

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-931-944

## TASKS OF RISKS ASSESSMENT AND FAILURES PREVENTION OF THE SHIP'S MECHANICAL SYSTEMS

**E. S. Moseyko<sup>1</sup>, E. O. Ol'khovik<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> — “Iceberg” Central Design Bureau, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>2</sup> — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The subject of the research is the tasks of assessing risks and preventing failures of ship mechanical systems, since at present reliability indicators are of great importance at the design stages and during operation. The various types of maintenance, namely, corrective, scheduled, by “state” are compared in the paper. The performance of technical monitoring can provide valid information about the actual state of the ship’s mechanical systems, which can reduce the technical and economic costs of their maintenance. A set of risks assessment methods is considered according the following stages — hazards identification, risks analysis, control options, cost-benefit assessment, decision making. To improve current methods and make them more practical, risks assessment and failures prevention are considered using the example of marine mechanical systems. The concept of risks matrix priority, taken from the analysis of the probability and consequences of failures, is used. The assessment identifies five levels of probability and five levels of consequences that can consider each type of undesirable accident. If statistical data are not available for each stage of the assessment, it is proposed to apply expert review. Possible connections between the design calculation of the reliability of ship’s mechanical systems and risk assessment based on actual data on accidents are discussed, i. e. a two-level system that considers various aspects of ensuring the reliability of ship equipment at all stages of its life cycle. The proposed approach for the joint use of risks assessment methods and traditional reliability calculations allows choosing the safest operating mode for the selected risk level, as well as predicting the necessary corrective actions, choosing options for diagnosing and maintaining ship’s mechanical systems. The conclusions received can be used to prepare specifications for the design of ship’s systems in order to assess reliability indicators, and also to extend the life of such equipment.*

*Keywords: maintenance, technical monitoring, failures probability, consequences of failures, accidents, risks matrix, expert review.*

**For citation:**

Moseyko, Evgeniy S., and Evgeniy O. Ol'khovik. “Tasks of risks assessment and failures prevention of the ship’s mechanical systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 931–944. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-931-944.

**УДК 621.78/79:629**

## ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ РИСКОВ И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОТКАЗОВ СУДОВЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Е. С. Мосейко<sup>1</sup>, Е. О. Ольховик<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> — АО «Центральное конструкторское бюро «Айсберг»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Темой исследования являются задачи оценки рисков и предупреждения отказов судовых механических систем. В настоящее время показателям надежности придают важное значение на стадиях проектирования и в период эксплуатации. В работе приведено сравнение различных видов технического обслуживания: корректирующего, планового, «по состоянию». Выполнение технического мониторинга позволяет обеспечить действующей информацией о фактическом состоянии судовых механических систем, что может снизить технико-экономические затраты на их содержание. Рассматривается совокупность методов оценки рисков на следующих этапах: идентификация опасностей, анализ рисков, варианты контроля, оценка затрат-выгод, оценка принятия решения. В целях улучшения текущих методов и придания им большей*

*практичности рассматривается оценка рисков и предупреждения отказов на примере судовых механических систем. Используется концепция приоритета матрицы риска, взятая из анализа вероятности и последствий отказов. Данная оценка определяет пять уровней вероятности и пять уровней последствий, которые могут характеризовать каждый тип нежелательного аварийного случая. Если статистические данные недоступны для каждого этапа оценки, то предлагается применять экспертную оценку. Обсуждаются возможные связи проектного расчета надежности судовых механических систем и оценки рисков на основе фактических данных об аварийных случаях, т. е. рекомендована двухуровневая система, рассматривающая различные аспекты обеспечения надежности судового оборудования на всех этапах его жизненного цикла. Предложенный подход совместного использования методов оценки рисков и традиционных расчетов надежности позволяет выбрать наиболее безопасный для выбранного уровня риска режим эксплуатации, а также спрогнозировать необходимые корректирующие действия, выбрать варианты диагностики и технического обслуживания судовых механических систем. Полученные выводы могут быть использованы для подготовки технического задания на проектирование судовых систем в целях оценки показателей надежности, а также при продлении срока эксплуатации такого оборудования.*

*Ключевые слова: техническое обслуживание, технический мониторинг, вероятность неисправностей, последствия отказов, аварийные случаи, матрица рисков, экспертная оценка.*

**Для цитирования:**

*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 имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 931–944. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-931-944.*

## **Введение (Introduction)**

Начиная со второй половины XX в. развитие методов оценки рисков неисправностей механических систем положительно зарекомендовало себя в атомной промышленности, авиастроении и др. В свою очередь, Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства [1] определяют следующие приоритеты предупреждения отказов.

Показатели надежности устанавливаются при проектировании или заказе элементов механической установки согласованием технической документацией между судовладельцем, проектной организацией и поставщиком. Состав показателей надежности должен устанавливаться для определенного вида изделий с учетом особенностей его использования, последствий отказов, технического обслуживания и ремонта [1, ч. VII, п. 2.6.1].

Анализ отказов должен включать следующее судовое оборудование: пропульсивные двигатели, системы передачи энергии, рулевое устройство, движители, основные системы электрооборудования, вспомогательные системы ответственного назначения (сжатого воздуха, топливную, масляную, водяного охлаждения, вентиляции), системы управления и контроля. Если единичный отказ оказывает влияние на один или большее количество элементов в системе, то все отказы должны анализироваться совместно [1, ч. VII, п. 11.2.1, 11.3.3]. Также следует отметить для двигателей с электронной системой, у которых основные процессы функционирования (топливоподача, смазки, газообмена, пуска, реверса) осуществляются с помощью гидравлических (пневматических) систем, управляемых программируемыми электронными устройствами по сигналам датчика. Единичный отказ любого элемента не должен приводить к потере управляемости двигателя [2, ч. IX, п. 2.2.11].

В научной литературе, в частности в работе [3], рассмотрен рейтинг возникновения режима отказа в автономном судовождении и критических последствий такой ситуации. Представленные результаты показывают, что в одинаковых условиях диапазон уровня риска варьируется в зависимости от эксплуатационных режимов автономного судна. Предложенный подход позволяет выбрать наиболее безопасный для данного уровня риска режим эксплуатации, а также спрогнозировать необходимые корректирующие действия. Представлена структура, используемая для количественной оценки эксплуатационного риска морского автономного надводного судна с тремя режимами работы: ручным, дистанционным и автономным управлением.

В работе [4] приведены основные виды возникающих при работе поломок на примере палубного оборудования рыбопромыслового судна, которые могут привести к неисправностям, что, в свою очередь, влечет за собой снижение эксплуатационной и экономической эффективности работы судового оборудования (СО). Поэтому для совершенствования технического обслуживания (ТО) необходима модернизация методики прогнозирования надежности по конструктивным показателям элементов на этапе проектирования. Для этого требуется получение точной статистической информации о надежности СО в течение периода эксплуатации судна. Отмечается, что для анализа риска отказа за время эксплуатации СО необходима *классификация опасностей*. Для оценки среднего ресурса и других показателей долговечности рассматриваются параметры распределения случайных факторов безотказной работы методами экспертной оценки, статистического моделирования Монте-Карло, закона Вейбулла – Гниденко.

Принятие решений по ТО включает в себя *методы прогнозирования и диагностики*. Первый пытается прогнозировать сроки наступления неисправностей в то время как второй фокусируется на поиске источника неисправности, в момент ее появления. Оценка текущего технического состояния СО может достигаться путем технического мониторинга на основе различных параметров (например, давление, температура, вибрация, уровень шума, смазочное масло и др.). Предел срабатывания сигнализации основан на рекомендациях производителей. Такие сигналы тревоги обычно определяют рабочие диапазоны, не применимые к условиям эксплуатации. Тем не менее недостатком этого метода является то, что он не учитывает различные определяющие факторы (например, интенсивность использования, время непрерывной работы и др.).

На этапе проектирования судна необходимо предусматривать создание диагностического комплекса, который может обеспечивать:

- исследование, осуществляемое с помощью центральной вычислительной системы на основе оперативной информации, получаемой от штатных средств измерения из систем управления;
- мониторинг для определения текущего технического состояния в процессе эксплуатации с учетом переносных универсальных средств измерения и неразрушающего контроля.

В работе [5] рассматривается вид ТО как «аварийное техническое обслуживание судна» с целью последующего выполнения следующих действий. Судно выходит в море, и техническое состояние СО оценивается путем сбора информации в режиме реального времени. В определенный момент времени текущее техническое состояние СО достигает *предела возможного отказа*, поэтому в ближайшем времени потребуется его ремонт. Далее в случае, если на борту судна нет необходимых запасных частей, необходима их доставка со склада поставщика в назначенный порт. При этом, ввиду неопределенности как с текущим техническим состоянием СО, так и с поставкой запасных частей, рассматривается *модель оптимизации ТО*, выражающаяся в минимизации затрат на ТО и максимизации надежности судна.

С учетом условий к ТО необходимо моделировать судовую механическую систему (далее — СМС) как набор элементов, работающих последовательно, таким образом, чтобы вся СМС работала, т. е. все элементы функционировали одновременно. В случае отказа неисправная часть может быть заменена при наличии запасных частей на складе. Однако в случае дефицита новые запасные части не подлежат повторной поставке. Таким образом, первоначальный запас запасных частей должен быть достаточным для обеспечения надежности СМС в течение всего времени эксплуатации.

Важно определить количество и тип запасных частей, которые должны быть закуплены по минимальной цене (или с минимальной площадью их складирования), чтобы *максимизировать надежность СМС за время эксплуатации*. Учитывая ограниченность складского пространства на судне, необходимо определить оптимальный набор запасных частей, которые следует взять на борт. Аналогичная проблема возникает также в конце срока службы СМС, когда СО больше не производится и снимается с рынка и производитель должен обеспечить доступность запасных частей в течение минимального периода несмотря на то, что их цена продажи обычно повышается. Таким образом, когда производитель убирает с рынка СО, судовладельцу *необходимо предвидеть возможное повышение цен и остаточный ресурс еще функционирующего СО*.

В работе [6] внимание уделяется алгоритму оптимизации запасных частей, когда подтверждается износ СМС. Учитываются следующие параметры: время выполнения задачи, необходимый уровень надежности, доступная стоимость, складская площадь, количество деталей, интенсивность отказов. Алгоритм рассматривает оптимальную границу запасных частей, применение распределений критических запасных частей, а также повышающую надежность СМС.

В данном исследовании для обеспечения оценки рисков и предупреждения отказов СМС необходимо решить следующие частные задачи:

- составить оптимальную стратегию ТО;
- рассмотреть перспективность технического мониторинга;
- определить категории вероятности отказа;
- определить категории предупреждения отказа;
- сформировать матрицу рисков неисправностей;
- применить группу экспертов-специалистов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Спланировать ремонт и одновременно заказать запасные части, необходимые для устранения неисправности можно, если предупреждение о будущем дефекте СМС судовладелец получает на ранней стадии. Различные виды ТО предлагается разделить на следующие категории (рис. 1):

- корректирующее ТО — выполняется после возникновения неисправности с помощью оценки текущего технического состояния СО;
- профилактическое ТО — выполняется до возникновения неисправности (для поддержания СО в работоспособном техническом состоянии используются динамические интервалы).
- ТО по техническому состоянию — выполняется на основе информации о работе СО, собранной с помощью технического мониторинга.

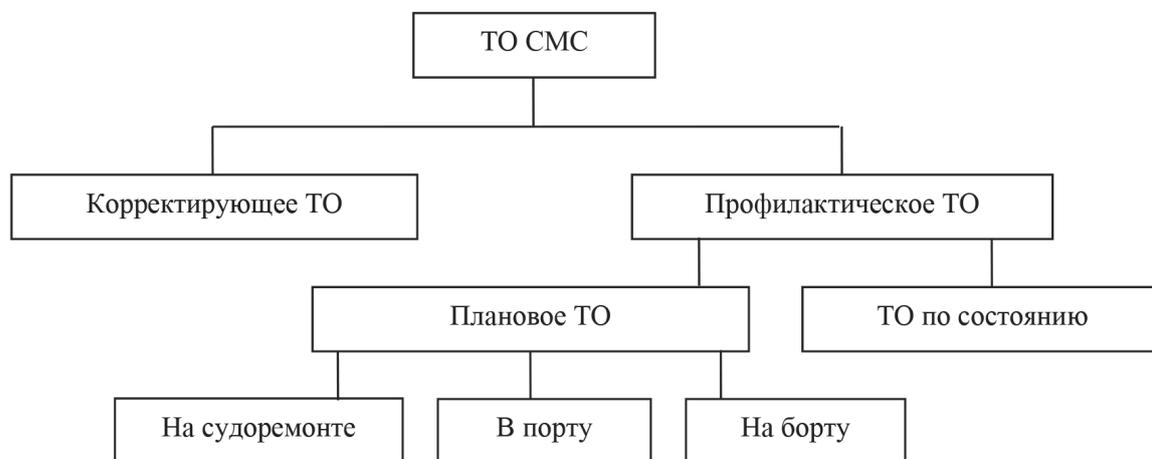


Рис. 1. Классификация видов технического обслуживания

Плановое ТО выполняется на основе графиков и независимо от технического состояния СО может подразделяться на следующие категории: *на борту* — выполняется с регулярными проверками во время рейса; *в порту* — выполняется, когда судно стоит на якоре в гавани; *на судоремонте* — выполняется, когда судно находится на плановом ремонте.

В работе [7] в качестве результатов исследования, в соответствии со стандартами Международной морской организации (англ. ИМО), рассмотрены варианты регулирования управления рисками. На рис. 2 приведена схема методологии оценки рисков неисправностей — процесс начинается с принятия решений с учетом опасностей и граничных условий, последствиями которых являются аварийные случаи (далее — АС) и их количество в единицу времени. Рассматриваются анализ риска, оценка экономической эффективности, контроль отдельного элемента СО и последующее принятие решений.

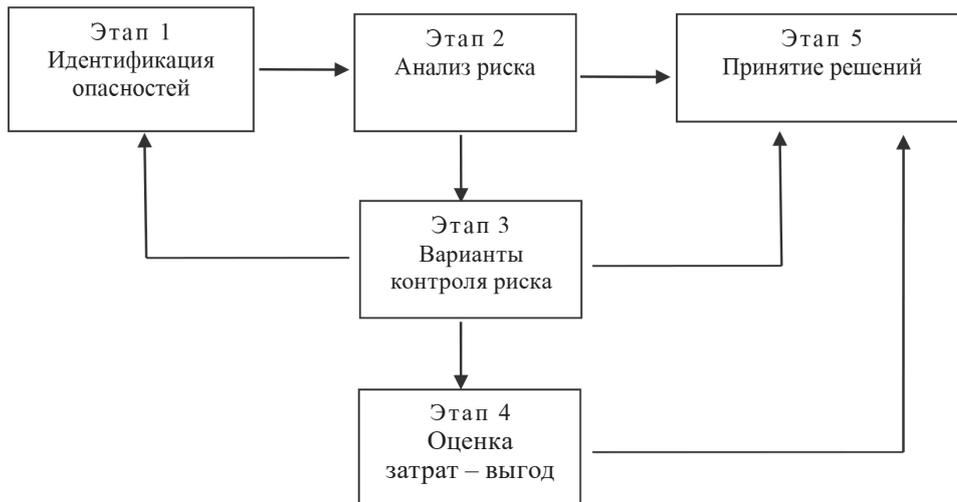


Рис. 2. Схема методологии оценки риска неисправностей судового оборудования

Человеческий фактор является одной из наиболее важных причин, оказывающих влияние на причинно-следственную связь АС. Проблемы, связанные с человеческим фактором во всей интегрированной системе, следует систематически рассматривать в рамках оценки рисков, связывая их с вероятностью возникновения и последствиями. Человеческий фактор может быть включен в процесс оценки рисков с использованием «анализа надежности человека» (англ. HRA). Последовательность применения метода HRA в части оценки рисков приведена в табл. 1.

Таблица 1

**Последовательность этапов метода HRA**

Анализ риска	Задачи для метода HRA
Этап 1	Опасности, связанные с деятельностью человека, предварительное описание результатов
Этап 2	Анализ критических задач, человеческих ошибок
Этап 3	Варианты управления риском
Этап 4	Анализ экономической эффективности
Этап 5	Рекомендации по принятию решений

Рассмотрим оценку рисков на каждом этапе.

*Этап 1 — идентификация опасности* — определение списка опасностей и связанных с ними АС, приоритетных для угрозы механизмов, человеческой жизни и окружающей среды. Данная цель достигается использованием стандартных методов определения опасностей, которые могут оказывать влияние на АС. Определение опасности следует проводить с учетом ряда функций, установленных при рассмотрении общей модели. Например, если проблема связана с типом судна, то такие функции включают нагрузку, аварийное реагирование, маневренность, связь и т. д., если она связана с типом опасности (например, с пожаром), то функции включают предотвращение, обнаружение, сигнализацию и т. д.

Общая модель должна рассматриваться не как отдельное судно, а скорее, как совокупность систем, включающих организационные, операционные и контрольные функции. Интегрированные системы должны быть разбиты на соответствующие уровни детализации. Необходимо получить общий вид, показанный, например, на рис. 3. Механическая и инженерная системы, неразрывно связанные с экипажем, являются функцией человеческого поведения. Экипаж взаимодействует с управленческой инфраструктурой, участвующей в эксплуатации и ТО. Приведенные системы связаны с внешней окружающей средой, регулируемой заинтересованными сторонами в судоходстве.

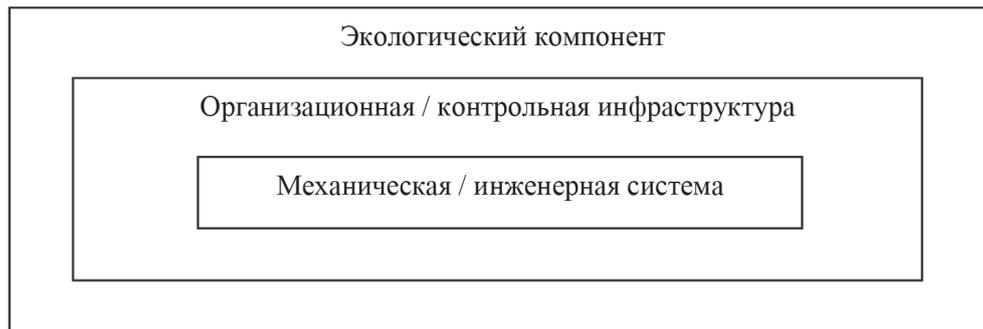


Рис. 3. Компоненты интегрированной системы

Данный этап определяет ключевые потенциальные взаимодействия, которые в случае их неправильного выполнения могут привести к сбою системы, т. е. создать *проблемные области*. Определение опасностей для человека выражается в выявлении рисков, при которых человеческая ошибка может привести к АС во время эксплуатации. Методы оценки обеспечивают надлежащий учет имеющегося опыта и обычно используют справочную информацию (например, применимые правила, кодексы, статистические данные АС, перечни опасностей для экипажа и т. д.).

Примерами опасностей, связанных с личными качествами, являются человеческие ошибки, отсутствие личных факторов, недостаток организации работы. Связанными с судовыми операциями являются: опасность при эксплуатации, вредные вещества на борту, источники возгорания, а также оказываемые на судно внешние воздействия. Частота и виды последствий, а также вероятности исхода АС, используемые в «матрице рисков», представляют «уровень риска» для получения оценки приоритетных АС по степени риска.

Для определения опасности можно применять методы, такие как «опасность и работоспособность» (англ. Hazard Operability, сокр. HazOp) и «анализ видов и последствий отказов» (англ. FMEA), которые оценивают дефекты различного вида с их последствиями и причинно-следственными связями.

*Этап 2 — анализ риска* — рассмотрение АС, выявляющих повышенный риск неисправностей. В свою очередь, оценка риска неисправностей может выполняться, по крайней мере, с двух сторон: с одной стороны, рассматривают индивидуума, который сталкивается с риском, с другой — риск, приемлемый для группы людей. Это может быть достигнуто за счет использования методов, моделирующих риск неисправностей, а также выявления и оценки факторов, влияющих на уровень риска.

Для анализа рисков можно использовать следующие методы:

- *вероятность человеческой ошибки* (англ. HEP) — следует применять для факторов, которые могут отрицательно сказаться на работоспособности человека;
- *оценка абсолютной вероятности* (англ. APJ) — можно применять в различных формах, оценки которых математически агрегатированы (обычно выражается через экспертное заключение);
- *метод оценки и уменьшения человеческих ошибок* (англ. HEART) — следует применять как базу данных типовых описаний задач и связанных с этим вероятностей человеческой ошибки (является альтернативой экспертного заключения при наличии статистических данных);
- *метод прогнозирования коэффициента человеческих ошибок* (англ. THERP) — следует применять для формирования базы данных ошибок (моделирует человеческие ошибки с использованием стандартного моделирования дерева событий и отказов);
- *дерево событий* — следует показывать на схеме вероятность или частоту АС, связанного защитными действиями, которые необходимо предпринять после возникновения событий в целях предотвращения последствия;
- *дерево отказов* — следует показывать на схеме причинно-следственную связь между событиями, которые по отдельности или в комбинации вызывают событие более высокого уровня;

– *график опасности* (рис. 4) — может представлять собой частоту каждой опасности. При установлении верхней и нижней границ приемлемости риска наклон может изменяться, показывая при этом отношение к риску: *склонность* или *нейтральность*.



Рис. 4. Дерево оценки риска неисправностей судового оборудования

*Этап 3— управление риском* — состоит в том, чтобы вначале определить «меры по контролю риска» (англ. RCM), а затем сгруппировать их в ограниченное число «вариантов управления рисками» (англ. RCO) для концентрации внимания на области наиболее нуждающегося в контроле риска.

Основными аспектами проведения этой оценки являются: уровень риска с учетом частоты возникновения; вероятность возникновения путем определения модели риска; серьезность, способствующая наибольшему исходу последствий; достоверность, в которой модели риска имеют существенное влияние.

Для управления риском можно использовать следующие методы:

–1-й метод — меры по контролю риска (англ. RCM) — показывает, как можно контролировать риск, а причинно-следственные связи относятся к тому, где в последовательности от начального события до АС может быть введен контроль риска;

– 2-й метод — варианты управления рисками (англ. RCO) — группирует RCM в ограниченное число RCO. Возможны два подхода. Первый — общий подход, обеспечивающий контроль риска путем определения вероятности возникновения АС, который может быть эффективными в их предотвращении. Второй — распределенный подход, обеспечивающий контроль надразвитием АС с возможностью влияния на нее на более позднем этапе.

*Этап 4 — оценка затрат – выгод* — определение и сравнение выгод и затрат, связанных с реализацией RCO. Оценка результатов может включать оценку экономической эффективности каждого варианта RCO с точки зрения стоимости на единицу снижения риска путем деления чистой стоимости на снижение риска; ранжирование RCO в целях облегчения рекомендаций для принятия решения (например, проверка нерентабельных или непрактичных).

Затраты могут выражать стоимость жизненного цикла и включать наладку, обучение и т. д. Выгоды могут включать снижение воздействия на механизмы, человека и экологию. Для оценки затрат – выгод можно применить несколько методов, которые выражают следующие расчетные показатели рентабельности:

– *валовые затраты на предотвращение летального исхода* (англ. GCAF) — мера экономической эффективности с точки зрения отношения предельной (дополнительной) стоимости варианта управления риском к его снижению для экипажа, предотвращающего АС;

– *чистые затраты на предотвращение летального исхода* (англ. NCAF) — мера экономической эффективности с точки зрения отношения предельных (дополнительных) затрат с учетом экономической выгоды от управления риском к его снижению для экипажа и предотвращения АС.

*Этап 5 — принятие решений* — определение рекомендаций, которые должны быть представлены соответствующим лицам, принимающим решения. Данные рекомендации основаны на сравнении опасностей и их основных причин, определении «вариантов контроля риска» в зависимости от сопутствующих затрат и преимуществ, а также определении тех «вариантов управления рисками», которые удерживают риски неисправностей на минимальном уровне. Результат включает оперативное сравнение альтернативных вариантов, основанное на потенциальном снижении рисков неисправностей и рентабельности.

На основе описания пяти этапов оценки рисков можно подробно рассмотреть метод «анализ видов и последствий отказов» (англ. FMEA). Тем не менее риск отказов СО недостаточно подробно описан в научной литературе из-за взаимодействия зависимостей и высокого уровня неопределенности в эксплуатации. Поэтому важно разработать комплексную оценку риска с использованием методов, которые будут учтены систематическим образом. Приведенные инструменты оценки рисков можно использовать в качестве приложения информационных технологий для технического мониторинга. Для улучшения текущих методов и придания им большей практичности рассмотрена оценка рисков и предупреждения отказов на примере СМС.

### Результаты (Results)

На основании ГОСТа Р 27.003–2016 «Состав и общие правила задания требований по надежности» при задании технических условий по надежности определяют критерии предельного технического состояния объекта. В работе [8] оценка надежности показывает, что произведена замена части насосов в составе судовых механических систем до выработки полного ресурса, при этом работоспособность систем в целом сохраняется или восстанавливается в результате ремонта; для части насосов заданный ресурс превышает, но при техническом освидетельствовании их эксплуатация была продлена. Как и большинство СО, насосы нуждаются в соответствующем ТО и контроле технического состояния. Целесообразными являются их обслуживание и ремонт, выполняемые по «состоянию», на основе результатов проведения безразборной диагностики методов прогнозирования остаточного ресурса работы.

В работе [9] рассмотрен эксплуатационный этап жизненного цикла СМС. В качестве показателей надежности выбраны критерии долговечности: срок службы, наработка и периодичность проведения ремонта. Работы по ремонту, ТО или замене СО производятся в соответствии с установленными регламентами или в случае неисправности. Проведение технического мониторинга может обеспечить действующая информация о фактическом состоянии СМС, что позволит снизить технико-экономические затраты на их содержание.

В продолжение исследования надежности оценку безотказности можно рассматривать с учетом ГОСТа Р 27.301–2011 «Управление надежностью. Техника анализа безотказности». Оценка безотказности может основываться на следующих методах: прогнозирование интенсивности отказов; анализ дерева неисправностей; анализ дерева событий; анализ влияния человеческого фактора; анализ возможных причин, вероятностей и последствий отказов; суммирование наработок и др.

На основании ГОСТа Р 51901.12–2007 «Метод анализа видов и последствий отказов» (англ. FMEA) приводятся рекомендации к применению методов прогнозирования. Отмечается, что необходимо проводить анализ на ранних стадиях разработки, когда устранение последствий и количество видов отказов являются *экономически наиболее эффективными*. Процесс оценки риска предлагается рассматривать в указанной последовательности: выбор предмета для анализа, определение участка оценки, определение опасностей, оценка вероятности и последствий АС, определение приоритетов возможных вариантов управления рисками, подготовка отчета об оценке рисков, доведение сведений о результатах оценки. Рассмотрим структуру оценки риска и предупреждения отказов.

1. *Выбор предмета для анализа и определение участка оценки.* Для прогнозирования может применяться оценка мнений специалистов-экспертов. В качестве участников для исследования была сформирована группа, состоящая из механиков и технологов в количестве десяти человек. Суть экстраполяционно-статистического метода сводится к построению зависимостей элементов

на основе статистической обработки данных имеющихся аналогов и согласно своему функциональному назначению. Для настоящего исследования выбраны СМС с различной мощностью и производительностью. Наиболее опасными участками из элементов СМС являются насосы, компрессоры и трубопроводные клапаны.

2. *Определение опасностей.* Необходимо выявлять опасности на основе имеющейся информации, такой как ТО, плановые ремонты и техническое освидетельствование. На основе рассмотренных опасностей определяется ряд возможных предупреждений АС. Например, определяющим фактором нарушения работоспособности насосов является эрозионное, коррозионное и усталостное разрушение, износ уплотнителей, а также ослабление посадочного места на валу. В поршневых насосах и компрессорах происходит износ цилиндров, поршней, а также наблюдается появление зазора на поверхности вала.

3. *Оценка вероятности и последствий.* Определяет пять уровней вероятности и пять уровней последствий, которые могут характеризовать каждый тип нежелательного АС. Каждому присваивается категория, на основе которой рассчитывается значение риска как произведение вероятности и последствия. Оценки вероятности и последствий предлагается оценивать по критериям, приведенным в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Описание категорий вероятности отказа**

Классификация	Категория	Вероятность
Очень редко	1	Очень редко, происходит только в исключительных обстоятельствах, не чаще одного раза в 20 лет
Редко	2	Редко(может возникать каждые 2–20 лет)
Иногда	3	Иногда(может возникать каждые 2 месяца и до 2 лет)
Часто	4	Часто(могут возникать от 1 раза в неделю до 2 месяцев)
Очень часто	5	Очень часто (могут возникать не реже 1 раза в неделю)

Таблица 3

**Описание категорий последствий отказа**

Описание	Категория	Воздействие на механизмы	Воздействие на человека	Воздействие на экологию
Незначительные	1	Может ухудшить выполнение функций системы	Нет травм для людей	Без ущерба
Небольшие	2	Может ухудшить выполнение функций системы	Легкое телесное повреждение одного или нескольких человек	Кратковременный ущерб окружающей среде
Значительные	3	Может привести к прекращению выполнения функций системы	Травмы нескольких лиц, требующие госпитализации	Кратковременный ущерб окружающей среде на небольшой территории
Особо крупные	4	Может вызвать значительное повреждение системы	Тяжелые травмы многих людей или потеря жизни	Необратимый ущерб окружающей среде на ограниченной территории
Катастрофические	5	Вызывает тяжелые повреждения системы	Тяжелые травмы многих людей или потеря нескольких жизней	Необратимый ущерб окружающей среде на большой территории

4. *Приемлемость риска.* Риск неисправностей определяется как произведение двух факторов: первый выражает вероятность возникновения нежелательного АС, второй — серьезность его потенциальных последствий. После определения категории вероятности и последствий предлагается рассчитать значение баллов риска в соответствии с матрицей, приведенной в табл. 4.

Для оценки предлагается определить четыре уровня риска с цветовыми полосами, представленные в табл. 5. Управление рисками включает структурированный процесс, определяющий АС с сопутствующим снижением риска до «минимального практически возможного уровня» (англ. ALARP).

Таблица 4

**Матрица значения риска**

Последствия отказа	Вероятность отказа				
	Очень редко (1)	Редко (2)	Иногда (3)	Часто (4)	Очень часто (5)
Катастрофические (5)	5	10	15	20	25
Особо крупные (4)	4	8	12	16	20
Значительные (3)	3	6	9	12	15
Небольшие (2)	2	4	6	8	10
Незначительные (1)	1	2	3	4	5

Таблица 5

**Описание категорий риска**

Значение риска	Категория риска	Необходимое действие
1–4	Зеленый	Низкий риск, не требующий дополнительных вариантов контроля, если только они могут быть реализованы с небольшими затратами.
5–8	Желтый	Умеренный риск, который должен быть снижен до уровня ALARP за счет реализации дополнительных вариантов контроля.
9–12	Оранжевый	Высокий риск, для которого необходимо предпринять существенные и срочные усилия, чтобы снизить его до уровня ALARP в течение определенного периода времени.
15–25	Красный	Очень высокий и неприемлемый риск, для устранения которого необходимы существенные и немедленные улучшения.

5. *Варианты управления риском.* Определение вариантов снижения риска для каждого нежелательного АС, которые в случае их реализации снизят риск до приемлемого уровня. В настоящее время существуют следующие «меры контроля рисков»: ТО, техническое освидетельствование, ремонт. Необходимо внедрять дальнейшие «меры контроля рисков», а именно: технический мониторинг, автоматическую систему контроля, соблюдение эксплуатационных режимов, обучение экипажа.

6. *Заполнения матрицы рисков.* Определение матрицы рисков, в которой указаны элементы, подверженные АС, с помощью обеспечения количественной оценки риска и предупреждения отказов. Можно определить наиболее значительные риски и рассмотреть варианты их снижения. В табл. 6 предлагается матрица рисков, рассматриваемых СМС. В ходе опроса специалистов-экспертов выявлены следующие характерные признаки. Все указанные риски по своим расчетным значениям относятся к желтой категории — *умеренный риск*, который необходимо снижать до «минимального практически возможного уровня» (англ. ALARP) за счет реализации дополнительных вариантов контроля. Это позволяет заинтересованным сторонам в судоходстве выделять соответствующие ресурсы для реализации мер, снижающих риск до приемлемого уровня.

Таблица 6

**Матрица рисков неисправностей судовых механических систем**

Судовые механические системы	Вероятность появления (категория)	Воздействие последствий, (категория)	Значение риска, (балл)
Система приема, перекачки, выдачи и сепарации моторного масла (ДГ, РДГ, АДГ)	2	3	6
Система приема, выдачи и перекачки компрессорного масла	2	3	6
Система смазки подшипников валопроводов	2	3	6
Система масляная ТПУ	2	3	6
Система смазки ГТГ	2	3	6
Система приема и перекачки дизельного топлива вспомогательного оборудования (РДГ, АДГ)	3	3	9
Система топливная ВКУ	3	3	9
Конденсатная система ПТУ(ГТГ)	4	2	8
Питательная система ПТУ(ГТГ)	4	2	8
Система охлаждения пресной водой и охлаждения забортной водой дейдвудных подшипников	4	2	8
Система охлаждения забортной водой РДГ	4	2	8
Питательная система опреснительной установки	4	2	8
Система охлаждения забортной водой вспомогательного оборудования (ПГНД, ВКУ, ОУ)	4	2	8
Питательная система ВКУ	4	2	8
Питательная система ПГНД	4	2	8
Конденсатная система ПГНД	4	2	8
Система приема и перекачки питательной воды	4	2	8
Система химической (водяной) очистки ВКУ	2	3	6
Система зачистки нефтепродуктов	2	3	6
Система удаления вод с химическими присадками	2	3	6
Система бытовой пресной воды	4	2	8
Система забортной воды	4	2	8
Система сточная и хозяйственно-бытовых вод	4	2	8
Система водяного отопления	4	2	8
Система водяного пожаротушения	3	2	6
Система осушительная	3		
Система балластная	3	2	6
Система охлаждения забортной водой оборудования системы вентиляции и кондиционирования воздуха	4	2	8
Система охлаждения оборудования систем машинной вентиляции	4	2	8
Система охлаждения забортной водой холодильной установки провизионных кладовых	4	2	8
Система охлаждения генераторов	4	2	8
Система охлаждения вспомогательного оборудования (ГЭД, ГУП, ГРЩ)	4	2	8

### Обсуждение (Discussion)

Сравнивая полученные результаты с работами других авторов, можно выделить следующее: в работе [10] оцениваются уровни риска подшипника редуктора на примере элементов судового крана с использованием диагностики. Использование установленных производителями эксплуатационных режимов и определение предупреждений в качестве пороговых значений обеспечивается

за счет технического мониторинга. В исследовании для примера рассматривается «метод анализа чувствительности» (англ. FRB). С учетом моделирования рассматриваются уровни риска для прогнозирования возможного отказа по критическим элементам испытаний образца масла для подшипника, по разработке функций принадлежности тестовых элементов подшипника, по разработке диагностики для прогнозирования риска подшипника. Внедрение оптимизации ТО, применение инструментов анализа в режиме реального времени для оценки технического состояния СО с использованием разработанных моделей может повышать надежность за счет раннего обнаружения неисправностей.

В работе [11] авторами предложены методы анализа системной надежности механических и гидравлических судовых систем, основанные на уравнениях конечных элементов, описывающих движение и равновесие между внутренними и внешними нагрузками для конструкций и механизмов. Такой подход отличается от известных, однако, по нашему мнению, может использоваться на этапе проектирования и в составе предлагаемой экспертной системы для получения предварительных оценок.

Оценка рисков неисправностей должна быть как качественной, так и количественной, включающей описательные и математические методы, согласующиеся со статистическими данными. Первоначальная оценка будет в первую очередь качественная, с признанием того, что при увеличении степени детализации количественная оценка будет выполняться в ходе проведения в последующих анализах по мере необходимости. В работе [12] рассмотрен количественный анализ связи между последствиями судовых аварий и сопутствующими факторами на основе реальных отчетов о расследовании судовых аварий, предложена двухэтапная методология исследования, что хорошо коррелируется с предложениями относительно связей в проектном расчете надежностей и последующей оценки рисков. Так, в работе [13] данная концепция более подробно рассмотрена для этапа технического и технологического проектирования применительно к механическим редукторным передачам судна. Авторами работы [14] исследована методология оценки надежности и качества, применяемых к транспортным системам, в том числе судовым, предложен расчетный индекс, который глобально измеряет качество системы, позволяя вероятностным образом связать качество обслуживания с надежностью системы. Для этой цели может быть полезна матрица рисков неисправностей СМС. В случае, когда статистические данные недоступны для каждого этапа оценки, может применяться обработка мнений группы экспертов-специалистов.

В связи с уровнем достоверности, связанным с экспертным заключением при формировании выводов, когда имеющихся доказательств недостаточно для принятия решения, можно использовать правила оценки рисков СО и предупреждения отказов. Статистический анализ тенденций позволяет определить требующие наибольшего внимания СО, тем самым эффективно распределяя ТО.

В исследовании рассмотрена экспертная система, которая может спрогнозировать возможные ранние признаки проблем СО благодаря исследованию методологии, основанной на уровнях риска. Рассмотренная модель может определить взаимосвязь между оценкой надежности на этапе проектирования судна и диагностикой его в процессе эксплуатации. Результатом применения этой методологии является модель, представленная в виде инструмента, помогающего предотвратить неисправность. Уровни риска дают информацию о том, какие неисправные элементы СО могут нуждаться в замене.

### Выводы

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для судового оборудования можно утвердить применение методов оценки рисков неисправностей и развитие системы оценки предупреждения отказов.
2. Судовое оборудование нуждается в диагностике ее отдельных элементов, различных видах технического обслуживания: корректирующего, планового или по «состоянию».
3. Инструменты оценки рисков в виде информационных технологий могут определять порядок осуществления технического мониторинга, что позволит обеспечить судовладельцев реальной информацией о техническом состоянии СМС при принятии решений об их дальнейшей эксплуатации.
4. Для оценки прогнозирования судового оборудования может применяться обработка мнений группы специалистов-экспертов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Правила классификации и постройки морских судов / Ч. VII: Механические установки. — НД № 2–020101–138. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2021. — С. 79.
2. Правила классификации и постройки морских судов / Ч. IX: Механизмы. — НД № 2–020101–138. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2021. — С. 136.
3. Гамс А. В. Оценка эксплуатационного риска для морских автономных судов / А. В. Гамс, Д. А. Акмайкин, А. А. Ильченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 248–256. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-248-256.
4. Ивановская А. В. Статистический анализ отказов элементов палубного оборудования рыбопромыслового судна / А. В. Ивановская, Н. П. Клименко, В. В. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 440–448. DOI:10.21821/2309-5180-2022-14-3-440-448.
5. Zhao J. A bi-objective model for vessel emergency maintenance under a condition-based maintenance strategy / J. Zhao, L. Yang // Simulation. — 2018. — Vol. 94. — Is. 7. — Pp. 609–624. DOI: 10.1177/0037549717741973.
6. Zammori F. A constructive algorithm to maximize the useful life of a mechanical system subjected to ageing, with non-resuppliable spares parts / F. Zammori, M. Bertolini, D. Mezzogori // International Journal of Industrial Engineering Computations. — 2020. — Vol. 11. — Is. 1. — Pp. 17–34. DOI: 10.5267/j.ijiec.2019.7.001.
7. Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. — London: IMO, 2018. — 69 p.
8. Мосейко Е. С. Исследование надежности судовых насосов по данным технического наблюдения / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 4. — С. 7–16. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-4-7-16.
9. Мосейко Е. С. Оценка обеспечения надежности судовых механических систем / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик // Морская радиоэлектроника. — 2022. — № 2(80). — С. 8–12.
10. Asuquo M. An integrated risk assessment for maintenance prediction of oil wetted gearbox and bearing in marine and offshore industries using a fuzzy rule base method / M. Asuquo, J. Wang, L. Zhang, G. Phylip-Jones // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. — 2020. — Vol. 234. — Is. 2. — Pp. 313–331. DOI: 10.1177/1475090219899528.
11. Avontuur G. C. Systems reliability analysis of mechanical and hydraulic drive systems / G. C. Avontuur, K. van der Werff // Reliability Engineering & System Safety. — 2002. — Vol. 77. — Is. 2. — Pp. 121–130. DOI: 10.1016/S0951-8320(02)00039-X.
12. Zhang L. Ship accident consequences and contributing factors analyses using ship accident investigation reports / L. Zhang, H. Wang, Q. Meng, H. Xie // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of risk and reliability. — 2019. — Vol. 233. — Is. 1. — Pp. 35–47. DOI: 10.1177/1748006X18768917.
13. Кузнецов П. В. Аналитический обзор отечественного и зарубежного опыта разработки и проектирования судовых реверс-редукторных передач / П. В. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-93-103.
14. Chiodo E. Stochastic index definition and estimation for reliability and quality assessment of transportation systems / E. Chiodo, D. Lauria // 2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion. — IEEE, 2012. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/ESARS.2012.6387419.

**REFERENCES**

1. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. Chast' VII: Mekhanicheskie ustanovki.* SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2021.
2. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. Chast' IX: Mekhanizmy.* SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2021.
3. Gams, Anastasia V., Denis A. Akmaykin, and Anna A. Ilchenko. “Operational risk assessment for marine autonomous vessels.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 248–256. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-248-256.

4. Ivanovskaya, Aleksandra V., Nikolay P. Klimenko, and Vladimir V. Popov. "Statistical analysis of fishing vessel deck equipment elements failures." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 440–448. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-440-448.
5. Zhao, Jinlou, and Liqian Yang. "A bi-objective model for vessel emergency maintenance under a condition-based maintenance strategy." *Simulation* 94.7 (2018): 609–624. DOI: 10.1177/0037549717741973.
6. Zammori, Francesco, Massimo Bertolini, and Davide Mezzogori. "A constructive algorithm to maximize the useful life of a mechanical system subjected to ageing, with non-resuppliable spares parts." *International Journal of Industrial Engineering Computations* 11.1 (2020): 17–34. DOI: 10.5267/j.ijiec.2019.7.001.
7. *Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process*. London: IMO, 2018.
8. Moseyko, Evgeniy Sergeevich, and Evgeniy Olegovich Olkhovik. "Studying reliability of marine pump systems by using technical supervision data." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 4 (2021): 7–16. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-4-7-16.
9. Moseyko, E.S., and E. O. Ol'khovik. "Otsenka obespecheniya nadezhnosti sudovykh mekhanicheskikh sistem." *Marine Radio-electronics* 2(80) (2022): 8–12.
10. Asuquo, Maurice, Jin Wang, Lihong Zhang, and Geraint Phylip-Jones. "An integrated risk assessment for maintenance prediction of oil wetted gearbox and bearing in marine and offshore industries using a fuzzy rule base method." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 234.2 (2020): 313–331. DOI: 10.1177/1475090219899528.
11. Avontuur, Gerardus Cornelius, and Klaas van der Werff. "Systems reliability analysis of mechanical and hydraulic drive systems." *Reliability Engineering & System Safety* 77.2 (2002): 121–130. DOI: 10.1016/S0951-8320(02)00039-X.
12. Zhang, Liye, Hua Wang, Qiang Meng, and Hongbin Xie. "Ship accident consequences and contributing factors analyses using ship accident investigation reports." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of risk and reliability* 233.1 (2019): 35–47. DOI: 10.1177/1748006X18768917.
13. Kuznetsov, Ruslan V. "Analytical review of domestic and foreign experience in the development and design of ship reverse gears." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-93-103.
14. Chiodo, E., and D. Lauria. "Stochastic index definition and estimation for reliability and quality assessment of transportation systems." *2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*. IEEE, 2012. DOI: 10.1109/ESARS.2012.6387419.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Мосейко Евгений Сергеевич** — инженер-технолог отдела технологии, экономики производства, нормирования материалов АО «Центральное конструкторское бюро «Айсберг»  
199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Большой пр., 36  
e-mail: [evgeniy-moseyko@mail.ru](mailto:evgeniy-moseyko@mail.ru)  
**Ольховик Евгений Олегович** — доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [olhovikeo@gumrf.ru](mailto:olhovikeo@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Moseyko, Evgeniy S.** — Process Engineer of the Department of Technology, Industrial Economy and Materials Rationing "Iceberg" Central Design Bureau  
36 Bol'shoi Ave., St. Petersburg, 199034, Russian Federation  
e-mail: [evgeniy-moseyko@mail.ru](mailto:evgeniy-moseyko@mail.ru)  
**Ol'khovik, Evgeniy O.** — Dr. of Technical Sciences, associate professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation  
e-mail: [olhovikeo@gumrf.ru](mailto:olhovikeo@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 2 ноября 2022 г.  
Received: November 2 2022.