбирается пороговое значение t . Все оценки, превышающие t , обозначают злонамеренный точки, а оценки ниже t обозначают точки.

Если требуется установить связь действительного числового значения оценки $s(x)$ с вероятностью, то необходимо применить функцию, отображающую действительные числа в значения из интервала $[0, 1]$. Стандартная функция для этой цели известна под названием логистическая, или сигмоидная, функция, которая показана на рисунке 1. Функция определяется следующей формулой:

$$h_{\theta} = \frac{1}{1 + e^{\theta^T x}} \tag{3}$$

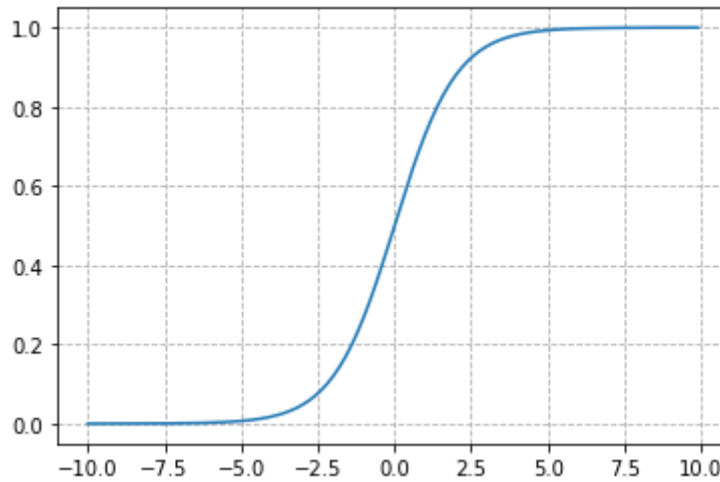


Рис. 1. График сигмоиды

Данные, выводимые логистической функцией, могут интерпретироваться как значения вероятности, что позволяет определить правдоподобие зависимого значения с привлечением к вычислениям конкретного значения из входного вектора признаков x .

1.2 Функция потерь

После установления ограничений на выбор алгоритмов прогнозирования, определяющих конкретное параметризованное семейство, необходимо выбрать наилучший алгоритм для предложенного тренировочного набора данных. Наилучший алгоритм должен оптимизировать некоторую числовую характеристику, вычисленную по исследуемым данным. Эта числовая характеристика называется целевой функцией, также называемой функцией стоимости или функцией потерь, поскольку она позволяет оценить количественно «стоимость» неправильных прогнозов или «потери», связанные с ними.

С математической точки зрения функция потерь – это функция, отображающая набор пар значений прогнозируемая метка / истинная метка в действительное число. Цель алгоритма - найти такие параметры модели, при которых прогнозируемые метки, получаемые при обработке тренировочного набора данных, минимизируют функцию потерь.

1.3. Оптимизация

Последним этапом в процедуре машинного обучения является поиск оптимального набора параметров, которые минимизируют функцию потерь. Для реализации процесса поиска используется алгоритм оптимизации.

Задача алгоритма оптимизации - минимизировать (или максимизировать) целевую функцию. В машинном обучении целевая функция выражается с помощью параметров модели обучения (θ и β), а ее целью является поиск таких значений θ и β , которые оптимизируют целевую функцию [2, с. 139-142].

Алгоритмы оптимизации можно разделить на две основные группы:

Алгоритмы первого порядка: эти алгоритмы оптимизируют целевую функцию, используя первую производную этой функции с учетом параметров обучения. Методы градиентного спуска представляют наиболее широко используемый тип алгоритмов оптимизации первого порядка. Их можно применять для поиска входных данных функции, которая выдает минимальное (или максимальное) значение. Вычисление градиента функции (т. е. частных производных по каждой переменной) позволяет определить моментальное направление, в котором должны смещаться значения параметров, чтобы достичь наиболее оптимального результата, выдаваемого функцией.

Градиентный спуск измеряет локальный градиент функции ошибок применительно к вектору параметров θ и двигается в направлении убывающего градиента. На примере функции издержек MSE градиентный

Функция издержек MSE – выпуклая и непрерывная с неизменяющимся, неожиданным образом, наклоном. Поэтому градиентный спуск гарантированно подберется произвольно близко к глобальному минимуму.

Градиентный спуск вычисляет градиент функции издержек в отношении каждого параметра модели θ_j . Результат измерения – частная производная. Частная производная функции издержек в отношении параметра θ_j имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial \theta_j} MSE(\theta) = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (\theta^T \cdot \mathbf{x}^{(i)} - y^{(i)}) x_j^{(i)} \quad (4)$$

Алгоритмы второго порядка: эти алгоритмы используют вторые производные для оптимизации целевой функции. Алгоритмы второго порядка лишены такого недостатка, как медленная сходимость. Например, алгоритмы второго порядка хорошо работают при решении задачи нахождения точек седловины (перевала кривой), тогда как алгоритмы первого порядка, вероятнее всего, будут поставлены в тупик на этих точках. Тем не менее методы второго порядка чаще всего являются более медленными и требуют больших издержек на вычисления.

Примерами алгоритмов второго порядка являются пакетный градиентный спуск и стохастический градиентный спуск.

При пакетном градиентном спуске вместо вычисления (4) по отдельности для каждого образца, можно воспользоваться вектором градиента:

$$\nabla_{\theta} MSE(\theta) = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \theta_0} MSE(\theta) \\ \frac{\partial}{\partial \theta_1} MSE(\theta) \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial \theta_n} MSE(\theta) \end{pmatrix} = \frac{2}{m} \mathbf{X}^T \cdot (\mathbf{X} \cdot \boldsymbol{\theta} - \mathbf{y}) \quad (5)$$

На каждом шаге, используется целый пакет обучающих данных, в результате чего он оказывается медленным на очень крупных обучающих наборах.

Важным фактором является скорость обучения η , так как размер шага определяется умножением вектора градиента на коэффициент обучения. Шаг определяется следующей формулой:

$$\theta^{(\text{следующий шаг})} = \theta - \eta \nabla_{\theta} MSE(\theta) \quad (6)$$

Для определения скорости обучения можно использовать решетчатый поиск, а для определения количества итераций устанавливается значение ε – допуск. Если значение вектора градиента становится меньше ε – достижение минимума.

Стохастический градиентный спуск (SGD) на каждом шаге выбирает из обучающего набора случайный образец и на его основе вычисляет градиенты. По причине стохастической природы,

алгоритм менее нормален чем пакетный градиентный спуск. По окончании значения параметров оказываются хорошими, но не оптимальными [3, с. 211 - 215].

SGD хорош при нерегулярности функции издержек – у стохастического градиентного спуска вероятность выхода из локального минимума (и соответственно, нахождения глобального минимума) выше.

Для достижения глобального оптимума в SGD применяется постепенное сокращение скорости обучения η (имитация отжига). Функция определяющая скорость обучения называется графиком обучения.

Методы первого порядка используются чаще по причине их относительной эффективности. Выбор подходящего алгоритма оптимизации зависит от размера набора данных, от сущности функции потерь, от типа задачи обучения и от скорости/требований к ресурсам для выполнения предполагаемой операции. Кроме того, некоторые методики регуляризации также могут создавать проблемы совместимости с определенными типами методов оптимизации.

Алгоритмы классификации

В процессе обучения было рассмотрено несколько моделей классификации. Модели обучались на одном и том же тренировочном наборе с использованием перекрёстной проверки по 3 блокам. Числовые метрики результата обучения каждой из моделей приставлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение результатов моделей

Классификатор	Точность	Полнота	Мера F1	ROC AUC
KNN	0.8974	0.9264	0.9117	0.8914
Логистическая регрессия	0.8995	0.9666	0.9318	0.8682
Стохастический градиентный спуск	0.8991	0.9844	0.9398	0.8746
Случайные леса	0.9005	0.9518	0.9254	0.9263
XGBoost	0.8992	0.9469	0.9224	0.9323
Градиентный бустинг	0.8979	0.99990	0.9461	0.8249
Метод опорных векторов	0.8977	0.9607	0.9281	0.8960

Кривая ROC рассмотренных классификаторов представлена на рисунке 2.

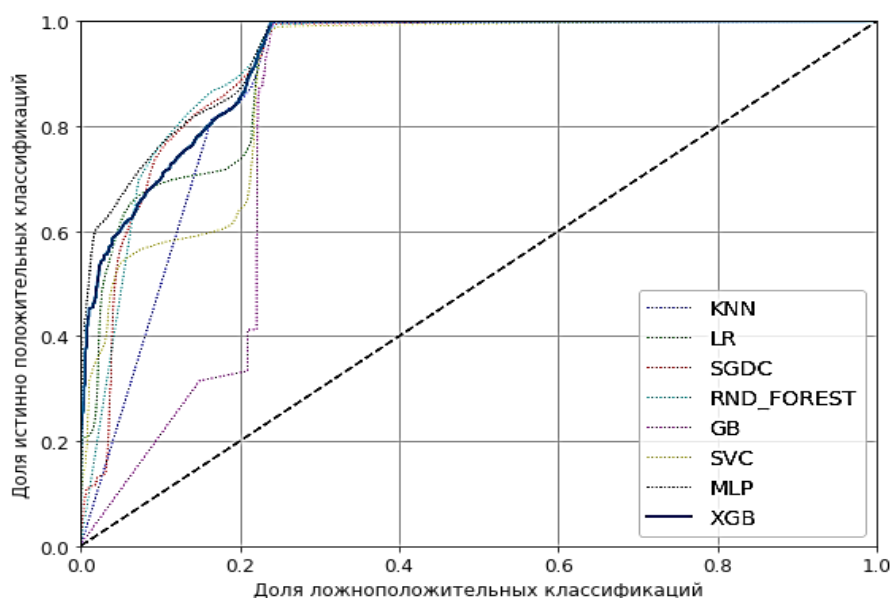


Рис. 2. Кривая ROC для всех классификаторов

На основании значений таблицы 1, лучшей моделью оказался: градиентный бустинг (GradientBoostingClassifier), матрица неточностей модели преставлена в таблице 2.

Таблица 2

Матрица неточностей модели GradientBoostingClassifier

Фактический класс	Спрогнозированный класс	
	42432	13568
	11	119330

Многоклассовая классификация

Разработанный модуль способен работать как отдельная программа детектируя изученные типы атак. Для обнаружения не принципиально классифицировать отдельный подтип каждой атаки, модуль сообщит лишь о доброкачественности или о зловредности захваченного пакета.

С целью возможности обучения и интеграции модуля с системами обнаружения вторжений, применяется мультиклассовая классификация. Такой подход позволяет проанализировать особенности каждого типа атаки для возможности консультирования по противодействию и созданию правил для системы предотвращения вторжений.

В качестве моделей мультиклассовой классификации были рассмотрены модели: ансамблевый градиентный бустинг, XGBoost, метод опорных векторов и стохастический градиентный спуск.

Наилучший результат был продемонстрирован классификатором XGBoost, матрица неточностей для которого отображена в таблице 3.

Таблица 3

Матрица неточностей многоклассовой модели XGBoost

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нормальный трафик (0)	0	0	1	42	8	0	0	0	0	0
Рекогносцировка (1)	0	2	8	48	54	1	3	0	1	0
Бэкдор (2)	0	0	466	219	63	2	24	2	10	0
DoS (3)	0	1	382	1629	152	15	66	17	12	1
Эксплойт (4)	0	1	50	112	875	0	172	0	2	0
Активное сканирование (5)	0	0	18	48	9	3641	4	1	1	1
Фаззинг (6)	0	0	4	12	49	0	7341	2	10	0
Черви (7)	0	1	62	73	5	0	6	574	2	0
Шелл-код (8)	0	0	0	9	2	1	14	0	49	0
Общие атаки (9)	0	0	1	3	0	0	0	0	0	3

Для наглядности и лучшего восприятия можно отобразить матрицу неточностей в виде тепловой карты, показанной на рисунке 3.

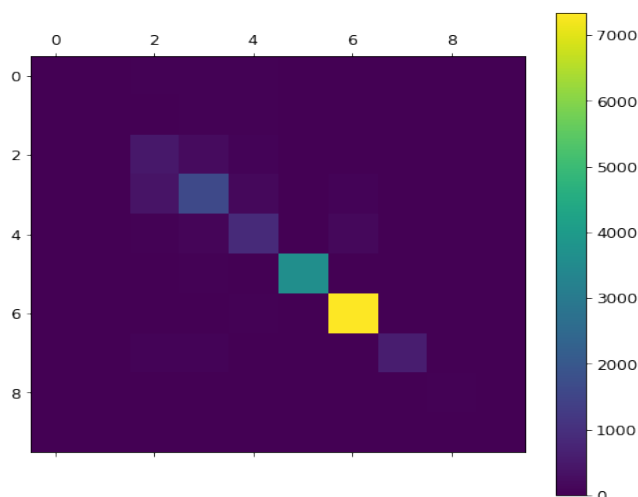


Рис 3. Тепловая карта матрицы неточностей

Значение метрик точности, полноты, меры F1, ROC AUC представлены в таблице 4.

Таблица 4

Значение метрик многоклассовой модели XGBoost

Тип трафика	ID	Точность	Полнота	Мера F1
Нормальный трафик	0	1.0	0.08	0.14
Рекогносцировка	1	0.4	0.02	0.03
Бэкдор	2	0.46	0.59	0.52
DoS	3	0.74	0.72	0.73
Эксплойт	4	0.70	0.72	0.71
Активное сканирование	5	0.99	0.98	0.99
Фаззинг	6	0.96	0.99	0.98
Черви	7	0.96	0.79	0.87
Шелл-код	8	0.56	0.65	0.60
Общие атаки	9	0.60	0.43	0.50

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луне Педро Коэльо, Вилли Ричарт. Построение систем машинного обучения на языке Python. 2-е издание / пер. с англ. Слинкин А. А. – М.: ДМК Пресс, 2016. – 302 с.
2. Крис Элбон. Машинное обучение с использованием Python. Сборник рецептов: Пер. с англ. – СПб.: БХВ-Петербург, 2019. – 384 с.
3. А. А. Браницкий, И. В. Котенко, Анализ и классификация методов обнаружения сетевых атак // Труды СПИИРАН, Выпуск 2(45), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН: Издательский центр СПИИРАН, 2016. – С. 207–244.

DETERMINING THE BEST MACHINE LEARNING MODEL OR NETWORK ATTACK DETECTION

Kudelka Denis Vasilyevich, software engineer

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: kudelka.dv@bgarf.ru

The aim of the work is to analyze machine learning models in order to determine the most accurate one in the tasks of determining network attacks. In the course of the work, 7 classification models were considered with the provision of summary data for each of them. In the process, a software module was developed to test the selected model. The solution has shown its effectiveness and can be an addition to the already integrated intrusion detection system as a consultant with the subsequent creation of threat leveling rules.

НЕОРТОГОНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

¹Петров Сергей Васильевич, аспирант Института физико-математических наук и информационных технологий

¹Пахотин Валерий Анатольевич, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор Института физико-математических наук и информационных технологий

¹Молостова Светлана Валерьевна, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент Института физико-математических наук и информационных технологий

²Коротей Евгений Владимирович, доцент кафедры судовых радиотехнических систем

¹ФГБОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. И. Канта»,

Калининград, Россия, e-mail: VPakhotin@kantiana.ru; SMolostova@kantiana.ru

²Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: eugeny_korotey@mail.ru

Рассмотрена возможность дополнительного уплотнения каналов в системах связи с их временным разделением. Основой являются оригинальные корреляционные фильтры максимального правдоподобия, позволяющие разделять неортогональные по времени приёма сигналы. Приводятся импульсные характеристики таких фильтров и анализируются их возможности. Рассмотрены два ортогональных и один дополнительный неортогональный каналы связи, в которых реализована модуляция 4-QAM. Приводятся статистики оценок амплитуд и фаз сигнального созвездия 4-QAM для трех неортогональных каналов связи, полученные с помощью модельных расчетов. Анализируется эффективность дополнительного уплотнения каналов.

Введение

В настоящее время цифровые системы связи представляют собой высокоэффективные радиотехнические комплексы, основным предназначением которых является передача информации [2, 3]. Они позволяют широко использовать различные виды амплитудно-частотно-фазовой модуляции (QAM). Это дает возможность существенно увеличить скорость передачи информации. Так например, в системах наземного эфирного телевидения переход на новый стандарт DVB-T2 обусловлен в первую очередь требованием обеспечить 30 % увеличение скорости передачи информации. Это оказывается возможным за счет сжатия информации, увеличения количества ортогональных поднесущих с 8К до 32К, увеличения сигнального созвездия с 64-QAM до 256-QAM. Существующий острый дефицит частотных полос требует развития новых возможностей для увеличения эффективности их использования. Следует отметить, что основой потока информации в системах связи является простейший сигнал – радиоимпульс длительностью T , характеризующийся круговой частотой ω , начальной фазой φ_0 , амплитудой U_0 и временем приема t_0 . В потоке сообщений указанные параметры являются случайными. Однако они постоянны на интервале длительности T и меняются от одного интервала длительностью T к другому случайным образом. В БФУ им. И. Канта к настоящему времени разработаны оригинальные частотные и корреляционные фильтры максимального правдоподобия, которые могут разделять радиоимпульсы по частоте и времени приема в области их неортогональности, когда частотные спектры или корреляционные функции радиоимпульсов частично перекрываются [5, 6]. Эти результаты могут быть использованы для создания неортогональных систем связи, основанных на частотном или временном разделении каналов связи. При этом эффективность использования выделенной полосы частот увеличивается за счет частотного или временного сжатия каналов связи. В [5, 6] рассмотрены потенциальные возможности частотного уплотнения каналов в системах связи с частотным разделением. В настоящей работе анализируются возможности уплотнения каналов в системах связи с временным разделением.

Таким образом, основной задачей настоящей работы является обоснование возможности дополнительного уплотнения каналов в системах связи с временным разделением.

Основы теории

Рассмотрим систему связи с временным разделением каналов. Ее структура показана на рисунке 1 [2, 3].

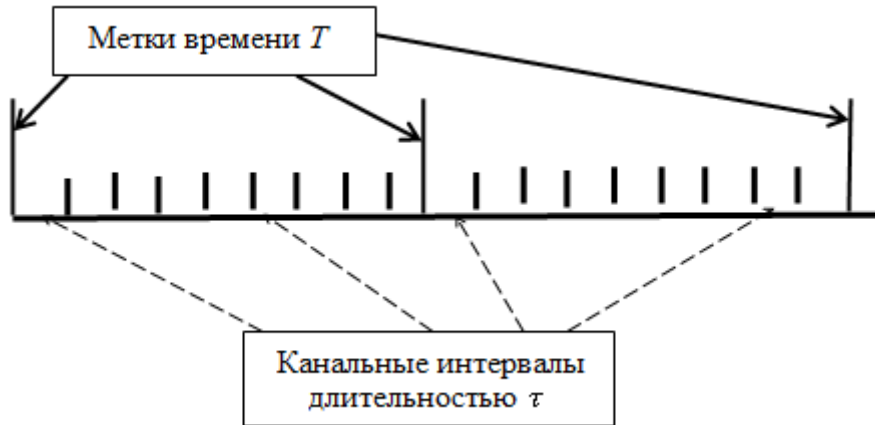


Рис. 1. Структура системы связи с временным разделением каналов

Интервал между метками времени T разбивается на N интервалов длительностью τ для создания N временных каналов. В каждом канале информация представляется в виде радиоимпульса с комплексной амплитудой \hat{U}_n . Длительность радиоимпульсов равна $\tau = \frac{1}{\Delta f}$, Δf - ширина выделенной полосы частот в системе связи. Радиоимпульсы в соседних каналах являются ортогональными по времени (они представлены без временного наложения). Скорость передачи информации в каждом канале такой системы связи будет равна

$$C = \Delta f \log_2(N_U N_\varphi), \tag{1}$$

где N_U, N_φ - количество независимых состояний сигнала по амплитуде и по фазе при амплитудно-фазовой модуляции.

Общая скорость передачи информации будет $C1 = NC$.

Рассмотрим систему связи с неортогональными по времени приема каналами на примере наиболее простой схемы. Выделим из совокупности каналов два соседних канала и поместим в середине еще один канал, как показано на рисунке 2.



Рис. 2. Фрагмент структуры системы связи с неортогональными по времени каналами

Длительность радиоимпульсов и частоты в этих трех выделенных каналах одинаковы, а амплитуды и фазы - произвольные. Следовательно, возможна амплитудно-фазовая модуляция в каждом канале связи. Времена приема всех трех радиоимпульсов известны. Радиоимпульсы в первом и втором каналах ортогональны (без перекрытия). Радиоимпульсы в первом и дополнительном ка-

налах, а также во втором и дополнительном каналах неортогональны. Основной задачей является оценка комплексных амплитуд во всех трех каналах. При решении этой задачи скорость передачи данных возрастает в 1,5 раза за счет дополнительных каналов. Рассмотрим положения теории [1, 5, 6]. Запишем принятую реализацию в виде

$$\hat{Y}(t) = \hat{U}_1 \exp(i\omega(t - t_1)) + \hat{U}_d \exp(i\omega(t - (t_1 + \tau/2))) + \hat{U}_2 \exp(i\omega(t - (t_1 + \tau))) + \hat{U}_ш(t). \quad (2)$$

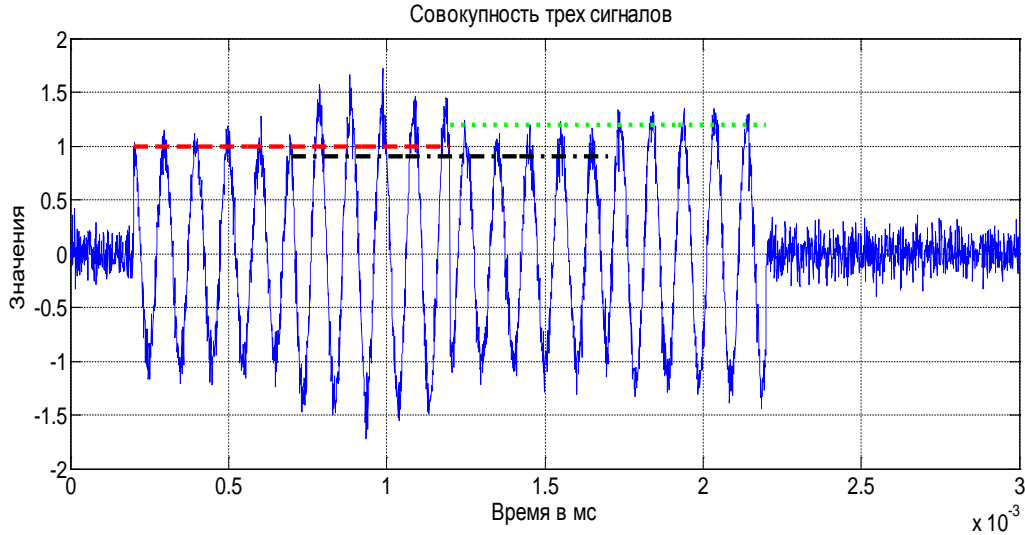


Рис. 3. Совокупность трех радиоимпульсов

Радиоимпульс первого канала имеет комплексную амплитуду \hat{U}_1 и расположен на интервале $t_1 \div t_1 + \tau$. Радиоимпульс дополнительного канала имеет комплексную амплитуду \hat{U}_d и расположен на интервале $t_1 + \frac{\tau}{2} \div t_1 + 3\tau/2$. Радиоимпульс второго канала имеет комплексную амплитуду \hat{U}_2 и расположен на интервале $t_1 + \tau \div t_1 + 2\tau$. Шумовая составляющая имеет нормальное распределение квадратурных компонент и интервал корреляции τ_k . На рисунке 3 показано расположение на временной оси совокупности трех радиоимпульсов.

На основании (2) запишем функционал правдоподобия

$$\Delta(\hat{U}_1, \hat{U}_2, \hat{U}_d) = \int_{t_1}^{t_1+2\tau} |\hat{Y}(t) - \hat{U}_1 \exp(i\omega(t - t_1)) + \hat{U}_d \exp(i\omega(t - (t_1 + \tau/2))) + \hat{U}_2 \exp(i\omega(t - (t_1 + \tau)))|^2 dt, \quad (3)$$

где штрихами отмечены оцениваемые комплексные амплитуды радиоимпульсов.

Дифференцируя (3) по комплексным амплитудам и приравнявая дифференциалы к нулю, получит систему уравнений правдоподобия

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_1+\tau} \hat{Y}(t) \exp(-i\omega(t - t_1)) dt &= \hat{U}_1 \tau + \hat{U}_d \exp(-\frac{i\omega\tau}{2}) \tau/2 + 0, \\ \int_{t_1+\tau/2}^{t_1+3\tau/4} \hat{Y}(t) \exp(-i\omega(t - t_1 - \tau/2)) dt &= \hat{U}_1 \tau/2 \exp(\frac{i\omega\tau}{2}) + \hat{U}_d \tau + \hat{U}_2 \tau/2 \exp(i\omega(-\tau/2)), \\ \int_{t_1+\tau}^{t_1+2\tau} \hat{Y}(t) \exp(-i\omega(t - t_1 - \tau)) dt &= 0 + \hat{U}_d \frac{\exp(\frac{i\omega\tau}{2}) \tau}{2} + \hat{U}_2 \tau. \end{aligned} \quad (4)$$

В матричном виде уравнения правдоподобия можно записать следующим образом

$$\bar{B} = \hat{A}\bar{U}, \quad (5)$$

где левый вектор столбец

$$\bar{B} = \begin{pmatrix} \int_{t_1}^{t_1+\tau} \hat{Y}(t) \exp(-i\omega(t-t_1)) dt, \int_{t_1+\tau/2}^{t_1+3\tau/4} \hat{Y}(t) \exp(-i\omega(t-t_1-\tau/2)) dt, \int_{t_1+\tau}^{t_1+2\tau} \hat{Y}(t) \exp(-i\omega(t-t_1-\tau)) dt \end{pmatrix}^T$$

корреляционная матрица

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} 1, \frac{\exp(-\frac{i\omega\tau}{2})}{2}, 0 \\ \frac{\exp(\frac{i\omega\tau}{2})}{2}, 1, \frac{\exp(-\frac{i\omega\tau}{2})}{2} \\ 0, \frac{\exp(\frac{i\omega\tau}{2})}{2}, 1 \end{pmatrix};$$

оцениваемый вектор комплексных амплитуд

$$\bar{U} = (\hat{U}_1, \hat{U}_d, \hat{U}_2)^T.$$

Решая матричное уравнение, можно получить оцениваемый вектор комплексных амплитуд трех сигналов

$$\hat{A}^{-1}\bar{B} = \bar{U}. \quad (6)$$

Таким образом, основная задача в системах связи с неортогональными по времени каналами оказывается решенной. Решение можно представить в виде схемы фильтрации тремя фильтрами максимального правдоподобия с соответствующими импульсными характеристиками $H1, H2, H3$, на выходах которых реализуются комплексные амплитуды $U1, U2, U3$, как показано на рисунке 4. Импульсные характеристики временных каналов можно определить по выражению (6), если положить правый вектор столбец, равным

$$\bar{B1} = (\exp(-i\omega(t-t_1)), \exp(-i\omega(t-t_1-\tau/2)), \exp(-i\omega(t-t_1-\tau)))^T,$$

а вектор амплитуд заменить на вектор импульсных характеристик

$$\bar{H} = (\hat{H}_1, \hat{H}_2, \hat{H}_3)^T, \hat{A}^{-1}\bar{B1} = \bar{H}. \quad (7)$$

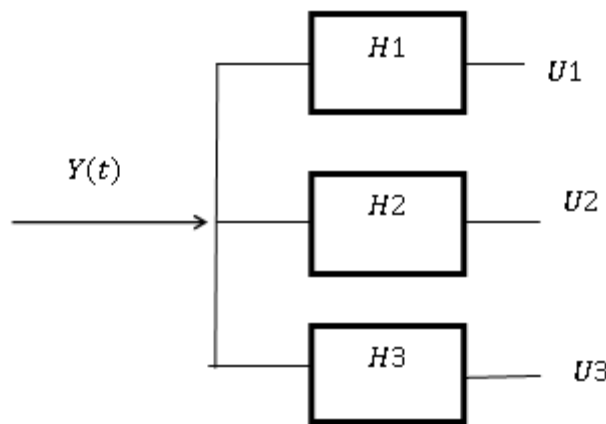


Рис. 4. Схема разделения радиоимпульсов в трех временных каналах

На рисунке 5 показана статистика амплитуд и фаз на выходе фильтров максимального правдоподобия. Прямоугольниками показаны истинные значения параметров радиоимпульсов. Отношение сигнал/шум равно -15 дБ.

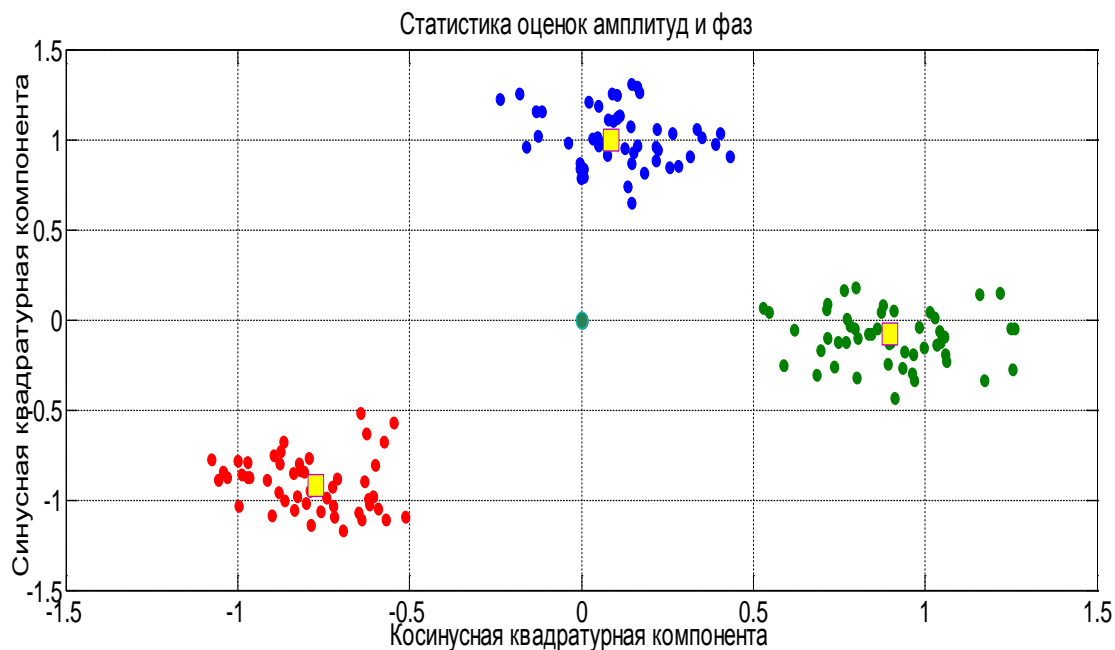


Рис.5. Статистика амплитуд и фаз на выходе фильтров максимального правдоподобия

Таким образом, модельные расчеты подтверждают возможность использования амплитудно-фазовой модуляции в системах связи с неортогональными во времени канальными интервалами.

Заключение

В настоящей работе представлена новая возможность уплотнения каналов в системах связи с временным разделением каналов. В рассматриваемом варианте скорость передачи данных увеличивается в 1,5 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника, 2003. – 400 с.
2. Дж. Возенкрафт, И. Джекобс. Теоретические основы техники связи. Перевод с англ. под ред. Р.Л. Добрушина. Изд. «Мир», Москва, 1969, 640 с.
3. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Основы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учебн. пособие. – М.: Эхо Тренд, 2005. – 392 с.
4. Слюсар В. И., Смоляр В. Г. Частотное уплотнение каналов связи на основе сверхрелеевого разрешения сигналов. Радиоэлектроника. Изв. высш. учеб. заведений. 2003, №7, с. 30 – 39.
5. Пахотин В.А., Анискевич В.М. Частотное уплотнение каналов связи на основе неортогональных сигналов. Цифровая обработка сигналов и ее применение: сборник докладов 16-й Международной конференции и выставки. – Москва, 2014. – Вып. XVI – С. 296-300.
6. Пахотин В.А., Строков В.И., Алещенко А.Н. Неортогональные сигналы в системах связи с частотным разделением каналов. «Радиолокация. Навигация. Связь»: сборник докладов 20-й международной научно-технической конференции. - Воронеж, НПФ «Саквое», 2014. - с. 354.

NON-ORTHOGONAL COMMUNICATION SYSTEMS

¹Petrov Sergey Vasilievich, post-graduate student of the Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies

¹Pakhotin Valeriy Anatolievich, Dr. of Phys.-Math. Sciences, Professor, Professor of the Institute of Physi-Mathematical Sciences and Information Technologies

¹Molostova Svetlana Valerievna, Candidate of Physics, -mat. Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Institute of Physical and Mathematical Sciences and Information Technologies

²Korotey Evgeny Vladimirovich, Associate Professor, Department of Ship Radio Engineering Systems

¹FSBEI HE "Baltic Federal University named after I. Kant", Kaliningrad, Russia, e-mail: VPakhotin@kantiana.ru; SMolostova@kantiana.ru;

²Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU", Kaliningrad, Russia, e-mail: eugeny_korotey@mail.ru

The possibility of additional compression of channels in communication systems with their temporary separation is considered. The basis is the original correlation filters of maximal-maximum plausibility, which allow to separate unorthogonal signals by time of reception. Pulse characteristics of such filters are given and their possibilities are analyzed. Two orthogonal and one additional non-orthogonal communication channels, in which 4-QAM modulation is implemented, are considered. The statistics of estimation of amplitudes and phases of the 4-QAM signal constellation for three non-orthogonal communication channels obtained with the help of model calculations are given. The efficiency of additional channel compaction is analyzed.

УДК 004.056.5:378.3

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ АУДИТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УРОВНЯ АСУТП

Подтопельный Владислав Владимирович, ст. преподаватель, кафедра информационной безопасности

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Россия, e-mail: ionpvv@mail.ru

Рассматриваются технологии аудита сетевой инфраструктуры диспетчерского уровня АСУТП. Изучается специфика применения системы обнаружения вторжений хостового типа (HIDS) для решения задач аудита защищенности сетевой инфраструктуры диспетчерского уровня, приводятся основные особенности формирования правил отслеживания событий безопасности. Изучается специфика применения аудита с применением интеллектуальных средства анализа трафика. Приводятся основные этапы формирования моделей анализа и описываются особенности данных моделей. Проводится сравнительный анализ и определяются положительные и отрицательные характеристики технологии аудита информационной безопасности диспетчерского уровня HIDS OSSEC и технологии с использованием интеллектуальных методов.

Для проведения аудита информационной безопасности сетевой инфраструктуры требуется осуществить сбор и анализ большого массива данных за определенный период времени. Кроме

того, требуется периодически осуществлять повторение процедур сбора и анализа сетевых данных для более полного представления о возможных проблемах в сети. Сейчас большое распространение получили системы типа SIEM (Security information and event management), которые позволяют осуществлять процедуры аудита сетевой инфраструктуры в процессе ее эксплуатации непрерывно. Целью данного типа аудита является определение того, насколько сетевая инфраструктура соответствует предъявляемым к ней требованиям информационной безопасности (ИБ). Таким образом определяется так же уровень защищенности информационных сетевых компонентов корпоративной информационной системы (КИС) предприятия.

Для достижения целей аудита (превентивного и детектирующего типа) информационной безопасности сетевой инфраструктуры АСУ ТП требуется решить ряд задач:

- осуществить поиск уязвимостей сетевых систем различными методами;
- оценить риски с учетом результатов исследования активности в сетевой инфраструктуре организации (отслеживание легитимных и вредоносных запросов);
- оценить уровень защищенности с учетом всех данных и всех факторов, влияющих на состояние инфраструктуры;
- определить уровень соответствия стандартам ИБ и выработать ряд рекомендаций по повышению уровня защищенности.

Для решения поставленных задач требуется изучить состояние сети, определить особенности ее инфопотоков и, если позволяет специфика инфраструктуры, провести тестирования на проникновение, то есть реализовать активный аудит (pen-тест). Однако в сетях АСУ ТП на диспетчерском уровне pen-тест, как правило, не допускается, поскольку подобные действия могут снизить работоспособность системы, что негативно скажется на работоспособности предприятия в целом.

Поскольку при аудите и последующем анализе его результатов следует учитывать влияние уже встроенных в инфраструктуру средств информационной безопасности, нужно изучить, какие компоненты систем защиты активны на рассматриваемом уровне АСУ ТП. Защита может обеспечиваться следующим:

- системами распределения прав доступа;
- системами контроля трансляции данных через пользовательский интерфейс OPC-сервера, сервер базы данных и подсистемы сбора и хранения данных;
- антивирусными системами;
- системами обнаружения вторжений.

Разграничение доступа осуществляется средствами операционной системы. Также могут применяться специальные программные и программно-аппаратные средства для защиты операционной системы, позволяющие контролировать разрешения политик безопасности на критически важных компонентах сети. Следует учитывать, что при аудите цели злоумышленника не очевидны, и часто проявления деструктивных влияний на компоненты уровня могут оказываться непоказательными, поскольку не затрагивают целевые объекты атаки.

Однако большую сложность представляет контроль среды передачи данных на диспетчерском уровне АСУ ТП. Сейчас Ethernet используется как единая среда передачи данных для АСУ ТП, хотя на диспетчерском уровне могут транслироваться данные подключенных ПЛК, которые используют протоколы Modbus/TCP, EtherNet/IP, PROFInet и др. При этом рекомендуется применять те устройства передачи данных, которые обеспечивают защиту от подмены IP-адресов узлов сети, а также защиту от утечки данных. Соответственно, требуется определить те методы и технологии, которые могут, учитывая специфичность сетевой инфраструктуры уровня системы, использоваться для реализации полноценного аудита. Необходимо понять, какие при аудите слабые и сильные стороны существуют у техник анализа данных с учетом технологических ограничений.

Одним из важнейших направлений контроля состояния АСУ ТП является внедрение и «тонкое» (то есть учетом функциональных особенностей компонентов сети) использование систем обнаружения сетевых атак как в сетевой, так и в хвостовой реализации. Известные сетевые системы обнаружения и предотвращения вторжений могут использоваться как средства защиты и, одновременно, как средство сбора данных с последующей сигнализацией об аномальном состоянии системы или данных трафика.

Такие системы, размещенные на диспетчерском (среднем) уровне, используются для защиты нижних уровней АСУТП, на которых работа средств контроля трафика может привести к задержкам в трансляции данных, что критически скажется на работе ПЛК.

Принцип работы средств аудита и контроля защищенности строится на основе централизации процедур журналирования (системные журналы и журналы аудита безопасности) и выявления критичных для системы событий с оповещением о них администраторов безопасности. При этом следует учитывать проблемы, которые могут возникнуть при эксплуатации данных систем. Главная проблема – это несовместимость технологий обработки данных и способов их трансляции. Технологические различия могут проявляться в использовании или неиспользовании OPC-сервера в системе, касаться различий операционных платформ. Проблемы несовместимости могут быть связаны с использованием протоколов, уникальных для технологической сборки уровня ПЛК.

Несовместимость средств аудита и исследуемых систем может возникнуть по следующим причинам:

- влияние на поток данных, что ограничит функционал SCADA, работающей в реальном режиме времени, с последующим вызовом коллизий;
- возможен эффект исчерпания ресурсов при активном аудите сервисов и/или сетевых служб SCADA.

Таким образом, средства аудита и контроля трафика следует встраивать на диспетчерский уровень, во-первых, учитывая технологическую специфику конкретно взятого диспетчерского уровня АСУ ТП системы, во-вторых, учитывая разделение технологий передачи данных на два уровня: уровень стандартных протоколов, используемых в корпоративных информационных системах и уровень технических протоколов типа CANopen, HART, Modbus. Так же требуется соблюдать осторожность при перехвате данных для анализа в процессе аудита, поскольку это может вызвать критическую для системы нижнего уровня АСУТП задержку.

Для проведения аудита информационной безопасности на диспетчерском уровне необходимо определить основной компонентный состав уровня, функциональные свойства его компонентов, а так же выявить средства информационной защиты, применение которых возможно с учетом технологической специфики уровня. Необходимо учитывать особенности организации АСУТП, а именно: подсистемы диспетчерского и полевого (нижнего) уровня должны быть связаны с корпоративной сетью и компонентами административного управления. Часть системы при эксплуатации полевого уровня, может работать в реальном режиме времени, который часто совмещается с виртуализированной обработкой данных на уровнях общего управления. Таким образом, исследуя инфраструктуру предприятия при аудите, требуется определить, к какому уровню относятся следующие компоненты:

1. Межсетевые экраны (МЭ), расположенные на границах уровней.
2. Системы удаленного доступа позволяющие контролировать производственные процессы.
3. Модемы, предназначенные для связи между MTU-терминалами и периферийными устройствами.
4. Маршрутизирующие устройства, выполняющие функции соединения сетей LAN с WAN-сетями, MTU-терминалов и RTU-устройств.

Кроме того, следует проанализировать промышленную сеть, которая включает сенсоры, датчики и элементы оборудования с программируемым логическим контроллером (ПЛК).

Учитывая эти факторы, можно выделить те технологии, при работе с которыми проблем совместимости возникнуть не должно. В рамках решения задач аудита применимы системы обнаружения (СОБ) типа OSSEC. Эта система классифицируется как HIDS (система хостового типа), и имеет клиентско-серверную архитектуру. В ней в качестве клиентов применяются агенты, установленные на контролируемые узлы сети. Агенты передают данные на сервер для последующего анализа с использованием специально созданных для заданного уровня инфраструктуры АСУТП правил аудита. Также данная СОБ решает задачи контроля целостности среды, отслеживает доступ привилегированных пользователей. Эта технология позволяет не использовать интеллектуальные методы анализа данных, и объем анализируемой информации не ограничен только сетевыми данными.

Перед этапом внедрения COB нужно было определить принципы встраивания механизмов OSSEC HIDS и принципы формирования правил аудита с учетом топологии сети и технологических особенностей диспетчерского уровня. Эти принципы были сформулированы следующим образом:

1. Функционал OSSEC HIDS не должен влиять на работоспособность АСУТП. Это может быть достигнуто за счет избирательной установки агентов на специально отобранные узлы с учетом специфики сетевых сервисов диспетчерского уровня. При этом COB будет функционировать на уровне предупреждений в режиме Real-Time.

2. Необходимо обеспечить зеркалирование трафика через SPAN-порт (Switched Port Analyzer) в том случае, если есть вероятность возникновения коллизии в трансляции данных при работе OSSEC.

3. Порт 1514/ udr должен быть свободен, так как агенты подключаются к серверу через этот порт. Поскольку агент взаимодействует с сервером через UDP-порт 1514, OSSEC может работать на узле и как сервер и как агент. В этом случае он не будет влиять на трафик, но будет исключен из общей сети агентов, что снизит уровень централизации аудита.

Основываясь на указанных принципах, целесообразно формировать компонентную сборку механизмов COB следующим образом: узлы MPB (монитор реального времени) и Web-сервисов будут включать в свой состав и серверы OSSEC, и агенты, поскольку при работе с данными компонентами опасность задержки в передаче сетевых пакетов будет критична для системы. Использование полноценной клиентско-серверной архитектуры COB, то есть когда сервер будет отделен от агентов сбора данных, возможно, если агенты будут интегрированы на отдельные узлы АРМ и серверы архивов, поскольку в этом случае допустима небольшая задержка при трансляции данных.

Правила должны учитывать специфику компонентной организации механизмов COB, а также требования трансляции служебных данных при работе в инфраструктуре диспетчерского уровня. При этом, у каждого правила OSSEC есть уникальный идентификатор (идентификаторы в диапазоне от 100000 до 109999 для собственных правил). Правила сгруппированы в соответствии с целью их применения. Так же у каждого правила есть уровень критичности (level) от 0 до 15. При значении 0 событие игнорируется, а 15 означает максимальный уровень критичности [1]. Это позволяет задать приоритеты при анализе событий. Всего для рассмотрения процедур аудита было сформировано 11 типов правил:

1. Угроза внедрения вредоносного кода или данных.
2. Угроза перехвата данных, передаваемых по вычислительной сети.
3. Угроза подделки записей журнала регистрации событий.
4. Угроза удаленного запуска вредоносного кода в обход механизмов защиты. операционной системы.
5. Угроза воздействия на программы с высокими привилегиями.
6. Угроза сканирования веб-сервисов.
7. Угроза подбора пароля.
8. Угроза «кражи» учётной записи доступа к сетевым сервисам.
9. Угроза обнаружения хостов.
10. Угроза использования механизмов авторизации для повышения привилегий.
11. Угроза внедрения кода или данных.

Таким образом, каждое правило отнесено к определенному типу узлов диспетчерского уровня, учитывает архитектурные особенности построения серверно-агентной системы HIDS и имеет уровень критичности в соответствии с оценкой опасности угрозы. При этом надо отметить, что данные правила могут работать с протоколами технических систем уровня ПЛК, такими как ModBus.

Как дополнение к системам SIEM для объективной оценки рисков сетевой инфраструктуры можно использовать интеллектуальные методы и, соответственно, механизмы анализа. Реализация данных методов имеет свою специфику. Один из наиболее эффективных интеллектуальных методов связан с построением аналитических моделей, которые используются для анализа данных. Применяя их, можно понять закономерности проявления нарушений и в дальнейшем прогнозировать появление потенциальных угроз. Данные модели можно непрерывно обучать. В целом, эта

методика предназначена для нахождения комбинации математических уравнений, которые лучше всего предсказывают результат.

Перед обучением модели необходимо сформировать обучающую выборку. Ее можно получить, снимая данные в определенный период времени с подконтрольной сети перед началом процедур аудита, или же заимствовать данные из набора COB OSSEC в той части, где фиксируются атаки. Однако и в первом и во втором случае данные необходимо привести к тому виду, который требуется для обработки в модели. Для этого в модуле анализа обязательно должны присутствовать:

- подмодуль обработки и анализа типа Pandas;
- инструментарий для прогнозного анализа данных типа Scikit-learn (он включает в себя библиотеки классификаторов, которые будут использоваться для анализа) [2].

Анализатор захватывает весь сетевой трафик, но поскольку обучение касается протоколов модели OSI, то будут интерпретироваться только кадры Ethernet. В выбранной модели заранее задаются исключения на отбор пакетов технологического уровня, что позволит сохранить требуемую скорость передачи для технических данных. После интерпретации кадра, пользователю демонстрируется информация заголовков кадра и происходит сравнение значения поля «EtherType» (Ethernet_protocol). Согласно стандарту IEEE 802.3 полю IPv4 соответствует значение 0x0800 [3]. При несоответствии поля заданным параметрам будет указано: «неопределённый сетевой протокол». Такой пакет не будет обрабатываться.

Следующий необходимый компонент - программа Argus, которая генерирует информацию о состоянии трафика. Она обрабатывает полученные пакеты и генерирует сводные данные о сетевом потоке. Argus может работать на отдельном граничном узле, фильтруя весь сетевой трафик. Кроме того, эта программа может работать как автономный модуль сбора и анализа сетевых данных. Используя включенные в свой состав алгоритмы, Argus находит признаки для формирования шаблона. Каждый признак и его атрибуты, используемые для обучения модели и создания решения, нужно анализировать вручную, чтобы найти ошибки в наборах: требуется исключить неактуальные признаки, произвести масштабирование числовых атрибутов и преобразование категориальных атрибутов (для приведения всех данных к требуемому единому масштабу атрибутов используется два типа масштабирования: масштабирование по минимуму или нормализация (min-max scaling / normalization) и стандартизация (standardization)). Таким образом можно сформировать шаблоны отбора для конкретной сети диспетчерского уровня, который, очевидно, характеризуется большей технологической специфичностью и большим количеством ограничений, чем стандартная корпоративная сеть.

Далее необходимо провести определение зависимостей между признаками. Для этого требуется вычислить стандартный коэффициент корреляции (коэффициентом корреляции Пирсона(r))[4].

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(x,y)}{\sqrt{s_x^2 s_y^2}}, \quad (1)$$

где $x^m = (x_1, \dots, x_m)$, $y^m = (y_1, \dots, y_m)$ – выборки, \bar{x}, \bar{y} – выборочные средние x^m, y^m , s_x^2, s_y^2 – выборочные дисперсии, $r_{xy} \in [-1, 1]$.

После обработки набор данных имеет n -количество числовых признаков (в проводимом эксперименте 53 признака, то есть 37 из исходных данных и 16 признаков были сформированы при кодировании категориальных атрибутов). Таким образом, каждый анализируемый сетевой пакет будет представлен как некий параметр в n -мерном векторном пространстве. При этом опытным путем было выяснено, что для классификации сетевых пакетов в задачах анализа данных лучшей моделью оказался: градиентный бустинг (GradientBoostingClassifier). Таким образом, формируется модель, позволяющая, с учетом всех возможных закономерностей, которые характерны для выбранной сетевой инфраструктуры, классифицировать данные при анализе трафика в процессе аудита.

Однако выбранные интеллектуальные методы ограничены спецификой обучаемой модели и необходимостью приведения к требуемому виду данных, то есть данные должны быть одного по-

рядка. С другой стороны, подобный механизм позволяет посредством обучения и выработки приемлемой модели классификации учесть динамику изменений сетевых угроз с учетом их специфики, что в системе HIDS, основанной на статических правилах, сделать не возможно. При этом, учитывая специфику встраивания OSSEC в сеть диспетчерского уровня и принципы формирования правил, сложно с помощью хостовой системы обнаружения создать единый контур аудита, то есть когда управление и анализ отслеживаемых событий будут полностью централизованным. Однако подобные системы позволят учесть все виды событий в сети и, более того, позволяет частично контролировать трафик уровня контроллеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andrew Hay, Daniel Cid OSSEC Host-Based Intrusion Detection Guide/ Hay A. URL: <http://index-of.co.uk/Hacking-Coleccion/OSSEC%20Host-Based%20Intrusion%20Detection%20Guide.pdf> (Дата обращения: 5.05.2020).
2. Scikit-learn: Библиотека машинного обучения для языка программирования Python [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: https://scikit-learn.org/stable/user_guide.html (дата обращения 17.05.2020).
3. 802.3.2-2019 - IEEE Standard for Ethernet - YANG Data Model Definitions. – URL: <http://www.ieee802.org/3/> (дата обращения 16.05.2020).
4. Т. Hastie; R. Tibshirani; J. Friedman. The Elements of Statistical Learning – Stanford: Springer, 2018. – 764 с.

COMPARATIVE ANALYSIS OF INFORMATION SECURITY AUDIT TECHNOLOGIES FOR NETWORK INFRASTRUCTURE AT THE DISPATCHER LEVEL OF THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM

Podtopelny Vladislav Vladimirovich, art. lecturer, information security department

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: ionpvv@mail.ru

The technologies of audit of the network infrastructure of the dispatcher level of the automated control system are considered. The author studies the specifics of using the bridge-type intrusion detection system (HEADS) to solve the tasks of security audit of the dispatcher-level network infrastructure. The main features of forming rules for tracking security events are given. We study the specifics of the application of audit with the use of intelligent traffic analysis tools. The main stages of forming analysis models are given and the features of these models are described. A comparative analysis is carried out and the positive and negative characteristics of the information security audit technology of the dispatcher level automated control system HIDS OSSEC and the technology using intelligent methods are determined

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЫБНЫХ СКОПЛЕНИЙ ПО ЭХОГРАММЕ В ГРАФИЧЕСКОЙ СРЕДЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ LABVIEW

Холоденин Дмитрий Вячеславович, ст. преподаватель

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Россия, e-mail: bffsa.rtf.srts.kdv@gmail.com

В статье приведен пример применения графической системы моделирования и программирования LabView фирмы National Instruments для вторичной обработки данных, полученных в реальных условиях от эхолота EK-500. Добавленный алгоритм эхоинтегрирования к разработанной ранее программе демонстрирует процесс вычисления средней силы объемного обратного рассеяния. В дальнейших разработках программы планируется подобным образом реализовать вычисление всех возможных параметров рыбных скоплений по данным, получаемым из эхограмм.

В данной статье приведены некоторые результаты продолжения работы автора [1] по извлечению и обработке исходной информации, которую регистрирует эхолот Simrad EK-500 [2]. Регистрируемая в реальных условиях информация сохраняется в файлы с расширением *.ek5 (формат разработанный Simrad для EK-500) в виде бинарного кода. Код структурирован в виде последовательности телеграмм, которые записываются по байтам. Большую часть данных занимает графическая информация о сканируемой толще воды, именуемой как эхограмма (сонограмма). Также файлы содержат навигационную, гидрологическую и другую служебную информацию [3; 4].

Программа обработки гидроакустической информации запускается файлом «OpenFile EK 500.vi», через среду моделирования LabVIEW. Файл расположен в одной папке с сонограммой разрешением «*.ek5». При запуске приложения на экране монитора отображается рабочее поле приложения, имеющее вкладку «Page 1», на которой находятся вкладки «Передатчик 1» и «Передатчик 2», отображающие данные с первого и второго передатчиков соответственно, а также вкладка «Настройка», на которой расположены элементы управления функцией «Выделение целей». Внешний вид первой рабочей страницы, «Передатчик 1», изображен на рисунке 1 [5].

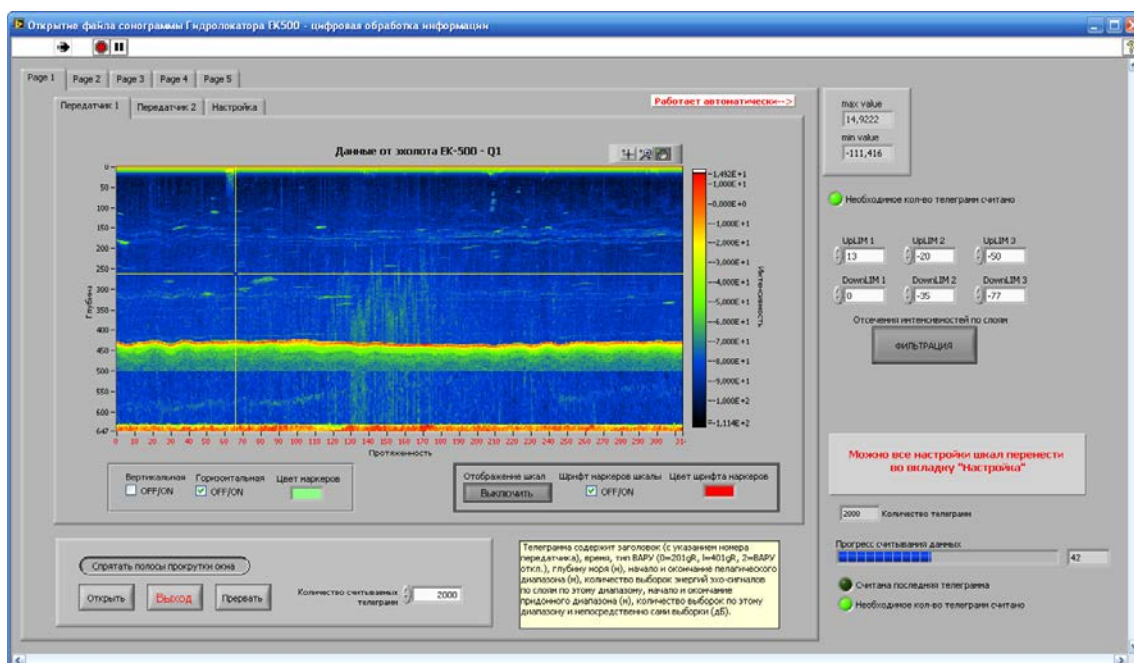


Рис. 1. Внешний вид первой рабочей страницы, вкладка «Передатчик 1»

Разработанный ранее алгоритм формирования эхограммы [5] решает основную задачу - расшифровать код файла сонограммы и сформировать массив данных из него, который может обрабатывать графическая система LabView с применением дополнительных алгоритмов обработки, адаптированных или разработанных автором [6; 7; 8; 9]. Ниже приводится описание выполненных или планируемых разработок алгоритмов обработки данных эхограммы.

Описание алгоритма оконтуривания кандидатов

Перед описанием самого алгоритма и алгоритмов, входящих в него, сформулируем задачи, которые должен решать данный алгоритм, и ряд допущений, с которыми мы должны согласиться.

Решаемые задачи:

- во-первых, алгоритм должен оконтуривать кандидаты (формировать массив группы точек), которые удовлетворяют заданным условиям интенсивности;
- во-вторых, все кандидаты должны быть неразрывны (в данной работе пренебрегается, будет учтено в будущих работах), не иметь самопересечений и пересечений друг с другом.

Допущения:

- примем, что кандидатом (объектом) будет называться контур, обведенный вокруг группы соприкасающихся точек;
- примем направление обхода контура по часовой стрелке;
- примем направление поиска точек кандидатов сверху – вниз и слева – направо;
- условимся, что точка принадлежит кандидату, если интенсивность точки с координатами (x, y) удовлетворяет заданному порогу и данная точка не входит ни в один из найденных ранее кандидатов.

На первом этапе обработки организуется внешний цикл по X, внутри которого организуется внутренний цикл, по Y, и проверяется значение интенсивности каждой последующей точки. При превышении интенсивности точки заданного порога проверяется принадлежность данной точки какому-нибудь кандидату из найденных ранее кандидатов. В случае положительного исхода проверяется следующая точка, при отрицательном результате, программа переходит к выполнению подпрограммы оконтуривания кандидата. Разработанный алгоритм представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Алгоритм оконтуривания кандидатов

Описание алгоритма эхоинтегрирования

Эхоинтегрирование – это вычисление интеграла эха (среднего значения силы обратного рассеяния) по набору точек данных, определенного региона, области или ячейки. В то же время могут быть вычислены другие переменные, такие как:

- коэффициент обратного рассеяния относительно морской мили (NASC) и коэффициент обратного рассеяния (ABC)
- средняя глубина объекта.

Переменные интегрирования:

- Sv среднее – средняя сила объемного обратного рассеяния;
- Sv минимум – минимальное значение Sv (которое является выше нижнего порогового значения – 999 децибел), включенное в интеграцию;
- Sv максимум – максимальное значение Sv, включенное в интеграцию;
- NASC – коэффициент обратного рассеяния относительно морской мили;
- ABC – коэффициент обратного рассеяния;
- средняя высота – средняя высота области, рассчитанная по количеству посылок, включенных в интегрирование;
- средняя глубина – средняя глубина отсчетов, включенных в данный регион;
- количество отсчетов – число отсчетов, фактически включенных в интеграцию;
- число посылок – число посылок между началом и концом объекта.

Алгоритм эхоинтегрирования выполняется следующим образом: сначала определяются координаты выделенного участка, над которым необходимо произвести эхоинтегрирование, затем организуются циклы по X и Y; определяется принадлежность каждой точки кандидату и после этого из всех точек, удовлетворяющих заданным условиям, определяется величина средней силы обратного объемного рассеяния и в соответствующем элементе интерфейса (индикаторе) программы выводится на экран.

Определение рыбных скоплений достаточно сложная задача, поэтому в этой работе рассмотрена только возможность реализации в среде LabVIEW алгоритма определения средней силы объемного обратного рассеяния.

Алгоритм вычисления средней величины силы обратного объемного рассеяния (Sv mean)

Пусть зона A будет площадью, для которой будет рассчитываться Sv, а N будет количеством отсчетов в A. Тогда Sv_i ($i = 1 \dots N$) – значения силы обратного рассеяния каждого отсчета в районе A. Пусть E зависит от значений Sv:

$$E_i = 10^{\frac{Sv_i}{10}} \quad (1)$$

Рассчитаем значение переменной E по представленной ниже формуле:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i \gamma_i \lambda_i E_i}{\sum_{i=1}^N \delta_i \gamma_i} \quad (2)$$

где $\delta_i = 0$, если отсчет i имеет недостоверные данные;

1, если данные отсчета верны;

- $\gamma_i = 0$, если отсчет i представляет данные, ограниченные порогом;

1, если не представляет таких данных;

- $\lambda_i = 0$, если отсчет i – не отсчет данных;

1, если наоборот.

Среднее значение силы цели будем вычислять по следующей формуле:

$$Sv_mean = 10 \log(E) \quad (3)$$

Структура алгоритма представлена на рисунке 3.

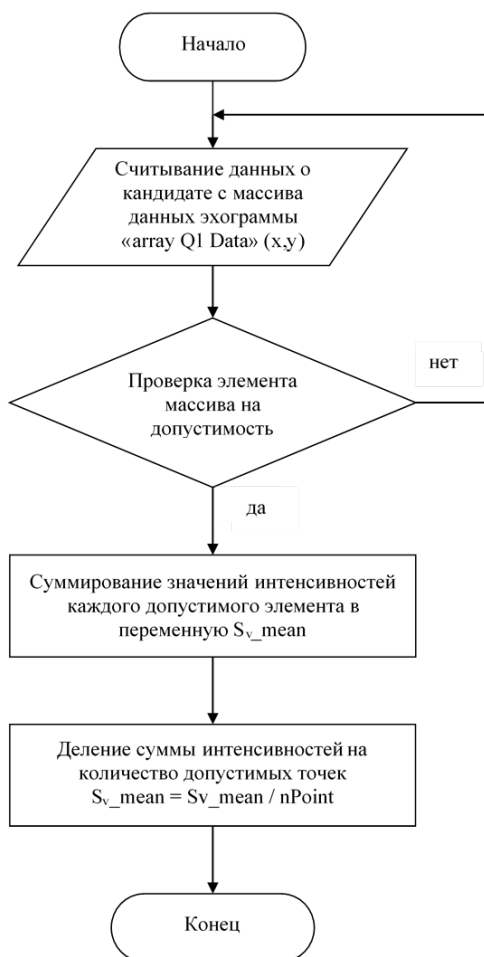


Рис. 3. Алгоритм вычисления средней величины силы объемного обратного рассеяния ($S_v\ mean$)

На рисунке 4 показан результат работы первого этапа обработки эхограммы алгоритмом. С левой стороны показано графическое окно с отображением считанного массива данных с общей эхограммы в увеличенном масштабе, с правой стороны значение интенсивностей в цифрах.

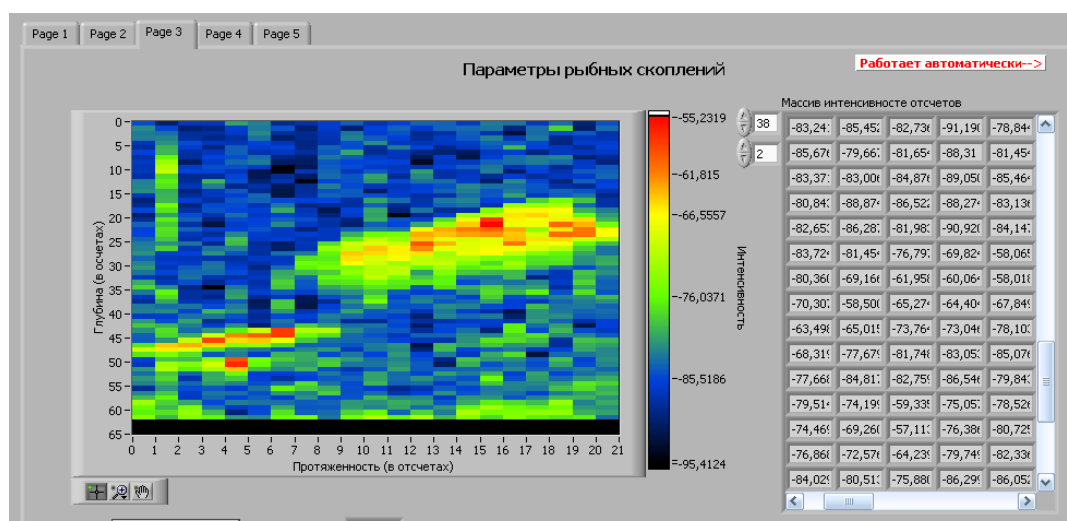


Рис. 4. Внешний вид третьей рабочей страницы с выделенным для обработки участком эхограммы

На рисунке 5 показана лицевая панель программы с отображением результата выполнения выборки подходящих отсчетов согласно выставленному порогу интенсивности и фильтрации значений отсчетов из выбранного массива данных.

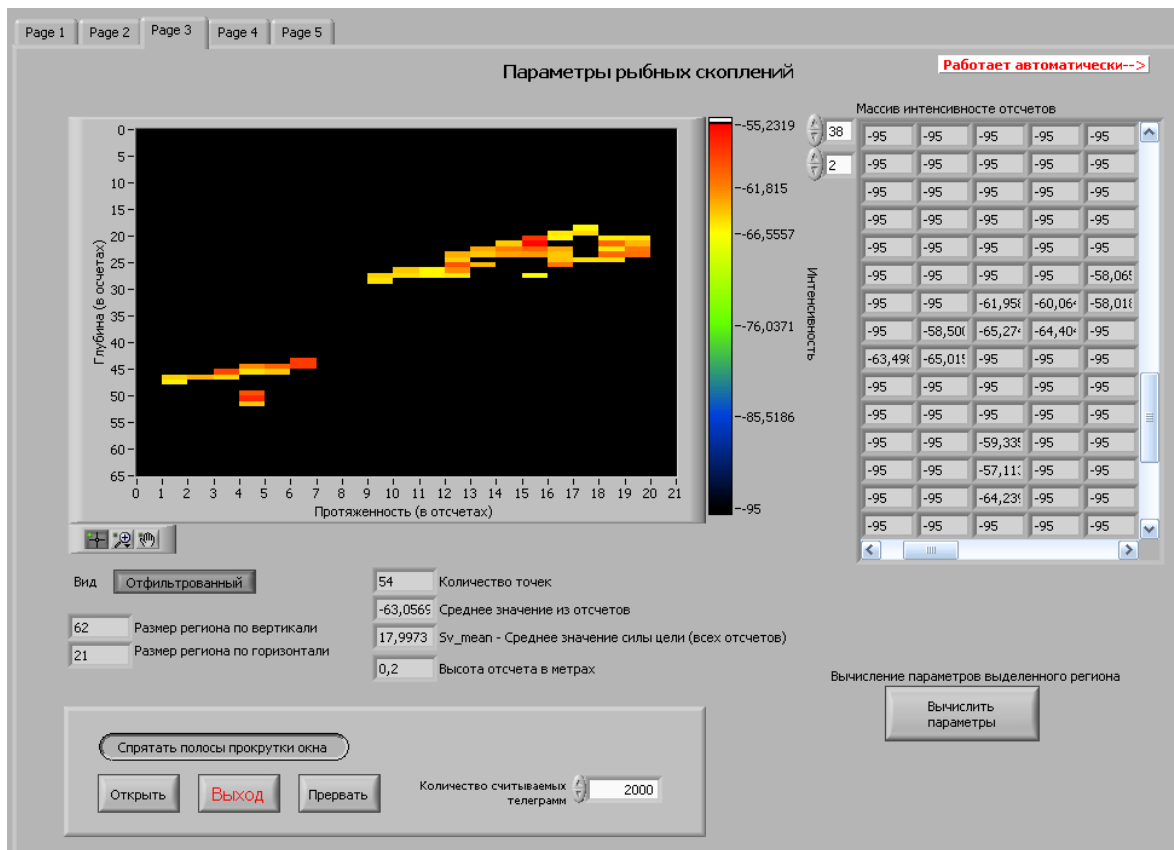


Рис. 5. Результат выполнения выборки и фильтрации значений отчетов из выбранного массива данных

Для эффективного и быстрого выполнения сопутствующих вычислений количества подходящих отсчетов, средней высоты кандидатов и отсека лишней значений из выбранного региона эхограммы т.е. выполнения оконтуривания кандидатов в алгоритме реализуется бинаризация по определенному порогу интенсивности, результат которой показан на рисунке 6.

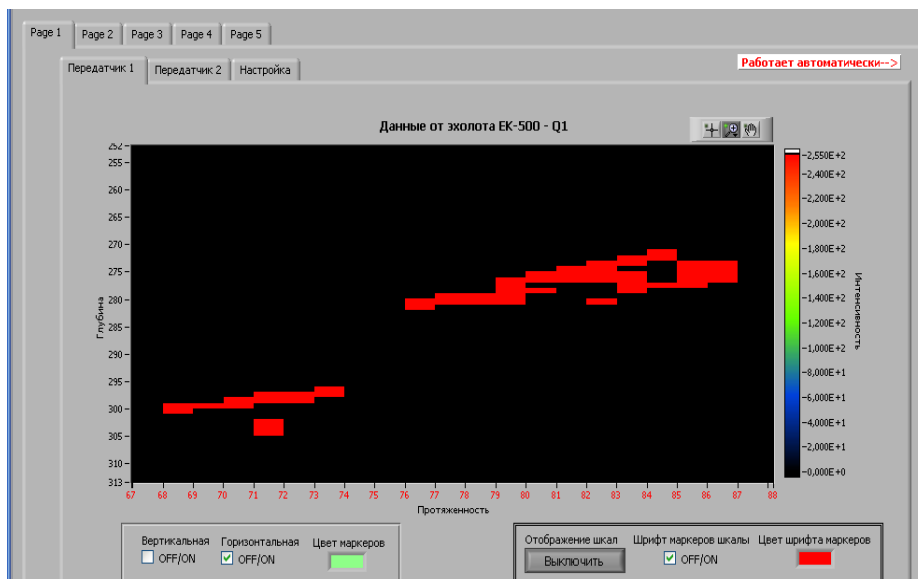


Рис. 6. Результат оконтуривания и бинаризации кандидатов

На рисунке 7 показан алгоритм вычисления по формулам 1-3 средней величины силы объемного обратного рассеяния (Sv_mean). Графический язык G LabVIEW несложен в восприятии и интуитивно понятен, поэтому для данного небольшого фрагмента кода автор посчитал излишними дополнительные комментарии.

8. Холоденин, Д. В. Вторичная обработка информации гидроакустического комплекса «ПЭВ-К» в среде LabView с целью повышения безопасности мореплавания / Д. В. Холоденин, И. А. Ветров // III Балтийский морской форум (24÷30.05.2015г.): материалы Международного морского форума. – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2015. – С.127-133.

9. Холоденин Д.В. Применение LABVIEW для трехмерной реконструкции информации гидролокатора бокового обзора в масштабе реального времени / Д.В. Холоденин // IV Международный балтийский морской форум. IV Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии» (22÷28.05.2016г.): материалы Международного Балтийского морского форума / КГТУ, БГАРФ ФГБОУ ВО "КГТУ". – Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. - С .443-454.

DETERMINATION OF FISH CLUSTER PARAMETERS FROM ECHOGRAMS IN A LABVIEW GRAPHIC MODELING ENVIRONMENT

Kholodenin Dmitriy Vyacheslavovich, senior lecturer

Baltic fishing fleet state academy FSBEI HE "KSTU",
Kaliningrad, Russia, e-mail: bffsa.rtf.srts.kdv@gmail.com

The article gives an example of the use of the graphic modeling and programming system LabView from National Instruments for secondary processing of data obtained in real conditions from the EK-500 echo sounder. The added echo-integration algorithm to the previously developed program demonstrates the process of calculating the average strength of volume backscattering. In the further development of the program, it is planned in a similar way to implement the calculation of all possible parameters of fish accumulations from the data obtained from the echograms.