



ОБЗОР МЕЖДУНАРОДНЫХ ДОКУМЕНТОВ

УДК 629.541:629.5.06
EDN KPMZOS

УТОЧНЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ МК СОЛАС К НАДЕЖНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПРАВИЛ РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

В.К. Шурпьяк, канд. техн. наук, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

Д.С. Семионичев, канд. техн. наук, Российский морской регистр судоходства, 191186 Россия, Санкт-Петербург, Миллионная ул., 7А, e-mail: semionichev.ds@rs-class.org

В статье проведен анализ требований по обеспечению надежности и живучести судовых энергетических установок (СЭУ) и их элементов. Сформулированы причины и проблемы, препятствующие применению классического подхода оценки надежности к механическому оборудованию СЭУ, рассмотрена необходимость учета медленно протекающих деградиационных процессов, которые приводят к аварийным ситуациям. Описаны требования Правил Российского морского регистра судоходства по обеспечению живучести СЭУ. Произведен анализ возможных схем резервирования элементов систем, применяемых на морских судах и регламентированных нормативными документами Регистра. На примере характерного аварийного случая показана связь опасности потери палубных контейнеров с надежностью работы систем СЭУ. Определены положения МК СОЛАС, содержащие двойные толкования в требованиях по обеспечению бесперебойной работы системы смазочного масла главного двигателя и предложена формулировка по корректировке. Цель работы — предложить корректировку требований МК СОЛАС для повышения надежности работы СЭУ и уменьшения вероятности возникновения аварийных случаев, результатом которых может стать гибель судна, потеря груза, загрязнение окружающей среды. Предлагаемый подход актуален в связи с ожидаемым расширением автономного судоходства.

Ключевые слова: СЭУ, надежность элементов СЭУ, живучесть СЭУ, потеря контейнеров.

Для цитирования: Шурпьяк В.К. Уточнение требований МК СОЛАС к надежности и живучести судовых энергетических установок на основе анализа правил Российского морского регистра судоходства / В.К. Шурпьяк, Д.С. Семионичев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2026. — Т. 56, № 2. — С. 199–211. — EDN KPMZOS.

SPECIFICATION OF SOLAS REQUIREMENTS FOR THE RELIABILITY AND SURVIVABILITY OF MARINE POWER PLANTS BASED ON THE RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING RULES ANALYSIS

V.K. Shurpyak, PhD, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

D.S. Semionichev, PhD, Russian Maritime Register of Shipping, 191186 Russia, St. Petersburg, Millionnaya ul., 7A, e-mail: semionichev.ds@rs-class.org

The article analyzes the requirements for ensuring the reliability and survivability of ship's power plants (SPP) as well as their elements. The article presents the reasons and problems that hinder the use of the classical approach to assessing the reliability of mechanical equipment in SPP, the need to take into account slow-flowing degradation processes that lead to emergencies is considered. The requirements of the Register Rules for ensuring the survivability of the SPP are described. The analysis of possible redundancy schemes for system elements used on sea vessels and regulated by the Rules of the Registry is carried out. Using the example of a typical emergency, the relationship between the risk of loss of deck containers and the reliability of SPP systems is shown. The SOLAS provisions containing a double interpretation of the requirements for ensuring uninterrupted operation of the oil lubrication system of the main engine are defined, and a wording for correction is proposed. The aim of the work is to propose an adjustment to the SOLAS requirements to increase the reliability of the SPP and reducing the likelihood of accidents involving maritime vessels, which may result in the loss of the vessel, cargo, or environmental pollution. This approach is relevant due to the expected expansion of autonomous shipping.

Key words: SPP, reliability of SPP elements, survivability of SPP, loss of containers.

For citation: Shurpyak V.K., Semionichev D.S. Specification of SOLAS requirements for the reliability and survivability of marine power plants based on the Russian Maritime Register of Shipping Rules analysis. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 2. P. 199–211. EDN KPMZOS. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время судовые энергетические установки (СЭУ) проходят новые этапы своего развития, что объясняется необходимостью реагировать на новые вызовы, к которым можно отнести: появление и активное внедрение новых видов топлива, новых технологий получения энергии на судах, сокращение численности экипажей вплоть до полного отказа от нахождения людей на борту на морских автономных надводных судах (МАНС), которые становятся все более востребованными. Для того чтобы реализовать полностью автономное судно, нужно достичь гораздо более высокого уровня надежности механического оборудования, обеспечивающего движение судна и получение электроэнергии, необходимой для работы судовых систем и связи судна с оператором. Таким образом, задача повышения надежности СЭУ получает новую актуальность в связи с развитием технологий.

При проектировании СЭУ определяющим фактором является устойчивость ее элементов к воздействию случайных событий, влияющих на надежность работы, что крайне важно с точки зрения безопасной эксплуатации. Следует особо отметить, что Международная морская организация (ИМО) последовательно решает задачи повышения безопасности мореплавания путем внедрения формализованной оценки безопасности (ФОБ) для разработки нормативных документов, используемых при проектировании и эксплуатации судов [1].

При анализе надежности технических средств и систем используется, как правило, классическая теория надежности, основанная на статистических данных об эксплуатационных отказах и математических методах их обработки. Такой подход получил широкое применение в технике и технической научной литературе, в том числе применительно к СЭУ [2, 3], но до сих пор не в полной мере применяется на практике в правилах классификационных обществ (КО) ни по отношению к механическому оборудованию, ни по отношению к корпусным конструкциям.

Целями настоящей статьи являются обоснование предложений о необходимости резервирования компонентов систем СЭУ с регламентацией времени подключения резервного оборудования и выработка предложений по корректировке требований МК СОЛАС для повышения надежности работы СЭУ.

Для достижения поставленных целей должны быть решены следующие задачи:

- анализ обоснованности применения классической теории надежности при оценке безотказности механического оборудования СЭУ;
- систематизация и определение применимости к СЭУ схем резервирования оборудования;

- оценка опасности недостаточной надежности вспомогательных систем, обслуживающих главный двигатель, на примере аварийного происшествия с судном *Fortune Trader*;
- анализ требований к надежности и живучести СЭУ в правилах Российского морского регистра судоходства;
- выработка предложений, направленных на уточнение требований глав II-1 и II-2 Конвенции МК СОЛАС.

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ К СЭУ

Отказы случаются практически во всех элементах СЭУ, но их влияние на функционирование судна в целом различно. Отказ главного двигателя оказывает критическое влияние на безопасное функционирование судна, поэтому повышение надежности СЭУ остается актуальной задачей, но есть особенности, которые препятствуют рационально применять классический аппарат для оценки надежности СЭУ на практике.

Классическая теория надежности была в свое время разработана на основе теории вероятности для оценки надежности компонентов изделий радиоэлектронной промышленности, поэтому математическая теория надежности может быть применена к объектам и системам другой природы с большой осторожностью. Отказ механического оборудования чаще всего связан с нарушением прочности и происходит либо в случае развития деградационных процессов, либо в момент, когда некая физическая величина, характеризующая нагрузку, превышает определенное значение, обычно называемое расчетным, характеризующее прочность; в качестве примера можно привести баллон с газом, находящимся под давлением: если величина давления регулируется и ограничена, например, предохранительным клапаном, а прочность баллона проверена после постройки, то такой отказ перестает быть внезапным случайным событием.

Следовательно, для обеспечения прочности и безотказной работы необходимо учитывать только медленно протекающие и контролируемые деградационные процессы, которые постепенно приводят к уменьшению запаса прочности. Наступление отказа из-за потери прочности в этих условиях можно не относить к случайным событиям, а значит, и применять математический аппарат оценки надежности, основанный на теории вероятности будет не совсем корректно. Можно лишь говорить о скорости протекания деградационных процессов как о величине случайной, а это требует несколько другого подхода при применении теории надежности к механическому оборудованию. В работе [4] были рассмотрены ограничения по применению традиционной математической теории надежности к механическим элементам транспортных машин и сделан вывод о том, что расчет надежности механической системы по схемам с параллельным и последовательным соединением элементов — необходимое, но недостаточное условие для правильного суждения о надежности механических систем, поскольку результат расчета не учитывает разницу в протекании физико-химических процессов в деталях и отдельных звеньях механической системы под влиянием действующих нагрузок и окружающей среды.

Учет разницы скоростей протекания деградационных процессов в судовых системах на основе классического подхода количественной оценки надежности, как результат расчета изменения вероятности отказа в процессе деградации, представляется сложной задачей, которая хоть и может быть теоретически решена с применением имитационного моделирования, однако необходимость достоверной информации, характеризующей показатели надежности, точности учета геометрических и прочностных отклонений, а также моделирования профиля нагрузки отдельных элементов системы делают ее решение трудоемким и труднопроверяемым.

При этом формальный аппарат теории надежности таков, что не возникает никаких затруднений в применении его к любым системам, механическим в том числе. Получаемые при этом результаты и прогнозные оценки надежности выглядят правдоподобными, но в значительной степени расходятся с действительными значениями, причем это выявляется гораздо позднее, после длительных сроков эксплуатации и накопления статистики по отказам.

Классификационные общества (КО) применяют другой подход к обеспечению надежности и живучести СЭУ в своих нормативных документах и в практической деятельности. В нормативных документах КО отсутствуют требования, регламентирующие количественные значения показателей надежности механического оборудования: безотказности (интенсивность отказов и среднее время наработки на отказ), долговечности (средний срок службы), ремонтпригодности (среднее время восстановления), сохраняемости (допустимый срок хранения). Хотя некоторые поставщики судового оборудования сообщают значения этих параметров в технических условиях на поставку, КО не требуют эти параметры ни сообщать, ни выполнять, и в случае, если поставщик добровольно их заявляет, не проверяют и не подтверждают эти значения. Для этого

есть свои причины, которые можно сформулировать как проблемы применения классического подхода оценки надежности к механическому оборудованию СЭУ, перечисленные ниже.

1. Низкая надежность (достоверность) данных о надежности механического оборудования СЭУ. Отсутствие достоверных данных об отказах различных элементов СЭУ и поломках отдельных элементов, не приведших к авариям.

2. Элементы механических установок гражданских судов не проходят испытаний на надежность. Классификационные общества ограничиваются испытаниями с некоторой перегрузкой, обычно незначительной, чтобы не повредить оборудование и не повлиять отрицательно на срок его службы.

3. Затруднения при прогнозировании внешних нагрузок, возникающих в течение всего срока эксплуатации судна.

4. Широкое разнообразие судового механического оборудования, малая серийность и уникальность отдельных образцов и изделий.

5. Длительный срок эксплуатации, часто за пределом расчетного ресурса оборудования.

6. Отсутствие непрерывного мониторинга состояния объекта в процессе эксплуатации.

Требования КО к прочности конструкций, влияющих на безопасность, основаны на концепции коэффициентов запаса. В этом случае расчетное условие прочности имеет вид

$$F \leq S/K,$$

где F — параметр действующей нагрузки;

S — параметр сопротивления конструкции;

K — коэффициент запаса по параметру, характеризующему сопротивление или коэффициент безопасности ($K > 1$).

Выполненный в работе [1] анализ результатов обработки отказов ГД позволил сделать вывод, что расчеты вероятности отказов на основе статистических данных не дают объективной информации и не могут быть использованы для прогнозирования отказов других двигателей и планирования технического обслуживания по состоянию, но они позволяют выявить основные причины отказов, полных и частичных, то есть идентифицировать опасность возникновения отказа и принять меры для уменьшения или исключения последствий.

Чтобы обеспечить безопасность СЭУ, необходимо оперировать двумя понятиями, которые по сути являются двумя составляющими безопасности судна и могут быть определены следующим образом:

• **надежность СЭУ** — способность установки поддерживать управляемость судна и его движение с заданной скоростью;

• **живучесть СЭУ** — способность установки сохранять свою работоспособность в чрезвычайных обстоятельствах: при аварии, пожаре, взрыве, затоплении отсека и других повреждениях.

Предлагаемые для СЭУ определения не противоречат аналогичным определениям, данным в ГОСТ Р 27.102—2021 для техники в целом [5].

Надежность характеризует работоспособность установки в нормальных условиях эксплуатации. Живучесть характеризует работоспособность установки в чрезвычайных, аварийных ситуациях.

Основной способ повышения надежности — резервирование особо ответственного оборудования. Основной способ повышения живучести — разделение СЭУ на несколько автономных установок и расположение их в отдельных водонепроницаемых отсеках.

КЛАССИФИКАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СЭУ

Надежность любой сложной системы зависит от надежности ее отдельных элементов и структуры системы, которая воспроизводится для анализа путем построения структурно-логической схемы. Поэтому для сложных систем (каковой, безусловно, является пропульсивная установка судна) возможны два пути повышения надежности: повышение надежности отдельных элементов и изменение (усложнение) структурной схемы путем введения избыточных элементов, чтобы обеспечить с их помощью резервирование.

Из теории надежности [2, 6] известно, что все способы соединения элементов в структурных схемах для отражения надежности системы можно разделить на три группы, как это показано на рис. 1–3:

1) последовательное соединение элементов — надежность повышается за счет повышения надежности отдельных элементов (рис. 1);

- 2) параллельное соединение элементов — надежность повышается за счет дублирования элементов (рис. 2);
 3) смешанное соединение элементов — надежность возможно повысить за счет дублирования наименее надежных элементов (рис. 3).

Все три перечисленных способа обеспечения надежности имеют свои достоинства и недостатки, но в судостроении наиболее часто применяется третий способ, который можно рассматривать как компромисс между надежностью и экономичностью.

При последовательном соединении элементов схема получается без резервирования, надежность такой системы может быть повышена только за счет повышения надежности отдельных элементов, структурная схема показана на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема с последовательным соединением элементов без резервирования

Преимущества:

- простота и дешевизна;
- экономия на обслуживании;
- экономия места в машинном отделении.

Недостатки:

- нет гарантии постоянной безотказной работы;
- надежность полностью зависит от поставщика оборудования;
- невозможно оценить надежность нового оборудования;
- схема может быть разрешена для некритичного оборудования.

Наиболее простым приемом повышения надежности системы на первый взгляд представляется повышение надежности отдельных элементов, однако его практическая реализация может оказаться невозможной: как правило, высоконадежные элементы имеют большие габариты, массу и стоимость, проверка их надежности требует длительных и дорогостоящих испытаний образцов. КО, включая Регистр, не требуют проведения ресурсных испытаний и испытаний на надежность элементов механического оборудования по причине их высокой стоимости и длительности. Полноценные испытания на надежность не могут пройти бесследно для испытуемого образца: изделие либо приходит в негодность, либо теряет значительную часть своего ресурса. При этом для получения достоверного результата требуется проведение ресурсных испытаний нескольких однотипных изделий. Ни производитель, ни судовладелец не согласятся пойти на такие дополнительные расходы.

Для повышения надежности всей системы без повышения надежности отдельных ее элементов применяют структурную избыточность, то есть включение в схему объекта дополнительных, резервных элементов, которые выполняют функции основных элементов: активируются при выходе из строя основных либо работают параллельно с частичной нагрузкой, и в случае выхода из строя одного из резервируемых элементов резервный принимает на себя его нагрузку.

При параллельном соединении элементов надежность повышается за счет резервирования элементов путем их полного дублирования; структурная схема показана на рис. 2.

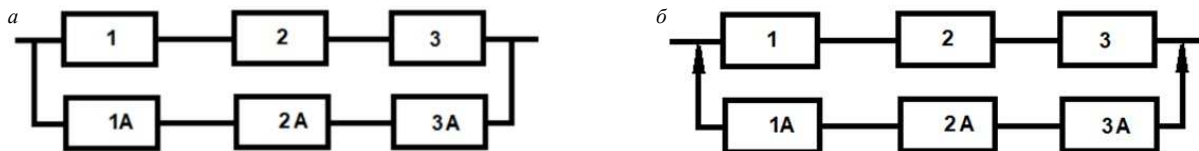


Рис. 2. Структурная схема с параллельным соединением элементов

Преимущества:

- гарантируется непрерывная безотказная работа;
- можно выполнять ремонт и техническое обслуживание отдельных элементов без остановки системы;
- данная схема может быть применима для критически важного оборудования.

Недостатки:

- высокая стоимость;
- трудности с размещением в машинном отделении;
- увеличение длины трубопроводов, кабелей, количества фитингов и т.д.;
- увеличение затрат на техническое обслуживание.

Гибридная схема с резервированием отдельных элементов. При такой схеме надежность повышается за счет дублирования отдельных наименее надежных элементов. Такой вид резервирования наиболее широко применяется в системах судовых энергетических установок (СЭУ), структурная схема показана на рис. 3.

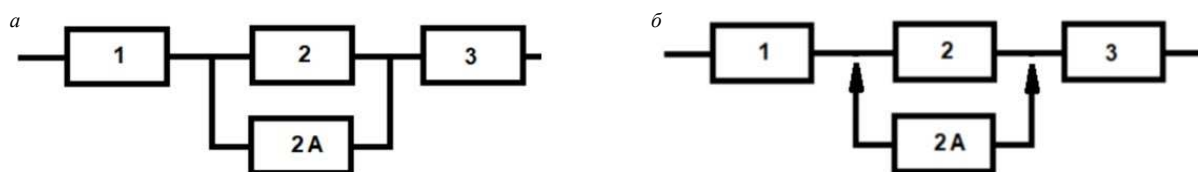


Рис. 3. Структурные схемы с различными способами соединения элементов: а — схема с непрерывным резервированием; б — схема резервирования с замещением

Гибридная схема соединения элементов наиболее часто применяется в судостроении, большинство классификационных обществ (КО) требуют обязательного резервирования «активных» элементов жизненно важных для работы главного двигателя компонентов систем. При этом некоторые КО дают описания активных элементов, таких как насосы топливные, масляные, охлаждения, компрессоры пускового воздуха; к пассивным элементам КО относят трубы, кабели, запорную арматуру.

Гибридная схема имеет следующие преимущества и недостатки.

Преимущества:

- средняя стоимость;
- средняя стесненность в машинном отделении.

Недостатки:

- нет гарантии непрерывного времени безотказной работы;
- надежность зависит от поставщиков нерезервированного оборудования;
- невозможно объективно оценить надежность нового незарезервированного оборудования.

При этом схемы с резервированием разделяют на схемы с непрерывным резервированием (на рис. 2 и 3 слева) и резервированием с замещением (на рис. 2 и 3 справа).

Надежность системы с замещением зависит не только от надежности резервируемых элементов, но и от надежности средств подключения резерва.

Для применения схемы смешанного соединения элементов необходимо определиться с понятиями, ответив на три вопроса.

1) Какое событие (или какой отказ) следует считать критическим отказом (т.е. неприемлемым событием) для СЭУ?

Мы считаем, что это должна быть потеря хода судна и рулевого управления.

2) Какой элемент следует считать недостаточно надежным и требующим резервирования?

В стандарте SOLAS (правило 26.3/II-1) указаны три вспомогательные системы главного двигателя, которые имеют решающее значение для поддержания работы судна: подача топлива, циркуляция смазочного масла и охлаждение.

3) Какое время на замену или восстановление этого элемента может быть отведено?

В МК СОЛАС (SOLAS MC, Rule 26.3/II-1) метод замещения и допустимое время замены не указаны: «Means shall be provided whereby normal operation of propulsion machinery **can be sustained or restored** even though one of the essential auxiliaries becomes inoperative» (Должны быть предусмотрены средства, позволяющие поддерживать **или восстанавливать** нормальную работу силовой установки даже в случае выхода из строя одного из основных вспомогательных элементов). Обратите внимание на слова «can be ... restored» (может быть восстановлен) — время восстановления не указано. Иногда в штормовых условиях время, необходимое для восстановления, имеет решающее значение.

ПОСЛЕДСТВИЯ НЕДОСТАТОЧНОЙ НАДЕЖНОСТИ СЭУ

Каковы последствия недостаточной надежности вспомогательных систем, обслуживающих главный двигатель? Это можно показать на примере одного происшествия.

Судно «Fortune Trader» покинуло порт Новороссийск и направилось в порт Кланг (Малайзия) с грузом контейнеров, которые частично располагались на открытой палубе (рис. 4).



Рис. 4. Судно «Fortune Trader»

В Индийском океане судно попало в суровые погодные условия: шторм со скоростью ветра 50 м/с, высотой волн 9–10 м. Судно успешно боролось со штормовой погодой до тех пор, пока не возникла необходимость кратковременной остановки главного двигателя. Причиной остановки стал масляный фильтр, конструкция которого не предусматривала очистки при работающем двигателе.

Из-за кратковременной остановки пропульсивной установки судно развернуло «лагом к волне» — наиболее опасное при сильном волнении положение. Из-за большой площади воздействия волны на борт в этом положении возникает сильная бортовая качка, что может привести к критическим кренам и риску опрокидывания. Кроме того, на палубные грузы действуют гидравлические удары волн, которые заливают палубу и ударяют в палубные контейнеры, создаются мгновенные скачки давления, которые могут многократно превышать усилия от веса контейнеров. Эти удары способны разрушить детали крепления груза, что приведет к его смещению или потере.

В результате через 14 минут первые 8 палубных контейнеров были смыты за борт. Экипажу потребовалось 35 минут на то, чтобы восстановить работоспособность масляного фильтра, запустить двигатель и судно начало движение нужным курсом, но отремонтировать конструкции, поврежденные во время потери хода, не удалось из-за продолжения шторма; в результате потери палубных контейнеров продолжились. В общей сложности 29 контейнеров упали за борт и 17 контейнеров были повреждены. Груз из поврежденных контейнеров впоследствии был передан для утилизации.

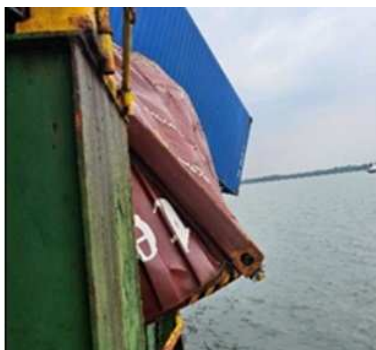


Рис. 5. Разрушение контейнеров на судне «Fortune Trader»

Если бы конструкция фильтра позволяла очистку без остановки двигателя, то контейнеры не были бы потеряны. Пример такого фильтра показан на рис. 6 справа, в отличие от фильтра слева, который не допускает очистку без остановки подачи пропускаемой среды. Время, требуемое для очистки фильтра, составляет 10–20 минут, что недопустимо много в условиях штормового моря, при незначительной разнице в цене двух таких фильтров.

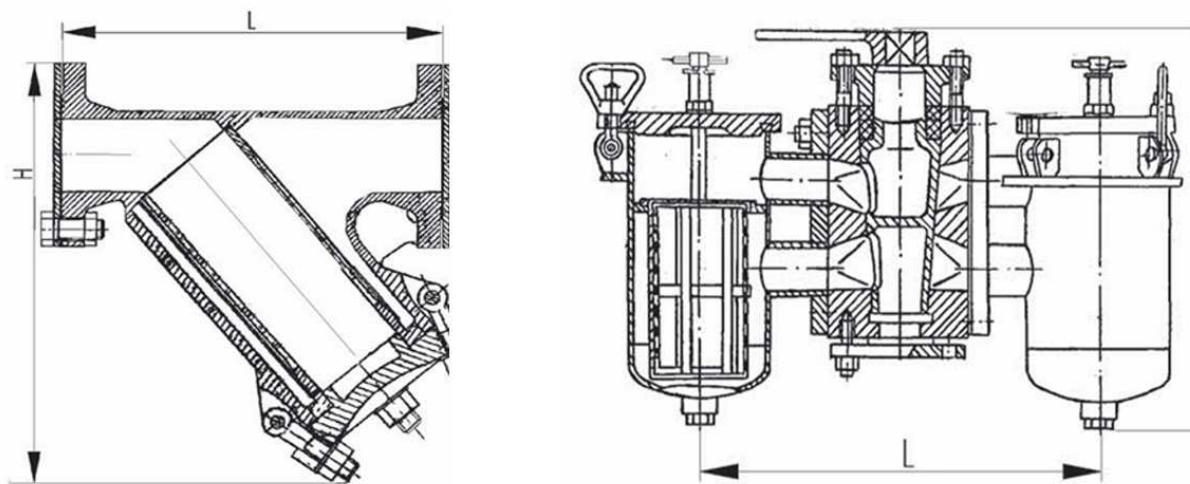


Рис. 6. Примеры исполнения масляных фильтров

Из данных Всемирного совета по судоходству (WSC) [7], представленных в ИМО в документе CCC 9/13, следует, что в результате воздействия моря за год с открытой палубы теряется в среднем 650–700 контейнеров; не исключено, что часть из них теряется именно из-за похожих случаев. Потеря груза удручает сама по себе, однако развитие ситуации с потерей хода и управляемости в штормовую погоду может привести в гораздо более серьезным последствиям.

ТРЕБОВАНИЯ К НАДЕЖНОСТИ И ЖИВУЧЕСТИ СЭУ В ПРАВИЛАХ РЕГИСТРА

В отличие от требований к надежности, требования к живучести в МК СОЛАС применяются только к пассажирским судам длиной 120 м и более. Живучесть обеспечивается за счет размещения резервного оборудования в отдельных машинных отделениях, разделенных водонепроницаемыми переборками с огнестойкостью А-60 для предотвращения быстрого распространения аварии (пожара или затопления).

Требование о возвращении пассажирских судов в порт было установлено в МК СОЛАС (правило 21/II-2) после серии аварий на пассажирских судах:

- пожар на круизном лайнере *Scandinavian Star* (158 погибших);
- авария круизного лайнера «Доктор Кинг» (погибли 90 человек).

В 2013 г. в части XVII Правил классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства появился раздел 8 «Требования к резервированию двигательной установки», который содержит требования к судам с дополнительными обозначениями RP-1, RP-1A, RP-1AS, RP-2 или RP-2S в отношении надежности и живучести силовых установок. В Правилах Регистра предусмотрено пять уровней надежности и живучести двигательной установки:

RP-1 — резервирование всех элементов вспомогательных систем;

RP-1A — требования к RP-1 + маломощная альтернативная двигательная установка;

RP-1AS — требования к RP-1A + альтернативная двигательная установка, расположенная в отдельном помещении;

RP-2 — полное резервирование всей двигательной установки;

RP-2S — требования к RP-2 + установки расположены в отдельных помещениях.

У судов с классом RP-1 пропульсивная установка обеспечивает резервирование своих компонентов, за исключением самых дорогостоящих и наиболее надежных элементов: главного двигателя, редуктора, вала и гребного винта; при этом единичный отказ в любом компоненте систем и оборудования, обслуживающих указанные компоненты, не должен приводить к потере хода, мощности и рулевого управления судном.

Пример реализации резервирования по схеме RP-1 показан на рис. 7 (резервирование с замещением отдельных элементов всех систем, обеспечивающих работу главных механизмов).

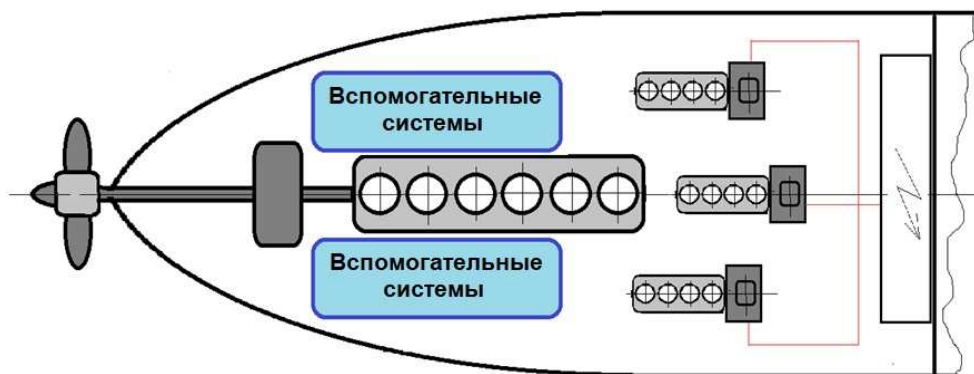


Рис. 7. Пример реализации резервирования по схеме **RP-1**

RP-1A — двигательная установка обеспечивает резервирование своих компонентов, за исключением главного двигателя, редуктора, вала и гребного винта; при этом единичный отказ в любом компоненте двигательной установки, ее вспомогательных механизмах и системах не должен приводить к потере хода и управляемости судна. Пример реализации резервирования по схеме RP-1A показан на рис. 8. В качестве резервного элемента может быть использована альтернативная установка, обеспечивающая судну движение со скоростью 6 уз или 50 % спецификационной скорости судна и управляемость, то есть резервирование выполнено с замещением всей системы, но резервный элемент имеет неполную мощность.

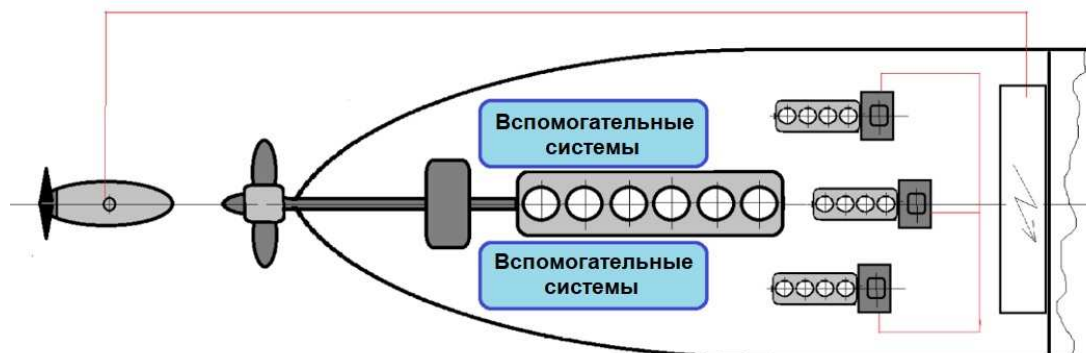


Рис. 8. Пример реализации резервирования по схеме **RP-1A**

RP-1AS — силовая установка обеспечивает резервирование своих компонентов, как это требуется для RP-1A, при этом основные двигатели или двигатели альтернативной силовой установки расположены в независимых машинных отделениях, так что потеря одного отсека из-за пожара или затопления не приведет к потере хода, мощности и рулевого управления судном. Пример реализации резервирования по схеме RP-1A показан на рис. 9. Помимо свойств, реализованных при резервировании по схеме RP-1A, добавлены требования по обеспечению живучести, так как главная и альтернативная установка должны располагаться в отдельных помещениях, разделенных водонепроницаемой переборкой с уровнем огнестойкости А-60.

RP-2 — двигательная установка обеспечивает резервирование своих компонентов и состоит из нескольких двигательных установок; при этом единичный отказ в любом компоненте двигательной установки и рулевого механизма не должен приводить к потере хода, мощности и рулевого управления судном.

RP-2S — двигательная установка обеспечивает резервирование своих компонентов, как это требуется для RP-2, и расположена в двух независимых машинных отделениях, так что потеря одного отсека из-за пожара или затопления не приведет к потере хода, мощности и рулевого управления судном, то есть резервирование выполнено с замещением всех элементов системы с полной мощностью. Схема RP-2S обеспечивает живучесть судна и соответствует требованиям МК СОЛАС (Правило 21/II-2) о возвращении в порт пассажирских судов, получивших аварийные повреждения.

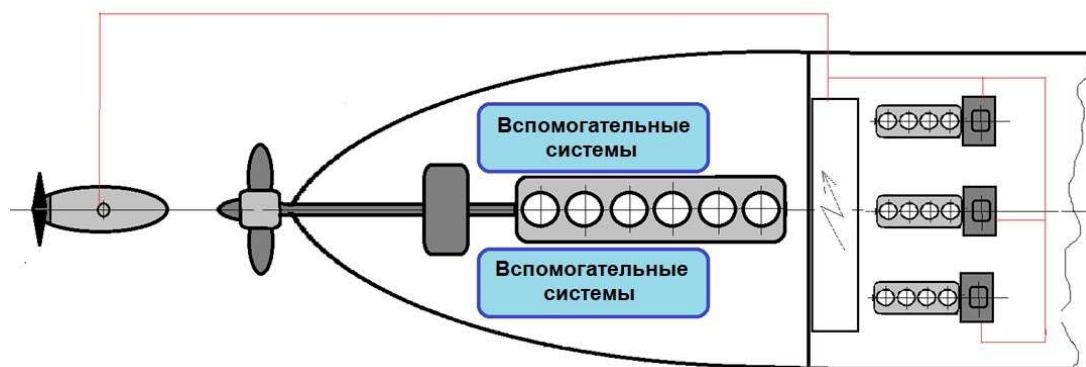


Рис. 9. Пример реализации резервирования по схеме RP-1AS

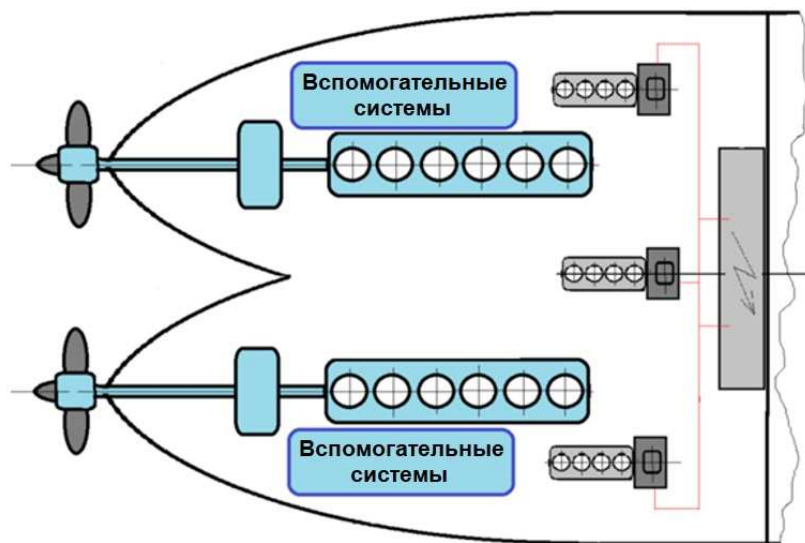


Рис. 10. Пример реализации резервирования по схеме RP-2

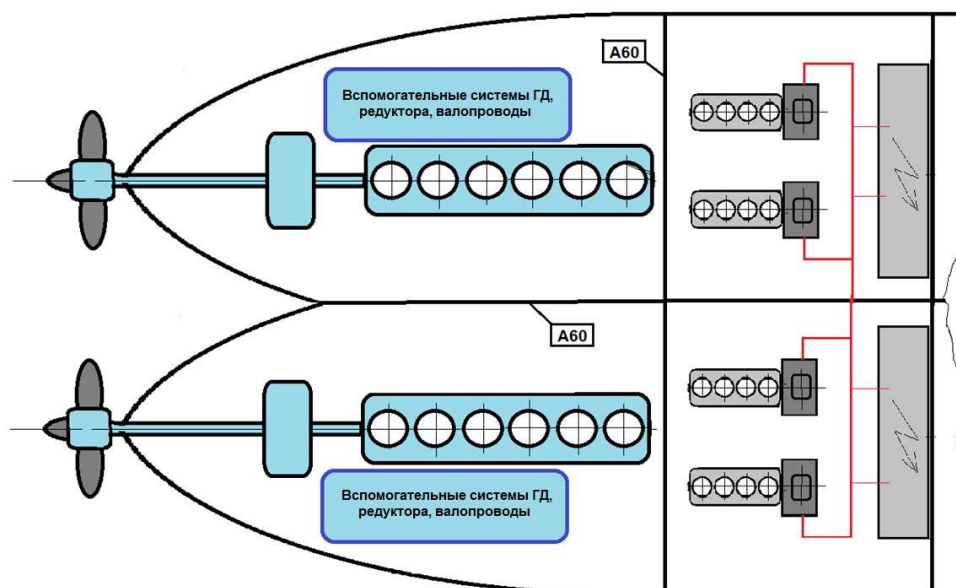


Рис. 11. Пример реализации резервирования по схеме RP-2S

Для подтверждения соответствия судна требованиям RP дополнительно должна быть представлена на утверждение следующая техническая документация:

1) результаты расчетов, демонстрирующие, что единичный отказ не приводит к потере хода и управляемости судна в соответствии с пунктом 8.5.3 части XVII Правил Регистра «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна» (для судов с дополнительными знаками RP-1A, RP-1AS, RP-2 или RP-2S). В качестве альтернативы могут быть представлены результаты модельных или натурных испытаний;

2) должен быть произведен качественный анализ вероятности и последствия отказов силовой установки и рулевого управления или FMEA компонентов силовой установки на основе дерева отказов или эквивалентного метода анализа рисков.

На момент написания статьи знаки RP-2S, RP-2 и RP-1 по результатам рассмотрения проектов были присвоены 23 судам.

ВЫВОДЫ

1. Суды с большой площадью боковой проекции, в частности суда, предназначенные для перевозки грузов на открытой палубе, являются наиболее уязвимыми к отказам элементов СЭУ в штормовых условиях. Даже кратковременная остановка главного двигателя может привести к потере и/или смещению палубного груза.

2. Надежность и живучесть двигательной установки требуют повышенного внимания со стороны проектировщиков судов и классификационных обществ. Остановка главного двигателя с потерей хода судна должна рассматриваться как критическая неисправность, то есть единичный отказ судового оборудования не должен приводить к потере хода судна.

3. Для оборудования, отказ которого приводит к потере хода судна, необходимо предусматривать резервирование с регламентацией времени подключения резервного оборудования, причем это время должно быть минимальным для недопущения развития неблагоприятной ситуации.

4. Можно предложить две меры по повышению безопасности судов:

- внести поправки в главу II-1 МК СОЛАС, предписывающие проведение очистки и технического обслуживания топливных и масляных фильтров без необходимости выключения основных двигателей;
- предложить ИМО распространить требования СОЛАС о возможности возвращения поврежденного судна в порт (Правило 21/II-2) в дополнение к пассажирским судам на другие опасные типы судов (газовозы, крупные танкеры и химовозы) или разработать для этих типов судов аналогичные требования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев В.В. Применение методологии формализованной оценки безопасности при проектировании судовой энергетической установки и ее элементов / В.В. Медведев. — СПб.: Реноме, 2008. — 328 с.
2. Смирнов О.Р. Надежность судовых энергетических установок / О.Р. Смирнов, Ф.Л. Юдицкий. — Л.: Судостроение, 1974. — 280 с.
3. Мясников Ю.Н. Основы теории надежности и диагностического обеспечения судовых энергомеханических установок: уч. пос. / Ю.Н. Мясников. — СПб.: СПбГУВК, 2010. — 183 с.
4. Плотов Ю.А. Новые подходы к анализу надежности транспортных машин / Ю.А. Плотов, Л.В. Хомич // Фундаментальные исследования. — 2004. — № 6. — С. 70–72. — [Электронный ресурс] URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=6298> (дата обращения 30.04.2026).
5. ГОСТ Р 27.102—2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения (IEC 60050-192:2015, NEQ).
6. Базовский И. Надежность. Теория и практика / И. Базовский. — М.: Мир, 1965.
7. World Shipping Council Report: Containers Lost at Sea — 2025 Update.
8. Тихонов Н.Ф. Требования к судовым энергетическим установкам (СЭУ) и их показатели надежности / Н.Ф. Тихонов, Е.Г. Шумихина, Л.С. Секлетина // Тенденции развития науки и образования. — 2021. — № 76-1. — С. 72–75.
9. Тихонов Н.Ф. Анализ требований к показателям надежности современных судовых энергетических установок / Н.Ф. Тихонов // Вопросы науки. — 2025. — № 2. — С. 73–78.
10. Мосейко Е.С. Задачи оценки рисков и предупреждения отказов судовых механических систем / Е.С. Мосейко, Е.О. Ольховик // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2022. — Т. 14, № 6. — С. 931–944.
11. Мосейко Е.С. Оценка обеспечения надежности судовых механических систем / Е.С. Мосейко, Е.О. Ольховик // Морская радиоэлектроника. — 2022. — № 2 (80). — С. 8–12.
12. Мочалин К.С. Основные причины отказов судовых энергетических установок и способы борьбы с ними / К.С. Мочалин, В.И. Силин, А.А. Приваленко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2025. — № 3. — С. 107–109.

13. Мосейко Е.С. Применение структурных методов для оценки надежности судовых механических систем / Е.С. Мосейко, Е.О. Ольховик, В.Г. Никифоров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2023. — Т. 15, № 5. — С. 834–844.
14. Тихонов Н.Ф. Влияние требований безопасности на проектирование судовых энергетических установок / Н.Ф. Тихонов // Нанотехнологии: наука и производство. — 2025. — № 4. — С. 78–84.
15. Петров А.П. Возможность использования традиционных современных судовых дизельных энергетических установок в автономном судоходстве / А.П. Петров, Г.Е. Живлюк // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2025. — Т. 17, № 1. — С. 138–147.
16. Лакомов И.В. Анализ методов расчета надежности электроэнергетических систем / И.В. Лакомов, Ю.М. Помогаев // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. — 2022. — Т. 15, № 3 (74). — С. 26–32.
17. Иванченко А.А. Развитие методологии оценки рисков эксплуатации судовых энергетических установок автономных судов на основе формализованной оценки безопасности / А.А. Иванченко, С.Н. Коржук, А.С. Кузнецов // Эксплуатация морского транспорта. — 2025. — № 3 (116). — С. 102–111.
18. Мосейко Е.С. Многоуровневая система обеспечения надежности судовых механических систем на этапах жизненного цикла / Е.С. Мосейко, Е.О. Ольховик, В.Ю. Рудь // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2024. — Т. 16, № 5. — С. 775–783.
19. Клименко Н.П. Способ ускоренного оценивания показателей надежности судовых технических средств / Н.П. Клименко, А.С. Шаратов, В.С. Чернуха // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. Серия: Морские технологии. — 2023. — № 2. — С. 66–79.
20. Петров А.П. Оценка рисков эксплуатации энергетических установок безэкипажных судов / А.П. Петров, И.И. Костылев, Г.Е. Живлюк // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 1-1 (63). — С. 110–122.
21. Коперчак О.П. Изучение методов и практических решений влияющих на техническую безопасность морских судов / О.П. Коперчак, Н.А. Халилов // Эксплуатация морского транспорта. — 2024. — № 4 (113). — С. 134–139.
22. Султанов М.М. Разработка методологии и мероприятий по обеспечению надежности оборудования энергетических систем / М.М. Султанов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2021. — Т. 23, № 5. — С. 46–55.
23. Бердник А.Н. Обеспечение надежности судовых дизелей средствами безразборной диагностики в условиях эксплуатации / А.Н. Бердник, Д.И. Андрияко // Справочник. Инженерный журнал. — 2022. — № 2 (299). — С. 42–46.
24. Гафарова А.М. Анализ причин аварийности технических систем в зависимости от надежности / А.М. Гафарова, Г.В. Хакимова // Естественные и технические науки. — 2023. — № 2 (177). — С. 226–227.
25. Мурашев Н.В. Понятия мониторинга и технической диагностики элементов судовой энергетической установки / Н.В. Мурашев, А.И. Епихин, В.В. Шкода // Эксплуатация морского транспорта. — 2022. — № 4 (105). — С. 126–130.
26. Андаева З.Т. Основные направления развития мероприятий по повышению надежности энергетических систем / З.Т. Андаева, Н.М. Ташиев, Б. Карабаев // Известия Омского технологического университета. — 2022. — № 1. — С. 72–74.

REFERENCES

1. Medvedev V.V. *Primenenie metodologii formalizovannoi otsenki bezopasnosti pri proektirovanii sudovoi energeticheskoi ustanovki i ee elementov* [Application of the formal safety assessment methodology in the design of a ship's power plant and its components]. St. Petersburg: Renome, 2008. 328 p.
2. Smirnov O.R., Yuditskii F.L. *Nadezhnost' sudovykh energeticheskikh ustanovok* [Dependability of marine power plants]. Leningrad: Sudostroenie, 1974. 280 p.
3. Myasnikov Yu.N. *Osnovy teorii nadezhnosti i diagnosticheskogo obespecheniya sudovykh energomekhanicheskikh ustanovok* [Fundamentals of the theory of dependability and diagnostic support for marine power and mechanical plants]. St. Petersburg: SPbGUVK, 2010. 183 p.
4. Plyutov Yu.A., Khomich L.V. *Novye podkhody k analizu nadezhnosti transportnykh mashin* [New approaches to the reliability analysis of transport vehicles]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research]. 2004. No. 6. P. 70–72. URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=6298> (accessed 30.04.2026).
5. GOST R 27.102—2021 Dependability in technics. Dependability of item. Terms and definitions (IEC 60050-192:2015, NEQ). (In Russ.)
6. Bazovskii I. *Nadezhnost'. Teoriya i praktika* [Dependability. Theory and practice]. Moscow: Mir, 1965.
7. World Shipping Council Report: Containers Lost at Sea — 2025 Update.
8. Tikhonov N.F., Shumikhina E.G., Sekletina L.S. *Trebovaniya k sudovym energeticheskim ustanovkam (SEU) i ikh pokazateli nadezhnosti* [Requirements for marine power plants and their dependability indicators]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the Development of Science and Education]. 2021. No. 76-1. P. 72–75.
9. Tikhonov N.F. Analysis of requirements for reliability indicators of modern marine power plants. *Voprosy nauki* [Issues in Science]. 2025. No. 2. P. 73–78. (In Russ.)
10. Moseyko E.S., Ol'khovik E.O. Tasks of risks assessment and failures prevention of the ship's mechanical systems. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova*. 2022. Vol. 14, No. 6. P. 931–944. (In Russ.)
11. Moseyko E.S., Ol'khovik E.O. *Otsenka obespecheniya nadezhnosti sudovykh mekhanicheskikh sistem* [Assessment of dependability assurance for marine mechanical systems]. *Morskaya radioelektronika* [Marine Radio Electronics]. 2022. No. 2 (80). P. 8–12.
12. Mochalin K.S., Sinitin V.I., Privalenko A.A. *Osnovnye prichiny otkazov sudovykh energeticheskikh ustanovok i sposoby bor'by s nimi* [Main causes of marine power plant failures and methods of addressing them]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East]. 2025. No. 3. P. 107–109.
13. Moseyko E.S., Ol'khovik E.O., Nikiforov V.G. Application of structural methods to assess the reliability of ship's mechanical systems. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova*. 2023. Vol. 15, No. 5. P. 834–844. (In Russ.)
14. Tikhonov N.F. *Vliyanie trebovaniy bezopasnosti na proektirovanie sudovykh energeticheskikh ustanovok* [The impact of safety requirements on the design of marine power plants]. *Nanotechnology: Science and Production*. 2025. No. 4. P. 78–84.

15. Petrov A.P., Zhivljuk G.E. Possibility of using traditional modern marine diesel power plants in autonomous shipping. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2025. Vol. 17, No. 1. P. 138–147. (In Russ.)
16. Lakomov I.V., Pomogaev Yu.M. Analysis of methods for electric power systems reliability calculation. *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2022. Vol. 15, No. 3 (74). P. 26–32. (In Russ.)
17. Ivanchenko A.A., Korzhuk S.N., Kuznetsov A.S. Development of a methodology for assessing the risks of operating marine power plants on autonomous vessels based on a formalized safety assessment. *Ekspluatatsiya morskogo transporta [Operation of Maritime Transport]*. 2025. No. 3 (116). P. 102–111. (In Russ.)
18. Moseyko E.S., Ol'khovik E.O., Rud V.U. A multi-level system for ensuring the reliability of marine mechanical systems at the stages of the life cycle. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2024. Vol. 16, No. 5. P. 775–783. (In Russ.)
19. Klimenko N.P., Sharatov A.S., Chernuha V.S. A method for accelerated evaluation of reliability indicators of ship technical means. *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University. Series: Marine Technologies*. 2023. No. 2. P. 66–79. (In Russ.)
20. Petrov A.P., Kostylev I.I., Zhivljuk G.E. To risk assessment of operation of power plants of unmanned vessels. *Marine Intellectual Technologies*. 2024. No. 1-1 (63). P. 110–122. (In Russ.)
21. Koperchak O.P., Khalilov N.A. Study of methods and practical solutions affecting technical safety of sea vessels. *Ekspluatatsiya morskogo transporta [Marine transport operation]*. 2024. No. 4 (113). P. 134–139. (In Russ.)
22. Sultanov M.M. Development of methodology and measures to ensure the reliability of energy systems equipment. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2021. Vol. 23, No. 5. P. 46–55. (In Russ.)
23. Berdnik A.N., Andriaka D.I. Ensuring the reliability of marine diesel engines by means of non-selective diagnostics in operating conditions. *Handbook. An Engineering Journal*. 2022. No. 2 (299). P. 42–46. (In Russ.)
24. Gafarova A.M., Khakimova G.V. Analysis of the causes of accidents of technical systems depending on reliability. *Natural and Technical Sciences*. 2023. No. 2 (177). P. 226–227. (In Russ.)
25. Murashev N.V., Epikhin A.I., Shkoda V.V. Concepts of monitoring and technical diagnostics of elements of a ship's power plant. *Ekspluatatsiya morskogo transporta [Operation of Maritime Transport]*. 2022. No. 4 (105). P. 126–130. (In Russ.)
26. Andaeva Z.T., Tashiev N.M., Karabaev B. The main directions of development of measures to improve the reliability of energy systems. *Bulletin of Osh Technological University*. 2022. No. 1. P. 72–74. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 08.04.2026.

Принята к публикации 15.05.2026.