

ISSN: 2949-558X

ВЕСТНИК

Керченского Государственного
Морского Технологического Университета

СЕРИЯ
Морские Технологии

Выпуск 1

Рецензируемое научное издание «Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия «Морские технологии» зарегистрировано как средство массовой информации (СМИ) и издается в соответствии с Законом Российской Федерации от 27.12.1991 № 2124-1 «О средствах массовой информации», Федеральным законом от 29.12.2012 № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации», уставом ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет». Учредитель научного сетевого издания «Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия «Морские технологии» – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Керченский государственный морской технологический университет». Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-85910 от 04 сентября 2023 г.

Редакционный Совет журнала

Главный редактор:

Виноградов Владимир Николаевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры судовождения и промышленного рыболовства

Заместитель главного редактора:

Ивановская Александра Витальевна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры судовых энергетических установок

Редакционная коллегия журнала

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

Авдеев Б.А.
Горелов С.В.
Емельянов В.А.
Каторин Ю.Ф.
Нырков А.П.
Саушев А.В.
Сычев Ю.А.
Титов И.Л.

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) (технические науки)

Викулов С.В.
Ениватов В.В.
Жуков В.А.
Кириухин А.Л.
Конюков В.Л.
Матвеев Ю.И.
Николаев Н.И.
Халявкин А.А.

2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография (технические науки)

Васьков А.С.
Виноградов В.Н.
Ермаков С.В.
Ивановский Н.В.
Пашков Д.П.
Субанов Э.Э.
Хекерт Е.В.

Уманец В.А. – ответственный секретарь

Бобарыкин О.В. – технический редактор, компьютерная верстка

Статьи в журнале издаются на русском и английском языках.

Позиция автора публикаций может не совпадать с точкой зрения редакционного совета и редакционной коллегии журнала.

Издается по решению НТС ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», протокол № 3 от 25.03.2026 г.

Адрес: 298309, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82

E-mail: mor.tech@vestnik-kgmtu.ru

Web: <https://mtjv.ru/>

Редакционная коллегия журнала

2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)

1. Авдеев Борис Александрович – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства
2. Горелов Сергей Валерьевич – действительный член РАЕН, доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта», заведующий кафедрой ЭСЭ
3. Емельянов Виталий Александрович – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», профессор кафедры бизнес-информатики
4. Каторин Юрий Федорович – доктор воен. наук, профессор ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», профессор кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности
5. Нырков Анатолий Павлович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», профессор кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности
6. Саушев Александр Васильевич – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», заведующий кафедрой ЭПиЭОБУ
7. Сычев Юрий Анатольевич – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики
8. Титов Иван Леонидович – канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», доцент кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства

2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) (технические науки)

1. Викулов Станислав Викторович – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта», заведующий кафедрой «Физики, химии и инженерной графики»
2. Ениватов Валерий Владимирович – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», заведующий кафедрой кафедры судовых энергетических установок
3. Жуков Владимир Анатольевич – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова», заведующий кафедрой судостроения и энергетических установок
4. Кирюхин Александр Львович – доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры Эксплуатации СЭУ ЧВВМУ имени П.С. Нахимова
5. Конюков Вячеслав Леонтьевич – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», доцент кафедры судовых энергетических установок
6. Матвеев Юрий Иванович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта» г. Нижний Новгород, зав. кафедрой «Эксплуатация судовых энергетических установок»
7. Николаев Николай Иванович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», профессор

кафедры эксплуатации судовых механических установок

8. Халявкин Алексей Александрович – канд. техн. наук, доцент, Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала Ф.М. Апраксина - филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта», доцент кафедры судомеханических дисциплин

2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография (технические науки)

1. Васьков Анатолий Семенович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», профессор кафедры судовождения
2. Виноградов Владимир Николаевич – доктор техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский морской технологический университет», профессор кафедры судовождения и промышленного рыболовства
3. Ермаков Сергей Владимирович – канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», директор Морского института
4. Ивановский Николай Владимирович – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Керченский морской технологический университет», декан морского факультета, заведующий кафедрой судовождения и промышленного рыболовства
5. Пашков Дмитрий Павлович – доктор техн. наук, профессор, филиал ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени Ф.Ф. Ушакова» в г. Севастополь, старший преподаватель кафедры судовождения
6. Субанов Эркин Эргешевич – канд. техн. наук, Начальник дипломного отдела, Службы капитана морского порта Новороссийск, ФГБУ «АМП Черного моря»
7. Хекерт Евгений Владимирович – доктор техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова», проректор по учебной и научной работе

СОДЕРЖАНИЕ

Научная специальность 2.5.20. Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)

Ивановская А.В., Халявкин А.А., Хачатрян А.М., Киселевич М.Э.
КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЯХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВНЕШНЕГО
НАГРУЖЕНИЯ 6

Очеретяный В.А., В.И. Михальков В.И.
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В СУДОВЫХ ПАРОВЫХ
ЛАБИРИНТНЫХ КОТЛАХ 14

Федоровский К.Ю., Гриненко Н.К., Ениватов В.В.
ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА ОТ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ
ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК 25

Научная специальность 2.9.7. Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография

Ермаков Н.Д.
ГИБРИДНАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ АРХИТЕКТУРА АДАПТИВНОГО
СЛИЯНИЯ МНОГОМОДАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ В
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ МОРСКОГО МОНИТОРИНГА 33

Свешников В.В.
ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОЖАРОВ И ВЗРЫВОВ НА СУДАХ С ПОМОЩЬЮ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЕНАЖЁРОВ КАФЕДРЫ 40

УДК 621.791.05

Ивановская А.В., Халявкин А.А., Хачатрян А.М., Киселевич М.Э.

КРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВНЕШНЕГО НАГРУЖЕНИЯ

Аннотация. Работа посвящена анализу динамического поведения валопровода судовых механизмов при переменном внешнем нагружении. В качестве базового объекта исследования выбрана траловая лебёдка промыслового судна, для которой характерно изменение тягового усилия. Рассмотрены механизмы формирования переменных крутящих моментов и их влияние на вибрационное состояние вала; показана взаимосвязь крутильных, изгибных и продольных колебаний через параметрические эффекты, включая возможность параметрического резонанса. В результате исследований построена система из восьми безразмерных критериев для проведения испытаний на экспериментальной установке. По каждому критерию раскрыт физический смысл, приведены характерные диапазоны значений для натурального объекта. Также рассмотрены нелинейные составляющие демпфирования: гистерезисное и кулоновское трение, нестационарность масляного клина подшипников скольжения. Сформированный критериальный аппарат даёт методическую основу для планирования полнофакторного эксперимента, регрессионного моделирования динамических характеристик валопровода и корректного переноса результатов модельных испытаний на натуральный объект.

Ключевые слова: валопровод, крутильные колебания, изгибные колебания, переменное нагружение, траловая лебёдка, судовой механизм, экспериментальные исследования, критерии подобия.

Ivanovskaya A.V., Khalyavkin A.A., Khachatryan A.M., Kiselevich M.E.

CRITERIAL APPROACH IN EXPERIMENTAL RESEARCH OF SHAFT OSCILLATIONS DURING CHANGES IN EXTERNAL LOADING

Abstract. The work is devoted to the analysis of the dynamic behavior of the shaft line of ship mechanisms under variable external loading. The trawl winch of a fishing vessel, which is characterized by a change in the traction force, is chosen as the basic object of research. The mechanisms of variable torque formation and their influence on the shaft vibration state are considered; the interrelation of torsional, bending and longitudinal vibrations through parametric effects, including the possibility of parametric resonance, is shown. As a result of the research, a system of eight dimensionless criteria is constructed for conducting tests on an experimental installation. For each criterion, the physical meaning is revealed, and characteristic ranges of values for a natural object are given. Nonlinear components of damping are also considered: hysteresis and Coulomb friction, non-stationarity of the oil wedge of plain bearings. The developed criteria provide a methodological basis for planning a full-factor experiment, regression modeling of the dynamic characteristics of the shaft system, and the correct transfer of the results of model tests to a real object.

Keywords: shaft line, torsional vibrations, bending vibrations, variable loading, trawl winch, ship mechanism, experimental studies, similarity criteria.

Современное рыболовство и транспортное судоходство предъявляет всё более высокие требования к надёжности и долговечности судовых механических систем. Одной из ключевых проблем в этой области является обеспечение допустимого вибрационного состояния вала при воздействии переменных внешних нагрузок. Данная проблема особенно актуальна для промысловых судов, оснащённых тяговыми лебёдками, траловыми комплексами и якорно-швартовными механизмами, где циклически изменяющиеся нагрузки являются нормальным условием эксплуатации [1-3].

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Траловая лебёдка является одним из наиболее нагруженных и динамически нестационарных судовых механизмов. Её функциональное назначение – выборка и травление ваерного троса при буксировке донного трала – обуславливает широкий диапазон изменения тягового усилия в процессе одного рабочего цикла. В ходе операции подъёма трала сопротивление движению сетного полотна изменяется в 3-5 раз в зависимости от степени наполнения кутка, гидродинамических условий и рельефа дна. При попадании трала на скалистый грунт или при резком увеличении улова может наблюдаться импульсное увеличение нагрузки, в 6-8 раз превышающее номинальное тяговое усилие [4-5].

С точки зрения динамики привода, траловая лебёдка представляет собой инерционную нагрузку переменной величины, приложенную к выходному валу редуктора. Момент инерции барабана с намотанным тросом существенно зависит от числа слоёв намотки и изменяется на протяжении одного рабочего цикла в 4–6 раз. Это означает, что даже при постоянной угловой скорости электродвигателя в системе появляется переменный реактивный момент, инициирующий крутильные колебания всего трансмиссионного вала. Частотный спектр этих колебаний определяется скоростью выборки троса, числом зубьев шестерён редуктора, частотой пульсаций гидравлического привода или частотой тиристорного преобразователя.

Принципиальная схема нагружения может быть описана следующим образом. Пусть мгновенное значение крутящего момента на барабане описывается функцией

$$M(t) = M_0 + \Delta M \cdot f(\omega_B t, \varphi) + M_{\text{имп}}(t), \quad (1)$$

где M_0 – среднее значение момента (статическая составляющая);

ΔM – амплитуда периодической составляющей;

ω_B – частота возмущающей силы;

φ – начальная фаза;

$M_{\text{имп}}(t)$ – случайная импульсная составляющая, обусловленная контактом трала с препятствиями, которая, как правило, описывается стохастическим процессом и требует статистической обработки.

Данное нагружение передаётся через многоступенчатый редуктор на электродвигатель или гидромотор и затем – на якорную точку крепления агрегата к корпусу судна, вызывая распределённые вибрации корпусных конструкций, что создаёт условия для возникновения как крутильных, так и изгибных колебаний вала, а также продольных колебаний при нестационарных осевых нагрузках.

При переменном нагружении в валопроводе возникают три основных типа колебаний, тесно взаимосвязанных между собой. Крутильные колебания проявляются в угловых колебаниях сечений вала относительно среднего положения и наиболее опасны с точки зрения усталостного разрушения шпонок, шлицевых соединений и галтелей. Изгибные колебания приводят к деформации оси вала в плоскости и могут вызывать нагрев и износ подшипников, а также увеличение динамических реакций в опорах. Продольные колебания особенно важны для гребных валов с гребными винтами и для валов насосных агрегатов, где переменная осевая сила возникает от нестационарного давления рабочей жидкости.

Взаимодействие этих типов колебаний обусловлено параметрическими эффектами: переменный крутящий момент изменяет жёсткость вала на изгиб и может приводить к параметрическому резонансу при выполнении условия $\omega_B = 2\omega_0$, где ω_0 – собственная частота изгибных колебаний. Данное явление особенно характерно для тонких длинных валов с малым отношением диаметра к длине ($d/l < 0,05$).

Отдельно следует рассмотреть влияние переменного нагружения на демпфирующие характеристики системы. При нестационарных нагрузках жидкостное трение в подшипниках скольжения становится нестационарным: коэффициенты жёсткости и демпфирования масляного клина изменяются вместе с нагрузкой, что делает задачу нелинейной и требует применения специальных методов анализа – либо численного интегрирования уравнений

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

движения, либо экспериментального определения нелинейных характеристик [6-9].

Целью исследований является определение критериев экспериментального исследования динамических характеристик валопровода судового механизма при переменном внешнем нагружении.

Материалы и методы исследования. Экспериментальная установка должна воспроизводить характерные особенности силовой трансмиссии траловой лебёдки в заданном масштабе по геометрическим параметрам. Конструкция установки предусматривает возможность изменения основных параметров в широком диапазоне, что позволяет использовать её для исследования различных классов судовых механизмов.

Физическое моделирование динамических процессов в механических системах основывается на π -теореме: если физический процесс описывается уравнением, связывающим n физических переменных с k независимыми размерностями, то это уравнение может быть представлено через $(n - k)$ независимых безразмерных комплексов – критериев подобия. Тожественность критериев подобия для натурального объекта и модели является необходимым и достаточным условием подобия двух физических процессов.

Для задачи вынужденных крутильных колебаний вала с переменным нагружением исходной является система уравнений движения в обобщённых координатах. Рассмотрим сначала уравнение для одномассовой системы (одна инерционная дискретная масса), которое в наиболее общем виде записывается как

$$J_{\text{пр}} \cdot \ddot{\varphi} + \mu(\dot{\varphi}) \cdot \dot{\varphi} + c(\varphi) \cdot \varphi = M_0 + \Delta M \cdot \cos(\omega_{\text{в}} t), \quad (2)$$

где $J_{\text{пр}}$ – приведенный момент инерции системы;

$\mu(\dot{\varphi})$ – коэффициент вязкого демпфирования, допускающий нелинейную зависимость от угловой скорости;

$c(\varphi)$ – угловая жёсткость, допускающая нелинейную зависимость от угла закрутки;

M_0 – статическая составляющая момента;

ΔM – амплитуда переменного момента;

$\omega_{\text{в}}$ – частота возмущающей силы;

φ – обобщённая координата.

В этом уравнении участвуют следующие физические переменные: $\varphi, t, J_{\text{пр}}, \mu_0$ (линейная часть демпфирования), c_0 (линейная жёсткость), $M_0, \Delta M, \omega_{\text{в}}$. Число переменных $n = 8$, число независимых размерностей $k = 3$ (масса M , длина L , время T – или эквивалентно: угол φ , момент $M \cdot L^2$, время T). По π -теореме число независимых безразмерных критериев равно $8 - 3 = 5$. Дополнительные критерии появляются при рассмотрении многомассовой системы (вводятся отношения моментов инерции), геометрии вала и характеристик подшипников (критерий Рейнольдса масляного клина). В итоге для данной задачи полная система включает восемь безразмерных критериев подобия, каждый из которых имеет чёткий физический смысл и должен сохраняться при масштабировании от натурального объекта к модели.

Первый критерий подобия – коэффициент настройки λ – представляет собой отношение частоты вынуждающей силы к собственной частоте незатухающих свободных колебаний системы

$$\lambda = \frac{\omega_{\text{в}}}{\omega_0}, \text{ где } \omega_0 = \sqrt{\frac{c_0}{J_{\text{пр}}}}. \quad (3)$$

Физический смысл этого критерия заключается в следующем: при $\lambda < 1$ система находится в дорезонансной зоне и колеблется практически синфазно с вынуждающей силой; при $\lambda = 1$ наступает резонанс, при котором амплитуда ограничивается лишь демпфированием; при $\lambda > 1$ система работает в зарезонансной зоне с ростом фазового отставания до 180° . Соответствие критерия λ достигается подбором жёсткости вала-образца и момента инерции

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

нагрузочного маховика.

Критерий демпфирования ζ является отношением фактического коэффициента демпфирования μ к критическому значению $\mu_{кр}$

$$\zeta = \frac{\mu_0}{\mu_{кр}} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \sqrt{(c_0 \cdot J_{пр})}}. \quad (4)$$

Данный критерий определяет высоту и ширину резонансного пика АЧХ: при малом ζ (слабое демпфирование) пик узкий и высокий, при $\zeta > 0,7$ резонансный пик исчезает. Для подшипников скольжения с жидкостным трением критерий демпфирования ζ зависит от вязкости смазки η , угловой скорости ω и геометрических параметров подшипника.

Следует особо отметить, что реальное демпфирование в системе не является линейным и постоянным. Гистерезисное демпфирование в стальном валу пропорционально деформации, а не скорости; сухое трение в шлицевых соединениях подчиняется закону Кулона. На установке нелинейная зависимость $\mu(\dot{\varphi})$ идентифицируется по измеренным кривым свободных затухающих колебаний при различных начальных амплитудах, что позволяет построить зависимость «эквивалентного ζ » от амплитуды.

Критерий нелинейности нагружения ε представляет собой отношение амплитуды переменной составляющей момента к статической

$$\varepsilon = \frac{\Delta M}{M_0}. \quad (5)$$

При $\varepsilon \rightarrow 0$ нагружение является практически постоянным и динамика системы описывается теорией линейных колебаний; при $\varepsilon > 0,3$ начинают проявляться нелинейные эффекты – сдвиг резонансной частоты, появление субгармоник в спектре, нелинейное взаимодействие гармоник. При $\varepsilon > 1$ переменная составляющая превышает статическую, что возможно при ударном попадании трала на препятствие и соответствует нагружению в режиме отрыва (кратковременное обнуление момента с последующим ударным восстановлением). Для натурального объекта ε изменяется в диапазоне 0,1-0,8 в штатных режимах и достигает 2,5-3,0 при аварийных ситуациях. На установке ε регулируется независимо от M_0 за счёт разделения нагружающего устройства на гистерезисный тормоз (задаёт M_0) и вибровозбудитель (задаёт ΔM), что позволяет воспроизводить весь диапазон ε с высокой точностью.

Критерий инерционного подобия J^* характеризует соотношение между моментом инерции нагрузки (барабан с тросом, маховик и т.п.) и моментом инерции самого вала, приведённым к тому же сечению

$$J^* = \frac{J_H}{J_B}, \quad (6)$$

где $J_B = \frac{\rho \cdot \pi \cdot d^4 \cdot L}{32}$ для сплошного вала;

J_H – момент инерции нагрузочного устройства.

При $J^* \rightarrow 0$ нагрузка пренебрежимо мала по инерции по сравнению с валом, и первая собственная частота определяется только распределённой массой вала; при $J^* \rightarrow \infty$ первая собственная частота стремится к нулю (вал «замкнут» на бесконечную инерционную нагрузку).

Критерий нагруженности α определяет уровень статической нагрузки относительно номинального момента привода:

$$\alpha = M_0 / M_H, \quad (7)$$

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

где $M_H = P_H / \omega_H$ – номинальный момент двигателя.

Этот критерий влияет на статическую составляющую напряжений в вале (что важно для оценки усталостного запаса) и на рабочую точку подшипника (что определяет жёсткость и демпфирование масляного клина). При $\alpha \rightarrow 0$ подшипник работает в режиме лёгкой нагрузки с неустойчивым масляным клином и повышенной склонностью к «масляному» вихрю; при $\alpha \rightarrow 1$ подшипник нагружен номинально.

Критерий геометрического подобия C_l характеризует относительную длину вала и определяет соотношение между крутильной и изгибной жёсткостями:

$$C_l = \left(\frac{d}{L}\right)^2, \quad (8)$$

где d – диаметр вала;

L – расстояние между опорами.

При $C_l > 0,01$ изгибная жёсткость значительно превосходит крутильную, и оба типа колебаний практически независимы (слабая изгибно-крутильная связь). При $C_l < 0,002$ связь становится существенной: крутящий момент заметно изменяет изгибную жёсткость, и для адекватного описания требуются связанные уравнения. На установке геометрическое подобие C_l соблюдается точно, что обеспечивает адекватное воспроизведение степени изгибно-крутильной связи.

Для подшипников скольжения с жидкостной смазкой динамические характеристики и, в нелинейном случае, число Рейнольдса масляной плёнки:

$$Re_{\Pi} = \frac{\rho_M \cdot \omega \cdot R \cdot h_0}{\eta}, \quad (9)$$

где ρ_M – плотность масла;

ω – угловая скорость вала;

R – радиус шейки вала;

h – средняя толщина масляной плёнки;

η – динамическая вязкость масла.

При $Re_{\Pi} < 1000$ режим течения смазки ламинарный и уравнение Рейнольдса линейно; при $Re_{\Pi} > 1500$ возникает турбулентность масляного клина, которая увеличивает эффективное демпфирование на 20–40% и требует введения поправочных коэффициентов. Для натурального подшипника $Re_{\Pi_H} \approx 420$ (ламинарный режим). При масштабировании 1:4 с тем же маслом ($\eta = const$) и той же угловой скоростью ($\omega_M = \omega_H$ при $\lambda = const$) получаем

$$Re_{\Pi_M} = Re_{\Pi_H} \cdot \left(\frac{R_M}{R_H}\right)^2 = 420 \cdot \left(\frac{1}{16}\right)^2 = 26,$$

что также соответствует ламинарному режиму. Таким образом, критерий Re_{Π} качественно выполняется, хотя количественно его значение отличается. Для компенсации различия в Re_{Π} на установке вязкость масла подбирается из условия

$$Re_{\Pi_M} = \eta_H \cdot \left(\frac{R_M}{R_H}\right)^2 \cdot \left(\frac{\omega_M}{\omega_H}\right). \quad (10)$$

Критерий упругого подобия (число Коши) связывает инерционные и упругие силы в системе и является обобщением для динамических задач с учётом деформируемости:

$$Ka = \frac{\rho \cdot \omega_0^2 \cdot L^2}{G}, \quad (11)$$

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

где ρ – плотность материала вала;

ω_0 – собственная частота;

L – длина вала;

G – модуль сдвига материала.

Физически критерий K_a показывает отношение инерционных сил, развивающихся при колебаниях, к упругим силам сопротивления деформации. При $K_a \ll 1$ вал ведёт себя как практически жёсткое тело с сосредоточенными деформациями только в зонах опор; при $K_a \rightarrow 1$ необходимо учитывать волновые эффекты (распространение упругих волн кручения вдоль вала).

Заключение. Сформированная критериальная система из восьми безразмерных критериев может лежать в основе методики планирования полнофакторного эксперимента, регрессионного моделирования динамических характеристик валопровода и корректного переноса результатов модельных испытаний на натуральный объект.

Список использованной литературы:

1. Судовые гидравлические траловые лебедки. URL: <https://sea-man.org/sudovaya-gidravlicheskaya-lebedka.html> (дата обращения: 20.06.2025 г.)
2. Карпенко В.П., Торбан С.С. Механизация и автоматизация процессов промышленного рыболовства: учебное пособие. М.: Агропромиздат, 1990. 464 с.
3. Те А.М. Эксплуатация судовых вспомогательных механизмов, систем и устройств. Учебное пособие. Владивосток: МГУ им. адм. Г.И. Невельского, 2014. 178 с.
4. Башуров Б.П., Скиба А.Н., Чебанов В.С. Функциональная надежность и контроль технического состояния судовых вспомогательных механизмов: учебное пособие. Новороссийск: МГА имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2009. 192 с.
5. Ивановская А.В., Виноградов В.Н., Ивановский А.Н. Оценка безотказности работы судовых грузоподъемных устройств // Развитие энергетики водного транспорта, информационных и энергосберегающих технологий: сборник материалов II Всероссийской конференции. Казань: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. С. 180-184.
6. ГОСТ 18855-94 (ИСО 281-89) Подшипники качения динамическая расчетная грузоподъемность и расчетный ресурс (долговечность). М.: Стандартинформ, 2009. 26 с.
7. Ивановская А.В., Халявкин А.А., Борозняк А.В., Шановал В.В. Комплексный подход к оценке влияния стохастических факторов на процессы износа подшипников траловых лебедок // Научные проблемы водного транспорта. 2025. № 83. С. 75-85. DOI: 10.37890/jwt.vi83.607.
8. Ивановская А.В., Халявкин А.А., Хачатрян А.М., Киселевич М.Э. Исследование динамических процессов в подшипниковых узлах траловой лебедки в условиях нестационарного нагружения // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия: Морские технологии. 2025. № 2. С. 39-47.
9. Халявкин А.А., Матвеев Ю.И., Али Саламех, Саусан Слимман. Повышение надежности механизмов судовой энергетической установки // Судостроение. 2024. № 5. С. 62-65.

References:

1. *Sudovyye gidravlicheskiye tralovyye lebedki* [Marine hydraulic trawl winches]. (In Russian). Available at: <https://sea-man.org/sudovaya-gidravlicheskaya-lebedka.html> (accessed 20.06.2025).
2. Karpenko V.P., Torban S.S. *Mexanizaciya i avtomatizaciya processov promy`shlennogo ry`bolovstva* [Mechanization and automation of industrial fishing processes]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1990, 464 p. (In Russian).
3. Те А.М. *E`kspluataciya sudovy`x vspomogatel`ny`x mexanizmov, sistem i ustrojstv* [Operation of ship auxiliary mechanisms, systems and devices]. Vladivostok, Moscow State University G.I.

Nevelsky Publ., 2014, 178 p. (In Russian).

4. Bashurov B.P., Skiba A.N., Chebanov V.S. *Funkcional'naya nadezhnost' i kontrol' texnicheskogo sostoyaniya sudovy`x vspomogatel'ny`x mexanizmov* [Functional reliability and technical condition control of ship auxiliary mechanisms]. Novorossiysk, MGA named after Admiral F.F. Ushakov Publ., 2009, 192 p. (In Russian).
5. Ivanovskaya A.V., Vinogradov V.N., Ivanovskij A.N. Ocenka bezotkaznosti raboty` sudovy`x gruzopod`emny`x ustrojstv. [Evaluation of vessel lifting devices failure-free operation]. *Sbornik materialov II Vserossiyskoy konferentsii «Razvitiye energetiki vodnogo transporta, informatsionnykh i energosberegayushchikh tekhnologiy»* [Collection of materials of the II All-Russian Conference «Development of the energy of water transport, information and energy-saving technologies»], Kazan, Volga State University of Water Transport Publ., 2024, pp. 180-184. (In Russian).
6. *GOST 18855-94 (ISO 281-89) Podshipniki kacheniya dinamicheskaya raschetnaya gruzopod`emnost' i raschetny`j resurs (dolgovechnost')* [State Standard 18855-94 (ISO 281-89). Dynamic design bearing capacity and design life (durability)]. Moscow, Standartinform Publ., 2009. 26 p. (In Russian).
7. Ivanovskaya A.V., Khalyavkin A.A., Boroznyak A.V., Shapoval V.V. Kompleksnyy podkhod k otsenke vliyaniya stokhasticheskikh faktorov na protsessy iznosa podshipnikov tralovykh lebedok [An integrated approach to assessing the influence of stochastic factors on the wear processes of trawl winch bearings]. *Nauchnyye problemy vodnogo transporta* [Scientific Problems of Water Transport], 2025, no. 83, pp. 75-85. (In Russian). DOI: 10.37890/jwt.vi83.607.
8. Ivanovskaya A.V., Khalyavkin A.A., Khachatryan A.M., Kiselevich M.E. Issledovaniye dinamicheskikh protsessov v podshipnikovykh uzlakh tralovoy lebedki v usloviyakh nestatsionarnogo nagruzheniya [Study of dynamic processes in bearing units of a trawl winch under non-stationary loading conditions]. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Morskiye tekhnologii* [Bulletin of the Kerch State Marine Technological University. Series: Marine Technologies], 2025, no. 2, pp. 39-47. (In Russian).
9. Khalyavkin A.A., Matveyev YU.I., Ali Salamekh, Sausan Sliman. Povysheniye nadezhnosti mekhanizmov sudovoy energeticheskoy ustanovki [Improving the reliability of ship power plant mechanisms]. *Sudostroyeniye* [Shipbuilding], 2024, no. 5, pp. 62-65. (In Russian).

Сведения об авторах / Information about authors

**Ивановская
Александра
Витальевна**

канд. техн. наук, доцент кафедры судовых энергетических установок
Керченский государственный морской технологический университет
298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
invkerh@yandex.ru

Ivanovskaya
Aleksandra
Vital'evna

Ph. D (Engin.), Associate Professor at the Department of marine power plants
Kerch State Maritime Technological University
28309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82
invkerh@yandex.ru

**Халявкин
Алексей
Александрович**

канд. техн. наук, доцент кафедры «Судомеханические дисциплины»
Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф.М. Апраксина - филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
414000, г. Астрахань, ул. Никольская, д. 6

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

- sopromat112@mail.ru
- Khalyavkin**
Alexey
Alexandrovich Ph. D (Engin.), Associate Professor of the Department «Ship-mechanical disciplines»
Caspian Institute of Sea and River Transport named after General Admiral F.M. Apraksina - the affiliation of Volga State University of Water Transport
414000, Astrakhan, Nikolskaya str., 6
sopromat112@mail.ru
- Хачатрян**
Артур
Мурадович курсант 3-го курса специальности «Эксплуатация судовых энергетических установок»
Керченский государственный морской технологический университет
298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
invkerch@yandex.ru
- Khachatryan**
Arthur
Muradovich cadet of the 3rd year of the training direction «Operation of marine power plants»
Kerch State Maritime Technological University
298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82
invkerch@yandex.ru
- Киселевич**
Михаил
Эдуардович курсант 2-го курса направления подготовки «Эксплуатация судовых энергетических установок»
Керченский государственный морской технологический университет
298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: invkerch@yandex.ru
- Kiselevich**
Mikhail
Eduardovich cadet of the 2nd year of the training direction «Operation of marine power plants»
Kerch State Maritime Technological University
298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82
invkerch@yandex.ru

Очеретяный В.А., В.И. Михальков В.И.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В СУДОВЫХ ПАРОВЫХ ЛАБИРИНТНЫХ КОТЛАХ

Аннотация. Рассмотрены конструктивные характеристики первых паровых стационарных котлов 18 века, как источника рабочего тела в паровых машинах. Показана тенденция роста паропроизводительности и влияние давления пара на конструктивные особенности первых судовых котлов начала 19 века. Обосновано появление судовых котлов с развитой поверхностью нагрева, впоследствии названных лабиринтными котлами. Показана их роль в росте энерговооруженности первых пароходов и тенденции к упрощению процедур технической эксплуатации, в частности очистка поверхностей нагрева. Сформирована модель теплового расчета лабиринтного котла середины 19 и на основе современных методик выполнен анализ его паропроизводительности. Обоснован необходимый рост поверхности нагрева для обеспечения требуемого расхода пара на поршневой паровой машине.

Ключевые слова: паровой котел, давление, паропроизводительность, газоход, топка, колосниковая решетка.

Mikhalkov V.I., Ocheretyaniy V.A.

INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER IN MARINE STEAM LABYRINTH BOILERS

Abstract. Structural characteristics of the first steam stationary boilers of the 18th century as a source of working fluid in steam engines are considered. The trend of increasing steam production and the influence of steam pressure on the design features of the first ship boilers of the early 19th century are shown. The appearance of ship boilers with a developed heating surface, later called labyrinth boilers, is justified. Their role in the growth of energy-bearing capacity of the first steamboats and the tendency to simplify the procedures of technical operation, in particular, cleaning of heating surfaces, are shown. A model of thermal calculation of the labyrinth boiler of the middle 19 was formed and an analysis of its steam production was carried out on the basis of modern methods. The necessary growth of the heating surface is justified to ensure the required steam consumption in a reciprocating steam engine.

Keywords: steamboiler, pressure, steamcapacity, flue, furnace, grate.

Введение. В 16-18 веках для привода основных мануфактурных и фабричных установок использовались водяные и ветровые колеса. Поэтому промышленные предприятия были сосредоточены по сельской местности и деревням, там, где не было проблем с доступом воде, имеющей большой потенциал кинетической энергии. С развитием металлургии, металлообработки, паровой техники до 1780-х годов связки паровой котел-паровая машина с основным использовались для откачки воды (осушение шахт), привода воздуходувок на металлургических предприятиях и подачи воды в резервуары, откуда вода снова использовалась для привода водяного колеса [1].

Это были балансирные паро-атмосферные машины с возвратно-поступательным движением рабочих органов Т. Ньюкомена (1711) [2], Д. Уатта (1775) [3], И.И. Ползунова (1766) [4] и др., которые применялись вплоть до конца XIX века.

Почти все котлы у паро-атмосферных машин по внешнему виду (рисунок 1) представляли собой прочный сосуд с вертикальной осью вращения диаметром 2...3 м. Обычно эти паровые котлы изготавливались из меди и скраивались клепкой из различных по площади кусков металла [5] и покрывались обмуровкой. На некоторых речных судах эти котлы применялись, но меньших габаритов.

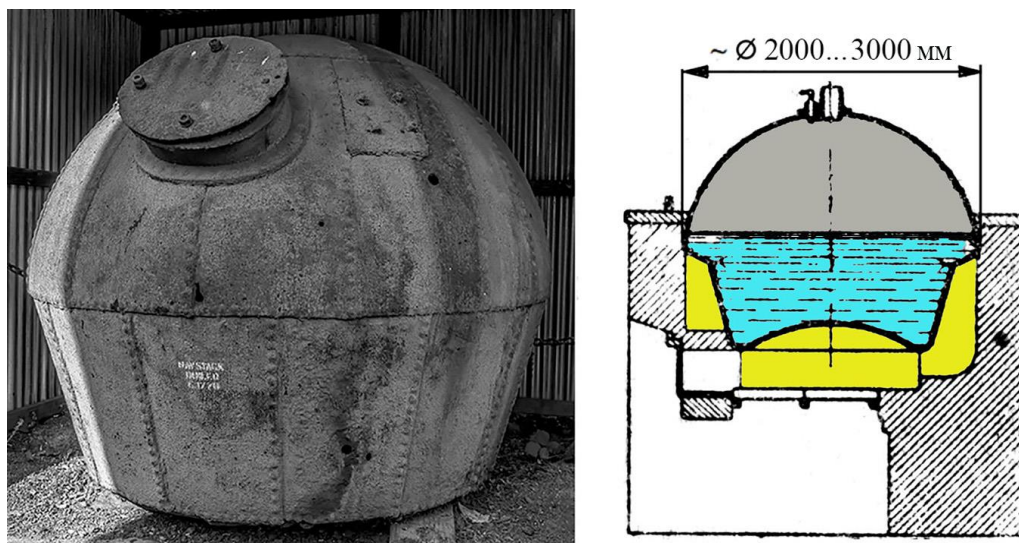


Рисунок 1 – Паровые котлы первых паровых машин ~

В последующих своих паровых машинах Д. Уатт реализовал вращательное движение выходного звена вместо возвратно-поступательного и использовал подачу пара на обе стороны поршня. Его котлы уже приобрели форму сундука и имели большую поверхность нагрева (рисунок 2) [6]. Подобный котел использовал в 1807 г. Р.Фултон на своем пароходе Клермонт. Это был первый пароход, оснащенный вполне надежной энергетической установкой для продолжительной работы при хождении по реке Гудзон (длина – 36 м; ширина – 5 м; осадка 1,2 м. Паросиловая установка парохода имела мощность 15 кВт. Пароход эксплуатировался для регулярных рейсов между городами Нью-Йорк и Альбани. Расстояние между этими городами в 225 км он преодолевал за 32 часа. Котел парохода – сундучного типа имел размеры 2,4×2,1×6,1 м, имел кирпичную обмуровку. Бортовые колеса выполнены диаметром 4,6 м. Паропроизводительность котла составляла приблизительно 500 кг/ч. Дымовая труба – кирпичная [7].

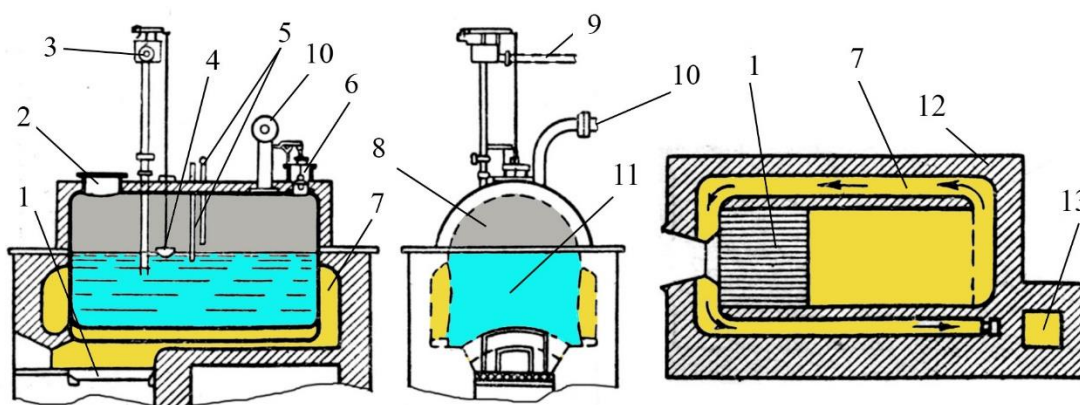


Рисунок 2 – Устройство сундучного парового котла

1 – колосниковая решетка; 2 – лаз; 3 – регулятор подачи воды в котел; 4 – поплавок регулятора; 5 – водоуказательные трубки; 6 – воздушный клапан; 7 – дымовые газы; 8 – паровое пространство; 9 – питательная труба; 10 – паротборная труба; 11 – водяное пространство; 12 – обмуровка котла; 13 – дымоход

Топливо (дров или уголь) набрасывалось на колосниковую решетку. Продукты горения омывали днищевую часть котла, на дальнем днище разворачивались и омывали боковые поверхности котла. Среди конструктивных особенностей – расположение топки и

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

траектории дымовых газов под котлом и вдоль боковин, что требует обмуровки и, как следствие, значительной массы.

Следующими этапами развития судовых паровых котлов были сундучные с жаровой трубой, лабиринтные, галерейные. Их развитие было взаимосвязанным, и каждая очередная конструкция имела и достоинства, и недостатки, однако являлась прогрессивной.

Среди судовых паровых котлов интерес представляют лабиринтные котлы, которые строили для морских судов в период 1820...1860 гг. [8]. Эти котлы представляли собой реализацию существенного развития инженерной мысли в области судового котлостроения. Анализу их эффективности посвящена настоящая работа.

Целью исследований является оценка тепловой эффективности лабиринтного котла середины 19 века, как источника энергии, а именно достигаемой паропроизводительности при известном расходе топлива [5], обеспечивающем движение судна.

На рисунке 3 представлен общий вид лабиринтного котла, установленного на североамериканском винтовом пароходе-фрегате Princeton [5]. Неметаллический пароход с парусным вооружением 1852 года постройки имел следующие технические характеристики: водоизмещение 1370 т; длина около 50,3 м; длина между перпендикулярами 47,5 м; ширина 10 м; средняя осадка 4,5 м; высота борта 6,5 м грузопместимость 663 т. Паровая машина с качающимися цилиндрами и частотой вращения коленчатого вала 23 мин⁻¹. Интересна судьба парохода Princeton. В 1844 году во время круиза по реке Потомак, который включал демонстрацию выстрела его двух новых тяжелых орудий, одно из них взорвалось. Погибло 6 человек, включая государственного секретаря, министра военно-морского флота и других. Президент Джон Тайлер, находившийся на борту, но под палубой, не пострадал. После данного события репутация корабля не восстановилась [9, 10].

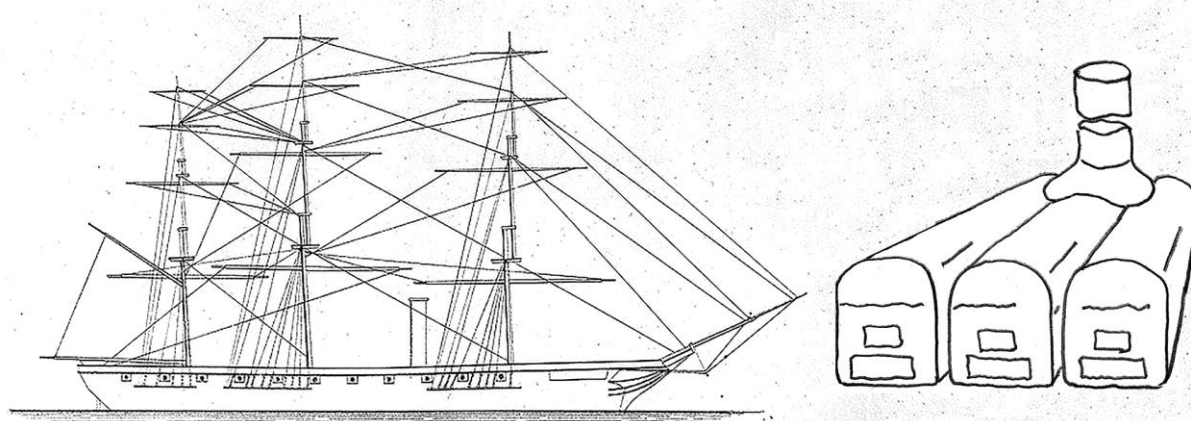


Рисунок 3 – Общий вид парохода-фрегата и его лабиринтных котлов

Котел парохода-фрегата Princeton, по существу, состоял из трех рядом установленных лабиринтных, объединенных общей дымовой трубой и естественно, работающих на один паропровод. Наличие большого количества плоских стенок свидетельствовало о небольшом рабочем давлении – избыточное давление в котле составляло 0,88 кг/см² (8,8 метров водяного столба). Наличие сложных ходов по газу обеспечивало неплохое снижение продуктов сгорания на выходе их котла, а также увеличивало поверхность нагрева, от площади которой линейно зависит паропроизводительность котла. В работе ставится задача оценить количественно паропроизводительность котла на номинальном режиме работы.

Материалы и методы исследования. При тепловом анализе работы паропроизводящих установок обычно используется нормативный метод расчета паровых котлов [11].

Оценка исходных данных для теплового расчета котла. Лабиринтный котел представлял собой конструкцию коробчатой формы, внутри которой располагались

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

газоходы, выполненные в виде каналов прямоугольного сечения. Между камерами располагались пространства, заполненные водой. Газы, образующиеся при горении топлива, двигались по газоходам в нескольких направлениях и выходили через боковой проход в дымовую трубу [12, 13].

Котлы имели следующие технические характеристики [14]: длина – 7,9 м; высота – 2,85 м; ширина – 2,1 м. Суммарная поверхность нагрева трех котлов – 224,8 м²; суммарный паровой объем – 34,6 м³; масса воды в трех котлах – 41960 кг; масса трех котлов – 51820 кг.

Вид на передний фронт и продольный разрез котла представлен на рисунке 4.

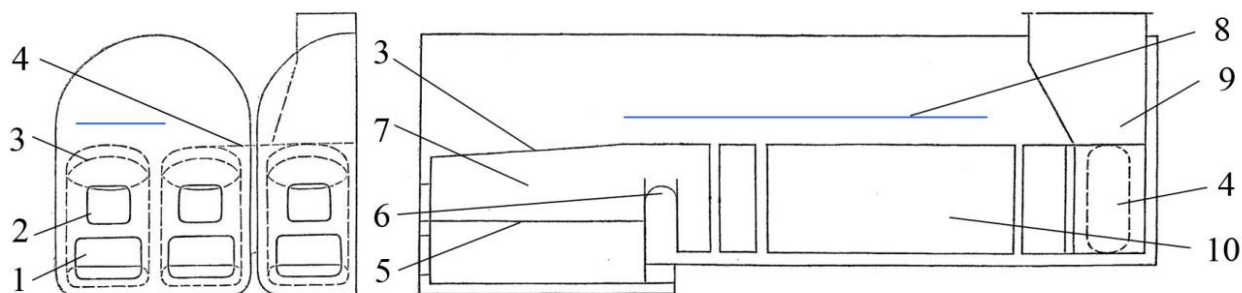


Рисунок 4 – Устройство лабиринтного котла

1 – поддувало (зольник); 2 – топочная дверца; 3 – свод топки; 4 – выход продуктов сгорания из боковых котлов в центральный газоход; 5 – колосники; 6 – боровок; 7 – топка; 8 – средний уровень воды в котле; 9 – газоход центрального котла через паровое пространство

Одним из преимуществ лабиринтных котлов является наличие большого водяного объема. В низ за счет освобождаемой теплоты жидкости при снижении в котле возможно было существенно увеличить паропроизводительность котла на небольшой период времени, и, наоборот, при внезапной остановке паровой машины вероятность аварийного повышения отсутствовала. Вследствие высокой аккумулирующей способности теплоты большого объема котловой воды, давление пара росло достаточно медленно при продолжающемся горении топлива (уголь и дрова). При полном прекращении потребления пара нормальная работа топки могла продолжаться в течение 1/3 часа, при этом давление в котле повышалось на 20...30 %.

При остановке машины не было необходимости немедленно прекращать огонь в топке с целью ограничения быстрого роста давления пара. Достаточно было понизить до минимума интенсивность горения.

Большой водяной объем котлов имел и серьезные недостатки: при повышении давления выше допустимого может произойти взрыв, последствия которого увеличиваются в зависимости от большого количества теплоты, содержащегося в значительных объемах перегретой воды.

Среди недостатков можно отметить медленную разводку в них паров, продолжающуюся до 12 часов и более. Длительный запуск требовался для обеспечения равномерного прогрева больших объемов воды во всех частях котла. Иначе возможен отказ заклепочных соединений или трубных досок (в местах вальцовки). Это недостаток особенно ощущался на корабельных котлах, которые по тактическим условиям требовали быстрой разводки паров.

Следующий недостаток – большая трудоемкость очистки дымогарных поверхностей от накипи.

Один из важнейших недостатков лабиринтных котлов – очень низкая прочность котлов вследствие наличия плоских стенок и прямоугольных газоходов.

Топливо – уголь, антрацит. Марка АО – Антрацит орех (рисунок 5), размер от 26 до 50 мм. Низшая теплота сгорания – 33200 кДж/кг. Содержание углерода 93%; водорода 2 %;

влажность 2 % [15].

Коэффициент избытка воздуха для современного судового главного парового котла, работающего на жидком топливе, находится в интервале $\alpha=1,05...1,12$; для современного вспомогательного котла $\alpha=1,15...1,25$ [16]; на рассматриваемом котле принудительной вентиляции не было, присутствовала только самотяга, паровой форсун не реализован, топливо – кусковой уголь размером до 50. Таким образом, учитывая [17], принимаем коэффициент избытка воздуха равным $\alpha=2,1$.



Рисунок 5 – Антрацит, типовое топливо для лабиринтного котла

Часовой расход топлива на один котел $V_{\text{ч}}=211 \text{ кг/ч} = 0,0586 \text{ кг/с}$ [5]. Суммарный расход топлива $V_{\text{ч}}=211 \times 3 = 633 \text{ кг/ч}$

Потери при работе котла [18].

Потери от химической неполноты сгорания $q_3=4 \%$.

Потери от механической неполноты сгорания:

потери тепла с провалом $q_{41}=4 \%$;

потери тепла со шлаком $q_{42}=3,3 \%$;

потери тепла с уносом $q_{43}=6,7 \%$;

Итого потери от механической неполноты сгорания: $q_{4\Sigma}=14 \%$;

Потери в окружающую среду $q_5=12 \%$.

Коэффициент полезного действия котла $\eta = 36 \%$.

Теплофизические характеристики питательной воды и пара [19]: давление в котле $p=0,188 \text{ МПа}$; температура питательной воды $20 \text{ }^\circ\text{C}$; энтальпия питательной воды $i_{\text{пв}} = 84 \text{ кДж/кг}$; энтальпия насыщенного пара $i'' = 2703 \text{ кДж/кг}$; температура насыщения $t_s = 118 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты исследования и их обсуждение. На основании вышеуказанных архивных источников были получены необходимые для расчетов конструктивные параметры поверхностей нагрева котла.

На рисунке 6 представлен продольный разрез трехкорпусного лабиринтного котла. Плоскость разреза расположена над колосниковыми решетками. Хорошо видны достаточно развитые для той эпохи поверхности нагрева. При этом можно отметить достаточно небольшой слой котловой воды, расположенный в обогреваемых вертикальных стенах прочного корпуса.

На рисунке 6 представлена схема движения продуктов сгорания из топки котла по газоходам, показаны объединенные и отдельные для топок каналы. Газоходы отдельные для топок (на рисунке – буква А) имеют габариты ширина 0,37 м и высота 1,2 м; газоходы объединенные (буква – Б) ширина 0,43 м и высота 1,2 м. Толщина рубашечных пространств (Г) – 0,1 м. Ширина топок 0,88 м при длине 2,33 м. Средняя высота свода над колосниковой решеткой – 1,7 м.

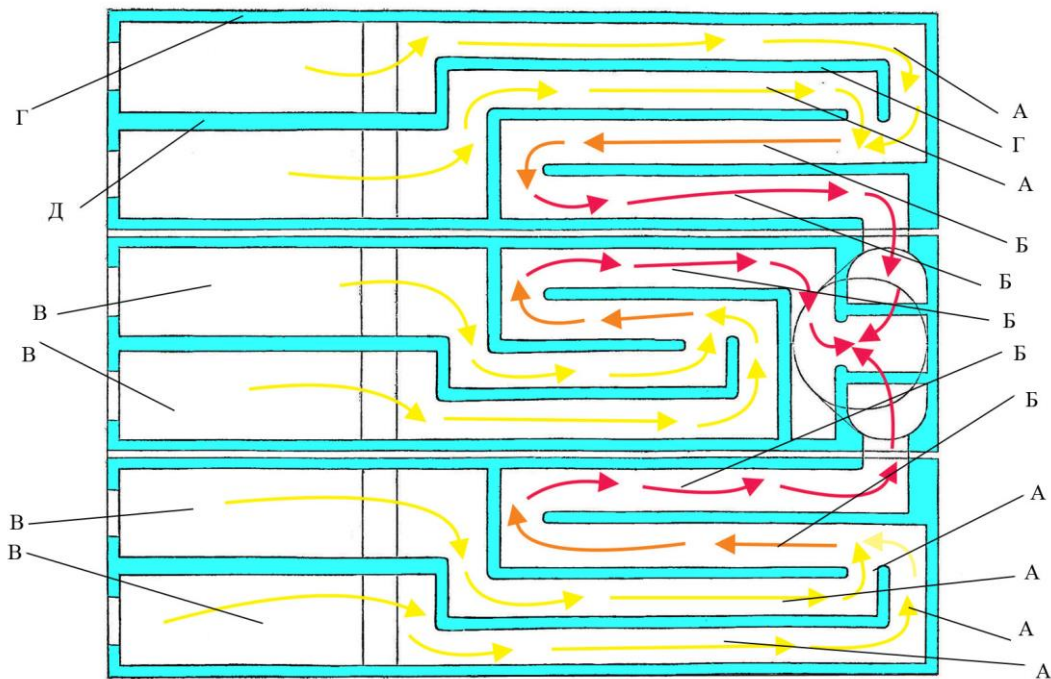


Рисунок 5 – Зонирование элементов котла по объединению газоходов и габаритам
А – газоходы для движения газов из одной топки; Б – газоходы для движения газов из 2-х топок; В – топка; Г – водяное рубашечное пространство котла; Д – водяное рубашечное пространство с двухсторонним лучистым обогревом

Оценка теплопроизводительности и паропроизводительности котла.

На основании уравнения прямого теплового баланса судового парового котла [19, 20] при известных теплофизических характеристиках пароводяного тракта, коэффициента полезного действия и часового расхода топлива можно оценить получаемую паропроизводительность котла (1):

$$D_{\text{ч}} = \frac{B_{\text{ч}} \cdot Q_{\text{P}}^{\text{P}} \cdot \eta_{\text{k}}}{(i_{\text{ВЫХ}} - i_{\text{ВХ}}) \cdot 100}, \quad (1)$$

где $B_{\text{ч}} = 633$ кг/ч – суммарный часовой расход топлива (антрацита);

$\eta_{\text{k}} = 36$ – КПД лабиринтного котла;

$i_{\text{ВЫХ}} = 2703$ кДж/кг – энтальпия насыщенного пара;

$i_{\text{ВХ}} = 84$ кДж/кг – энтальпия питательной воды;

$Q_{\text{P}}^{\text{P}} = Q_{\text{P}}^{\text{H}} + Q_{\text{ФП}} + Q_{\text{ПГ}}$ – располагаемая теплота, кДж/кг, где не учитывается теплота подогретого топлива (уголь) – $Q_{\text{ФП}} = 0$ кДж/кг и не используется пар для распыливания топлива – $Q_{\text{ПГ}} = 0$. $Q_{\text{P}}^{\text{H}} = 33200$ кДж/кг – низшая теплота сгорания топлива.

$$\text{В итоге } D_{\text{ч}} = \frac{633 \cdot 33200 \cdot 36}{(2703 - 84) \cdot 100} = 2888 \text{ кг/ч}$$

Имея информацию об элементарной массе топлива, коэффициенте избытка воздуха и используя [21, 22] была построена диаграмма зависимости «Энтальпия-температура» для продуктов сгорания для температурного интервала $\vartheta = 100 \dots 1500$ °С. На основании полученной диаграммы энтальпия-температура на основании решения уравнения обратного

теплового баланса может быть оценена температура уходящих газов лабиринтного котла:

$$J_{yx} = \frac{Q_P^P \cdot q_2}{100} + Q_{XB} = \frac{Q_P^P}{100} \cdot (100 - \eta_k - q_3 - q_4 - q_5) + Q_{XB}, \quad (2)$$

где $Q_{XB} = 420$ кДж/кг – теплота, вносимая в топку воздухом, тогда

$$J_{yx} = \frac{33200}{100} \cdot (100 - 36 - 4 - 14 - 12) + 420 = 11708 \text{ кДж/кг}$$

В соответствии с диаграммой энтальпия-температура ("J-θ") температура уходящих газов составляет $\theta_{yx} = 447^\circ\text{C}$.

Расчет теплообмена в топке. В каждом котле по две топки.

Для упрощения заменяем топку с эллиптическим сводом плоским и рассматриваем ее как прямоугольную призму габаритами: $2,33 \times 0,88 \times 1,7$ м.

Объем топки $V_T = 2,33 \cdot 0,88 \cdot 1,7 = 3,48$ м³; полная площадь стен $F_{СТ} = 2 \times (2,33 \times 0,88 + 2,33 \times 1,7 + 0,88 \times 1,7) = 15,01$ м²; лучевоспринимающая поверхность нагрева топки $H_{Л} = 2 \times 2,33 \times 1,7 + 2,33 \times 0,88 = 9,97$ м²; степень экранирования топки $\psi = H_{Л} / F_{СТ} = 9,97 / 15,01 = 0,642$. Степень экранирования топки достаточно высока. Это достигнуто за счет выполнения боковых стен-экранов топки – водоохлаждаемыми.

Расчет теплообмена в топке выполнен графоаналитическим способом, варьируемым параметром являлась температура продуктов сгорания на выходе из топки. Для рассчитываемой топки топочный критерий Больцмана получен на интервале 0,60...0,62, что достаточно неплохо. Расчет показал, что на выходе из данной топки поддерживается безразмерная температура $\Theta_{ЗТ}$ на уровне 0,67, что говорит малой удельной тепловой мощности топки при низко потенциальных по теплоте газоходах. Это соответствует температуре дымовых газов за топкой $\theta_{ЗТ} = 675$ °С. При полученной мощности топки 377,8 кВт паропроизводительность топки составила $D_T = 0,14$ кг/с или 503 кг/ч. Результаты расчета отражены на рисунке 6.

Расчет котла по газоходам также выполнялся графоаналитическим методом, причем учитывалось объединение газовых потоков во втором газоходе (газоход Б – рисунок 5).

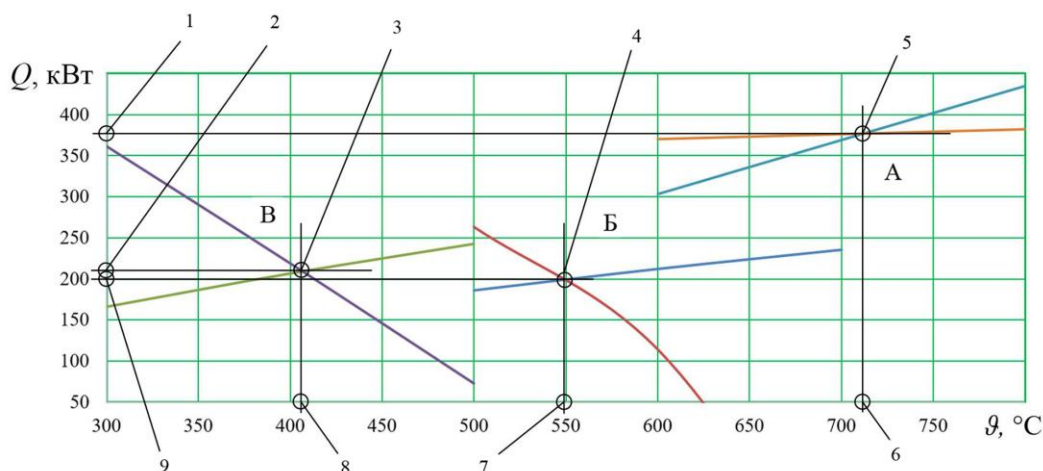


Рисунок 5 – Результаты расчета котла

1, 2, 9 – расчетные мощности поверхностей; 3, 4, 5 – расчетные тепловые режимы; 6, 7, 8 – температуры за рассчитываемыми поверхностями; А – расчет теплообмена в топке; Б – расчет теплообмена в 1 газоходе; В – расчет теплообмена во 2 газоходе

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Исходными данными явилась площадь поверхности нагрева хода $H_A=19,2 \text{ м}^2$; площадь для прохода газов $F_A=0,44 \text{ м}^2$. Трехточечный расчет производился для предполагаемых температур на выходе из первого газохода $\vartheta_A = 400, 500, 600 \text{ }^\circ\text{C}$. Скорость газов, обеспечиваемая самотягой находилась в интервале $3,9...4,4 \text{ м/с}$. Расчет показали, что получаемая тепловая мощность первого газохода составляет мощность 199 кВт при температуре на выходе $\vartheta_{\text{АРЕЗ}} = 549 \text{ }^\circ\text{C}$. Суммарная полученная паропроизводительность участка $D_T = 0,076 \text{ кг/с}$ или 273 кг/ч .

Расчета второго газохода (Б) выполнялись для двух топок котла (по расходу топлива и по объему дымовых газов). Исходными данными явилась площадь поверхности нагрева хода $H_A=23,4 \text{ м}^2$; площадь для прохода газов $F_A=0,516 \text{ м}^2$. Трехточечный расчет производился для предполагаемых температур на выходе из газохода в дымовую трубу $\vartheta_B = 300, 400, 500 \text{ }^\circ\text{C}$. Скорость газов, обеспечиваемая самотягой находилась в интервале $6,3...7,2 \text{ м/с}$. Повышение скорости связано с объединением газового потока от двух топок в одну. Расчет показали, что получаемая тепловая мощность второго газохода составляет мощность 207 кВт при температуре на выходе $\vartheta_{\text{АРЕЗ}} = 410 \text{ }^\circ\text{C}$. Суммарная полученная паропроизводительность участка $D_T = 0,079 \text{ кг/с}$ или 284 кг/ч .

Таким образом, поверочные расчеты лабиринтного котла с применением современного научного подхода в анализе работы котлов [19] показали, что паропроизводительность одного котла составляет $D_K = 503+273+284 = 1059 \text{ кг/ч}$. На всю котельную установку, содержащую три высокотемпературных теплообменных аппарата паропроизводительность составляет $D_\Sigma = 1059 \times 3 = 3177 \text{ кг/ч}$. Это несколько превышает заявленные значения по сравнению с заявленным в [5].

В сравнении первыми лабиринтными котлами рассматриваемый имел более высокое избыточное давление пара, так как один большой лабиринтный мокродонный котел был разделен на три отдельно, но рядом стоящих. Достаточно больше габариты котла объясняются увеличением поверхности нагрева для большей паропроизводительности. В настоящее время для типового не наливного судна паропроизводительность котла не изменилась – около 3 тонн в час, будь то вспомогательный котел (со сжиганием топлива в топке) или утилизационный. И среднее давление пара современных котлов $0,7 \text{ МПа}$, что в 10 раз превышает давление рассматриваемого в работе котла.

Выводы. История развития техники не только достаточно интересная наука, она позволяет прогнозировать их развитие, выполнять анализ и диагностику современного судового оборудования. Методы и инструментальная база проектирования также меняется и развивается. Лабиринтные котлы, как этап развитие судовой котельной техники соответствовали уровню своего времени в области металлургии, металлообработки, контрольно-измерительных приборов. Дальнейшее развитие лабиринтных котлов при получении возможности серийного и массового производства трубных элементов среднего и малого размера (не клепанных и не полученных горячей ковкой), привело к появлению коробчатых котлов, которые широко применялись в 1850-1880 гг. В следующей работе будет выполнен анализ конструктивных особенностей судовых коробчатых котлов.

Список использованной литературы:

1. Кузнецов Б.Г. История энергетической техники. М.: ОНТИ ГРЭЛ, 1937. 317 с.
2. Stuart R. A Descriptive History of the Steam Engine. London: J. Knight and H. Lacey, 1824. 228 p. URL: <https://archive.org/details/adescriptivehis01stuagoog> (дата обращения: 20.02.2026).
3. Юинг Д.А. Паровая машина и другие тепловые двигатели. Киев. 1904. 432 с. URL: https://vk.com/topic-138740831_34899394 (дата обращения: 20.02.2026).
4. Южаков М.И. Иван Иванович Ползунов и его паровая машина. Томск. 1906. 101 с. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/shihmeyster-ivan-ivanovich-polzunov-i-ego-parovaya-mashina/viewer> (дата обращения: 20.02.2026).

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

5. *Бараиш П.* Развитие судовых паровых котлов. Л.: ОНТИ, 1937. 698 с.
6. *Очеретяный В.А., Бубенцов В.М.* Развитие конструкций судовых паровых котлов. Методические указания к выполнению дипломного проекта. Севастополь: Изд-во СевНТУ. 2007. 48 с.
7. *Кнох Т.В.* The life of Robert Fulton and a history of steam navigation. New York: G.P. Putnam, 1900. 534 p. URL: <https://ia904705.us.archive.org/29/items/lifeofrobertfult00knox/lifeofrobertfult00knox.pdf> (дата обращения: 20.03.2026).
8. *Акимов П.П.* История развития судовых энергетических установок. Л.: Судостроение, 1966. 188 с.
9. *Miles A.H., Navy U.S.* The "Princeton" Explosion. URL: [https://wamu.org/story/14/06/06/how_an_explosion_on_the_potomac_170_years_ago_arguably_begot_the_civil_war/USPrinceton_\(1843\)](https://wamu.org/story/14/06/06/how_an_explosion_on_the_potomac_170_years_ago_arguably_begot_the_civil_war/USPrinceton_(1843)) (дата обращения: 22.03.2026).
10. Военный корабль США Принстон (1843 г.). URL: [https://ru.wikiital.com/wiki/USPrinceton_\(1843\)](https://ru.wikiital.com/wiki/USPrinceton_(1843)) (дата обращения: 22.03.2026).
11. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). СПб.: НПО ЦКТИ-ВТИ, 1998. 256 с.
12. *Серебрянников А.* Основания теории паровых машин и котлов. Тип Карла Вульфа. СПб. 1856. 356 с. URL: https://retrolib.pdp-11.ru/books10/1860_serebrennikow.pdf (дата обращения: 20.03.2026).
13. *Bertin L.E.* Marine boiler, their construction and working, dealing more especially with tubulous boilers. London. 1898. 488 p. URL: <https://archive.org/details/marineboilersthe00bertuoft> (дата обращения: 20.03.2026).
14. *Stuart Ch.B.* The naval and mail steamer of the united states. London. Norton, Irving house. 1853. 392 с. URL: <https://archive.org/details/naulmailsteamer00stuaauoft> (дата обращения: 20.03.2026).
15. Уголь антрацит: его особенности и основные характеристики. URL: <https://crimeatek.ru/stati/ugol-antratsit-ego-osobennosti-i-osnovnye-kharakteristiki> (дата обращения: 20.03.2026).
16. *Дементьев К.С., Романов В.А., Турлаков А.С., Волков Д.И.* Проектирование судовых парогенераторов. Л.: Судостроение, 1986. 386 с.
17. *Тецнер Ф., Гейнрих О.* Паровые котлы. Руководство и справочник для инженеров, техников и студентов ВТУЗов и техникумов. Л.: ГНТИ, 1932. 456 с.
18. *Бараиш П.А.* Основы теории и тепловые расчеты судовых паровых котлов. Л.: ВМИ НКРВМФ СССР, 1939. 291 с.
19. *Александров А.А., Григорьев Б.А.* Справочные таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: МЭИ, 1995. 160 с.
20. *Хряпченков А.С.* Судовые вспомогательные и утилизационные котлы. Л.: Судостроение, 1988. 296 с.
21. *Очеретяный В.А.* Расчеты судового парового котла: учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию. Севастополь: СевГУ, 2021. 167 с. URL: <http://lib.sevsu.ru/xmlui/handle/123456789/10016> (дата обращения: 20.03.2026).
22. *Очеретяный В.А.* Тепловой расчет парового котла. Определение объемов воздуха и расчет диаграммы «Температура-энтальпия» для выполнения КП и ДП для студентов специальности Эксплуатация СЭУ. 2024. URL: <https://disk.sevsu.ru/index.php/s/b6TGMAapudSnyiT> (дата обращения: 20.03.2026).

References:

1. Kuznetsov V.G. *Istoriya energeticheskoy tekhniki* [History of power engineering]. Moscow, ONTI GREL Publ., 1937, 317 p. (In Russian).
2. Stuart R. *A Descriptive History of the Steam Engine*. London: J. Knight and H. Lacey Publ., 1824, 228 p. (In English). Available at: <https://archive.org/details/adescriptivehis01stuaagoog> (accessed 20.02.2026).

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

3. Yuing D.A. *Parovaya mashina i drugiye teplovyye dvigateli* [Steam engine and other heat engines]. Kyiv, 1904, 432 p. (In Russian). Available at: https://vk.com/topic-138740831_34899394 (accessed 20.02.2026).
4. Yuzhakov M.I. *Ivan Ivanovič Polzunov i ego parovaâ mašina* [Ivan Ivanovich Polzunov and his steam engine]. Tomsk, 1906, 101 p. (In Russian). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/shihmeister-ivan-ivanovich-polzunov-i-ego-parovaya-mashina/viewer> (accessed 20.02.2026).
5. Barash P. *Razvitiye sudovykh parovykh kotlov* [Development of marine steam boilers]. Leningrad, ONTI Publ., 1937, 698 p. (In Russian).
6. Ocheretyanyy V.A., Bubentsov V.M. *Razvitiye konstruktsiy sudovykh parovykh kotlov. Metodicheskiye ukazaniya k vypolneniyu diplomnogo proyekta* [Development of designs of marine steam boilers. Guidelines for completing the diploma project]. Sevastopol, SevNTU Publ., 2007, 48 p. (In Russian).
7. Knox T.W. *The life of Robert Fulton and a history of steam navigation*. New York, G.P. Putnam Publ., 1900, 534 p. (In English). Available at: <https://ia904705.us.archive.org/29/items/lifeofrobertfult00knox/lifeofrobertfult00knox.pdf> (accessed 20.03.2026).
8. Akimov P.P. *Istoriya razvitiya sudovykh energeticheskikh ustanovok* [History of the development of ship power plants]. Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1966, 188 p. (In Russian).
9. Miles A.H., Navy U.S. *The "Princeton" Explosion*. (In English). Available at: [https://wamu.org/story/14/06/06/how_an_explosion_on_the_potomac_170_years_ago_arguably_begot_the_civil_war/USS_Princeton_\(1843\)](https://wamu.org/story/14/06/06/how_an_explosion_on_the_potomac_170_years_ago_arguably_begot_the_civil_war/USS_Princeton_(1843)) (accessed 22.03.2026).
10. *Voyenny korabl' SSHA Prinston (1843 g.)*. (In Russian). Available at: [https://ru.wikiital.com/wiki/USS_Princeton_\(1843\)](https://ru.wikiital.com/wiki/USS_Princeton_(1843)) (accessed 22.03.2026).
11. *Teplovoy raschet kotlov (Normativnyy metod)* [Thermal calculation of boilers (Normative method)]. St. Petersburg, NPO TSKTI-VTI Publ., 1998, 256 p. (In Russian).
12. Serebryannikov A. *Osnovaniya teorii parovykh mashin i kotlov. Tip Karla Vul'fa*. [Foundations of the Theory of Steam Engines and Boilers. Karl Wulff Type]. St. Petersburg, 1856, 356 p. (In Russian). Available at: https://retrolib.pdp-11.ru/books10/1860_serebrennikow.pdf (accessed 20.03.2026).
13. Bertin L.E. *Marine boiler, their construction and working, dealing more especially with tubulous boilers*. London, 1898, 488 p. (In English). Available at: <https://archive.org/details/marineboilersthe00bertuoft> (accessed 20.03.2026).
14. Stuart Ch.B. *The naval and mail steamer of the united states*. London, Norton, Irving house, 1853, 392 p. (In English). Available at: <https://archive.org/details/naulmailsteamer00stuauf> (accessed 20.03.2026).
15. *Ugol' antratsit: yego osobennosti i osnovnyye kharakteristiki* [Anthracite coal: its features and main characteristics]. (In Russian). Available at: <https://crimeatek.ru/stati/ugol-antratsit-ego-osobennosti-i-osnovnyye-kharakteristiki> (accessed 20.03.2026).
16. Dement'yev K.S., Romanov V.A., Turlakov A.S., Volkov D.I. *Proyektirovaniye sudovykh parogeneratorov* [Design of ship steam generators]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1986, 386 p. (In Russian).
17. Tetsner F., Geynrikh O. *Parovyye kotly. Rukovodstvo i spravochnik dlya inzhenerov, tekhnikov i studentov VTUZov i tekhnikumov* [Steam boilers. Guide and reference book for engineers, technicians and students of higher technical universities and technical schools]. Leningrad, GNTI Publ., 1932, 456 p. (In Russian).

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

18. Barash P.A. *Osnovy teorii i teplovyye raschety sudovykh parovykh kotlov* [Fundamentals of the theory and thermal calculations of marine steam boilers]. Leningrad, VMI NKRVMF SSSR Publ., 1939, 291 p. (In Russian).
19. Aleksandrov A.A., Grigor'yev B.A. *Spravochnyye tablitsy teplofizicheskikh svoystv vody i vodyanogo para* [Reference tables of thermophysical properties of water and water vapor]. Moscow, MEI Publ., 1995, 160 p. (In Russian).
20. Khryapchenkov A.S. *Sudovyye vspomogatel'nyye i utilizatsionnyye kotly* [Ship auxiliary and waste-heat boilers]. Leningrad, Sudostroyeniye Publ., 1988, 296 p. (In Russian).
21. Ocheretyanyy V.A. *Raschety sudovogo parovogo kotla: uchebnoye posobiye k kursovomu i diplomnomu proyektirovaniyu* [Calculations of a marine steam boiler: a tutorial for course and diploma projects]. Sevastopol, SevGU Publ., 2021, 167 p. (In Russian). Available at: <http://lib.sevsu.ru/xmlui/handle/123456789/10016> (accessed 20.03.2026).
22. Ocheretyanyy V.A. *Teplovoy raschet parovogo kotla. Opredeleniye ob'yemov vozdukha i raschet diagrammy «Temperatura-ental'piya» dlya vypolneniya KP i DP dlya studentov spetsial'nosti Ekspluatatsiya SEU* [Thermal calculation of a steam boiler. Determination of air volumes and calculation of the "Temperature-enthalpy" diagram for performing CP and DP for students of the specialty Operation of SPP]. 2024. (In Russian). Available at: <https://disk.sevsu.ru/index.php/s/b6TGMAapudSnyiT> (accessed 20.03.2026).

Сведения об авторах / Information about authors

Очеретяный Владимир Анатольевич	канд. техн. наук., доцент, доцент кафедры Энергоустановки морских судов и сооружений Севастопольский государственный университет 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33 ocheret-1961@rambler.ru
Ocheretyanyy Vladimir Anatolyevich	Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Marine Vessel and Structure Power Plants Sevastopol State University 299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33 ocheret-1961@rambler.ru
Михальков Владимир Игоревич	студент 5 курса Севастопольский государственный университет 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33 casualvim@gmail.com
Mikhalkov Vladimir Igorevich	5th year student Sevastopol State University 299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33 casualvim@gmail.com

Федоровский К.Ю., Гриненко Н.К., Ениватов В.В.

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО УЩЕРБА ОТ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Аннотация. Рассмотрены вопросы численной оценки ущерба, наносимого биологическим ресурсам морей, в следствие эксплуатации систем охлаждения судовых энергетических установок. Возможны различные варианты построения таких систем, которые отличаются своим негативным воздействием на биологические ресурсы морей. Показано, что данный фактор требует обязательного учета при создании этих систем. Описан механизм губительного воздействия, оказываемого системами на планктон, икринки и мальков, формирующих основу пищевой цепочки морей. Разработаны методические подходы численной оценки экологического ущерба, а также его соотношение с положительным результатом работы системы, выражающимся в обеспечении требуемого теплоотвода. Учтены важные технические показатели, характеризующие работу систем охлаждения энергоустановок. Предложенный относительный показатель приведен к безразмерному виду, при этом системы с меньшим значением данного показателя соответствуют более лучшему варианту построения системы охлаждения.

Ключевые слова: судовая энергоустановка, система охлаждения, экологический ущерб, планктон, биоресурсы.

Fedorovsky K. Yu., Grinenko N. K., Enivatov V. V.

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL DAMAGE FROM THE OPERATION OF COOLING SYSTEMS OF MARINE POWER PLANTS

Abstract. This article examines the numerical assessment of damage to marine biological resources caused by the operation of ship power plant cooling systems. Various design options for such systems are possible, each with its own negative impact on marine biological resources. It is shown that this factor must be taken into account when designing these systems. The mechanism of the detrimental impact of these systems on plankton, eggs, and fry, which form the basis of the marine food chain, is described. Methodological approaches for the numerical assessment of environmental damage are developed, as well as its correlation with the positive outcome of the system's operation, which is the provision of the required heat removal. Important technical indicators characterizing the operation of power plant cooling systems are considered. The proposed relative indicator is reduced to dimensionless form, with systems with a lower value of this indicator corresponding to a better design option for the cooling system.

Keywords: ship power plant, cooling system, environmental damage, plankton, biological resources.

Введение. На морскую оказываются различные виды негативного воздействия [1], а для морских судов такое воздействие лимитируется нормами Международной морской конвенции МАРПОЛ 73/78. [2]. Однако, эта конвенция не затрагивает всех факторов, имеющих место при эксплуатации судов. Рассмотрим один из таких факторов, связанный с работой систем охлаждения судовых энергетических установок. Наиболее широкое распространение получили разомкнутые двухконтурные системы, предусматривающие потребление забортной охлаждающей воды. В качестве примера в таблице 1 показаны соответствующие значения для различных морских объектов.

Таблица 1 – Примеры потребления морской воды

Объект	Потребление морской воды, м ³ /час
Морская платформа ЛСП-1	1600 (номинальное) 2000...2400 (максимальное)
Морская платформа проекта 10170	400...800
Рефрижераторное судно «Zenit»	460
Многоцелевое судно «Амке»	160

Проведенные исследования показали, что количество потребляемой воды зависит в первую очередь от мощности энергетической установки (рис. 1) и может аппроксимировано выражением (1).

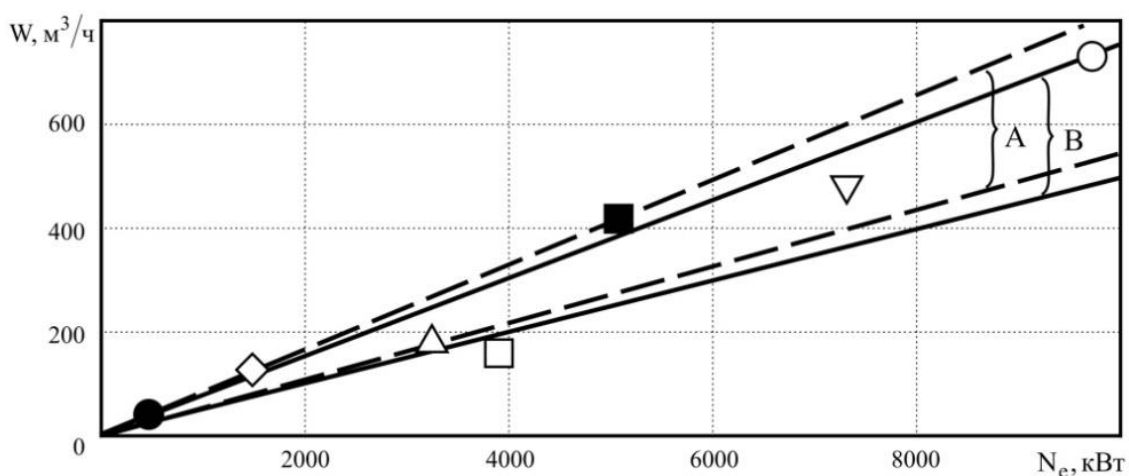


Рисунок 1 – Потребление заборной воды W в зависимости от мощности N_e СЭУ

- – плавкран проекта 15201; Δ – рефрижератор «Ангара»; \circ – Рефрижератор «WildCosmos»;
- \square – Многофункциональное судно «Амке»; \diamond – плавкран «Нептун-3»; ∇ – Рефрижератор «Zenit»; \cdot – полупогружная буровая установка «Шельф».

$$W = 0,06N_e, \text{ (м}^3\text{/ч)}, \quad (1)$$

где N_e – мощность, кВт.

При создании систем охлаждения их комплектуют насосами из выпускаемого промышленностью типоразмерного ряда. Использовать насос с меньшей производительностью, чем это определено по расчету требуемой теплоотводящей способности системы недопустимо. Поэтому фактическое потребление заборной воды может оказаться несколько большим, чем это задается зависимостью (1).

Разомкнутые системы охлаждения потребляют заборную воду, содержащую планктон, икринки, мальков и рыбную молодь. Используемые в системах фильтры имеют диаметр проходного отверстия порядка 2...4 мм. Размеры же упомянутых морских организмов измеряются от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Поэтому данные организмы попадая в систему проходят через все ее элементы: насосы, теплообменники, арматуру, фильтры и т.д. (рис. 2). После этого, нагретая в системе охлаждения вода, вместе с указанными организмами сбрасывается обратно в акваторию.

При прохождении через систему планктон, икринки и др. подвергается различным видам губительного воздействия, что не может ни сказаться на состоянии морских биоресурсов, сохранение которых является актуальной задачей и требует соответствующей оценки [3].

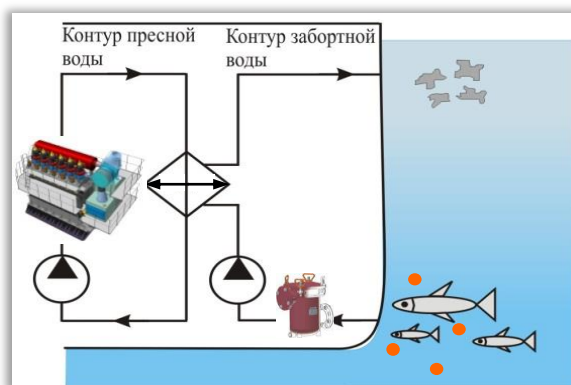


Рисунок 2 – Двухконтурная разомкнутая система охлаждения СЭУ

Целью исследования является разработка метода оценки экологического ущерба, наносимого эксплуатацией систем охлаждения судовых энергетических установок для сопоставления различных вариантов построения систем охлаждения и выбора наилучшего.

Материалы и методы исследования. При проведении исследований использовались экспериментальные методы определения потребления системами охлаждения воды из окружающей акватории, а также математические методы построения модели функционирования системы, а также абсолютной и относительной оценки их эффективности.

Результаты исследования и их обсуждение. Известно, что планктон, икринки и мальки являются основой пищевой цепочки морей. Данные организмы, пройдя через систему охлаждения практически полностью погибают под воздействием механического и теплового факторов. Наибольшее механическое воздействие осуществляется в насосах, обычного центробежного типа. Тепловое воздействие, связанное с резким нагревом морской воды, осуществляется в теплообменниках системы. Проведенные исследования (табл. 2) показали, что во многих случаях вода в системе прогревается до 15...19 градусов.

Таблица 2 – Нагрев забортной воды $\delta_{ЗВ}$ на различных судах

Судно	Установленная мощность, кВт	Нагрев забортной воды $\delta_{ЗВ}$, градусы
Рефрижератор «Zenit»		7...18
Рефрижератор «Wild Cosmos»		16...19
Рефрижератор «Wild Plone»		11...13
Многофункциональное «Amke»		9...13
Рефрижератор «Ангара»		2...8
Самоходный плавкран «Нептун - 3»		5...10
Буксир «Пелла»		9...15

Для большинства рыб резкий скачек температуры воды 15...20 градусов является губительным, поскольку приводит к «ожогу» жабр со всеми дальнейшими негативными последствиями. Планктон, икринки и мальки способны выдержать существенно меньший скачек температуры воды.

К сожалению, экологический фактор, связанный с уничтожением биологических ресурсов морей, практически не учитывается специалистами, занимающимися судовыми энергетическими установками и, в частности, их системами охлаждения.

При проектировании таких систем возможны различные варианты их построения (разомкнутые двухконтурные, трехконтурные, замкнутые системы и т.д.) [4, 5]. Выбор варианта построения системы, помимо технических и экономических показателей, должен учитывать соответствующий экологический ущерб. Это может повлиять на принимаемое окончательное решение [6]. Необходим метод определения этого ущерба.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

Численность мальков и икринок, попадающих в систему охлаждения, зависит от количества потребляемой воды $W_{ЭУ}$.

$$W_{ЭУ} = W_{ВО} + W_{МО} + W_{ОНВ} + W_{ОЭГ} + W_{КВ} + W_{ХМ} + W_{КП}, \quad (2)$$

где $W_{ВО}$, $W_{МО}$, $W_{ОНВ}$, $W_{ОЭГ}$, $W_{КВ}$, $W_{ХМ}$, $W_{КП}$ – требуемые расходы соответственно на охладители: водяной, масляный, наддувочного воздуха, электрогенератора, кондиционирования воздуха, холодильной машины, компрессоров.

Количество воды, забранной из акватории за время фактической работы системы $\tau_{Ф}$ с учетом режимов загрузки системы, определяется

$$Q = W_{ЭУ} \cdot \tau_{Г} \cdot K_{ТИ} \cdot K_{ИЭ} = W_{ЭУ} \cdot \tau_{Ф}, \text{ м}^3, \quad (3)$$

где $\tau_{Г}$ – годовой бюджет времени;

$K_{ТИ}$ и $K_{ИЭ}$ – соответственно коэффициент технического использования и коэффициент интенсивности эксплуатации системы, равные соответственно 0,95 и 0,75.

Для различных морей, известна концентрация икринок $\rho_{ИК}$ и мальков рыб $\rho_{МА}$. Эти значения и количество потребленной из водоема воды Q , можно рассчитать количество погибших икринок

$$n_{ИК} = Q \cdot \rho_{ИК} \cdot K_{ГИБ}, \text{ шт.} \quad (4)$$

и мальков

$$n_{МА} = Q \cdot \rho_{МА} \cdot K_{ГИБ}, \text{ шт.}, \quad (5)$$

где $K_{ГИБ}$ – коэффициент, характеризующий относительное количество погибших икринок и мальков. Приблизительно его среднее значение можно считать равным 0,25.

При известном уничтоженном количестве мальков и икринок рыб соответствующая масса рыбы промыслового возраста может быть определена

$$M_{РБ} = \frac{n_{ИК} \cdot \varepsilon_{ИК} + n_{МА} \cdot \varepsilon_{МА}}{100} \cdot \bar{\gamma}_{РБ}, \text{ кг}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{ИК}$ и $\varepsilon_{МА}$ – коэффициенты промыслового возраста соответственно икринок и мальков;
 $\bar{\gamma}_{РБ}$ – средний вес рыбы промыслового возраста, кг/экз.

Коэффициенты $\varepsilon_{ИК}$ и $\varepsilon_{МА}$ учитывают тот факт, что до промыслового возраста выживает лишь часть рыб от количества икринок и мальков [7,8].

Уничтоженные системой охлаждения икринки и мальки в дальнейшем могли бы дать потомство. Учета этого фактора может быть выполнен с помощью зависимости, по которой определяется масса рыбы от потери потомства:

$$M_{ПШ} = \frac{(n_{ИК} + n_{МА}) \cdot P_{Д} \cdot \varepsilon_{ИК} \cdot d \cdot \xi}{10000} \cdot \gamma_{РБ}, \text{ кг}, \quad (7)$$

где $P_{Д}$ – средняя плодовитость рыб, шт.;

d – доля самок в стаде, %;

ξ – кратность нереста.

Следует отметить, что численное значение величины $\bar{\gamma}_{РБ}$ рассчитывается как средневзвешенное для различных видов промысловых рыб в данном море

$$\bar{\gamma}_{рб} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_{рб_i} \cdot a_i}{a_i}, \text{ кг/экз.} \quad (8)$$

Характерное для рассматриваемого моря и периода времени относительное количество рыб данного вида a_i и их вес $\bar{\gamma}_{рб}$ определяются по результатам контрольных тралений акватории. Могут также использованы данные справочной литературы для различных морей, например [9, 10].

Зная цену $\bar{Ц}_{рб_i}$ различных видов промысловых рыб, аналогично может быть определена и средняя цена:

$$\bar{Ц}_{рб} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{Ц}_{рб_i} \cdot a_i}{a_i}, \text{ руб./экз.} \quad (9)$$

С учетом зависимостей (6) и (7), характеризующих воздействие системы охлаждения, можно определить стоимостное выражение ущерба по икринкам

$$C_{ик} = Q \cdot K_{гиб} \frac{\bar{\gamma}_{рб} \cdot \bar{Ц}_{рб} \cdot \varepsilon_{ик}}{100} \cdot \rho_{ик}, \text{ руб.}, \quad (10)$$

и по малькам

$$C_{ма} = Q \cdot K_{гиб} \frac{\bar{\gamma}_{рб} \cdot \bar{Ц}_{рб} \cdot \varepsilon_{ма}}{100} \cdot \rho_{ма}, \text{ руб.} \quad (11)$$

Ущерб, связанный с уничтожением потомства

$$C_{пт} = Q \cdot K_{гиб} (\rho_{ик} + \rho_{ма}) \frac{\bar{Ц}_{рб} \cdot \gamma_{рб} \cdot \Pi_{л} \cdot \varepsilon_{ик} \cdot d \cdot \xi}{10000}, \text{ руб.} \quad (12)$$

Тогда стоимостное выражение наносимого экологического ущерба

$$C_{э} = C_{ик} + C_{ма} + C_{пт} = Q \cdot K_{гиб} \cdot \bar{Ц}_{рб} (M_{рб} + M_{пт}) \cdot \bar{\gamma}_{рб}, \text{ руб.} \quad (13)$$

Данный ущерб необходимо соотнести с положительным результатом работы системы охлаждения, которым является отводимый тепловой поток T (Вт). Тогда, за время фактической работы системы $\tau_{ф}$ суммарно отводится теплота

$$\Phi_T = 3600 \cdot T \cdot \tau_{ф}, \text{ Дж.} \quad (14)$$

Этой теплоте необходимо дать соответствующую стоимостную оценку. Это может быть сделано исходя из того, что для получения данной теплоты необходимо приобрести и потратить топливо в количестве

$$\text{ТОП}_T = \frac{\Phi_T}{(1 - \eta_{ЭУ}) \cdot H}, \text{ кг.} \quad (15)$$

где $\eta_{ЭУ}$ – эффективный коэффициент полезного действия энергетической установки;
H – низшая теплотворная способность используемого топлива, Дж/кг.

На основании потребленного количества топлива ТОП_T и его рыночной цены $C_{ТП}$, рассчитывается стоимость отведенной теплоты

$$C_T = \text{ТОП}_T \cdot C_{ТП} = T \cdot \beta_T, \text{ руб.}, \quad (16)$$

где

$$\beta_T = \frac{3600 \cdot \tau_\Phi}{(1 - \eta_{ЭУ}) \cdot H} \cdot C_{ТП}. \quad (17)$$

В результате появляется возможность соотнести в стоимостном выражении наносимый системой охлаждения ущерб и обеспечиваемый системой полезный функционал. Воспользовавшись широко используемым принципом построения показателей эффективности как приведенных затрат, получаем

$$k_\Theta = \frac{C_\Theta}{C_T} = \frac{Q \cdot K_{ГИБ} \cdot C_{РБ} \cdot \bar{\gamma}_{РБ}}{\beta_T \cdot T} [M_{РБ} + M_{ПП}]. \quad (18)$$

Величина k_Θ является безразмерной и чем меньше ее значение, тем лучше с экологической точки зрения система.

Выводы. Работа системы охлаждения судовой энергетической установки приводит к гибели планктона, икринок и мальков, являющихся основой пищевой цепочки морей, что в конечном счете, приводит к уничтожению их биологических ресурсов. Оценка наносимого ущерба требует обязательного учета при создании систем охлаждения, в аспекте выбора наилучшего варианта построения таких систем. Представленные методические подходы и соответствующие зависимости позволяют сделать это и учитывают не только экологический фактор, но и целый ряд частных технических показателей, характеризующих работу системы.

Список использованной литературы:

1. *Пряхин Ю.В.* Антропогенное влияние на экологическую обстановку в Азово-Черноморском бассейне и численность приплода пиленгаса // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2013. Т. 10. № 2. С. 81-88.
2. International Maritime Organization. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), 1973, as modified by the Protocol of 1978. London: IMO, 1973/1978. URL: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx) (дата обращения: 23.12.2025).
3. *Лучшева В.В., Аксенова Е.И., Аникина А.М.* Оценка экономического ущерба от сокращения биоразнообразия // Управление экономическими системами. 2018. № 8 (114). С. 10.
4. *Шурпяк В.К., Rogozin A.B., Михеева А.А.* Применение различных схем охлаждения заборных теплообменных аппаратов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2025. № 78. С. 155-171.
5. *Федоровский К.Ю., Федоровская Н.К.* Замкнутые системы охлаждения судовых энергетических установок: монография. М.: ИНФРА-М, 2025. 160 с. URL:

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

<https://znanium.ru/catalog/product/2196088> (дата обращения: 23.12.2025).

6. Claire Cole. How an integrated approach to project management leads to better bids for shipbuilding projects. 2021. URL: <https://blogs.sw.siemens.com/marine/2021/12/21/integrated-project-management-approach-for-better-shipbuilding-projects-bids/> (дата обращения: 23.12.2025).
7. Полистовская П.А., Карпенко Л.Ю., Махнин И.А., Ажикина О.Ю. Исследование органоминерного хелатного комплекса на репродуктивную функцию самок и выживаемости икры ДАНИО РЕРИО // Международный вестник ветеринарии. 2024. № 1. С. 112-119. DOI: 10.52419/issn2072-2419.2024.1.112.
8. Правдин И.Ф. Выживаемость икры, личинок и мальков. URL: <http://aquaria2.ru/node/7237> (дата обращения: 23.12.2025).
9. Шляхов В.А., Пятинский М.М. Оценка состояния запасов морских видов рыб Черного моря (воды России) в 2021 г. // Водные биоресурсы и среда обитания. 2023. Т. 6. № 3. С. 96-113. DOI: 10.47921/2619-1024_2023_6_3_96.
10. Гаврилов Г.М., Храпова П.С. Межгодовая изменчивость состава, биомассы и вылова донных рыб на шельфе экономической зоны России Берингова моря // Известия ТИНРО. 2004. Т. 139. С. 208-224.

References:

1. Pryakhin YU.V. Antropogennoye vliyaniye na ekologicheskuyu obstanovku v Azovo-Chernomorskom bassejne i chislennost' priploda pilengasa [Anthropogenic impact on the ecological situation in the Azov-Black Sea basin and the number of mullet offspring]. *Ekologicheskij vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of the Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation], 2013, vol. 10, no. 2, pp. 81-88. (In Russian).
2. *International Maritime Organization. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), 1973, as modified by the Protocol of 1978*. London: IMO, 1973/1978. (In English). Available at: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx) (accessed 23.12.2025).
3. Luchsheva V.V., Aksenova Ye.I., Anikina A.M. Otsenka ekonomicheskogo ushcherba ot sokrashcheniya bioraznoobraziya [Assessment of economic damage from biodiversity loss]. *Upravleniye ekonomicheskimi sistemami* [Management of Economic Systems], 2018, no. 8 (114), pp. 10. (In Russian).
4. Shurpyak V.K., Rogozin A.V., Mikheyeva A.A. Primeneniye razlichnykh skhem okhlazhdeniya zabortnykh teploobmennyykh apparatov [Application of various cooling schemes for outboard heat exchangers]. *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva* [Scientific and Technical Collection of the Russian Maritime Register of Shipping], 2025, no. 78, pp. 155-171. (In Russian).
5. Fedorovskiy K.YU., Fedorovskaya N.K. *Zamknutyie sistemy okhlazhdeniya sudovykh energeticheskikh ustanovok* [Closed cooling systems of ship power plants]. Moscow, INFRA-M Publ., 2025, 160 p. (In Russian). Available at: <https://znanium.ru/catalog/product/2196088> (accessed 23.12.2025).
6. Claire Cole. *How an integrated approach to project management leads to better bids for shipbuilding projects*. 2021. (In English). Available at: <https://blogs.sw.siemens.com/marine/2021/12/21/integrated-project-management-approach-for-better-shipbuilding-projects-bids/> (accessed 23.12.2025).
7. Polistovskaya P.A., Karpenko L.YU., Makhnin I.A., Azhikina O.YU. Issledovaniye organominernogo khelatnogo kompleksa na reproduktivnyuyu funktsiyu samok i vyzhivayemosti ikry DANIO RERIO [Study of organomineral chelate complex on reproductive function of

females and survival rate of eggs of *Danio rerio*]. *Mezhdunarodnyy vestnik veterinarii* [International Bulletin of Veterinary Medicine], 2024, no. 1, pp. 112-119. (In Russian). DOI: 10.52419/issn2072-2419.2024.1.112.

8. Pravdin I.F. *Vyzhivayemost' ikry, lichinok i mal'kov* [Survival of eggs, larvae and fry]. (In Russian). Available at: <http://aquaria2.ru/node/7237> (accessed 23.12.2025).
9. Shlyakhov V.A., Pyatinskiy M.M. *Otsenka sostoyaniya zapasov morskikh vidov ryb Chernogo morya (vody Rossii) v 2021 g.* [Assessment of the state of stocks of marine fish species of the Black Sea (waters of Russia) in 2021]. *Vodnyye bioresursy i sreda obitaniya* [Aquatic Bioresources and Habitat], 2023, vol. 6, no. 3, pp. 96-113. (In Russian). DOI: 10.47921/2619-1024_2023_6_3_96.
10. Gavrilov G.M., Khrapova P.S. *Mezhhodovaya izmenchivost' sostava, biomassy i vylova donnykh ryb na shel'fe ekonomicheskoy zony Rossii Beringova moray* [Interannual variability of the composition, biomass and catch of bottom fish on the shelf of the economic zone of Russia in the Bering Sea]. *Izvestiya TINRO* [News TINRO], 2004, vol. 139, pp. 208-224. (In Russian).

Сведения об авторах / Information about authors

**Федоровский
Константин
Юрьевич**

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Энергоустановки морских судов и сооружений» Севастопольский государственный университет 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33 fedkonst@rambler.ru

Fedorovskiy
Konstantin Yurievich

Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department of Power Installations of Marine Vessels and Structures Sevastopol State University 299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33 fedkonst@rambler.ru

**Гриненко
Надежда
Константиновна**

канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергоустановки морских судов и сооружений» Севастопольский государственный университет 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33 nkgrinenko@mail.ru

Grinenko
Nadezhda
Konstantinovna

Ph.D. (Engin.), Associate Professor of the Department of Power Plants of Sea Vessels and Structures Sevastopol State University 299053, Sevastopol, Universitetskaya str., 33 nkgrinenko@mail.ru

**Ениватов
Валерий
Владимирович**

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой судовых энергетических установок Керченский государственный морской технологический университет 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82 valeriy.enivatov@gmail.com

Enivatov
Valerii
Vladimirovic

Ph.D. (Engin.), Head of the Department of the Department of marine power plants Kerch State Maritime Technological University 298309, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str.,82 valeriy.enivatov@gmail.com

Ермаков Н.Д.

ГИБРИДНАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ АРХИТЕКТУРА АДАПТИВНОГО СЛИЯНИЯ МНОГОМОДАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ МОРСКОГО МОНИТОРИНГА

Аннотация. В статье представлена гибридная нейросетевая архитектура адаптивного слияния многомодальных навигационных данных, предназначенная для повышения достоверности и устойчивости систем морского мониторинга. Рассмотрены теоретические основы интеграции гетерогенных сенсорных потоков (радиолокационных, навигационных, лидарных и оптических) в едином признаковом пространстве. Предложен механизм динамического перераспределения доверительных коэффициентов на основе энтропийной оценки информативности источников, обеспечивающий самоадаптацию модели при деградации отдельных сенсоров. Проведён формальный анализ структуры сети, включающей сверточные, рекуррентные и трансформерные модули, а также блок адаптивного слияния (Adaptive Fusion Block). Показано, что предлагаемая архитектура может служить базой для построения интеллектуальных навигационных комплексов, функционирующих в условиях высокой неопределённости и изменчивости морской среды.

Ключевые слова: нейросетевая архитектура, слияние данных, морской мониторинг, адаптивные системы, сенсорная интеграция, доверительные коэффициенты, машинное обучение, интеллектуальные навигационные комплексы.

Ermakov N.D.

HUBRID NEURAL NETWORK ARCHITECTURE FOR ADAPTIVE FUSION OF MULTIMODAL NAVIGATION DATA IN INTELLIGENT MARITIME MONITORING SYSTEMS

Abstract. The paper presents a hybrid neural network architecture for adaptive fusion of multimodal navigation data aimed at enhancing the reliability and robustness of maritime monitoring systems. The theoretical foundations of integrating heterogeneous sensor streams (radar, navigation, LiDAR, and optical) into a unified feature space are discussed. A dynamic confidence re-weighting mechanism based on entropy-driven informativeness estimation is proposed, enabling self-adaptation of the model under sensor degradation. The structure of the network combining convolutional, recurrent, and transformer modules with an Adaptive Fusion Block is formally analyzed. The proposed architecture can serve as a foundation for intelligent maritime navigation systems capable of operating under high uncertainty and environmental variability.

Keywords: neural network architecture, data fusion, maritime monitoring, adaptive systems, sensor integration, confidence estimation, machine learning, intelligent navigation systems.

Введение. Безопасность нынешнего судоходства всё чаще зависит от того, насколько навигационные комплексы способны обеспечить работу без перерывов, достоверное и адаптивное восприятие морской обстановки. Развитие морских автономных судов (далее – МАНС) и систем интеллектуальной навигации предъявляет новые требования к обработке данных, поступающих от множества сенсорных источников. При таких обстоятельствах традиционные методы интеграции навигационных данных – байесовские и калмановские фильтры – показывают ограниченную результативность из-за предположения о стационарности шумов и неизменности характеристик сенсоров [1]. Международная морская организация (ИМО), признаёт концепцию Maritime Domain Awareness (MDA) вместе с компонентом situational awareness (осведомлённость о текущей обстановке) одной из базовых составляющих обеспечения безопасности, охраны и долговременного

функционирования морской деятельности [2]. По определению ИМО, MDA предполагает всестороннее практико-ориентированное понимание элементов морской сферы, способных оказывать воздействие на безопасность, охрану, экономические интересы или состояние окружающей среды; *situational awareness* понимается как результат планомерного аккумулирования, объединения и осмысления разнотипных данных о реальном положении дел на море. Международные правила предупреждения столкновений судов в море (МППСС-72) фиксируют нормы и подчёркивают требование об использовании имеющихся средств наблюдения с учётом специфики навигационной обстановки [3]. Своевременное выявление предполагаемых угроз и стремление уменьшить вероятность столкновений обосновывают наличие данного предписания.

В навигационных комплексах текущего поколения применяются несколько типов сенсоров, радиолокационные станции, системы автоматической идентификации (АИС), лидарные устройства и оптические камеры [4]. На практике сведения от перечисленных каналов не всегда согласованы между собой. Качество передаваемых сведений варьируется под влиянием внешних факторов – помех, погодных условий и возможной деградации отдельных сенсорных каналов. К тому же различия в частоте обновления, в системе координат и в показателях погрешности измерений создают дополнительные сложности при объединении сведений в единую согласованную картину [5].

Для решения данной проблемы требуется построение интеллектуальных моделей слияния данных, способных в реальном времени:

1. Оценивать текущую степень полезности и достоверность каждого сенсорного канала;
2. Выполнять оперативное перераспределение весов источников с учётом условий наблюдения;
3. Обеспечивать согласование временных и пространственных координат в едином геодезическом базисе;
4. Обеспечивать надёжную объединённую оценку морской обстановки даже при частичной потере данных.

В рамках данной работы предлагается гибридная нейросетевая архитектура, ориентированная на адаптивное объединение многомодальных навигационных данных. Её реализация основана на совместном использовании сверточных, рекуррентных и трансформерных компонентов, взаимодействие которых организовано через специальный блок адаптивного слияния (*Adaptive Fusion Block*). В отличие от классических вероятностных подходов [6], предложенная модель использует энтропийный анализ информативности для оценки доверительных коэффициентов, что обеспечивает контекстно-зависимую самоадаптацию при деградации отдельных сенсоров [7].

Таким образом, исследование направлено на формализацию и развитие теоретических основ нейросетевого адаптивного слияния данных для систем морского мониторинга и навигационной безопасности, что соответствует современным тенденциям интеллектуализации морских транспортных комплексов [8].

Материалы и методы исследования. Для реализации предложенной модели адаптивного слияния навигационных данных рассматривались разнородные сенсорные источники, характерные для современных систем морского мониторинга: радиолокационные станции, автоматическая идентификационная система (АИС), лидары и оптические видеокамеры. Каждый из этих источников обладает собственной частотой дискретизации, пространственной привязкой и уровнем достоверности измерений, что требует согласования данных в едином геодезическом базисе.

В качестве методологической основы применялся системный подход к организации интеллектуальных информационно-аналитических комплексов [9]. Для каждой модальности выделялась отдельная ветвь обработки признаков – сверточная (для РЛС), рекуррентная (для АИС), точечная (для LiDAR, по типу PointNet++) и трансформерная (для оптических данных). Интеграция признаков выполнялась в рамках блока *Adaptive Fusion Block* (AFB)

(рис. 1), в котором реализован механизм взвешенного объединения с адаптивной настройкой коэффициентов доверия.

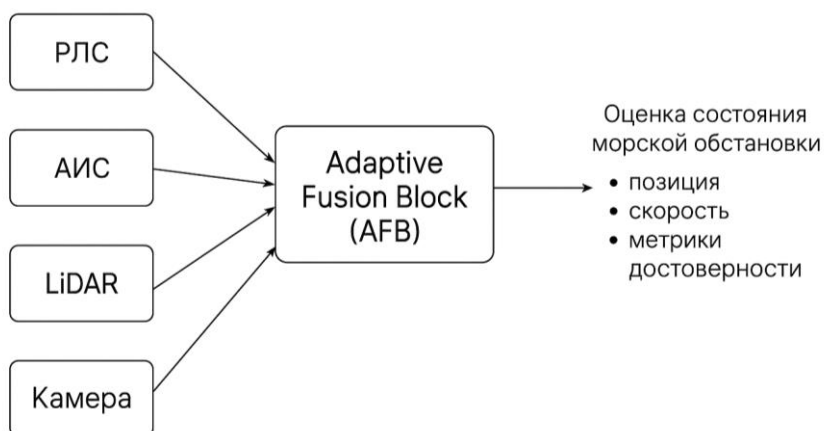


Рисунок 1 – Структура гибридной нейросетевой архитектуры адаптивного слияния навигационных данных

Для подстройки параметров модели под изменяющиеся условия используют оценку полезности каналов на основе критерия, основанного на энтропии. При увеличении значения энтропии, выступающего в роли индикатора ухудшения качества входных данных, снижается коэффициент влияния данного канала, благодаря чему можно перераспределять вклад разных источников для получения итоговой оценки. Указанный подход отражает принципы проектирования систем адаптивного типа с изменяемой архитектурой [10]. При ухудшении характеристик отдельного канала выполняют мгновенную корректировку алгоритма слияния потоков данных в онлайн-режиме без отключения всего комплекса от эксплуатации [11].

В математической записи коэффициент доверия α_i для i -го сенсора задаётся как функция отношения апостериорной и априорной энтропии выходных представлений:

$$\alpha_i = f\left(\frac{H_{prior}}{H_{post}}\right). \quad (1)$$

Результаты исследования и их обсуждение. Выводы исследования показывают, что предложенное решение синхронизирует работу датчиков и в автоматическом режиме перенастраивает относительные веса поступающих данных при изменении условий мониторинга. Рисунок 2 показывает эволюцию коэффициентов распределения весов. Например, при падении качества данных от одного канала его доля в итоговой оценке снижается, тогда как вклад альтернативных каналов возрастает, компенсируя потерю полезности данных и поддерживая стабильную работу системы. Исследование показало, что при использовании энтропийного критерия вклад каждого сенсора в суммарную оценку проявляет нелинейную зависимость от качества поступающих данных. По сравнению с традиционными вероятностными методами такая форма связи даёт системе более гибкие реакции на изменения рабочей среды.

В качестве иллюстрации приведены характерные траектории на рисунке 2 для радиолокационных, лидарных и оптических сенсоров; на рисунке наглядно видно, как комплекс адаптируется и перераспределяет ресурсы, что выступает отличительной чертой сложных многоуровневых интеллектуальных систем [4, 6, 8].

Предложенный метод обладает практической ценностью, совместим с существующими системами навигации и позволяет интегрировать в архитектуру МАНС. Обзор актуальной литературы подтверждает, что внедрение подобных решений повышает корректность оценки окружающей сцены и снижает зависимость от определённых видов датчиков [11, 12].

При сочетании с использованием передовых нейросетевых методов обработки LiDAR и оптических данных [13] описанный механизм адаптивного фьюжна служит основой для интеллектуальных систем морского ситуационного восприятия.

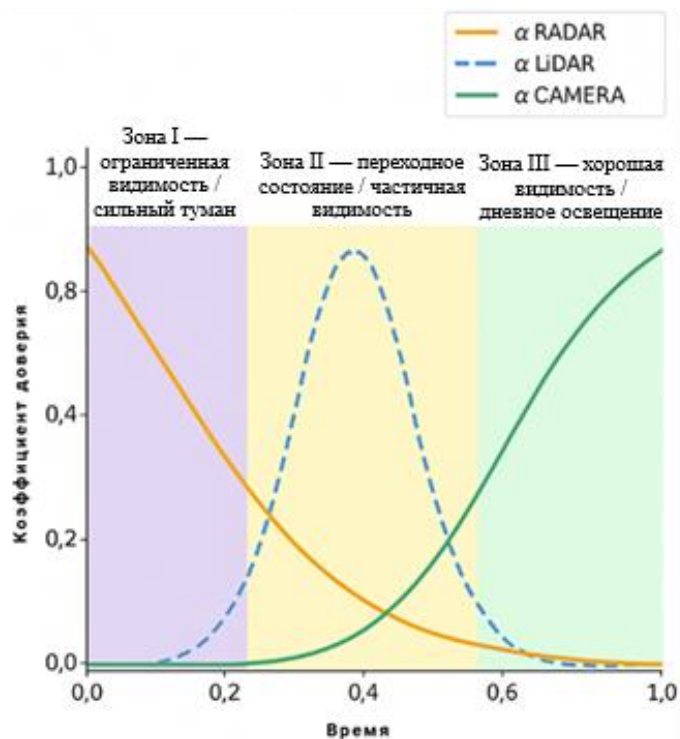


Рисунок 2 – Механизм адаптивного перераспределения доверия в зависимости от информативности сенсоров

Рисунок 2 показывает графики и зависимости, послужившие опорой для теоретических выводов исследования. Полученные результаты указывают, что созданные алгоритмы проявляют надёжность при решении задач адаптивного объединения массивов данных. Дополнительно установлено, что описанные подходы пригодны для интеграции в морские подсистемы, выполняющие обработку, оценивание и интерпретацию данных при использовании ИИ следующего поколения.

Выводы. В работе предложена и теоретически обоснована гибридная нейросетевая архитектура адаптивного слияния многомодальных навигационных данных, предназначенная для интеллектуальных систем морского мониторинга (рис. 3). Модель основана на интеграции сверточных, рекуррентных и трансформерных модулей с блоком динамической калибровки доверительных коэффициентов. Главный научный результат исследования – формальное описание метода, использующего меры энтропии для количественной оценки полезности сигналов датчиков. Предложенный метод предоставляет аппаратным вычислительным узлам и программным компонентам возможность автономно перестраиваться и переконфигурировать связи между структурными элементами системы в ответ на колебания условий мониторинга. Внедрение методики повышает надёжность работы и усиливает методологическую обоснованность процедур слияния измерительных данных. Устраняется нужда в заблаговременной параметризации шумовых процессов и в установлении относительного приоритета для отдельных каналов, несущих сигналы. В итоге расширяются практические сферы использования технологии, в частности навигационные комплексы судов и системы автономного управления.

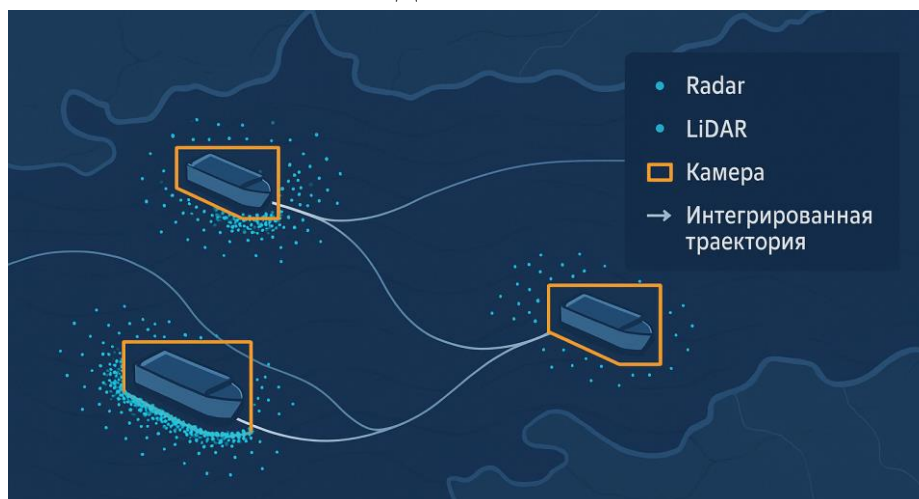


Рисунок 3 – Пример интеграции навигационных данных РЛС, LIDAR и видеокамер после адаптивного слияния

Предстоящие исследования будут направлены на создание распределённых фьюжн-архитектур для объединения сигналов спутниковых платформ с данными гидроакустических комплексов и внедрения модулей ХАИ для прозрачной интерпретации алгоритмических выводов. Реализация данной концепции послужит отправной точкой для появления систем следующего поколения – продвинутых навигационных комплексов морского назначения, рассчитанных на надёжную работу в условиях высокой неопределённости и при интенсивных изменениях морской среды.

Список использованной литературы:

1. Wang B., Wang Z. Adaptive Kalman Filter Under Minimum Error Entropy with Fiducial Points for Strap-Down Inertial Navigation System/Ultra-Short Baseline Integrated Navigation Systems // Journal of Marine Science and Engineering. 2025. Vol. 13. № 5. P. 990. DOI: 10.3390/jmse13050990.
2. Maritime Domain Awareness (MDA). URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/security/pages/maritime-domain-awareness.aspx> (дата обращения: 20.01.2026).
3. Международные правила предупреждения столкновений судов в море (МППСС-72). М.: Моркнига, 2013. 156 с.
4. Ma R., Zhang J., Nie W., Ge N., Wen H., Liu A. Multimodal Information Fusion Using Incremental Graph Convolutional Network for Ship Behavior Anomaly Detection // Journal of Marine Science and Engineering. 2026. Vol. 14. № 1. P. 87. DOI: 10.3390/jmse14010087.
5. Lei J., Sun Y., Wu Y., Zheng F., He W., Liu X. Association of AIS and Radar Data in Intelligent Navigation in Inland Waterways Based on Trajectory Characteristics // Journal of Marine Science and Engineering. 2024. Vol. 12. № 6. P. 890. DOI: 10.3390/jmse12060890.
6. Yan Y., Yang J. An Improved Variational Bayesian-Based Adaptive Federated Kalman Filter for Multi-Sensor Integrated Navigation Systems // Sensors. 2025. Vol. 25. № 23. P. 7173. DOI: 10.3390/s25237173.
7. Ji B., Sun X., Chen P., Wang S., Song S., He B. An Integrated Navigation Algorithm for Underwater Vehicles Improved by a Variational Bayesian and Minimum Mixed Error Entropy Unscented Kalman Filter // Electronics. 2024. Vol. 13. № 23. P. 4727. DOI: 10.3390/electronics13234727.
8. Zou Y., Xiao G., Biancardo S.A. Intelligent Maritime Shipping: A Bibliometric Analysis of Internet Technologies and Automated Port Infrastructure Applications // Journal of Marine Science and Engineering. 2025. Vol. 13. № 5. P. 979. DOI: 10.3390/jmse13050979.

9. Durlik I., Miller T., Kostecka E., Tuński T. Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. № 18. P. 8420. DOI: 10.3390/app14188420.
10. Chlon L., Chlon M., Awada M.M. Robust Multimodal Learning via Entropy-Gated Contrastive Fusion // *arXiv*. 2025. arXiv:2505.15417. URL: <https://arxiv.org/abs/2505.15417>. (дата обращения: 20.01.2026).
11. Zhong C., Zeng S., Zhu H. Adaptive Multimodal Fusion with Cross-Attention for Robust Scene Segmentation and Urban Economic Analysis // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. № 1. P. 438. DOI: 10.3390/app15010438.
12. Zhang M., Zhang X., Fu S., Dai L., Yu Q. Recent Developments and Knowledge in Intelligent and Safe Marine Navigation // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11. № 12. P. 2303. DOI: 10.3390/jmse11122303.
13. Zhang J., Gao J., Liang J., Wu Y., Li B., Zhai Y., Li X. Efficient Water Segmentation with Transformer and Knowledge Distillation for USVs // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11. № 5. P. 901. DOI: 10.3390/jmse11050901.

References:

1. Wang B., Wang Z. Adaptive Kalman Filter under Minimum Error Entropy with Fiducial Points for Strapdown Inertial Navigation System/Ultra-Short Baseline Integrated Navigation Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, vol. 13, no. 5. pp. 990. DOI: 10.3390/jmse13050990. (In English).
2. *Maritime Domain Awareness (MDA)*. (In English). Available at: <https://www.imo.org/en/ourwork/security/pages/maritime-domain-awareness.aspx> (accessed 20.01.2026).
3. *Mezhdunarodnyye pravila preduprezhdeniya stolknoveniy sudov v more (MPPSS-72) [International Regulations for Preventing Collisions at Sea (IRPCS-72)]*. Moscow, Morskaya Publ., 2013, 156 p. (In Russian).
4. Ma R., Zhang J., Nie W., Ge N., Wen H., Liu A. Multimodal Information Fusion Using Incremental Graph Convolutional Network for Ship Behavior Anomaly Detection. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2026, vol. 14, no. 1, pp. 87. (In English). DOI: 10.3390/jmse14010087.
5. Lei J., Sun Y., Wu Y., Zheng F., He W., Liu X. Association of AIS and Radar Data in Intelligent Navigation in Inland Waterways Based on Trajectory Characteristics. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, vol. 12, no. 6, pp. 890. (In English). DOI: 10.3390/jmse12060890.
6. Yan Y., Yang J. An Improved Variational Bayesian-Based Adaptive Federated Kalman Filter for Multi-Sensor Integrated Navigation Systems. *Sensors*, 2025, vol. 25, no. 23, pp. 7173. (In English). DOI: 10.3390/s25237173.
7. Ji B., Sun X., Chen P., Wang S., Song S., He B. An Integrated Navigation Algorithm for Underwater Vehicles Improved by a Variational Bayesian and Minimum Mixed Error Entropy Unscented Kalman Filter. *Electronics*, 2024, vol. 13, no. 23, pp. 4727. (In English). DOI: 10.3390/electronics13234727.
8. Zou Y., Xiao G., Biancardo S.A. Intelligent Maritime Shipping: A Bibliometric Analysis of Internet Technologies and Automated Port Infrastructure Applications. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, vol. 13, no 5, pp. 979. (In English). DOI: 10.3390/jmse13050979.
9. Durlik I., Miller T., Kostecka E., Tuński T. Artificial Intelligence in Maritime Transportation: A Comprehensive Review of Safety and Risk Management Applications. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 18, pp. 8420. (In English). DOI: 10.3390/app14188420.
10. Chlon L., Chlon M., Awada M.M. Robust Multimodal Learning via Entropy-Gated Contrastive Fusion. *arXiv*. 2025. arXiv:2505.15417. (In English). Available at: <https://arxiv.org/abs/2505.15417>. (accessed 20.01.2026).

11. Zhong C., Zeng S., Zhu H. Adaptive Multimodal Fusion with Cross-Attention for Robust Scene Segmentation and Urban Economic Analysis. *Applied Sciences*, 2025, vol. 15, no. 1, pp. 438. (In English). DOI: 10.3390/app15010438.
12. Zhang M., Zhang X., Fu S., Dai L., Yu Q. Recent Developments and Knowledge in Intelligent and Safe Marine Navigation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, vol. 11, no. 12, pp. 2303. (In English). DOI: 10.3390/jmse11122303.
13. Zhang J., Gao J., Liang J., Wu Y., Li B., Zhai Y., Li X. Efficient Water Segmentation with Transformer and Knowledge Distillation for USVs. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, vol. 11, no. 5, pp. 901. (In English). DOI: 10.3390/jmse11050901.

Сведения об авторе / Information about author

Ермаков	аспирант
Никита Дмитриевич	Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова 353922, Российская Федерация, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93 ermakovnd@icloud.com
Ermakov	Postgraduate Student
Nikita Dmitrievich	Admiral F. F. Ushakov State Maritime University 353922, Russian Federation, Novorossiysk, Lenin ave., 93 ermakovnd@icloud.com

УДК 656.61

Свешников В.В.

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ПОЖАРОВ И ВЗРЫВОВ НА СУДАХ С ПОМОЩЬЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРЕНАЖЁРОВ КАФЕДРЫ

Аннотация. В статье рассматривается проблематика предотвращения пожаров и взрывов на судах военно-морского флота и гражданского морского транспорта. Анализируются причины возникновения данных чрезвычайных ситуаций, последствия их реализации, а также современные подходы к обучению личного состава. Особое внимание уделяется роли учебных тренажёрных комплексов как ключевого инструмента формирования профессиональных компетенций у курсантов военных и гражданских морских специальностей. Обосновывается актуальность систематического применения тренажёрной подготовки в системе морского образования. Предложены методические рекомендации по совершенствованию учебного процесса.

Ключевые слова: тренажёрная подготовка, живучесть корабля, безопасность мореплавания, противопожарная защита, борьба за живучесть.

Sveshnikov V.V.

FIRE AND EXPLOSION PREVENTION ON VESSELS USING SIMULATORS

Abstract. The article addresses the issues of fire and explosion prevention on naval fleet vessels and merchant fleet. The author analyses the causes of such emergencies, the consequences of their occurrence, as well as current approaches to crew training. Particular attention is given to the role of training simulators as a key tool for developing professional competencies among cadets in military and civilian maritime specialties. The relevance of systematically incorporating simulator-based training into the maritime education system is substantiated. Methodological recommendations for improving the educational process are proposed.

Keywords: simulator training, ship survivability, navigation safety, fire protection, damage control.

Введение. Обеспечение безопасности эксплуатации морских судов остаётся одной из наиболее острых проблем современного судоходства. По данным Международной морской организации, пожары и взрывы на борту судов входят в число трёх наиболее распространённых причин гибели морских судов, уступая лишь столкновениям и затоплениям. Особую значимость данная проблема приобретает в контексте военно-морского флота, где последствия пожара или взрыва определяются не только гибелью личного состава и утратой материальных ценностей, но и снижением боевого потенциала государства, возможностью нарушения стратегического баланса. В данном контексте особую роль приобретают тренажёрные комплексы профильных кафедр военно-морских и гражданских морских учебных заведений. Именно они обеспечивают формирование у обучающихся профессиональных компетенций [1] в условиях, максимально приближенных к реальной аварийной обстановке на судне, но исключающих какой-либо риск для здоровья и жизни [2]. Настоящая статья посвящена анализу роли тренажёрной подготовки как системообразующего элемента противопожарной культуры на современном флоте.

Материалы и методы исследования. Предотвращение пожаров и взрывов объединяется общим понятием – пожарная профилактика.

Её можно обеспечивать различными способами и средствами:

- технологическими (автоматическая блокировка технологических и технических механизмов и аппаратов, сигнализация взрывоопасной среды и т.п.);
- конструктивными (оборудование отсеков и помещений системами дымоудаления и

эвакуации, легкоудаляемыми и другими предохранительными конструкциями и т.д.);

– организационно-техническими (создание на судах станций пожаротушения и средств защиты штатного оборудования и перевозимых веществ и материалов).

Для возникновения и развития пожара на судне должны быть следующие условия горения:

1. наличие горючего материала;
2. присутствие окислителя;
3. наличие значительного количества теплоты;
4. необходимая скорость окислительных процессов при горении.

Самовозгорание – самопроизвольное возникновение горения твёрдых горючих веществ и материалов в условиях аккумуляции энергии, выделяемой в результате экзотермической реакции их окисления. Как правило самовозгорание происходит при скоплении указанных материалов в дисперсном состоянии. Оно может проявляться в виде тления и пламенного горения.

В процессе самовозгорания веществ (материалов) в результате термоокислительной и (или) термической деструкции органических соединений происходит выделение газов, в том числе горючих: водород, метан, окись углерода. Образование взрывоопасных газоздушных смесей в закрытых объёмах (например, в трюмах и твиндеках) при наличии очага горения (тления) веществ, материала, вызванного самовозгоранием, является причиной взрывов органических веществ (например, угля, муки), на судне.

В зависимости от механизма, который запускает процесс самовозгорания, выделяют три его вида: тепловое, химическое и микробиологическое.

Тепловое самовозгорание возникает при нагревании вещества каким-либо внешним теплом до температуры, обеспечивающий его термическое разложение и дальнейших процесс спонтанного самонагрева за счёт тепла экзотермических реакций в объёме. При этом большую роль играют реакции окисления продуктов термического разложения. Горение в глубине объёма твёрдого дисперсного вещества протекает в форме тления, которое со временем и при доступе воздуха переходит в пламенное горение.

Разновидностью теплового самовозгорания является так называемое «очаговое самовозгорание». Понятие «очаговое самовозгорание» используется для случаев с предварительным прогревом массы материала до температур, существенно превышающих температуру окружающей среды. На практике отмечаются случаи самовозгорания при превышении насыпи критических величин характеристического размера.

Химическое самовозгорание возникает при контакте химически активных веществ, реагирующих с выделением большого количества теплоты. В этом случае самовозгорание обычно начинается на поверхности материала, а затем распространяется вглубь. При перемешивании химических веществ самовозгорание может начаться в глубине объёма. И скорее всего, именно там и начнётся, т.к. именно там имеются наилучшие условия для аккумуляции теплоты, его накопления и постепенного развития реакции.

В ряде случаев разделение понятий химического и теплового самовозгорания является достаточно чётким. Так в случае, если первичный нагрев возник в результате экзотермической реакции окисления и окислитель не кислород воздуха, а, например, перманганат калия или концентрированная серная кислота, безусловно это химическое самовозгорание. Если же окислителем является кислород воздуха, классификация вида самовозгорания может быть не такой однозначной. Тут надо учитывать интенсивность тепловыделения в зоне реакции, скорость развития процесса и т.д.

Микробиологическое самовозгорание характерно для органических дисперсных и волокнистых материалов, внутри массива которых возможна жизнедеятельность микроорганизмов. Первичное нагревание массы материала происходит за счёт теплоты, выделяемого микроорганизмами. Повышение температуры в объёме способствует ускорению экзотермических реакций окисления и возникает процесс самонагрева материала. На

определённом этапе бактерии гибнут, а процесс продолжает развиваться уже по механизму теплового самовозгорания.

Особенностью самовозгорания является то, что оно не требует внешнего импульса, инициирующего горение, а возникает за счёт реакции гетерогенного окисления в больших объёмах вещества при относительно низких температурах окружающей среды. Из-за плохой теплопроводности массы мелкодисперсного продукта происходит накопление теплоты в его объёме, возрастает температура, и соответственно скорость химической реакции, что приводит к воспламенению материала.

Необходимо различать самовозгорание и самовоспламенение. При тепловом самовозгорании предварительный нагрев является только толчком к разогреву, а основной разогрев, приводящий к возникновению пламенного горения, идёт в массе веществ непосредственно за счёт его окисления кислородом воздуха и выделением при этом теплоты. Нагретая поверхность, чтобы обеспечить самовоспламенение вещества, должна нагреть его до критической температуры (температуры самовоспламенения), при которой произойдёт резкая интенсификация процессов термического разложения вещества с возникновением пламенного горения. Чтобы достичь критической температуры вещество должно прогреться до значительно меньших температур. Например, температура тления, которая инициирует возгорание древесных опилок составляет 295°C, а у пирофорной древесины – может опускаться до 80°C, в то время, как температура самовоспламенения составляет ~400°C. Достижение критической температуры идёт достаточно медленно, в то время, как до самовоспламенения процесс может идти достаточно быстро, если источник теплоты будет достаточно мощным [1].

Оценка пожаро- и взрывоопасности судов и их оборудования происходит при:

– учёте пожароопасных свойств конструкций судна и его оборудования, а также учёте аварийного режима выхода горючих твёрдых, жидких и газообразных веществ в конкретные отсеки и помещения. Это позволяет значительно снизить условия возникновения и развития пожаров и взрывов на судне.

– количестве обращающихся веществ и материалов в процессах, происходящих при эксплуатации судна.

Подходы к оценке пожаровзрывоопасности судна и его оборудования бывают:

а) детерминированные (основаны на определённой количественной дифференциации судового оборудования и перевозимых грузов на категории, классы и т.п.).

б) вероятностные (основаны на расчёте вероятностей достижения определённого уровня пожаровзрывоопасности).

Количество поступающих в помещение (отсек) веществ, которые могут образовать взрывоопасные газовоздушные или паровоздушные смеси определяются из следующих предпосылок:

1. Происходит расчётная (наиболее неблагоприятная) авария одного из механизмов (аппаратов) или трубопроводов судовых систем.

2. Всё содержимое оборудование поступает в помещение (отсек).

3. Происходит одновременно утечка веществ из трубопроводов, питающих оборудование по прямому и обратному потокам в течение времени, необходимого для отключения трубопроводов.

В общем случае для различных судов имеется разнообразное наполнение отсеков (помещений) вооружением и техническими средствами, которое значительно влияет на развитие возгорания и последующего горения:

1. Главный командный пост.

2. Центральный пост управления.

3. Реакторный отсек.

4. Паротурбинный отсек.

5. Газотурбинный отсек.

6. Дизельный отсек.
7. Отсек вспомогательных механизмов (компрессора сжатых газов, ресиверы, баллоны).
8. Румпельное отделение (помещение).
9. Цистерны топливные, масляные, рабочей жидкости.
10. Баллоны и ресиверы сжатого воздуха.
11. Камбузный блок, прачечная, баня и столовая.
12. Жилой отсек (блок) и т.д.

Поэтому необходим:

- a) учёт конструктивных характеристик судна и его оборудования, в том числе и разделительных противопожарных зон;
- b) учёт характеристик легковоспламеняющихся жидкостей, лёгких и тяжёлых топлив и масел, рабочих жидкостей гидравлики, условия их хранения и использования на судне;
- c) учёт использования аккумуляторных батарей, силового и слаботочного электрооборудования на судне;
- d) учёт развития каскадных аварий, в том числе с возгораниями и взрывами аэрозолей твёрдых и жидких веществ.
- e) учёт применения средств и систем защиты оборудования и членов экипажа от пожаров и взрывов.
- f) учёт вывода членов экипажа из отсека (помещения) с возникновением пожара или возможностью взрыва.

В качестве примера применения комплексных мероприятий по предотвращению взрывов и пожаров, и предотвращения взрывов и пожаров во время обучения членов экипажа на водолазном боте проекта 535 [3, 4] приведены ниже (рисунок 1):

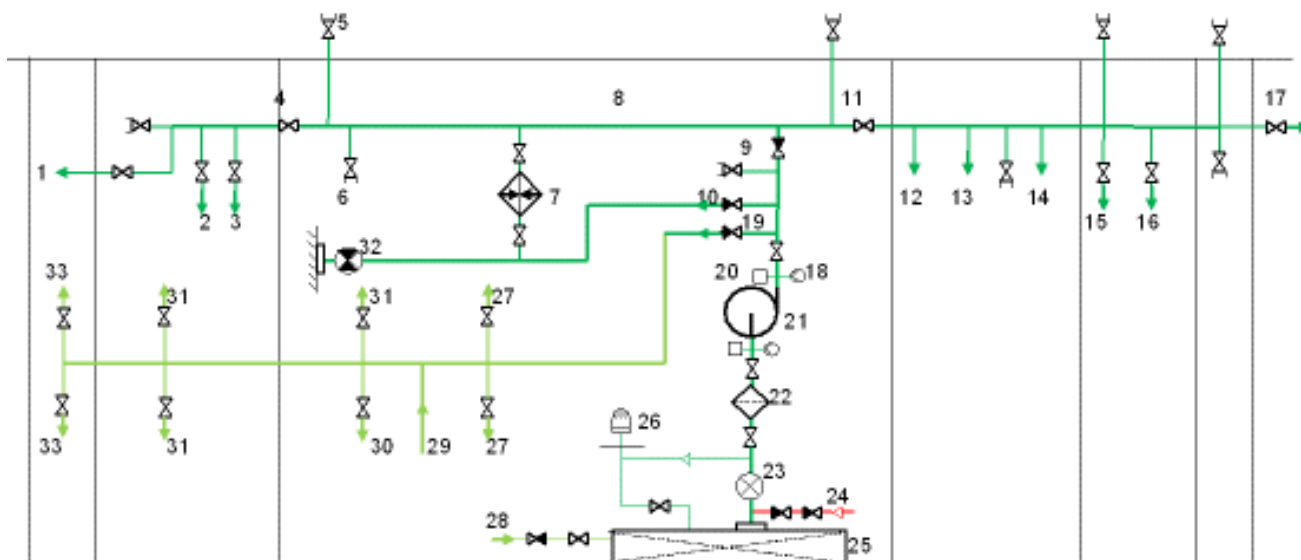


Рисунок 1 – Противопожарная водяная система водолазного бота

1, 3, 12, 27, 30, 31, 33 – охлаждение блока осушки, охлаждение холодильников гоппкалитовых приставок, гироскопа, главного двигателя, главного упорного подшипников и дейдвудных подшипников; 2 – заполнение шкафа осветительных ракет; 4, 1 – разобщительные клапаны, 5, 6 – пожарные концевые клапаны; 7 воздухоохладитель; 8 – магистральный трубопровод; 9 – пожарный клапан; 10 – от насоса гранторазмыва; 13, 16 – эжекторы сточный и хозяйственно-бытовой систем; 14, 15 – цистерны фекальных и сточных вод; 17 – обмыв якорной цепи; 18, 20 – манометр и датчик давления; 19 – клапан аварийного охлаждения; 21 – пожарный насос; 22 – грязевая коробка; 23 – приемный кингстон; 24 – паровое продувание; 25 – кингстонный ящик; 26 – головка воздушного трубопровода; 28 – промывка кингстонного ящика; 29 – от насоса охлаждения; 32 – отливной кингстон трубопровода нулевого расхода

- 1) Предотвращение возгорания в помещении бота.
- 2) Предотвращение возгорания и пожара на палубе бота (основной и резервный вариант использования средств пожаротушения).
- 3) Предотвращение возгорания и пожара в машинном помещении бота (основной и резервный вариант использования средств пожаротушения).
- 4) Предотвращение возгорания и пожара в отсеке бота (основной и резервный вариант использования средств пожаротушения).

Самовозгорание в помещениях бота может произойти тепловое, химическое и микробиологическое в зависимости от наличия тканей промасленной ветоши, личных вещей членов экипажа и шкиперского имущества [5]. Такие возгорания необходимо тушить водой, направляя струю на очаг возгорания.

Самовозгорание на палубе бота может произойти тепловое и химическое различных материалов, по причине их наличия для проведения различных работ на палубе. Такие возгорания также необходимо тушить водой, направляя струю на очаг возгорания.

Самовозгорание в машинном помещении может произойти тепловое, и химическое и микробиологическое различных материалов, в том числе и горючих, по причине их наличия при эксплуатации для проведения различных работ в машинном отделении. Такие возгорания также необходимо тушить водой, направляя струю на очаг возгорания или на переборку выше очага возгорания.

Основные действия экипажа при возникновении возгорания на борту бота приведены ниже [6, 7].

При возгорании на палубе бота необходимо использовать любые два пожарных крана, находящиеся поблизости к очагу горения. При этом струю воды необходимо направлять на любое препятствие или стенку за очагом возгорания, а по мере тушения очага возгорания – на зону горения. Если произошло возгорание на воде или пирсе, необходимо сразу направлять струю воды на зону горения.

При возгорании в помещениях бота необходимо также использовать два пожарных крана, находящихся поблизости в аварийном помещении, на палубе, через входную дверь или в соседнем помещении через проходную ближайшую к очагу дверь. Если произошло возгорание в машинном отделении, необходимо использовать оба пожарных крана отделения или если это невозможно – второй ближайший пожарный кран из соседнего помещения или с палубы.

При возгорании блока осушки, холодильника гопкалитовых приставок и шкафа осветительных ракет воду подавать в холодильник, шкаф или на блок осушки.

Подготовка к борьбе с пожарами для военных и гражданских морских специальностей имеет как общую основу, так и существенные специфические особенности. Рассмотрение этих особенностей важно для правильного проектирования учебных программ и тренажёрных сценариев.

Специфика военной подготовки состоит в необходимости освоения противопожарных действий в условиях, характерных для боевого повреждения: пожар от попадания боеприпаса, разрушение штатных систем пожаротушения, необходимость работы в условиях крена, частичного разрушения конструкций, угрозы вторичного взрыва боеприпасов. Военный моряк должен уметь организовать борьбу с пожаром даже при потере офицерского состава – взять на себя командование в критической ситуации.

Специфика гражданской подготовки определяется, прежде всего, разнообразием типов перевозимых грузов. Вахтенный помощник капитана контейнеровоза обязан знать особенности тушения самовозгорающихся грузов, а механик танкера – специфику взрывозащиты на объектах с нефтепродуктами. Кроме того, гражданский флот предполагает наличие на борту пассажиров, что добавляет задачу организации массовой эвакуации, принципиально отсутствующую в военной службе.

Тренажёрный комплекс кафедры, таким образом, должен обладать гибкостью:

предусматривать как базовые сценарии, единые для военной и гражданской подготовки, так и специализированные модули, учитывающие профессиональную специфику каждой группы обучающихся. Такая модульная архитектура учебных программ позволяет рационально использовать ресурсы тренажёрного комплекса, обеспечивая при этом необходимую глубину специализации.

На тренажёрах кафедры можно отрабатывать действия обучаемых по предотвращению возгорания и пожара на палубе и в отсеках (помещениях) водолазного бота. При этом можно задавать временные отрезки возникновения возгорания в одном или нескольких отсеках. При этом обучаемым необходимо выполнять действия во времени по тушению пламени пожара, задаваемые инструктором, а также возгорания (пожара) в различных отсеках (помещениях).

Эффективность тренажёрной подготовки определяется не только качеством технической базы, но и методической системой, в рамках которой эта база используется. Анализ отечественного и зарубежного опыта позволяет выделить несколько ключевых методических принципов.

Принцип поэтапного нарастания сложности предполагает, что обучающийся последовательно осваивает задачи от простых к сложным. На первом этапе – изучение устройства судовых систем пожаротушения, классификации пожаров, физических и химических основ горения. На втором – работа с отдельными видами пожаротушающего оборудования в штатных условиях. На третьем – отработка комплексных действий в условиях смоделированного пожара одного класса. На четвёртом – работа в условиях комбинированных аварий: пожар + пробоина, взрыв + пожар + потеря управления.

Принцип реалистичности стрессового воздействия требует постепенного включения в учебные сценарии факторов, моделирующих психологическое давление реальной аварии: ограничение времени, работа в СИЗОД (средствах индивидуальной защиты органов дыхания), снижение видимости из-за задымления, ситуационная неопределённость. Без этого компонента тренажёрная подготовка остаётся лишь «сухой» отработкой алгоритмов и не формирует стрессоустойчивости.

Принцип рефлексивного анализа предполагает обязательный разбор каждого тренировочного упражнения с детальным анализом допущенных ошибок. Современные тренажёрные комплексы, как правило, оснащены системами видеозаписи, что позволяет инструктору наглядно продемонстрировать курсанту допущенные ошибки и их возможные последствия. Именно разбор ошибок на тренажёре, а не их совершение в реальных условиях, является главным механизмом формирования профессионального мастерства.

Принцип командного взаимодействия требует регулярного проведения групповых тренировок, в ходе которых отрабатываются не только индивидуальные действия, но и согласованность экипажа как единого организма. Практика показывает, что большинство катастрофических последствий пожаров на судах обусловлено не незнанием правил пожаротушения отдельными членами экипажа, а нарушенной координацией их совместных действий: несвоевременной передачей информации, дублированием одних функций при игнорировании других.

Выводы. Пожары и взрывы на морских судах продолжают оставаться одной из ведущих причин катастроф на море, и в структуре этих катастроф доминирующую роль играет человеческий фактор. Это фундаментально означает, что именно качество подготовки личного состава является ключевым фактором снижения аварийности – не только техническое совершенствование систем пожаротушения.

Предотвращение возгорания на водолажном боте выполняются с помощью организационно-методических мероприятий, которые не всегда выполняются.

- 1) Обязанности членов экипажа не должны выполняться халатно.
- 2) Противопожарная водяная система конструктивно выполнена с некоторыми недостатками, например, не подключены к пожарной магистрали насосы охлаждения энергетической установки и грунторазмыва (отсутствуют трубопроводы с клапанами).

Актуальность развития тренажёрной базы одинаково высока как для военных, так и для гражданских морских специальностей, несмотря на различие их конечных профессиональных задач. Общий базис компетенций открывает возможности для создания унифицированных тренажёрных комплексов, дополненных специализированными модулями для каждого профиля подготовки.

Список использованной литературы:

1. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДНВ-78) с поправками. Лондон: ИМО, 2011. 450 с.
2. IMO Model Course 2.03: Advanced Training in Fire Fighting. 2023. 191 p. URL: <https://imo-epublications.org/content/books/9789280117608> (дата обращения: 10.01.2026).
3. ГОСТ 12.1.044-89. (ИСО 4589-84). Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. М.: Стандартиформ, 2006.
4. Чешко И.Д., Плотников В.Г. Анализ экспертных версий возникновения пожара. М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2010. 706 с.
5. Наставление по борьбе за живучесть судна. НБЖС, РД 31.60.14-81. СПб.: ЦНИИМ России, 2007.
6. Кулагин А.В. Пример моделирования применения противопожарных судов // Технологии техносферной безопасности. 2021. № 3 (93). С. 183-198. DOI: 10.25257/TTS.2021.3.93.183-198.
7. Шевцова А.В. Обеспечение пожарной безопасности на судах // Инновационные процессы в науке и технике XXI века: материалы XX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, ученых, педагогических работников и специалистов-практиков. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. С. 389-392.
8. Габриэлян С.Г., Добровенко С.В. Обеспечение пожарной безопасности при утилизации надводных кораблей с ядерными энергетическими // Пожарная безопасность. 2018. № 4. С. 72-77.
9. Кудрявцев Д.И., Янченко А.Ю., Андросенко Н.В. Вопросы регулирования пожарной безопасности на водном транспорте // Экономика и управление. 2020. Т. 26. № 3 (173). С. 233-241. DOI: 10.35854/1998-1627-2020-3-233-241.
10. Мартыненко В.И., Ставицкий М.Г. Когда на борту пожар. Л.: Судостроение, 1983. 192 с.

References:

1. *Mezhdunarodnaya konventsiya o podgotovke i diplomirovanii moryakov i nesanii vakhty 1978 goda (PDNV-78) s popravkami* [International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, 1978 (STCW-78), as amended]. London, IMO Publ., 2011, 450 p. (In Russian).
2. IMO Model Course 2.03: Advanced Training in Fire Fighting. 2023, 191 p. (In English). Available at: <https://imo-epublications.org/content/books/9789280117608> (accessed 10.01.2026).
3. *GOST 12.1.044-89. (ISO 4589-84). Sistema standartov bezopasnosti truda (SSBT). Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov. Nomenklatura pokazateley i metody ikh opredeleniya* [State Standard 12.1.044-89. (ISO 4589-84). Occupational safety standards system (OSS). Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indicators and methods for their determination]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. (In Russian).
4. Cheshko I.D., Plotnikov V.G. *Analiz ekspertnykh versiy vozniknoveniya pozhara* [Analysis of expert versions of fire origin]. Moscow, FGU VNIPO EMERCOM of Russia Publ., 2010. 706 p. (In Russian).

5. *Nastavleniye po bor'be za zhivuchest' sudna. NBZHS, RD 31.60.14-81* [Instructions for the fight for ship survivability. NBZhS, RD 31.60.14-81.]. St. Petersburg, Central Research Institute of Marine Engineering of Russia Publ., 2007. (In Russian).
6. Kulagin A.V. Primer modelirovaniya primeneniya protivopozharnykh sudov [An example of modeling the use of fire-fighting vessels]. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti* [Technologies of Technosphere Safety], 2021, no. 3 (93), pp. 183-198. (In Russian). DOI: 10.25257/TTS.2021.3.93.183-198.
7. Shevtsova A.V. Obespecheniye pozharnoy bezopasnosti na sudakh [Fire safety on ships]. *Innovatsionnyye protsessy v nauke i tekhnike XXI veka: materialy 20 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov, uchenykh, pedagogicheskikh rabotnikov i spetsialistov-praktikov* [Proceedings of the 20th International scientific and practical conference of students, graduate students, scientists, teachers and practitioners “Innovative processes in science and technology of the 21st century”], Tyumen, Tyumenskiy industrial'nyy universitet Publ., 2023, pp. 389-392. (In Russian).
8. Gabrielyan S.G., Dobrovenko S.V. Obespecheniye pozharnoy bezopasnosti pri utilizatsii nadvodnykh korablye s yadernymi energeticheskimi [Ensuring fire safety during the disposal of surface ships with nuclear power plants]. *Pozharnaya bezopasnost'* [Fire Safety], 2018, no. 4, pp. 72-77. (In Russian).
9. Kudryavtsev D.I., Yanchenko A.YU., Androsenko N.V. Voprosy regulirovaniya pozharnoy bezopasnosti na vodnom transporte [Issues of fire safety regulation in water transport]. *Ekonomika i upravleniye* [Economics and Management], 2020, vol. 26, no. 3 (173), pp. 233-241. (In Russian). DOI: 10.35854/1998-1627-2020-3-233-241.
10. Martynenko V.I., Stavitskiy M.G. *Kogda na bortu pozhar* [When there is a fire on board]. Leningrad, Sudostroenie, 1983, 192 p. (In Russian).

Сведения об авторе / Information about author

Свешников Виталий Витальевич	канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент, доцент кафедры Эксплуатации судовых энергетических установок Черноморское высшего военно-морского ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова 299028, г. Севастополь, ул. Павла Дыбенко, 1А vitaliy_sv.sev@mail.ru
Sveshnikov Vitaly Vitalievich	Ph. D (Engin.), Senior Researcher, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ship Power Plant Operation Black Sea Higher Naval Order of the Red Star School named after P.S. Nakhimov 299028, Sevastopol, Pavla Dybenko str., 1A vitaliy_sv.sev@mail.ru