

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА»

ВЕСТНИК

**ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА**

Том 15. № 1

**Vestnik Gosudarstvennogo universiteta
morskogo i rechnogo flota
imeni admirala S. O. Makarova**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2023**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2023. — Т. 15. — № 1. — 154 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

«Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» является научным периодическим изданием, зарегистрированным Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство о регистрации СМИ от 17 июля 2013 г. ПИ № ФС 77-54734).

В «Вестнике» публикуются материалы оригинальных научных исследований и основных результатов диссертационных работ на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников.

2.5.19 «Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства (технические науки)»;

2.5.20 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) (технические науки)»;

2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)»;

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

Статьи тщательно отбираются по критериям новизны, актуальности, научно-практической значимости, возможности реального использования описанных в них новых технологий на водном транспорте, публикуются на русском и английском языках. Статьи рецензируются независимыми экспертами. Кроме того, в «Вестнике» публикуются обзорные материалы научных конференций, семинаров и совещаний, сообщения и статьи к юбилейным датам ведущих ученых и знаменательным событиям университета.

«Вестник» включен в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ.

Индекс для подписки в каталоге агентства Урал-Пресс: 37276.



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ7

Галин А. В., Слицан А. Е., Виноградова Э. В. Исследование вопроса
многозадачности расчетов при определении количества
погруженного груза.....7

Петухов П. И. Рекомендации по созданию сцепки для судов,
совершающих плавание в полярных водах, при возникновении
чрезвычайных ситуаций15

Чернов О. А. Типовые замечания, выявляемые при проверках
государств — членов ИМО, и способы их устранения32

Пеньковский Д. В., Ершов А. А., Анисимов А. Н. Расширение процедур
управления состояниями судовых операций в борьбе за живучесть
в аварийных ситуациях.....42

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА52

Барышников С. О., Иванов А. Н. Анализ условий подбора чисел зубьев
планетарных редукторов52

Фиактистов Я. О., Цветков Ю. Н., Зайцева Н. С. Механизм разрушения
эпоксидных композитов с металлическим порошковым наполнителем
при кавитационном воздействии64

Крюков А. А. Влияния шага сопловой лопатки на коэффициент скорости
центростремительной турбины с частичным облопачиванием
рабочего колеса73

Кушнер Г. А., Мамонтов В. А., Волков Д. А. Моделирование поверхности
износа дейдвудных подшипников методом оптического сканирования.....82

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ).....93

Коняев Д. В. Судовая энергетическая установка для «водородных»
танкеров с установкой повторного сжижения.....93

Том 15. № 1

2023

РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ

Гл. редактор

С. О. Барышников
д-р техн. наук, проф.

Зам. гл. редактора

А. П. Нырков
д-р техн. наук, проф.

Члены
редакционной
коллегии:

А. Е. Сазонов
д-р техн. наук,
проф., чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов
д-р техн. наук, проф.,
чл.-кор. РАН

О. К. Безюков,
д-р техн. наук, проф.

А. Т. Беккер,
д-р техн. наук, проф.

Н. И. Ватин,
д-р техн. наук, проф.

П. А. Гарибин,
д-р техн. наук, проф..

Д. П. Голоскоков,
д-р техн. наук, проф.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-54734 от 17.07.2013 г.

E-mail: journal@gumrf.ru <http://journal.gumrf.ru>

Адрес редакции: 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7.

Подписной индекс в каталоге Урал-Пресс — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

В. Л. Ерофеев,
д-р техн. наук, проф.

В. А. Жуков,
дд-р техн. наук, доц.

Ю. М. Искандеров,
д-р техн. наук, проф.

В. В. Каретников,
д-р техн. наук, доц.

А. В. Кириченко,
дд-р техн. наук, проф.

М. Н. Кирсанов,
д-р физ.-мат. наук, проф.

М. А. Колосов,
д-р техн. наук, проф.

Е. А. Королева,
д-р экон. наук, проф.

И. И. Костылев,
д-р техн. наук, проф.

А. Л. Кузнецов,
д-р техн. наук, проф.

В. А. Логиновский,
д-р техн. наук, проф.

А. В. Макишанов,
д-р техн. наук, проф.

В. Е. Марлей,
д-р техн. наук, проф.

Т. А. Пантина,
д-р экон. наук, проф.

В. И. Решняк,
д-р техн. наук, проф.

А. В. Саушев,
д-р техн. наук, доц.

С. В. Смоленцев,
д-р техн. наук, проф.

С. С. Соколов,
д-р техн. наук, доц.

М. В. Сухотерин,
д-р техн. наук, доц.

А. Л. Тезиков,
д-р техн. наук, проф.

А. А. Чертков,
д-р техн. наук, доц.

В. Б. Чистов,
д-р техн. наук, проф.

Королёв В. И. Особенности маневренных режимов эксплуатации реакторных установок атомных ледоколов при работе в условиях Арктики109

Жуков В. А., Еришова И. В. Экспериментальные методы оценки качества материалов футеровки топочных камер судовых котлов126

Федоровский К. Ю., Гриненко Н. К. Повышение эффективности и экологической безопасности систем охлаждения судовых энергетических установок со струйными устройствами теплоотвода135

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ.....145

Голоскоков К. П., Губернаторов О. Н., Губернаторов М. О. Комплексная оценка качества и эффективности автоматизированных систем управления145

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY.....7

Galin A. V., Slitsan A. E., Vinogradova E. V. Studying the issue
of calculations ambiguity at determining the amount of loaded cargo7

Petukhov P. I. Recommendations on vessels coupling in case
of emergencies in polar waters.....15

Chernov O. A. Typical findings issued during IMO member states audits
and ways to eliminate them.....32

Penkovsky D. V., Ershov A. A., Anisimov A. N. Expanding the procedures
for managing the states of ship operations during the fight for survivability
in emergency situations.....42

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION.....52

Baryshnikov S. O., Ivanov A. N. Analysis of conditions for selecting
the number of teeth of planetary gearboxes.....52

Fiaktistov Ya. O., Tsvetkov Yu. N., Zaytseva N. S. Destruction mechanisms
of epoxy-based composite filled with metal powder under cavitation
attack.....64

Kryukov A. A. The effect of the nozzle blade pitch on the velocity
coefficient
of the inflow turbine with partial blading of the runner.....73

Kushner G. A., Mamontov V. A., Volkov D. A. Modeling the deadwood
bearings wear surface by optical scanning.....82

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY).....93

Koniaev D. V. Ship power plant with re-liquefaction installation
for tankers transporting hydrogen.....93

Volume 15. № 1

2023

EDITORIAL BOARD

S. O. Baryshnikov
Doctor of Technical Sciences

Deputy Editor-in-Chief
A. P. Nyrkov
Doctor of Technical Sciences

Members of the editorial board:

A. Ye. Sazonov
Doctor of Technical Sciences,
Prof.,
corresponding member
of the Russian Academy
of Sciences

R. M. Yusupov
Doctor of Technical Sciences,
Prof., corresponding member
of the Russian Academy of
Sciences

O. K. Bezyukov,
Doctor of Technical Sciences

A. T. Bekker,
Doctor of Technical Sciences

N. I. Vatin,
Doctor of Technical Sciences

P. A. Garibin,
Doctor of Technical Sciences

D. P. Goloskokov,
Doctor of Technical Sciences

V. L. Erofeev,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Zhukov,
Doctor of Technical Sciences

V. V. Karetnikov,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Kirichenko,
Doctor of Technical Sciences

M. N. Kirsanov,
Doctor of Phys.-Math. Sciences

M. A. Kolosov,
Doctor of Technical Sciences

E. A. Koroleva,
Doctor of Economic Sciences

I. I. Kostylev,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Kuznetsov,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Loginovskiy,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Makshanov,
Doctor of Technical Sciences

V. Ye. Marley,
Doctor of Technical Sciences

T. A. Pantina,
Doctor of Economic Sciences

V. I. Reshnyak,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Saushev,
Doctor of Technical Sciences

S. V. Smolentsev,
Doctor of Technical Sciences

S. S. Sokolov,
Doctor of Technical Sciences

M. V. Sukhoterin,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Tezikov,
Doctor of Technical Sciences

A. A. Chertkov,
Doctor of Technical Sciences

V. B. Chistov,
Doctor of Technical Sciences

<i>Korolev V. I.</i> Features of maneuverable operation modes of nuclear icebreakers reactor installations when working in the Arctic	109
<i>Zhukov V. A., Ershova I. V.</i> Experimental methods for assessing the materials quality of lining for the ship boilers combustion chambers	126
<i>Fedorovsky K. Yu., Grinenko N. K.</i> Increasing the efficiency and environmental safety of ship power plants cooling systems with jet heat removal devices.....	135
AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS	145
<i>Goloskokov K. P., Gubernatorov O. N., Gubernatorov M. O.</i> Comprehensive assessment of the quality and efficiency of automated control systems.....	145

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-7-14

STUDYING THE ISSUE OF CALCULATIONS AMBIGUITY AT DETERMINING THE AMOUNT OF LOADED CARGO

A. V. Galin, A. E. Slitsan, E. V. Vinogradova

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

A unified algorithm for calculating the amount of loaded cargo is provided in the paper. The algorithm checks the vessel readiness to carry out survey work, on the basis of which further operations or the elimination of inconsistencies that have arisen, are proposed. Attention is paid in detail to the measurements carried out during the draft survey, necessary for calculating the average draft of the vessel. The error value is given as a percentage of the deadweight of the vessel, depending on the measured source. The necessary conditions for the issuance of a permit by a surveyor to carry out loading and unloading operations on a ship after checking the conformity of the results obtained with the declared data are defined in the paper. The "Bow-and-stern Sediment diagram" is investigated as a method intended for approximate, but at the same time fast, non-commercial calculation. It is proved that the calculation of the vessel displacement based on this diagram leads to a significant error resulting from a fundamental misunderstanding of the draft survey process and its purpose. The most common mistakes at using ship's documents, as well as the formulas use, are discussed in the paper. The ways of reducing inaccuracies in calculations are determined. It's substantiated in the paper that the use of the "average draft" and "river" formulas cannot be carried out for all types of vessels due to their possible specific design features, in particular, additional grades of deepening and the presence of hull bending. The specifics of the ship's register documents are given. The values of errors are also analyzed if there are only register documents on the ship. It's proved in the paper that the proposed unified algorithm for calculating the amount of loaded cargo is quite accurate compared to other methods considered.

Keywords: unified algorithm, draft survey, "average precipitation" formula, "hull bending" formula, "river" formula.

For citation:

Galina, Alexander V., Andrey E. Slitsan, and Erika V. Vinogradova. "Studying the issue of calculations ambiguity at determining the amount of loaded cargo." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 7–14. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-7-14.

УДК 656.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСА МНОГОЗАДАЧНОСТИ РАСЧЕТОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КОЛИЧЕСТВА ПОГРУЖЕННОГО ГРУЗА

А. В. Галин, А. Е. Слищан, Э. В. Виноградова

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье приведен унифицированный алгоритм расчета количества погруженного груза, который предполагает проверку готовности судна к проведению сюрвейерских работ. Отмечается, что на основании предлагаемой проверки возможно дальнейшее выполнение операций или устранение возникших несоответствий в исходных данных и методах проводимых расчетов. Особое внимание уделено замерам, выполняемым во время проведения драфт-сюрвея, необходимым для расчета усредненной осадки судна. Приведена величина погрешности в процентном соотношении от дедвейта судна в зависимости от измеряемого источника. В работе определены необходимые условия для выдачи разрешения сюрвейером на осуществление

погрузочно-разгрузочных работ на судне после проведения проверки соответствия полученных результатов с заявленными данными. Выполнено исследование «диаграммы осадок носом и кормой» в качестве способа, предназначенного для приблизительного, но в то же время быстрого некоммерческого расчета. Приведены доказательства того, что расчет водоизмещения судна на основании данной диаграммы обуславливает значительную величину погрешности, возникающей в результате фундаментального недопонимания процесса драфт-сюрвея и его цели. Рассмотрены наиболее распространенные ошибки в использовании судовых документов, а также применении формул для определения количества груза. Определены способы уменьшения неточностей в расчетах. Приведено обоснование того, почему применение формул «усредненной осадки» и «речной» не может осуществляться для всех типов судов ввиду их возможных специфических конструктивных особенностей (в частности, дополнительных марок углубления и наличия изгиба корпуса). Рассмотрена специфика регистровых судовых документов. Проанализированы значения погрешностей при наличии на судне только регистровых документов. В статье доказывается, что предложенный унифицированный алгоритм для расчета количества погруженного груза является достаточно точным по сравнению с другими применяемыми на практике методами.

Ключевые слова: унифицированный алгоритм, драфт-сюрвей, формула «усредненной осадки», «изгиб корпуса», «речная» формула.

Для цитирования:

Галин А. В. Исследование вопроса многозадачности расчетов при определении количества погруженного груза / А. В. Галин, А. Е. Слищан, Э. В. Виноградова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 7–14. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-7-14.

Введение (Introduction)

Квалифицированный подсчет количества груза, погруженного на судно или выгруженного с него, является важнейшей задачей при определении количества навалочного груза, принятого судном к перевозке. Вес груза вычисляется как разница между водоизмещением судна до начала погрузки / выгрузки и водоизмещением судна по окончании погрузки / выгрузки с учетом изменения количества переменных запасов на борту судна.

Расчет водоизмещения является неотъемлемой частью драфт-сюрвея — метода, наиболее часто применяемого для расчета количества погруженного или выгруженного груза на судне, суть которого состоит в определении по осадке судна количества погруженного или выгруженного груза на грузовых судах, соответствующих требованиям Международной конвенции о грузовой марке (International Convention on Load Lines). Точность калькуляции водоизмещения напрямую зависит от измерения осадки судна, а также наличия всех необходимых расчетных данных в судовой документации.

Результаты данного расчета используются государственными и коммерческими организациями: грузоотправителями, грузополучателями, судовладельцами, фрахтователями и другими сторонами, интересы которых связаны с определяемым количеством груза. Первые используют их для определения сумм налогов и сборов, вторые — в части определения стоимости поставленного груза, величины фрахта и других платежей, связанных с выполнением заключенных договоров (договор поставки товара, договор морской перевозки и т. д.). Таким образом, корректность и точность проведения этих расчетов, имеющих принципиальный характер, позволят избежать убытков и коммерческих споров, которые могут возникнуть при расхождении в количестве груза, принятого к перевозке и выгруженного в порту назначения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Многозначность расчетов при проведении драфт-сюрвея. Наиболее распространенным методом определения количества погруженного на судно груза является драфт-сюрвей, в качестве расчетной основы для которого используется множество различных методов и формул. В то же время обоснованные оценки достоверности расчетов, выполненных по той или иной методике для конкретного судна или типа судов, практически отсутствуют [1]. Выбор метода целиком зависит от сюрвейера, что зачастую служит причиной возникновения разногласий по вопросам количества груза между заинтересованными сторонами.

В специальной литературе приведено описание множества разработок, которые, по мнению их создателей, следует использовать для выполнения драфт-сюрвея. В большинстве случаев такие разработки на практике неприменимы, поскольку создаются на основе теоретических положений. Как правило, недостатки рассматриваемых расчетов объясняются фундаментальным непониманием процесса драфт-сюрвея и его целью [2]. В частности, расчет количества груза, погруженного на борт судна, заменяется одним из многих способов расчета водоизмещения, разработанных для иных целей.

Примером подобных фундаментальных ошибок является использование расчета водоизмещения на основе диаграммы осадок носом и кормой (рис. 1). Рассматриваемый в этом случае способ расчета предназначен для весьма приблизительного оперативного некоммерческого расчета (например, груза, погруженного за смену). Однако точность такого экспресс-расчета весьма невелика, поскольку в нем не учитываются *весомые* и *значимые* исходные данные, такие, например, как значения осадки судна на миделе.

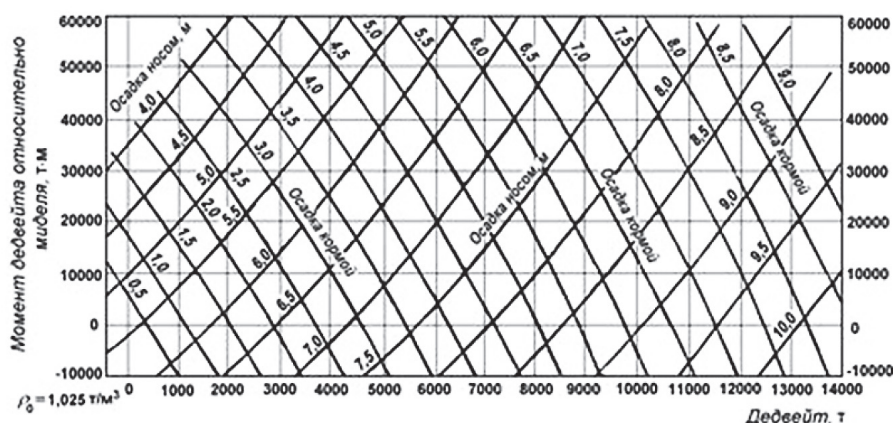


Рис. 1. Диаграмма осадок носом и кормой

До недавнего времени существовала практика использования сюрвейерами так называемой *речной формулы расчета «усредненной осадки»*, которая в спорных случаях трактуется как не совсем точное определение количества груза с с последующим аннулированием итогов расчетов [3].

Необходимо отметить методику определения веса груза по осадке, при которой допускались к применению приблизительные способы калькуляции, такие как однократный расчет на основе фиксированного порожнего веса судна и расчет по габаритам корпуса с учетом изменения осадки [4], в которых не предусмотрен учет влияния дифферента и отстояния марок осадки от перпендикуляров. Таким образом, задаче обеспечения единообразия методов расчетов при проведении драфт-сюрвея необходимо придавать большее значение, чем повышению точности самих методов, как чрезвычайно актуальной для России, поскольку значительное количество отечественных судов имеют такие особенности, как *дополнительные марки и гибкий корпус*. Это относится практически ко всем отечественным судам типа «река – море» вне зависимости от года постройки: от старых судов пр. 1565 «Волго-Дон» до самых современных судов класса «Волго-Дон макс», в том числе судов двойного назначения проекта RST54.

Единый алгоритм проведения драфт-сюрвея. Заказчиками выполнения драфт-сюрвея могут быть грузоотправители, грузополучатели, судовладельцы, фрахтователи и другие стороны, интересы которых так или иначе связаны с грузом. Предполагается, что специалист, выполняющий драфт-сюрвей (сюрвейер), обязан указать в своем отчете все обстоятельства, которые могли повлиять на точность определения количества груза. Необходимым условием выполнения данной задачи является *максимально тщательное и добросовестное выполнение измерений*. Однако практика проведения драфт-сюрвея показывает, что указанному вопросу не уделяется достаточного внимания [5]. Оптимальным решением для обеспечения точности и единообразия расчетов, а также исключением имеющихся на текущий момент разногласий, является снабжение судов как регламентами

проведения, включая допустимые к использованию формулы расчета и бортовые программы, так и специальные документы, созданные для драфт-сюрвея.

Среди специалистов и заказчиков драфт-сюрвея распространено мнение о том, что при отсутствии исходных данных, необходимых для расчетов, эти данные можно рассчитать или определить [6]. При этом сюрвейер рассматривается как квалифицированный специалист, который в состоянии самостоятельно получить отсутствующие данные или рассчитать адекватную замену, что является достаточно серьезным заблуждением. Необходимо осознавать, что при отсутствии необходимых данных любая попытка их восполнить, скорее всего, приведет лишь к увеличению погрешности. Использование дополнительных формул допустимо лишь в случае, когда их применимость научно обоснована и подтверждена практикой именно для драфт-сюрвея и для использования на данном типе судна. В таком случае эти формулы обязательно должны быть зарегистрированы в судовом персональном руководстве по драфт-сюрвею.

Является целесообразным внести следующие ограничения в процесс проведения драфт-сюрвея для повышения точности расчетов:

1. Запретить самостоятельное определение любых данных в случае их отсутствия в утвержденной судовой документации.
2. Не допускать применение любых формул или алгоритмов расчетов кроме официально утвержденных в персональных судовых документах именно для целей драфт-сюрвея.
3. Если какие-либо судовые данные из перечня обязательных отсутствуют, то необходимо принять, что итоговая погрешность расчета будет увеличена в процентах на величину, рассчитанную для каждого показателя, приведенного в таблице, которая зависит от влияния данного показателя на результат драфт-сюрвея и дедвейта судна.

Влияние параметров на точность расчетов

Показатель	Величина, % DWT
1. Плотность забортной воды	0,01
2. Плотность балласта	0,01
3. Снятие данных гидростатики с аналоговой таблицы	0,30
4. Судовая гидростатика	0,25
5. Калибровочные таблицы танков	2,00
6. Применение опрессовки танков	2,00
7. Неучтенный незамеряемый балласт	1,00
8. Изгиб корпуса более допустимой величины, расчет «усредненной осадки»	3,00
9. Неучет значений осадки на дополнительных марках углубления	1,00
10. Снятие данных осадки в зависимости от высоты волнения	0,60

Таким образом, в алгоритм проведения драфт-сюрвея вводится дополнительный пункт «Проверка наличия документации» (рис. 2), который включает предложенные ограничения. Такое изменение алгоритма позволит избежать ранее указанных ошибок и увеличить точность в определении количества груза погруженного на борт судна.

Расчеты по замерам осадки судна выполняются сюрвейером совместно с грузовым помощником или капитаном в порядке, установленном в судовой документации [7] в случае, если судно имеет конструктивные особенности, не позволяющие применять предлагаемый регламент. После проведения расчетов сюрвейер сверяет рассчитанные данные с полученными от представителей судна (судовая константа, заявленное количество груза). В случае обнаружения значительных различий представляется целесообразным проведение повторных замеров и расчетов. После получения результатов повторных расчетов сюрвейер дает разрешение на проведение грузовых работ. Результаты расчетов документально оформляются и подписываются сюрвейером и представителем судна.

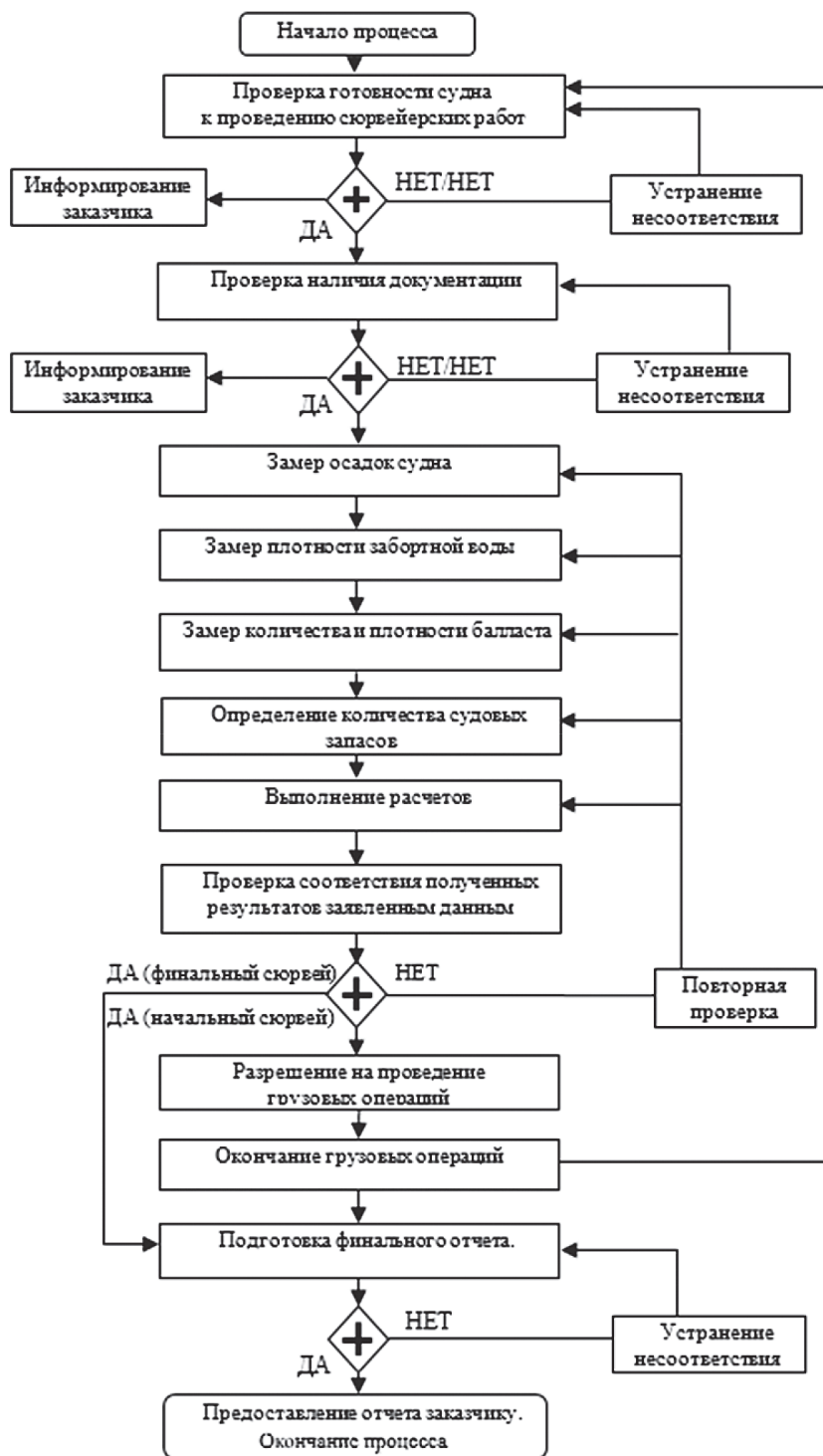


Рис. 2. Алгоритм выполнения драфт-сюрвея

Одним из ключевых этапов при расчете драфт-сюрвея является определение «усредненной осадки» судна:

$$MMM = \frac{T_{AP} + 6T_{MP} + T_{FP}}{8}, \quad (1)$$

где T_{AP} — средняя осадка на кормовом перпендикуляре, м;
 T_{MP} — средняя осадка на перпендикуляре на миделе, м;
 T_{FP} — средняя осадка на носовом перпендикуляре, м.

В специальной литературе часто можно встретить также другие формулы для расчета усредненной осадки (например, так называемую *речную формулу*, предназначенную для использования на речных судах):

$$MMM = \frac{T_{AP} + 4T_{MP} + T_{FP}}{6}. \quad (2)$$

Следует отметить, что данную формулу следует применять с осторожностью и лишь при соответствующих указаниях в «Судовом руководстве по проведению драфт-сюрвея», так как она, как и другие подобные формулы, не являются официально признанными, поэтому ответственность за негативные последствия, возникшие после ее применения, будут возложены на применившую ее сторону [8]. Сюрвейерский отчет, выполненный с использованием таких формул, может быть поставлен под сомнение или опротестован.

Для расчета с точностью 0,5 % необходимо использование документов, изготовленных и утвержденных для каждого судна исключительно для целей драфт-сюрвея. При использовании регистровых документов («Информации об остойчивости») невозможно обеспечить точность расчета количества груза выше 2 %. Для судов с гибким корпусом погрешность зависит от величины изгиба и в некоторых случаях может превышать даже 15 % [9].

Согласно проведенным практическим экспериментам, при расчете количества погруженного груза с использованием формулы «усредненной осадки» при наличии изгиба корпуса судна погрешность водоизмещения составляет более 0,5 %. Поэтому в данном случае следует отказаться от использования формулы «усредненной осадки» и выполнять расчеты *методом интеграции по шпангоутам*, который является универсальным. Также возможны следующие допущения:

- использование для расчета средней осадки иной, чем формула (1), так называемой *речной формулы* (2));
- применение *полудифференциального метода* для расчета средней осадки.

Практика и проводимое компьютерное моделирование показали, что на некоторых типах судов применение рассмотренного метода весьма корректно, в то же время на других — его применение значительно увеличивает погрешность. Поэтому можно предположить, что использование указанного способа расчета будет возможно лишь при условии, что их применимость к конкретному судну будет обоснованной, и индивидуально утверждена в судовом «Руководстве по проведению драфт-сюрвея» [10].

Сюрвейер не в состоянии выполнить столь сложный анализ возможности применения тех или иных методов расчета на конкретном судне, поэтому их применение по желанию сюрвейера должно быть исключено, необходимо использовать только метод, утвержденный для данного судна. Отличительными характеристиками регистровых судовых документов для проведения драфт-сюрвея являются следующие особенности их разработки и применения:

1. Гидростатическая информация для целей расчета остойчивости изготавливается на этапе проектирования судна на основе судовых чертежей без учета реальных особенностей корпуса судов. Гидростатическая информация, пригодная для целей драфт-сюрвея, изготавливается после постройки судна по факту получения реальных данных обмера корпуса.
2. Калибровочные таблицы судовых танков для расчета остойчивости изготавливаются также на этапе проектирования судна на основе судовых чертежей и не учитывают реальных особенностей танков. Калибровочные таблицы, пригодные для целей драфт-сюрвея, изготавливаются после постройки судна по факту получения реальных данных обмера танков изнутри по стандарту ISO 8311.

Заключение (Conclusion)

Предложенный алгоритм проведения драфт-сюрвея является унифицированным и предназначен для определения количества погруженного груза по осадке судна. До последнего времени при осуществлении драфт-сюрвея применялось множество различных методов и формул, результатом которых являлись разногласия по количеству груза, связанные с отсутствием единого ме-

тогда. Наиболее распространенной ошибкой при проведении драфт-сюрвея была замена исходных данных, необходимых для применения указанного метода, расчетными данными, в результате чего возникала существенная погрешность.

Применение формул, не относящихся к официально признанным, допустимо лишь в том случае, когда использование этих формул документально подтверждено именно в целях использования драфт-сюрвея на данном конкретном судне.

Использование предложенного алгоритма обеспечивает необходимую точность расчета погруженного груза на борт судна, обеспечивает отсутствие коммерческого брака и в итоге судебных разбирательств при доставке навалочных грузов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ли С. В. Инновационная технология по разгрузке массовых навалочных грузов / С. В. Ли, О. Ж. Рабат, Н. Д. Сайдинбаева, А. Н. Салманова // *Новости науки Казахстана*. — 2020. — № 2 (144). — С. 60–65.
2. Ситов А. Н. Морская перевозка железа прямого восстановления навалом / А. Н. Ситов, В. А. Маловечко, А. Е. Слисан // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1162–1178. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1162-1178.
3. Галин А. В. Экономическое развитие общества и транспортные системы доставки грузов / А. В. Галин, А. А. Дмитриев, Э. В. Виноградова // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. — 2020. — № 1 (69). — С. 7–12. DOI: 10.24143/1812-9498-2020-1-7-12.
4. Арефьев А. А. Специфика транспортировки навалочных грузов / А. А. Арефьев // *Современные вопросы экономики и управления: сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции*. — Кинель: Самарская государственная сельскохозяйственная академия, 2018. — С. 228–230.
5. Ивановский А. Н. Расчет и программная реализация процедуры драфт сюрвей в рамках практического курса «Автоматизация судовождения» / А. Н. Ивановский, А. С. Сиушкина, Ю. Д. Шпатович // *Современные тенденции практической подготовки в морском образовании. Материалы III национальной научно-практической конференции*. — Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2022. — С. 291–297.
6. Тимченко Т. Н. Актуальные проблемы определения массы насыпных грузов методом «драфт-сюрвей» / Т. Н. Тимченко, М. В. Бухтенко // *Научное обозрение*. — 2017. — № 19. — С. 104–108.
7. Kuznetsov A. L. Simulation for assessment of bulk cargo berths number / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, A. E. Slitsan // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — IOP Publishing, 2017. — Vol. 87. — Is. 6. — Pp. 062010. DOI: 10.1088/1755-1315/87/6/062010.
8. Ивановский А. Н. Экономическое обоснование эффективности внедрения АСУ ТП Драфт сюрвей на судах типа балкер / А. Н. Ивановский, Е. Д. Коломейцева, А. Д. Кузнецов // *Вестник Керченского государственного морского технологического университета*. — 2022. — № 3. — С. 242–253.
9. Тарасов В. В. Драфт-сюрвей как оптимальный способ определения количества навалочных грузов при перевозке водным транспортом / В. В. Тарасов // *Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции*. — 2010. — Т. 1. — № 1. — С. 100–102.
10. Соколов С. С. Автоматизация определения осадки судна методами машинного обучения / С. С. Соколов, А. Н. Ивановский // *Современные наукоемкие технологии*. — 2021. — № 7. — С. 67–72. DOI: 10.17513/snt.38754.

REFERENCES

1. Li, S. V., O. Zh. Rabat, N. D. Saidinbaeva, and A. N. Salmanova. “Innovatsionnaya tekhnologiya po razgruzke massovykh navalochnykh грузов.” *Novosti nauki Kazakhstana* 2(144) (2020): 60–65.
2. Sitov, Alexandr N., Vladimir A. Malovechko, and Andrey E. Slitsan. “Sea transportation of direct reduced iron in bulk.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1162–1178. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1162-1178.
3. Galin, Alexander Valentinovich, Alexander Aleksandrovich Dmitriev, and Erika Vladimirovna Vinogradova. “Economic development of society and cargo transportation systems.” *Vestnik of Astrakhan state technical university* 1(69) (2020): 7–12. DOI: 10.24143/1812-9498-2020-1-7-12.

4. Aref'ev, A. A. "Spetsifika transportirovki navalochnykh грузов." *Sovremennye voprosy ekonomiki i upravleniya. Sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Kinel': Samarskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaistvennaya akademiya, 2018. 228–230.
5. Ivanovskii, A. N., A. S. Siushkina, and Yu. D. Shpatovich. "Raschet i programnaya realizatsiya protsedury draft syurvei v ramkakh prakticheskogo kursa «Avtomatizatsiya sudovozhdeniya»." *Sovremennye tendentsii prakticheskoi podgotovki v morskoy obrazovanii. Materialy III natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Kerch': FGBOU VO «Kerchenskii gosudarstvennyi morskoi tekhnologicheskii universitet», 2022. 291–297.
6. Timchenko, Tat'yana Nikolaevna, and Mikhail Vladimirovich Bukhtenko. "Relevant problems of determining the mass of bulk cargo by the draft survey method." *Scientific Review* 19 (2017): 104–108.
7. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, and A. E. Slitsan. "Simulation for assessment of bulk cargo berths number." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 87. No. 6. IOP Publishing, 2017. DOI: 10.1088/1755-1315/87/6/062010.
8. Ivanovskii, A. N., E. D. Kolomeitseva, and A. D. Kuznetsov. "Analysis of an automated draught survey system implementation efficiency on bulkers." *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University* 3 (2022): 242–253.
9. Tarasov, V. V. "Draft-syurvei kak optimal'nyi sposob opredeleniya kolichstva navalochnykh грузов pri perevozke vodnym transportom." *Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* 1.1 (2010): 100–102.
10. Sokolov, S. S., and A. N. Ivanovskiy. "Automatization of draft marks reading on ships with machine learning." *Modern high technologies* 7 (2021): 67–72. DOI: 10.17513/snt.38754.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галин Александр Валентинович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru

Слицан Андрей Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: slicanae@gumrf.ru

Виноградова Эрика Владимировна — аспирант
Научный руководитель:
Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: fyynn@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galin, Alexander V. —
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: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru

Slitsan, Andrey E. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: slicanae@gumrf.ru

Vinogradova, Erika V. — Postgraduate
Supervisor:
Kuznetsov, Aleksandr L. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: fyynn@list.ru

Статья поступила в редакцию 3 ноября 2022 г.
Received: November 3, 2022.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-15-31

RECOMMENDATIONS ON VESSELS COUPLING IN CASE OF EMERGENCIES IN POLAR WATERS

P. I. Petukhov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The ways of implementing international regulations in force since 2017 are considered in the paper. The main one is the receipt by the vessel of a Certificate of a polar navigation vessel, which is impossible without the availability of special documentation — Instructions for the operation of vessels in polar waters. The current international acts contain instructions for the development of such Manuals with detailed requirements for each section. Thus, according to the instructions in chapter 3 of the Instructions on interaction with Rescue and Search services, it is recommended to provide procedures for preparing for the voyage and for actions in emergency situations. The approaches for the development of recommendations for the safety of various types of vessels navigating in polar waters, including the analysis of various coupling options that can be implemented in polar navigation conditions, are elaborated in the paper. The various coupling options: in an ice caravan, in shallow ice, the creation of a rigid coupling (an option in which all possible mooring devices are brought between vessels), are proposed. The results of the study can significantly improve the safety of navigation in ice conditions, and can also form the basis for the development of operating instructions in polar waters and be adapted for practical use for various types of vessels.

Keywords: International Polar Code, ice navigation of vessels, methods for reducing the risk, of ice damage to ships.

For citation:

Petuhov, Pavel I. "Recommendations on vessels coupling in case of emergencies in polar waters." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 15–31.
DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-15-31.

УДК 656.61.052

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОЗДАНИЮ СЦЕПКИ ДЛЯ СУДОВ, СОВЕРШАЮЩИХ ПЛАВАНИЕ В ПОЛЯРНЫХ ВОДАХ, ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

П. И. Петухов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена разработке рекомендаций для судов, совершающих плавание в полярных водах, при возникновении чрезвычайных ситуаций, а также способам реализации международных предписаний, действующих с 2017 г., главным из которых является «Свидетельство судна полярного плавания». Получение такого свидетельства невозможно без наличия специальной документации, такой как «Наставления по эксплуатации судов в полярных водах». Отмечается, что действующие международные акты содержат инструкции по разработке таких документов с перечнем подробных требований к каждому разделу. Так, согласно инструкциям, которые включены в гл. 3 Наставлений о взаимодействии со спасательными и поисковыми службами, рекомендуется предусмотреть процедуры по подготовке к рейсу и выполнению необходимых действий в аварийных ситуациях. В статье исследованы подходы для разработки рекомендаций по обеспечению безопасности различных типов судов, осуществляющих плавание в полярных водах, в том числе проанализированы различные варианты сцепки, которые могут применяться в условиях полярного плавания. Предложены следующие варианты сцепки: в ледовом караване, в мелкобитом льду, варианты физического взаимодействия, такие как подход под прямым углом к аварийному судну, подход лагом к аварийному судну одного или нескольких судов, создание так называемой «жесткой» сцепки — тот вариант, когда между судами заводятся все возможные швартовные устройства: пропиленовые, нейлоновые концы,

стальные тросы, которые должны быть надежно закреплены на аварийном судне и подошедших к нему поддерживающих судах. Результаты исследования позволяют существенно повысить безопасность плавания в ледовых условиях, а также могут лечь в основу разработки наставлений по эксплуатации в полярных водах и быть адаптированы к практическому применению для различных типов судов.

Ключевые слова: Международный полярный кодекс, ледовое плавание судов, методы снижения опасности, ледовые повреждения судов.

Для цитирования:

Петухов П. И. Рекомендации по созданию сцепки для судов, совершающих плавание в полярных водах, при возникновении чрезвычайных ситуаций / П. И. Петухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 15–31. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-15-31.

Введение (Introduction)

Северный морской путь, воды Арктики и Антарктики приобретают все большее значение для мирового судоходства, о чем свидетельствует интерес исследователей к разработке вопросов данной проблематики, а также множество нормативных документов, регламентирующих особенности осуществления судами плавания в рассматриваемых условиях. Так, мореплавание по северным и южным широтам выше 60 параллели должно удовлетворять всем основным конвенциям и в дополнение к ним международное судоходство начиная с 2017 г. осуществляется в соответствии с «Международным кодексом для судов, эксплуатируемых в полярных водах» (далее — МПК). Обязательное соблюдение требований МПК предусмотрено двумя конвенциями: СОЛАС-74 и МАРПОЛ 73/78 [1], [2]. При этом МПК требует разработки для каждого судна, эксплуатируемого в полярных водах, специального «Наставления по эксплуатации судов в полярных водах» (далее — НЭПВ).

Плавание в акватории Северного морского пути (СМП) должно осуществляться согласно требованиям, установленным в Приказе № 7 Министерства транспорта РФ от 17.01.2013 г. [3]. Администрация СМП выдает разрешение на плавание судов, в том числе на основании «Свидетельства судна полярного плавания» и «Наставлений по эксплуатации судов, эксплуатируемых в полярных водах» (НЭПВ). Данные документы проверяются службами инспекции государственного портового контроля на предмет соответствия требованиям МПК [4].

В современных условиях возникает потребность включения вариантов физического взаимодействия между судами путем создания сцепки — подхода к аварийному судну [5]–[7], швартовки между судами с целью разработки рекомендаций для судов, совершающих плавание в полярных водах, в случае возникновения чрезвычайных ситуаций [8], а также должно быть заложено (выделить красным для автора) в основу разработки НЭПВ для выполнения главной цели МПК — *безопасного плавания в полярных водах* [9]. Анализ специальной литературы показывает, что современными исследователями осознана значимость данного вопроса, что подтверждается имеющимися публикациями, в которых рассматриваются вопросы обеспечения экологической безопасности [10]–[12], а также обеспечения безопасного мореплавания [13], [14].

В настоящее время в специальной научной литературе такие вопросы, как создание вариантов физического взаимодействия между судами путем создания сцепки — подхода к аварийному судну, швартовки между судами, полярного плавания рассмотрены недостаточно. Так, в работе [15] рассмотрены основные принципы взаимодействия между судами в отношении действий, предпринимаемых в чрезвычайных ситуациях в ледовых условиях [16]. Однако в настоящее время подготовка к рейсу весьма типовая, при этом действия в аварийных ситуациях требуют более подробного рассмотрения и исследования вариантов сцепки в ледовых условиях.

Цель исследования — разработать рекомендации по созданию сцепки для судов при возникновении чрезвычайной ситуации в условиях плавания в полярных водах.

Задачи исследования:

1. Осуществить расчет эффективного способа обеспечения безопасности в аварийных случаях при повреждении корпуса судна в полярных водах.

2. Исследовать различные варианты взаимодействия и сцепки судов в случаях повреждений корпуса в разных условиях ледового плавания.
3. Разработать рекомендации по созданию сцепки для судов при возникновении чрезвычайной ситуации в условиях плавания в полярных водах.

Методы и материалы (Methods and materials)

Проведенное исследование включает численные методы расчета параметров движения судна в полярных водах и действий в аварийных ситуациях с учетом влияния других судов с использованием математического моделирования. НЭПВ предусмотрены действия судов в чрезвычайных ситуациях. Одним из вариантов взаимодействия между судами является физическое взаимодействие, которое можно условно обозначить как *сцепка судов*. В предлагаемой статье рассматриваются варианты сцепки в различных условиях плавания.

В качестве теоретической базы может использоваться следующая формулировка: *сохранение устойчивости аварийного судна в случае аварии и наличия вблизи иных коммерческих либо спасательных судов может осуществляться посредством создания сцепки с аварийным судном*. При создании сцепки следует предусмотреть *кранцевую защиту* для предотвращения получения повреждений корпуса поддерживающего судна. Такая сцепка может быть *жесткой* в случае, когда используются специальные сцепные устройства, или *гибкой*, когда применяются швартовные тросы [16]. При любом варианте сцепки возникает дополнительный восстанавливающий момент (далее — ДВМ), который по величине может быть различным в зависимости от того, как расположены суда после «карамболажа» и какие действия осуществляет поддерживающее судно.

Рассчитаем минимальную величину ДВМ под прямым углом к аварийному судну (рис. 1). Суммарный восстанавливающий момент (далее — СВМ) $M_{\Sigma a}$ при расположении поддерживающего судна под прямым углом (рис. 1) можно рассчитать по формуле

$$M_{\Sigma a} = M_{в.а} + M_{в.п} = P_a h_{1a} \sin \theta_a + P_{\Pi} H_{\Pi} \sin \psi_{\Pi}, \quad (1)$$

где h_{1a} — поперечная метацентрическая высота аварийного судна после начала поступления воды через пробоину, м;

$M_{в.а}$ — поперечный восстанавливающий момент аварийного судна после начала поступления воды через пробоину;

$M_{в.п}$ — продольный восстанавливающий момент поддерживающего судна;

P_a — весовое водоизмещение аварийного судна, кН;

θ_a — угол крена аварийного судна, град.;

P_{Π} — весовое водоизмещение поддерживающего судна, кН;

H_{Π} — продольная метацентрическая высота ледокола, м;

ψ_{Π} — угол дифферента поддерживающего судна, град. [6].

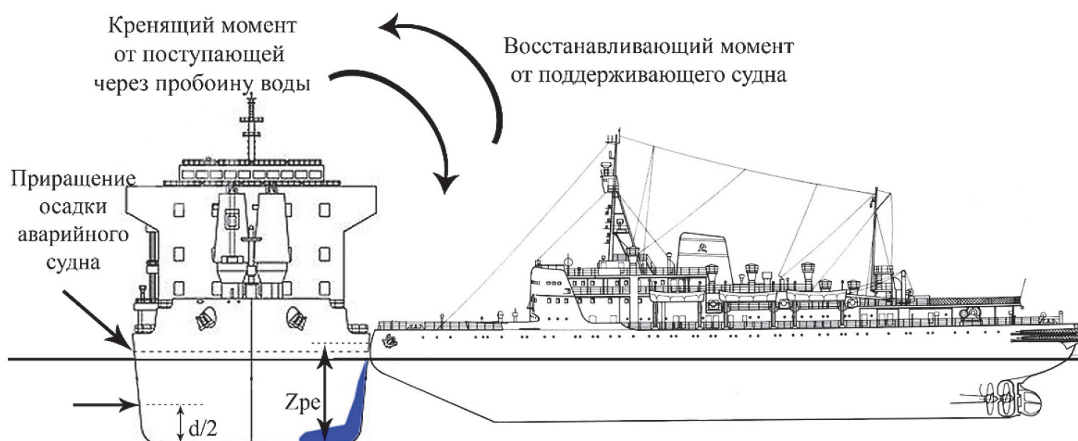


Рис. 1. Возникновение дополнительного восстанавливающего момента

Для того чтобы обеспечить сцепку судов, можно воспользоваться работой гребного винта поддерживающего судна на упор в направлении аварийного судна. В таком случае ДВМ возникает на корпусе аварийного судна, величину которого можно рассчитать по формуле

$$M_{\text{ВГВП}} = P_e (z_{Pe} - z_r) \cos \theta_a, \quad (2)$$

где P_e — тяга гребного винта поддерживающего судна, кН;

z_{Pe} — точка приложения силы от работы гребного винта поддерживающего судна на корпусе аварийного судна, м;

z_r — координата равнодействующей приложения гидродинамических сил на корпусе аварийного судна, м;

θ_a — угол крена аварийного судна, град.

Рассмотренные виды сцепки показывают возможность получения СВМ на аварийном судне при различных вариантах. СВМ при расположении поддерживающего судна под прямым углом и работе его гребного винта в упор в направлении аварийного судна можно рассчитать по формуле

$$M_{\Sigma a} = P_a h_{1a} \sin \theta_a + P_{\Pi} H_{\Pi} \sin \psi_{\Pi} + P_e (z_{Pe} - z_r) \cos \theta_a, \quad (3)$$

Согласно расчетам, выполняемым по формулам (1)–(3), видно, что каждый вариант сцепки имеет свои положительные стороны при различных ледовых повреждениях судна, поскольку многократно увеличивает на аварийном судне восстанавливающий момент для устранения возможности его опрокидывания [11]. Расчеты позволили выявить такой наиболее эффективный способ обеспечения безопасности в аварийных случаях при повреждении корпуса судна в полярных водах, как *комбинирование действий по перекачке жидкости и извлечению пробоины судна из воды*, а также рассматриваемый в данной статье способ *дальнейшей сцепки судов с поврежденным судном* [8], [15]. Согласно рассмотренным вариантам для каждого типа судна, можно предусмотреть необходимые меры, соответствующие предписаниям к НЭПВ, при взаимодействии со спасателями и иными судами в аварийных ситуациях.

В результате выполненных расчетов судам, совершающим плавание в полярных водах, могут быть рекомендованы такие необходимые действия при возникновении аварийной ситуации, как создание сцепки с другими судами и извлечение пробоины из воды.

Рассмотрим варианты взаимодействия и сцепки судов в случае повреждений корпуса в различных условиях ледового плавания.

1-й вариант — взаимодействие при повреждениях корпуса судна в ледовом караване.

Наиболее характерные ситуации.

1. *Повреждение получает судно, следующее за ледоколом в ледовом караване в относительно узком ледовом канале; ход аварийного судна относительно воды сохранен.*

Судно, следующее за поврежденным судном, швартуется к его корпусу для осуществления сцепки (рис. 2). На судах в месте сцепки устанавливается дополнительная кранцевая защита. Суммарный восстанавливающий момент на аварийном судне после обеспечения сцепки может быть определен по формуле

$$M_{\Sigma a} = P_a h_{1a} \sin \theta_a + P_{\text{л}} h_{\text{л}} \sin \theta_{\text{л}} + P_{\Pi} h_{\Pi} \sin \theta_{\Pi}, \quad (4)$$

где h_{1a} — поперечная метацентрическая высота аварийного судна после начала поступления воды через пробоину, м;

P_a — весовое водоизмещение аварийного судна, кН;

θ_a — угол крена аварийного судна, град;

$P_{\text{л}}$ — весовое водоизмещение ледокола, кН;

$h_{\text{л}}$ — поперечная метацентрическая высота ледокола, м;

$\theta_{\text{л}}$ — угол крена ледокола, град;

P_{Π} — весовое водоизмещение поддерживающего судна, следовавшего в караване за аварийным судном, кН;

h_{π} — поперечная метацентрическая высота поддерживающего судна, следовавшего в караване за аварийным судном, м;

θ_{π} — угол крена поддерживающего судна, следовавшего в караване за аварийным судном, град.

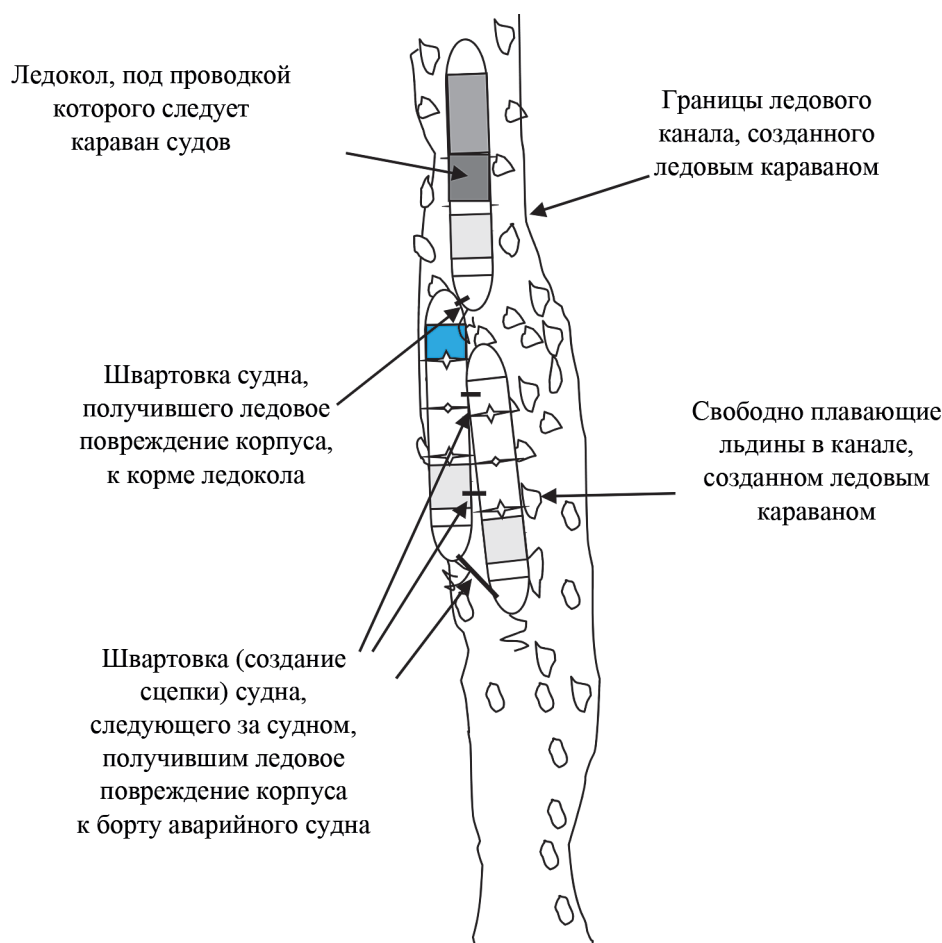


Рис. 2. Швартовка ледокола к поврежденному судну

Следовательно, СВМ на поврежденном судне после обеспечения сцепки увеличивается за счет остойчивости и сцепки аварийного судна с ледоколом и поддерживающим судном (4).

2. Повреждение получает судно, следующее за ледоколом в караване в относительно узком ледовом канале; ход аварийного судна относительно воды потерян.

Судно, следующее за поврежденным судном, швартуется к его корпусу для осуществления сцепки (рис. 3). На корпус поврежденного суда давят ледокол и поддерживающее судно. На судах в месте сцепки устанавливается дополнительная кранцевая защита.

ДВМ на аварийном судне после создания сцепки может быть определен по формуле

$$M_{\Sigma a} = P_a h_{1a} \sin \theta_a + P_l h_l \sin \theta_a + P_{\pi} h_{\pi} \sin \theta_a + P_l H_l \sin \psi_a + P_{\pi} H_{\pi} \sin \psi_a + P_{ел} (zP_l - z_l) \cos \theta_a \cdot dK_{a,l} + P_{еп} (zP_{\pi} - z_{\pi}) \cos \theta_a \cdot dK_{a,\pi}, \quad (5)$$

где h_{1a} — поперечная метацентрическая высота аварийного судна после начала поступления воды через пробоину, м;

P_a — весовое водоизмещение аварийного судна, кН;

θ_a — угол крена аварийного судна, град.;

ψ_a — угол дифферента аварийного судна, град.;

P_l — весовое водоизмещение ледокола, кН;

h_l — поперечная метацентрическая высота ледокола, м;

- P_{Π} — весовое водоизмещение ледокола, кН;
 h_{Π} — поперечная метацентрическая высота поддерживающего судна, следовавшего в караване за аварийным судном, м;
 P_{Π} — весовое водоизмещение поддерживающего судна, следовавшего в караване за аварийным судном, кН;
 H_{Π} — продольная метацентрическая высота поддерживающего судна, следовавшего в караване за аварийным судном, м;
 H_{Π} — продольная метацентрическая высота ледокола м;
 $P_{\text{ел}}$ — тяга гребного винта ледокола, кН;
 zP_{Π} — точка приложения силы от работы ледокола на корпусе аварийного судна, м;
 $P_{\text{еп}}$ — тяга гребного винта поддерживающего судна, кН;
 zP_{Π} — точка приложения силы от работы гребного винта поддерживающего судна на корпусе аварийного судна, м;
 z_{Γ} — координата равнодействующей приложения ледового покрова на корпусе аварийного судна, м;
 $dK_{\text{а.л}}$ — разница курсов ледокола и аварийного судна, град.;
 $dK_{\text{а.п}}$ — разница курсов поддерживающего и аварийного судна, град.

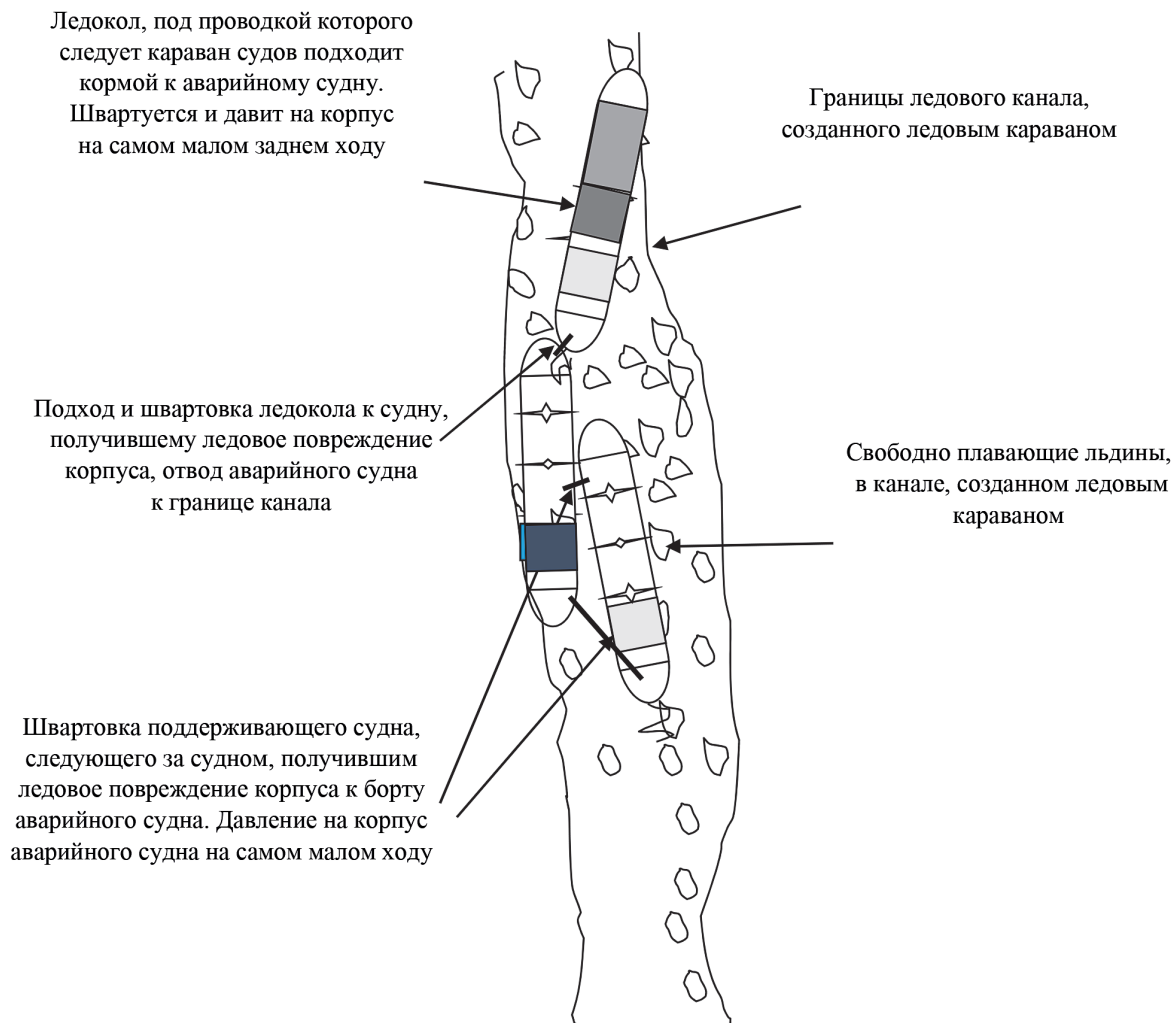


Рис. 3. Швартовка ледокола к поврежденному судну

Расчеты показывают, что давление на корпус аварийного судна поддерживающих судов существенно увеличивают СВМ на этом поврежденном судне даже при потере хода относительно

воды (5). Взаимодействие аварийного судна с поддерживающими судами путем швартовки и создания сцепки создает благоприятные условия для организации эвакуации людей с аварийного судна путем пересадки на поддерживающие суда без водной (ледовой) спасательной операции.

3. Повреждение получает судно, следующее за ледоколом в ледовом караване в относительно широком ледовом канале; ход аварийного судна относительно воды потерян.

Суммарный восстанавливающий момент на аварийном судне после обеспечения сцепки может быть определен в виде

$$M_{\Sigma a} = P_a h_{1a} \sin \theta_a + P_l h_l \sin \theta_a + P_n h_n \sin \theta_a, \quad (6)$$

где h_{1a} — поперечная метацентрическая высота аварийного судна после начала поступления воды через пробоину, м;

P_a — весовое водоизмещение аварийного судна, кН;

θ_a — угол крена аварийного судна, град.;

P_l — весовое водоизмещение ледокола, кН;

h_l — поперечная метацентрическая высота ледокола, м;

h_n — поперечная метацентрическая высота поддерживающего судна, следовавшего в караване за аварийным судном, м;

P_n — весовое водоизмещение поддерживающего судна, следовавшего в караване за аварийным судном, кН.

Ледокол, после швартовки носом к аварийному судну движется вперед, выдавливая свободно плавающий лед между корпусами судов, затем швартуется к аварийному судну всем бортом

Судно, следующее за ледоколом, получающее ледовое повреждение корпуса. Швартуется к ледоколу и поддерживающему судну по всему борту

Судно, следующее за судном, получившим ледовое повреждение корпуса, движется вперед, выдавливая свободно плавающий лед между корпусами судов, затем швартуется к аварийному судну всем бортом

Границы ледового канала, созданного ледовым караваном

Свободно плавающие льдины, в канале, созданном ледовым караваном

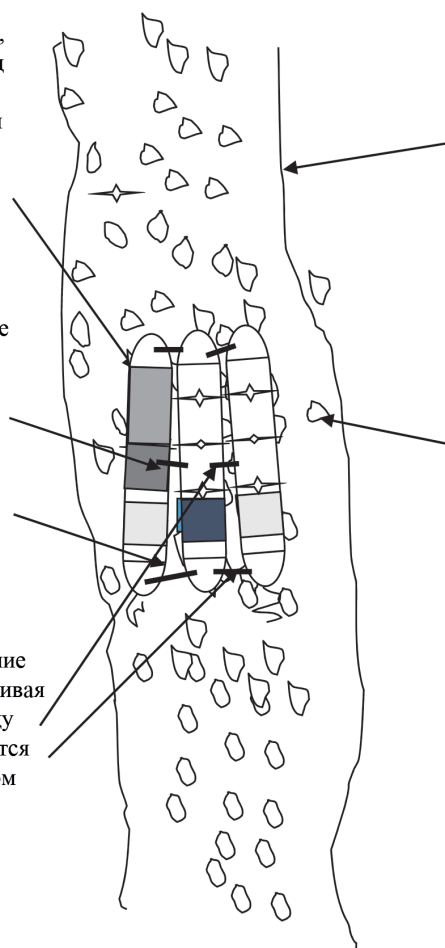


Рис. 4. Движение вперед ледокола после швартовки носом к аварийному судну

Таким образом, ледокол швартуется выдавливая свободно плавающий лед между корпусами судов, к аварийному судну всем бортом, обеспечивая сцепку. Для предотвращения повреждения

корпуса ледокола заводится кранцевая защита. Поэтому судно, следующее за получившим ледовое повреждение корпуса судном, движется вперед, выдавливая свободно плавающий лед между корпусами судов, затем швартуется к аварийному судну всем бортом, обеспечивая сцепку. Для выполнения расчета по формуле (6), сравнения и анализа результатов с целью получения выводов использованы данные аварийного и поддерживающих судов, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные аварийного и поддерживающих судов

Водоизмещение аварийного судна, т	12 000
Водоизмещение аварийного судна, кН	97 000
Начальная поперечная МВ аварийного судна, м	0,51
Угол крена аварийного судна, град.	1,0
Водоизмещение ледокола,	20 000
Водоизмещение ледокола, кН	100 000
Начальная поперечная МВ ледокола, м	5
Угол крена ледокола, град.	1
Водоизмещение поддерживающего судна, т	11 000
Водоизмещение поддерживающего судна, кН	97 000
Начальная поперечная МВ поддерживающего судна, м	1

Результаты расчета схемы швартовки (рис. 5) показывают, что сцепка поврежденного судна с поддерживающими судами значительно увеличивает ДВМ на поврежденном судне. Жесткость сцепки позволяет использовать существующие и создавать новые швартовные устройства по сравнению с существующими. Необходимо заводить дополнительную кранцевую защиту во избежание повреждения корпуса поддерживающих судов.

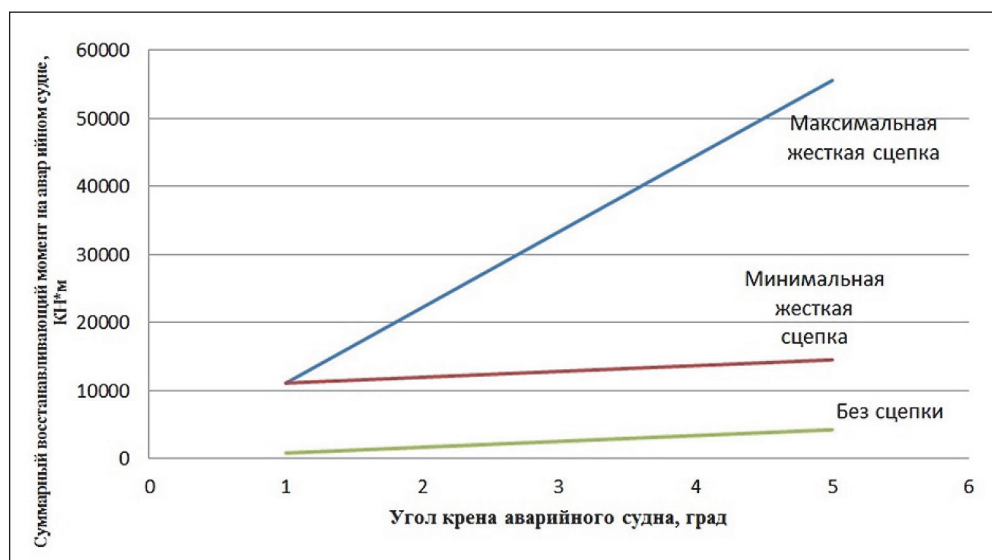


Рис. 5. Изменение величины СВМ при различных вариантах сцепки

Взаимодействие аварийного судна с поддерживающими судами путем швартовки и создания сцепки создает благоприятные условия для организации эвакуации людей с аварийного судна путем пересадки на поддерживающие суда без водной (ледовой) спасательной операции [8], [16].

4. Повреждение получает судно, следующее в середине ледового каравана в относительно широком ледовом канале; ход аварийного судна относительно воды потерян.

Судно после швартовки к аварийному судну движется назад, выдавливая свободно плавающий лед между корпусами судов, затем швартуется к аварийному судну максимальной частью борта

Судно после швартовки к аварийному судну движется назад, выдавливая свободно плавающий лед между корпусами судов, затем швартуется к аварийному судну максимальной частью борта

Судно, получившее ледовое повреждение корпуса швартуется к поддерживающим судам максимальной частью борта

Судно, получившее ледовое повреждение корпуса, швартуется к поддерживающим судам максимальной частью борта

Судно, следующее за судном, получившим ледовое повреждение корпуса, движется вперед, выдавливая свободно плавающий лед между корпусами судов, затем швартуется к аварийному судну максимальной частью борта

Судно, следующее за судном, получившим ледовое повреждение корпуса, движется вперед, выдавливая свободно плавающий лед между корпусами судов, затем швартуется к аварийному судну максимальной частью борта

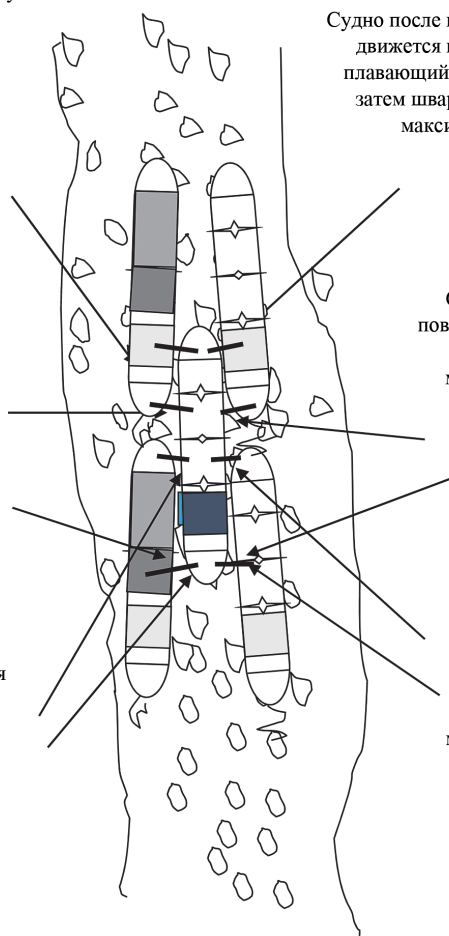


Рис. 6. Суда после швартовки к аварийному судну

После швартовки к аварийному судну (рис. 6) суда движутся назад и вперед, выдавливая свободно плавающий лед между корпусами судов, затем швартуется к аварийному судну максимальной частью борта. На судах в месте сцепки устанавливается дополнительная кранцевая защита. Суммарный восстанавливающий момент (СВМ) на аварийном судне после создания сцепки в результате швартовки может быть определен в виде формулы

$$M_{\Sigma a} = P_a h_{1a} \sin \theta_a + P_{n1} h_{n1} \sin \theta_{n1} + P_{n2} h_{n2} \sin \theta_{n2} + P_{n3} h_{n3} \sin \theta_{n3} + P_{n4} h_{n4} \sin \theta_{n4}, \quad (7)$$

где h_{1a} — поперечная метацентрическая высота аварийного судна после начала поступления воды через пробоину, м;

P_a — весовое водоизмещение аварийного судна, кН;

θ_a — угол крена аварийного судна, град.;

P_{n1} — весовое водоизмещение первого поддерживающего судна 1, кН;

θ_{n1} — угол крена поддерживающего судна 1, град.;

h_{n1} — поперечная метацентрическая высота поддерживающего судна 1, следующего в караване перед аварийным судном 1, м;

P_{n2} — весовое водоизмещение второго поддерживающего судна 2, кН;

θ_{n2} — угол крена поддерживающего судна 2, град.;

h_{n2} — поперечная метацентрическая высота второго поддерживающего судна 2, следующего в караване перед аварийным судном, м;

P_{n3} — весовое водоизмещение третьего поддерживающего судна 3, кН;

θ_{n3} — угол крена поддерживающего судна 3, град.;

$h_{п3}$ — поперечная метацентрическая высота третьего поддерживающего судна 3, следующего в караване за аварийным судном, м;

$P_{п4}$ — весовое водоизмещение четвертого поддерживающего судна 4, кН;

$\theta_{п4}$ — угол крена поддерживающего судна 4, град.;

$h_{п4}$ — поперечная метацентрическая высота четвертого поддерживающего судна 4, следующего в караване за аварийным судном, м.

Анализ величины СВМ по формуле (7) представлен на рис. 7. Для выполнения расчета, сравнения и анализа результатов из табл. 1 выбраны данные судов. Исходные данные аварийного и поддерживающих судов для расчета по формуле (7) приведены в табл. 1.

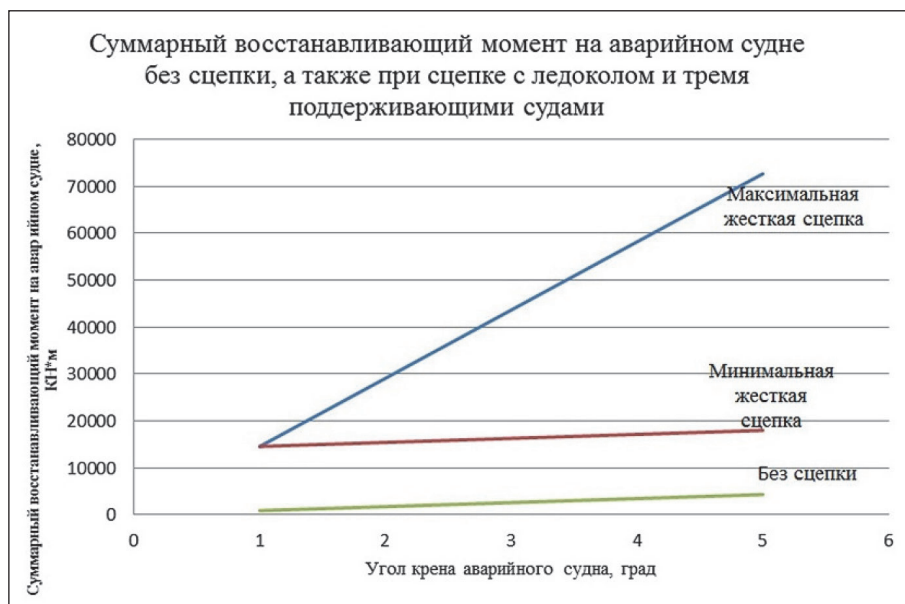


Рис. 7. Анализ величины СВМ по результатам расчета швартовки судов

Результаты расчета швартовки судов, приведенные на рис. 6 и 7, показывают, что увеличение количества судов в сцепке значительно увеличивает СВМ на поврежденном судне, поэтому необходимо заводить дополнительную кранцевую защиту во избежание повреждения корпусов поддерживающих судов. Взаимодействие поврежденного судна с поддерживающими судами путем швартовки и создания сцепки создает благоприятные условия для организации эвакуации людей с аварийного судна путем пересадки на поддерживающие суда, без водной (ледовой) спасательной операции [7], [11].

2-й вариант — взаимодействие судов при повреждениях на чистой воде.

Рассмотрим наиболее характерные ситуации.

1. Повреждение получает судно на воде, свободной от сплоченного льда, ход аварийного судна относительно воды потерян, на сигнал бедствия прибывают другие суда (см. 1-й вариант).

На рис. 8 рассмотрена ситуация, когда аварийное судно потеряло ход относительно воды. На судах в месте сцепки устанавливается дополнительная кранцевая защита. СВМ на аварийном судне после появления давления от подошедших судов может быть определен в виде

$$M_{\Sigma a} = P_a h_{1a} \sin \theta_a + P_{e1} \left(z_{Pe1} - \frac{d}{2} \right) \cos \theta_a + P_{e2} \left(z_{Pe2} - \frac{d}{2} \right) \cos \theta_a, \quad (8)$$

где h_{1a} — поперечная метацентрическая высота аварийного судна после начала поступления воды через пробоину, м;

θ_a — угол крена аварийного судна, град.;

P_{e1} — тяга гребного винта поддерживающего судна 1, кН;

z_{Pe1} — точка приложения силы от работы поддерживающего судна 1 на корпусе аварийного судна, м;

P_{e2} — тяга гребного винта поддерживающего судна, кН;
 z_{Pe2} — точка приложения силы от работы гребного винта поддерживающего судна 2 на корпусе аварийного судна, м;
 $d/2$ — координата равнодействующей приложения гидродинамических сил на корпус аварийного судна, равная середине осадки аварийного судна, м.



Рис. 8. Повреждение судна на открытой воде, свободной от сплоченного льда

Для выполнения расчета, сравнения и анализа результатов выбраны исходные данные судов, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные аварийного и поддерживающих судов

Водоизмещение аварийного судна, т	11000
Водоизмещение аварийного судна, кН	97000
Начальная поперечная МВ аварийного судна, м	0.51
Угол крена аварийного судна, град.	2
Осадка аварийного судна, м	9
Водоизмещение поддерживающего судна 1, т	11 000
Водоизмещение поддерживающего судна 1, кН	97 000
Начальная продольная МВ поддерживающего судна 1, м	151
Угол дифферента поддерживающего судна 1, град.	1.2
Тяга поддерживающего судна 1, кН	150
Аппликата приложения упора поддерживающего судна 1, м	18

Окончание табл. 2

Водоизмещение поддерживающего судна 2, т	11 000
Водоизмещение поддерживающего судна 2, кН	97 000
Начальная продольная МВ поддерживающего судна 2, м	151
Угол дифферента поддерживающего судна 2, град.	2
Тяга поддерживающего судна 2, кН	151
Апplikата приложения упора поддерживающего судна 2, м	18

Анализ величины СВМ по формуле (8) приведен на рис. 9.

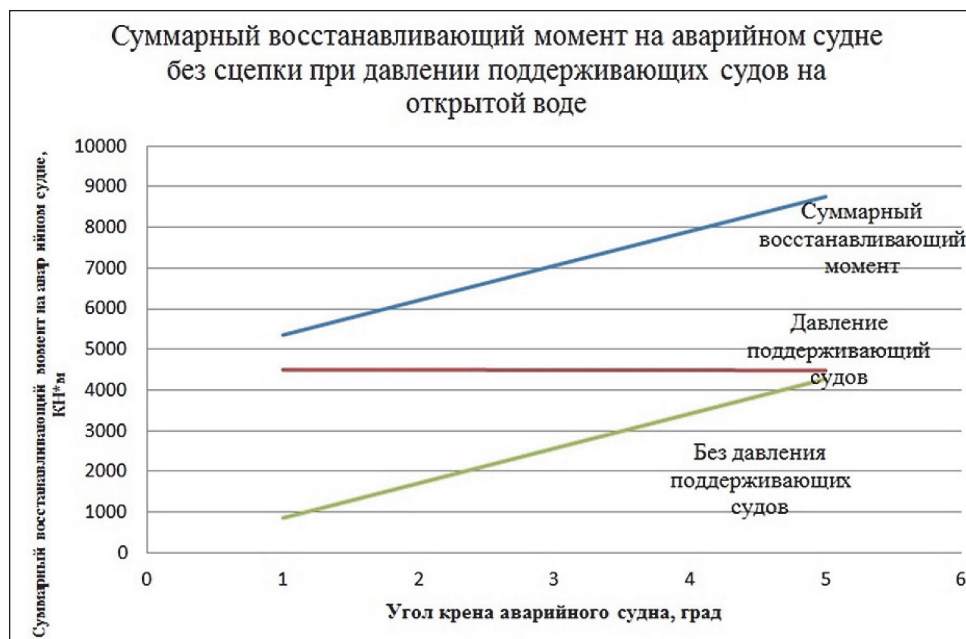


Рис. 9. Анализ величины СВМ

Таким образом, суда, пришедшие на спасение по сигналу бедствия аварийного судна, подходят носом к пониженному борту аварийного судна и начинают работать двигателем на самый малый передний ход (на судах предусматривается дополнительная кранцевая защита корпуса).

Согласно схеме, представленной на рис. 10, давление поддерживающих судов на корпус поврежденного судна путем работы движителей на самый малый ход может значительно увеличить величину СВМ на поврежденном судне даже при отсутствии сцепки. На судах значительных продольных размеров следует с осторожностью выполнять данный вид сцепки, осуществляя подход к поврежденному судну в местах, указанных на борту судна как TUG или место подхода буксира для обеспечения воздействия по нормали к поврежденному судну. Этот способ, позволяющий избежать опасного влияния аварийного судна на корпус поддерживающих судов, может быть рекомендован для судов.

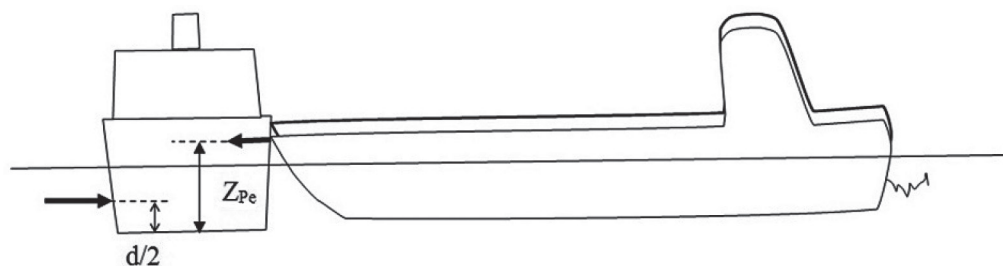


Рис. 10. Схема сил на аварийном судне при воздействии поддерживающих судов после начала работы двигателем на самый малый передний ход

2. Повреждение получает судно на воде, свободной от сплоченного льда; ход аварийного судна относительно воды потерян, на сигнал бедствия прибывают другие суда (рис. 11).

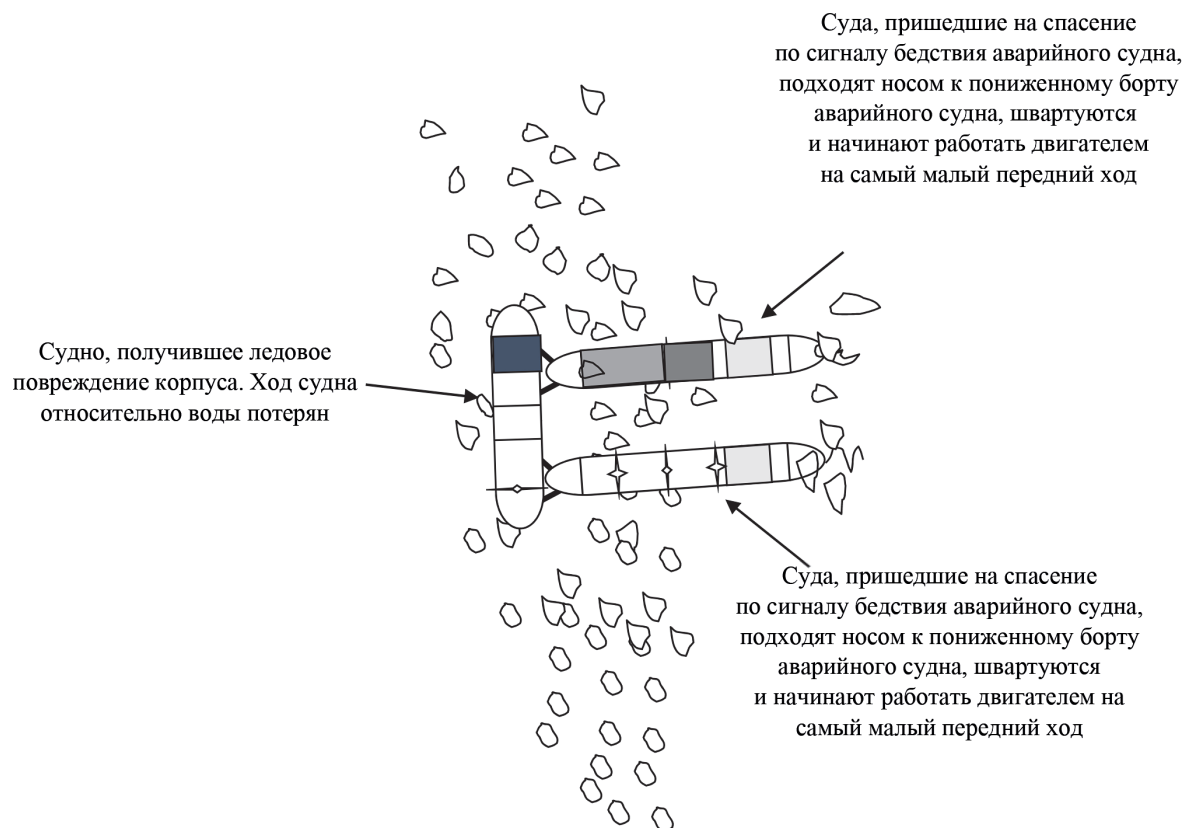


Рис. 11. Повреждение судна на открытой воде, свободной от сплоченного льда

Аварийное судно потеряло ход относительно воды. Суда, пришедшие на спасение по сигналу бедствия аварийного судна, подходят носом к пониженному борту аварийного судна, швартуются и начинают работать двигателем на самый малый передний ход. СВМ на аварийном судне после швартовки подошедших судов и обеспечения сцепки с аварийным судном может быть определен по формуле

$$M_{\Sigma a} = P_a h_a \sin \theta_a + P_1 H_1 \sin \psi_1 + P_2 H_2 \sin \psi_2, \quad (10)$$

где h_a — поперечная метацентрическая высота аварийного судна после начала поступления воды через пробоину, м;

P_a — весовое водоизмещение аварийного судна, кН;

θ_a — угол крена аварийного судна, град.;

ψ_1 — угол дифферента поддерживающего судна 1, град.;

ψ_2 — угол дифферента поддерживающего судна 2, град.;

P_1 — весовое водоизмещение поддерживающего судна 1, кН;

P_2 — весовое водоизмещение поддерживающего судна 2, кН;

H_1 — продольная метацентрическая высота поддерживающего судна 1, м;

H_2 — продольная метацентрическая высота поддерживающего судна 2, м.

Результаты расчета по формуле (10), представленные на рис. 11, показывают, что наличие сцепки аварийного и поддерживающих судов, расположенных носом к аварийному судну, максимально увеличивает величину восстанавливающего момента на аварийном судне за счет того, что в его создании участвует продольная метацентрическая высота поддерживающих судов. При расположении поддерживающих судов носом к поврежденному можно усилить жесткость

их сцепки и значительно увеличить восстанавливающий момент на поврежденном судне. Это позволяет использовать существующие и создавать новые швартовные устройства, расположенные на баке поддерживающих судов в целях увеличения СВМ на поврежденном судне.

На судах значительных продольных размеров следует с осторожностью выполнять данный вид сцепки и осуществлять подход поддерживающих судов в местах, указанных на борту судна как TUG или место подхода буксира для обеспечения воздействия по нормали к поврежденному судну. Взаимодействие поврежденного судна с поддерживающими судами путем швартовки и создания сцепки создает благоприятные условия для организации эвакуации людей с аварийного судна путем пересадки на поддерживающие суда без водной (ледовой) спасательной операции [8], [16].

Результаты (Results)

Благодаря использованию численных методов расчета параметров движения судна в полярных водах и действий в аварийных ситуациях с учетом влияния других судов, расчеты с использованием математического моделирования показывают эффективность различных вариантов взаимодействия между судами путем создания сцепки. Таким образом рекомендуется учитывать при подготовке к рейсу варианты взаимодействия между судами, изложенные в пп. 1 и 2 рассмотренных вариантов сцепки.

В результате произведенных расчетов и рассмотренных в статье вариантов сцепки между судами, совершающими плавание в полярных водах, выше шестидесятой параллели, сформулированы конкретные рекомендации относительно действия судов при возникновении чрезвычайных ситуаций для обеспечения их безопасности. Рассмотренные рекомендации могут применяться как для судов, совершающих плавание в полярных водах, в том числе по Северному морскому пути, так и для других судов, совершающих рейсы в других районах Мирового океана.

Обсуждение (Discussion)

Чрезвычайные ситуации, в которые могут попасть суда, особенно при плавании в полярных водах, сами по себе являются более суровыми условиями плавания с точки зрения возможности возникновения рисков. Эти риски в первую очередь включают в себя возможность получения пробоин в ходе ледового плавания ввиду наличия торосов, рапака и т. п. Планирование рейса при переходах в полярных водах должно выполняться заблаговременно и варианты действий судна при возникновении аварийных ситуаций также должны быть тщательно продуманы. Для создания различных вариантов сцепки на судах должна быть предусмотрена адекватная кранцевая защита, позволяющая избежать повреждения корпуса подошедшего судна, а также может быть продуман дополнительный механизм для создания так называемой «жесткой» сцепки помимо заведения стальных тросов и швартовных устройств между судами. На основании вариантов сцепки при разных условиях, которые рассмотрены в статье, могут разрабатываться мероприятия по взаимодействию судов в аварийных случаях при планировании рейса, что соответствует предписаниям НЭПВ [3], [4].

Выводы (Conclusion)

На основе результатов проведенного исследования решены следующие задачи:

1. Выполнен расчет эффективного способа обеспечения безопасности в аварийных случаях при повреждении корпуса судна в полярных водах.
2. Исследованы различные варианты взаимодействия и сцепки судов в случаях повреждений корпуса в различных условиях ледового плавания.
3. Разработаны рекомендации по созданию сцепки для судов при возникновении чрезвычайной ситуации в условиях плавания в полярных водах.

В ходе решения задач исследования сделаны следующие выводы:

1. Для получивших повреждение судов рекомендуется создание сцепки путем швартовки и / или иных более жестких вариантов, когда угол крена приближается к углу дифферента или углу крена поддерживающего судна, что значительно повышает СВМ на поврежденном судне.

2. Рекомендуется создание сцепки со всеми судами, пришедшими на помощь, так как увеличение количества судов, принимающих участие в сцепке, дополнительно повышает СВМ на поврежденном судне.

3. При создании сцепки между судами рекомендуется создание давления поддерживающих судов на корпус поврежденного судна, что дополнительно повышает СВМ на поврежденном судне.

4. Наиболее эффективным является создание сцепки и последующая перекачка для извлечения пробоины из воды (создание сцепки на время перекачки для контроля крена и увеличения временного интервала для перекачки, после этого сцепка может быть ликвидирована и поддерживающие суда могут отойти для создания условий при проведении ремонтных работ по заделке пробоины).

5. Различные виды сцепки судов после спрямления поврежденного льдом судна с извлечением пробоины из воды можно рекомендовать как основной метод взаимодействия со спасателями и иными судами при повреждении судна льдом в соответствии с установленными МПК предписаниями.

Таким образом, приведенные рекомендации для судов могут существенно повысить безопасность плавания в ледовых условиях, а также в дальнейшем могут служить основой для разработки наставлений по эксплуатации судов в полярных водах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года с поправками (СОЛАС-74) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://base.garant.ru/71353064/> (дата обращения: 01.11.2022).

2. Международная конвенция о предотвращении загрязнения с судов 1973 года, измененная протоколом 1978 г. к ней с поправками (МАРПОЛ 73/78) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://base.garant.ru/2540818/> (дата обращения: 01.11.2022).

3. Приказ Минтранса России от 17.01.2013 № 7 (ред. от 09.01.2017) «Об утверждении Правил плавания в акватории Северного морского пути» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_145233/ (дата обращения: 01.11.2022).

4. Резолюция ИМО MSC.385(94). Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://base.garant.ru/71844400/> (дата обращения: 01.11.2022).

5. Gao G. X. Breaking the Ice: Navigation in the Arctic / G. X. Gao, L. Heng, T. Walter, P. Enge // Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011). — National Academies Press, 2012. — Pp. 3767–3772.

6. Ершов А. А. Теория судна. Статика: учеб. пособие / А. А. Ершов [и др.]. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. — 170 с.

7. Ершов А. А. Некоторые аварии и катастрофы отечественных и иностранных судов: монография / А. А. Ершов, В. И. Никольский. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 196 с.

8. Ершов А. А. Разработка системы интеллектуальной поддержки судоводителя для снижения опасности столкновений судов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.19; защищена 19.11.2012; утв. 20.05.2013 / Андрей Александрович Ершов. — СПб., 2012. — 366 с.

9. Резолюция ИМО MSC.386(94). Поправки к Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 года с поправками [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://base.garant.ru/71730660/> (дата обращения: 01.11.2022).

10. Узун О. Л. Концепция развития и обеспечения безопасности территорий Крайнего Севера в современных условиях / О. Л. Узун // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика — регион стратегических интересов: правовая политика и современные технологии обеспечения безопасности в Арктическом регионе / Материалы междунар. науч.-практ. конф. — СПб.: Санкт-Петербургский ун-т Гос. противопожарной службы Министерства РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева, 2020. — С. 102–104.

11. *Статуте А. И.* Обзор роли Арктического судоходства и обеспечение его экологической безопасности / А.И. Статуте // Российская Арктика. — 2020. — № 9. — С. 5–16. DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12091.
12. *Рейхерт А. В.* Аспекты обеспечения экологической безопасности при транспортировке углеводородов на арктическом шельфе / А. В. Рейхерт // Научное сообщество студентов XXI столетия. Экономические науки: сб. ст. по материалам CVII студ. междунар. науч.-практ. конф. — Новосибирск: ООО «Сибирская академическая книга», 2021. — С. 19–26.
13. *Петров А. А.* Создание программного обеспечения для разработки эксплуатационной документации на суда ледового плавания / А. А. Петров, И. А. Лебехов, С. А. Идрисова // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № S2. — С. 25–32. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-25-32.
14. *Никитина В. Н.* Некоторые аспекты обеспечения безопасности судоходства полярных водах / В. Н. Никитина, Н. И. Калинина, Г. Г. Ляшко, Е.Н. Панкина // Российская Арктика. — 2019. — № 6. — С. 44–47. DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10066.
15. *Ершов А. А.* Рекомендации по спрямлению судна при аварии в ледовых условиях / А. А. Ершов, П. И. Петухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 34–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-34-42.
16. *Ершов А. А.* Рекомендации по действиям в чрезвычайных ситуациях в ледовых условиях плавания / А. А. Ершов, П. И. Петухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 17–26. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-17-26.

REFERENCES

1. The International Convention for the Safety of Human Life at Sea of 1974, as amended (SOLAS-74). Web. 1 Nov. 2022 <<https://base.garant.ru/71353064/>>.
2. The International Convention on the Prevention of Pollution from Ships of 1973, as amended by the Protocol of 1978 to it, as amended (MARPOL 73/78). Web. 1 Nov. 2022 <<https://base.garant.ru/2540818/>>.
3. Prikaz Mintransa Rossii ot 17.01.2013 № 7 (red. ot 09.01.2017) “Ob utverzhdenii Pravil plavaniya v akvatorii Severnogo morskogo puti”. Web. 1 Nov. 2022 <http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_145233/>.
4. Resolution MSC.385(94) – International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code) – (Adopted On 21 November 2014). Web. 1 Nov. 2022 <https://www.imorules.com/MSCRES_385.94.html>.
5. Gao, Grace Xingxin, Liang Heng, Todd Walter, and Per Enge. “Breaking the ice: Navigating in the Arctic.” *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011)*. National Academies Press, 2012. 229–238.
6. Ershov, A.A., B.P. Korotkov, G.T. Mil'kin, and M.S. Ovsyannikov. *Teoriya sudna. Statika: ucheb. posobie*. SPb.: GMA im. adm. S. O. Makarova, 2009.
7. Ershov, A.A., and V. I. Nikol'skii. *Nekotorye avarii i katastrofy otechestvennykh i inostrannykh sudov: monografiya*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.
8. Ershov, A.A. *Razrabotka sistemy intellektual'noi podderzhki sudovoditelya dlya snizheniya opasnosti stolknovenii sudov*. Dr. diss. SPb., 2012.
9. Resolution MSC.386(94) – Amendments to the 1974 International Convention for the Safety of Life at Sea, as amended. Web. 1 Nov. 2022 <[https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSCR.386\(94\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSCR.386(94).pdf)>.
10. Uzun, O.L. “The concept of development and safety of the far north territories the in modern conditions.” *Servis bezopasnosti v Rossii: opyt, problemy, perspektivy. Arktika-region strategicheskikh interesov: pravovaya politika i sovremennye tekhnologii obespecheniya bezopasnosti v Arkticheskom regione. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb, 2020. 102–104.
11. Statuto, A.I. “Overview of the arctic shipping role and ensuring of its environmental safety.” *Russian Arctic* 9 (2020): 5–16. DOI: 10.24411/2658-4255-2020-12091.
12. Petrov, A.A., I.A. Lebekhov, and S.A. Idrisova. “Creating software for operating documentation development to ice-going ships.” *Transactions of the Krylov state research centre* S2 (2018): 25–32. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-25-32.
13. Nikitina, V., N. Kalinina, G. Lyashko, and E. Pankina. “Some aspects of the safety of navigation in polar waters.” *Russian Arctic* 6 (2019): 44–47. DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10066.
14. Reikher, Artur. “Aspects of ensuring environmental safety during transportation of hydrocarbons on the arctic shelf.” *Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Ekonomicheskie nauki. Sbornik statei po materi-*

alam CVII studencheskoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Novosibirsk: Sibirskaya akademicheskaya kniga, 2021. 19–26.

15. Ershov, Andrey Alexandrovich, and Pavel Igorevich Petuhov. “Recommendations to straighten the ship in the accident in ice conditions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(40) (2016): 34–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-34-42.

16. Ershov, Andrey A., and Pavel I. Petuhov. “Recommendations for emergency response in ice conditions of navigation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.1 (2017): 17–26. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-17-26.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Петухов Павел Игоревич — соискатель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: sevarus89@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Petuhov, Pavel I. — Applicant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: sevarus89@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 5 октября 2022 г.
Received: October 5, 2022.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-32-41

TYPICAL FINDINGS ISSUED DURING IMO MEMBER STATES AUDITS AND WAYS TO ELIMINATE THEM

O. A. Chernov

Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

The paper concerns the study related to improving of level of safety at sea and reducing risk of marine accidents through development of conventions, codes and resolutions by the International Maritime Organization (IMO). IMO strives for each of the 175 Member States to properly implement and ensure enforcement of IMO instruments related to maritime safety. To assist Member States in implementing its instruments, IMO has been developing a special set of measures, which is currently enshrined within the IMO Member State Audit Scheme (IMSAS). IMSAS implies conduct of periodic audits in each IMO Member State, to assess how the audit standard, namely, the mandatory Code for the IMO Instruments Implementation (III Code) and IMO instruments (conventions, codes, etc.), to which the State is a party, are applied to the required extent and with the appropriate level of quality. In 2022, IMO adopted a number of decisions and documents, according to which further steps for the development of the Scheme, such as development of an recommendatory "Guidance in relation to IMO Member State Audit Scheme (IMSAS) to assist in the implementation of the III Code" (hereinafter referred to as Guidance) are planned. The purpose of the Guidance is to provide Member States with guidelines and recommendations in the implementation of the III Code and IMO instruments by clarifying and interpreting the relevant terms. The Guidance is currently in the final stage of development within the IMO Subcommittee on Implementation of IMO Instruments (III), and it is planned that the IMO Assembly will adopt it in 2023 with a recommendation status. In this paper, the Guidance is considered, its background and prerequisites for its development are investigated, its structure, composition, purpose are considered, as well as an assessment of quality and degree of its usefulness from the point of view of achieving the goals set during its development is given. The chapter of the Guidance listing typical findings issued during Member States audits is reviewed in detail, the most effective measures for their elimination are reviewed. The analysis and generalization of measures taken by Member States to eliminate findings is carried out, systematization of such measures by areas of maritime activity of the State, identification of similar aspects and approaches are also carried out. Possible measures are identified to improve the IMO Member State Audit Scheme as a whole and to implement its provisions within a single State.

Keywords: International Maritime Organization, IMO Member State Audit Scheme, Maritime safety, Marine environment protection, State Audit, Convention Implementation, Requirements enforcement.

For citation:

Chernov, Oleg A. "Typical findings issued during IMO member states audits and ways to eliminate them." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.1 (2023): 32–41. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-32-41.

УДК 35.07

ТИПОВЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ, ВЫЯВЛЯЕМЫЕ ПРИ ПРОВЕРКАХ ГОСУДАРСТВ — ЧЛЕНОВ ИМО, И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

О. А. Чернов

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой работы является исследование вопросов повышения уровня безопасности на море и снижения риска возникновения морских аварий при помощи разработки конвенций, кодексов и резолюций Международной морской организацией (ИМО). ИМО стремится к тому, чтобы каждое из 175 государств-членов

надлежащим образом применяло и обеспечивало выполнение разработанных ею нормативных документов, касающихся безопасности мореплавания. Для оказания государствам — членам ИМО помощи выработан специальный инструмент, который в настоящее время закреплён в рамках Системы проверки государств — членов ИМО (IMSAS). Система подразумевает проведение периодических проверок в каждом государстве, являющемся членом ИМО, в целях оценки степени выполнения обязательного Кодекса по осуществлению документов ИМО (Кодекса ОДИ), конвенций, кодексов и других документов ИМО, стороной которых является государство, и их соблюдения в необходимом объёме и с должным уровнем качества. Отмечается, что в 2022 г. ИМО был принят ряд решений и документов, в соответствии с которыми намечены дальнейшие шаги развития данной системы проверки, такие как разработка вспомогательного «Руководства в отношении Системы проверки государств — членов ИМО (IMSAS) для содействия в осуществлении Кодекса ОДИ», целью которого является предоставление государствам руководящих принципов и рекомендаций в осуществлении Кодекса ОДИ и инструментов ИМО посредством разъяснения и толкования соответствующих норм. Данное руководство в настоящее время находится на завершающей стадии разработки в профильном Подкомитете по осуществлению документов ИМО (III), его принятие планируется Ассамблеей ИМО в 2023 г. с рекомендательным статусом. В настоящей статье показана предыстория и исследованы предпосылки разработки данного руководства, рассмотрены его структура, состав, предназначение, а также дана оценка качества и степени его применимости с точки зрения достижения поставленных в нём целей. Подробно рассмотрен раздел руководства, в котором рассмотрены типовые замечания, выявляемые в ходе проверок государств — членов ИМО, сформулированы наиболее эффективные мероприятия для их устранения. Выполнен анализ и разработаны меры, предпринимаемые государствами для устранения замечаний, систематизированы необходимые мероприятия в области морской деятельности государства, выявлены схожие аспекты и подходы. Сформулированы возможные мероприятия по совершенствованию Системы проверки ИМО как в целом, так и в вопросах реализации ее положений в рамках отдельно взятого государства.

Ключевые слова: Международная морская организация, Система проверки ИМО, безопасность мореплавания, защита морской среды, проверка государства, соблюдение конвенций, осуществление требований, обеспечение выполнения требований.

Для цитирования:

Чернов О. А. Типовые замечания, выявляемые при проверках государств — членов ИМО, и способы их устранения / О. А. Чернов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — 32–41. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-32-41.

Введение (Introduction)

Внедренная в 2016 г. Система проверки государств — членов ИМО (IMSAS), в соответствии с которой каждое из 175 входящих в нее государств должно проходить такую обязательную проверку каждые 7 лет, в настоящее время приближается к завершению первого цикла проверок, который планируется завершить в 2025 г. ввиду практически полной их приостановки в период 2020–2021 гг.

Целью проверки является, с одной стороны, оценка степени соответствия проверяемого государства установленным требованиям ИМО, а с другой стороны, оказание ему содействия в осуществлении и обеспечении выполнения конвенций, кодексов и других инструментов ИМО. Проверка охватывает широкий спектр вопросов [1], касающихся политики в области безопасности мореплавания и защиты морской среды от загрязнения с судов, морского законодательства, процедур присоединения к инструментам ИМО, государственного портового контроля, выполнения функций государства флага, подготовки кадров и др. Как правило, проверка затрагивает одновременно несколько федеральных министерств (в сфере транспорта, природы, обороны) и различного рода организаций и ведомств, выполняющих в системе государства функции в области навигации, гидрографии, спасания и др. Важным и актуальным вопросом в таких условиях является должная подготовка государства к проверке ИМО, которую целесообразно организовывать заблаговременно с привлечением достаточных ресурсов, позволяющих осуществить проведение необходимых мероприятий по обучению и самопроверке тех учреждений, которые впоследствии будет проверять ИМО.

По состоянию на конец 2022 г. ИМО было проведено порядка ста проверок, в результате которых выявлено более 1500 замечаний [2]. Практика их проведения показала, что многие государства испытывают трудности в процессе внедрения требований инструментов ИМО [3]. Это приводит,

с одной стороны, к негативным результатам проверок IMSAS, а с другой — в конечном итоге негативно отражается на безопасности мореплавания и защите морской среды. Поэтому в настоящее время актуальным этапом развития Системы проверки ИМО является разработка руководящих принципов и рекомендаций для государств-членов в осуществлении и обеспечении ими выполнения инструментов ИМО посредством разъяснения и толкования основного документа и стандарта проверки — Кодекса по осуществлению документов ИМО (далее — Кодекс ОДИ) [4].

В 2022 г. ИМО при непосредственном участии ее профильного рабочего органа — Подкомитета по осуществлению документов ИМО — выработан проект такого важного документа, как «Руководство в отношении Системы проверки государств — членов ИМО (IMSAS) для содействия в осуществлении Кодекса ОДИ» [5] (далее — Руководство). Данный документ находится на завершающей стадии разработки и должен быть финализирован в 2023 г. в качестве *необязательного Руководства*.

В настоящей статье, являющейся одним из результатов проводимого автором исследования всей Системы проверки ИМО, указанное Руководство было подвергнуто тщательному анализу, выполнено подробное исследование предыстории и предпосылок его разработки; детально рассмотрены структура, состав, предназначение, дана оценка качества и его применимости с точки зрения достижения целей, поставленных при его разработке; подробно рассмотрен раздел Руководства, посвященный типовым замечаниям, выявляемым в ходе проверок государств — членов ИМО.

Целью предлагаемого исследования является разработка наиболее эффективных мероприятий для устранения типовых замечаний, выявляемых при проверках государств — членов ИМО. В процессе работы были проанализированы меры, предпринимаемые государствами для устранения выявленных замечаний, выполнена систематизация необходимых мероприятий в области морской деятельности государства, а также выявлены схожие аспекты и подходы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Тематика Системы проверки государств — членов ИМО в силу своей специфики, не раскрывается в отечественной литературе. В основном данные вопросы обсуждаются в международном профессиональном и научном сообществе. Одним из основоположников Системы проверки ИМО являлся сотрудник Секретариата ИМО Лоуренс Барчу, автор публикации *The voluntary IMO Member State Audit Scheme: An accountability regime for states on maritime affairs*. WMU Journal of Maritime Affairs (2009). На протяжении нескольких лет работая в ИМО, он привнес в нормативные документы, описывающие Систему проверки, большинство современных ее особенностей [6]. Ряд исследователей из состава Всемирного морского университета (WMU) занимались изучением данной темы в своих работах. Так, в 2007 г. представителем Ганы был выполнен подробный «Анализ добровольной Системы проверки государств — членов ИМО», в то время существовавшей на добровольной основе [7]. В 2010 г. представитель Республики Корея выполнил «Сравнительное исследование по эффективному внедрению обязательной системы проверки государств — членов ИМО» применительно к проверке своей Республики. В рамках исследования, в частности, был проведен подробный обзор Системы проверки ИМО, выполнено ее сравнение с «Универсальной программой аудита ИКАО по надзору за безопасностью полетов» (USOAP), исследовано прохождение Республикой Корея проверок ИМО и ИКАО, даны рекомендации по эффективному внедрению обязательной Системы проверки ИМО [8].

В 2013 г. представителем Китая на примере этой страны было выполнено исследование «Последствия введения обязательной системы проверки государств — членов ИМО с юридической и практической точек зрения» по результатам прохождения в ноябре 2009 г. добровольной проверки ИМО (исследование было посвящено будущей обязательной проверке Китая) [9]. Наконец, в 2017 г. представителем Республики Корея было выполнено исследование «Разработка ключевых показателей эффективности для государств — членов ИМО в контексте Системы проверки государств — членов ИМО». В рамках данного исследования были разработаны показатели KPI,

помогающие оценить, насколько государство соответствует тому или иному требованию Кодекса ОДИ, и апробированные в рамках подготовки Кореи к проверке ИМО [10].

Одной из наиболее актуальных работ, касающихся Системы проверки ИМО, явилось исследование на тему: «Пандемия: влияние на Систему проверки государств — членов ИМО в тихоокеанских островных государствах», выполненное в 2022 г. представителем Фиджи Шалин Лата. В работе рассмотрены последствия влияния пандемии COVID-19 на Систему проверки ИМО, показаны принимаемые ИМО меры по возобновлению проверок, проведение которых было приостановлено в 2020–2021 гг. при помощи внедрения *дистанционных (удаленных) методов* [11].

Обсуждение (Discussion)

По состоянию на конец 2022 г. Руководство находится на завершающем этапе разработки [5] в профильном Подкомитете по осуществлению документов ИМО (III). На прошедшем в июле 2022 г. заседании Подкомитета проект Руководства был детально рассмотрен, и по результатам состоявшихся обсуждений были одобрены его структура и формат, а также согласована необходимость продолжения его разработки в части, касающейся оценки и анализа деятельности прибрежного государства и государства порта. В целом разработанный проект Руководства, даже не будучи завершенным и принятым ИМО в виде официальной резолюции или циркуляра, представляет собой полезный документ достаточно высокой степени детализации содержащихся в нем положений и *может факультативно использоваться государствами при самоподготовке к проверке ИМО*.

Проект Руководства состоит из двух частей: А и Б. Часть А, содержащая «Руководство по осуществлению Кодекса ОДИ», структурирована в соответствии с Кодексом ОДИ и включает различные пояснения, комментарии и интерпретации требований Кодекса ОДИ (например, дано подробное разъяснение положений Кодекса, касающихся наличия в государстве общей стратегии по осуществлению обязательных документов ИМО; описан возможный порядок организации поставки в ИМО обязательных отчетов и информации, организации в государстве мероприятий по улучшению всей системы осуществления обязательных документов ИМО и др.).

Прил. 1 к Руководству содержит наиболее типовые замечания, выявляемые при проверках, на основе которых в качестве ориентиров указаны причины выявленных замечаний и корректирующие действия, при этом перечисление замечаний выполнено в соответствии с разделами Кодекса ОДИ.

Часть Б документа содержит «Руководство по подготовке к проверке в соответствии с Системой проверки государств — членов ИМО», в котором приведены развернутые вспомогательные положения, предназначенные для оказания помощи государствам в ходе планирования и проведения своих проверок, подробно разъясняющие этапы и аспекты, которые могут вызвать трудности.

В прил. 1 содержится вспомогательное Руководство в отношении «Вопросника, заполняемого до проверки», в котором по каждому пункту также приведены поясняющие комментарии, предназначенные для облегчения ответов на вопросы. В прил. 2–4 приведены, соответственно, типовая повестка вступительного совещания перед проверкой; примерная дорожная карта для процесса Системы проверки ИМО; примерное распределение сфер ответственности между государственными органами в рамках конвенций ИМО.

Результаты (Results)

Важной особенностью Руководства является то, что к нему прилагаются типовые замечания, выявляемые при проверках ИМО. Например, следующие замечания, касающиеся разработки стратегии для обеспечения выполнения международных обязательств:

1. В государстве не была разработана общая стратегия для обеспечения выполнения международных обязательств и обязанностей как государства флага, порта и прибрежного государства. При этом необходимо отметить, что несмотря на рекомендательный статус данного пункта в Кодексе ОДИ, в документе отмечается следующее: «Для достижения целей настоящего Кодекса государству рекомендуется «...» разработать общую стратегию...» [15, стр. 4]; при проверках оформляются полноценные замечания, фактически являющиеся несоответствиями.

2. Отсутствует методология мониторинга и оценки эффективности стратегии (т. е. стратегия разработана, но ее мониторинг не осуществляется).

3. Несмотря на то, что государством разработана общая стратегия, оно не обеспечило выполнение всех своих обязательств в соответствии с обязательными документами ИМО, участником которых оно является.

4. Если для устранения замечаний пп. 1 и 2 государству необходимо разработать и внедрить отсутствующий документ (стратегию и методологию мониторинга), то замечание пп. 3 представляется иным по сути, поскольку государству необходимо путем доведения до сведения всех сторон морской деятельности собственной стратегии обеспечить ее эффективное выполнение. Для государства это не должно вызвать каких-либо затруднений, поскольку в данном случае имеется в виду реализация требований, сформулированных им же самим для себя.

Руководство также содержит примеры замечаний, выявленных при проверках, касающихся аспекта осуществления (Implementation [12]) инструментов ИМО. Например, отмечается следующее:

1. Администрация не выделила ресурсы и не разработала процессы, способные осуществлять программу обеспечения безопасности и охраны окружающей среды, которая включает административные инструкции по эффективному осуществлению обязательных документов ИМО, участником которых является государство, и поправок к ним.

2. Администрация не разработала независимую программу проверки и инспекции, охватывающую организацию, которая выдает необходимые сертификаты и документацию судам, имеющим право плавать под флагом государства (как правило, такими организациями являются классификационные общества).

3. Администрация не установила политику и / или руководящие принципы для реализации тех требований, которые в конвенциях установлены «к удовлетворению Администрации» (to the satisfaction of the Administration), а также критерии официального утверждения типа материалов и оборудования согласно требованиям соответствующих документов ИМО.

Примеры другого вида замечаний свидетельствуют о том, что Администрация не располагает системой, обеспечивающей эффективное осуществление политики и законодательства государства при выполнении им своих обязанностей государства флага. Кроме того, государство не распределило обязанности по обновлению и пересмотру принятой политики.

Замечаниями, связанными с осуществлением государством инструментов ИМО, являются следующие:

1. Администрация не разработала документы учебных программ для обеспечения надлежащих практических и теоретических знаний о судах и их эксплуатации для инспекторов, лиц, проводящих расследования, и инспекторов государства флага, а также не предоставила соответствующие национальные и международные документы, необходимые им для выполнения своих обязанностей.

2. Отсутствие государственной политики проведения расследований несчастных случаев, повлекших за собой телесные повреждения, а также гибель вследствие несчастных случаев и инцидентов на производстве и оборудования таких расследований.

Указанные замечания имеют схожую характеристику: они указывают на отсутствие в проверенном государстве какого-либо конкретного элемента, документа или системы, установленных соответствующими положениями конвенций или кодексов ИМО. Следовательно, мерой по устранению таких замечаний является разработка и внедрение отсутствующего элемента [13]. Однако согласно основным принципам менеджмента качества гораздо более важным и, как правило, одновременно сложным для реализации является *устранение причин выявленной проблемы* [14], [15]. Именно устранение этих причин обеспечит недопущение повторения возникновения нежелательной ситуации.

В большинстве случаев причиной замечаний, выявляемых при проверках ИМО: будь то отсутствие в государстве какого-либо нормативно-правового акта или невыполнение каких-либо конкретных требований конвенций или кодексов ИМО, является *отсутствие в государстве ресурса*

для обеспечения выполнения соответствующей деятельности [16]. Например, если в государстве не разработана стратегия по реализации документов ИМО, то, как правило, причина этого заключается в отсутствии вследствие недостаточного количества персонала в Администрации назначенного органа, департамента или в общем случае лица, в ответственность которого вменена разработка такой стратегии.

Устранение подобного рода проблем в государстве координируется на самом высоком уровне, поскольку это является вопросом расширения штата, функций, полномочий подразделений уровня федерального министерства [17]. Именно поэтому многие государства — члены ИМО в данном вопросе сталкиваются с определенными сложностями и вынуждены искать пути решения проблем какими-либо иными способами (например, посредством перераспределения обязанностей внутри министерства, оптимизации деятельности, реорганизации и др.). Примерами типовых замечаний являются следующие.

1. Государство не предприняло всех необходимых действий для обеспечения того, чтобы информация о любых опасностях для судоходства была доведена до сведения соответствующих лиц. Например, навигационные предупреждения не направлялись судам, эксплуатируемым в водах, находящихся под юрисдикцией государства¹.

2. Морской администрацией не создан механизм предоставления услуг радиосвязи, включая присвоение идентификационных данных ГМССБ, делимитацию морских районов, использование цифровых селективных вызовов и предоставление соответствующих береговых средств радиосвязи для передачи срочных сообщений, касающихся безопасности судоходства, и для приема аварийных сообщений по радиосвязи на море².

3. Отсутствие свидетельств наличия надлежащего законодательства, руководящих указаний или процедур для обеспечения того, чтобы морская администрация выполняла требования Международного кодекса морской перевозки опасных грузов (IMDG) и Международного кодекса морской перевозки навалочных грузов (IMSBC). В частности, отсутствие доказательств того, что морская администрация определила компетентный орган по вопросам, связанным с обращением с опасными грузами; обеспечила проведение периодической подготовки берегового персонала; внедрила подробные инструкции по реагированию на чрезвычайные ситуации и оказанию неотложной медицинской помощи, необходимой в случае аварии с опасными грузами; обеспечила выполнение требований по погрузке-разгрузке в соответствии с гл. VI SOLAS-74 и соответствующими положениями Кодекса IMSBC; периодически выполняла оценку эффективности при обращении с опасными грузами.

4. Государство не регулировало деятельность поставщиков топлива и не создало программу мониторинга, включающую ведение реестра поставщиков топлива, регулирование хранения поставщиками топлива бункерных накладных и проверку качества топлива (МАРПОЛ, прил. VI, правило 18.9).

Указанные замечания вновь подпадают под категорию замечаний, свидетельствующих об отсутствии в государстве того или иного документа или комплекса документов, и могут быть устранены посредством их разработки.

Замечания, касающиеся аспекта обеспечения выполнения (Enforcement), следующие.

1. Администрация не разработала необходимых мер и правовой базы для обеспечения эффективного соблюдения требований, вытекающих из обязательных документов ИМО, таких как введение штрафов, препятствующих нарушению международных правил, положений и стандартов; разработка через национальное законодательство эффективного механизма правоприменения и наличие достаточного квалифицированного персонала для осуществления и обеспечения выполнения национального законодательства, включая персонал для проведения расследований и освидетельствований.

¹ В качестве невыполненного требования ИМО указывается правило V/4 SOLAS-74.

² Правила IV/5, IV/5–1, V/4, V/31.2 SOLAS-74.

2. Меры, принятые Администрацией для обеспечения выполнения правил и стандартов судами, имеющими право плавать под флагом государства, были недостаточными, а предпринятые действия не соответствовали процедурам, установленным национальным законодательством; не проводились периодические проверки судов, имеющих право плавать под флагом государства, для удостоверения того, что фактическое состояние судна и его экипажа соответствует имеющимся у них свидетельствам; национальное законодательство не включало положения, позволяющие Администрации возбуждать дело в отношении лиц, имеющих подтверждающие записи, которые нарушили положения обязательных документов ИМО; в случае нарушений не было возбуждено производство в соответствии с национальным законодательством.

3. В рамках существующей системы судовой отчетности отсутствует механизм обеспечения выполнения, включая соответствующие положения национального законодательства.

4. Государство не разработало механизма своевременного реагирования на инциденты загрязнения в своих водах и не проводило учений по оценке готовности к борьбе с загрязнением на периодической основе.

5. Администрация пользовалась своим правом осуществлять государственный портовый контроль (PSC), однако процессы управления программой не полностью соответствовали процедурам ИМО в области государственного портового контроля.

6. Существующие механизмы проведения инспекций PSC не были адекватными несмотря на то, что право на проведение PSC осуществлялось государством. Не была установлена политика или процессы для управления программой PSC. Инспекторы PSC не были должным образом уполномочены и квалифицированы (SOLAS-74, правило I/19; MARPOL, прил. I, правило 11; TONNAGE 1969, ст. 12).

Типовые замечания по вопросу, касающемуся *совершенствования (Improvement) деятельности государства*, которое может учитывать в качестве исходных данных измерение эффективности деятельности на основе различного рода показателей [18], [19], следующие:

1. Не существует системы или механизма периодической оценки и мониторинга с целью постоянного повышения эффективности государства в осуществлении обязательных документов ИМО. Кроме того, не были приняты меры по стимулированию культуры, предоставляющей возможности для повышения эффективности деятельности по обеспечению безопасности на море и охране окружающей среды.

2. Учения проводились без каких-либо записей об учебных баллах или о подведении итогов. Не было предпринято никаких действий по выявлению и устранению причин существующих и потенциальных несоответствий.

3. Государство не создало механизма мониторинга и обзора мер для эффективного осуществления и обеспечения выполнения обязательных документов ИМО. В частности, не были предусмотрены анализ несоответствий, осуществление необходимых корректирующих действий и анализ принятых корректирующих действий для устранения причины несоответствий во избежание их повторения.

Типовыми замечаниями в отношении *предоставления полномочий (Delegation of Authority)* являются следующие.

1. Отсутствие доказательств того, что Администрация дала своим признанным организациям конкретные инструкции с подробным описанием действий, которые необходимо предпринять в случае, если судно будет признано непригодным для выхода в море; обеспечила признанные организации всеми соответствующими документами национального законодательства и их толкованиями; создала программу надзора или участвовала в ней, располагая достаточными ресурсами для мониторинга своих признанных организаций и связи с ними (SOLAS-74, правило XI-1/1).

2. Отсутствие доказательств того, что назначение инспекторов для проведения освидетельствований, проверок и инспекций от имени Администрации регулировалось.

3. Отсутствие инструкций о процедурах проведения различных освидетельствований, порученных назначенным инспекторам, или действиях, которые должны быть предприняты в случае признания судна негодным к плаванию.

Кроме того, ряд типовых замечаний был выявлен также в отношении аспекта *первоначальных действий* (*Initial Actions*), среди которых выделены следующие: внедрение поправок к обязательным документам ИМО, не всегда осуществляемое до их вступления в силу; отсутствие системы мониторинга поправок для обеспечения соответствия национального законодательства современным требованиям и достаточного количества персонала, обладающего морскими знаниями, для оказания помощи в принятии национальных законов и выполнении всех обязанностей государства (SOLAS-74, ст. I; MARPOL, ст. 1; STCW 1978, ст. I; LL 1966, ст. 1; TONNAGE 1969, ст. 1; COLREG 1972, ст. I).

Отсутствие доказательств в отношении осуществления и обеспечения выполнения соответствующих документов ИМО в следующих аспектах:

- способность государства издавать законы, допускающие эффективную юрисдикцию;
- создание правовой основы для обеспечения выполнения всех соответствующих документов ИМО, включая связанные с ними следственные и уголовные процессы;
- наличие юридического и технического персонала, обладающего морскими знаниями, для принятия национального законодательства и выполнения всех обязанностей государства;
- пересмотр и обновление действующего национального законодательства. (SOLAS-74, ст. I; MARPOL, ст. 1; STCW 1978, ст. I; STCW 1978, ст. IV).

Заключение (Conclusion)

В работе рассмотрена наиболее актуальная мера, предпринимаемая ИМО для оказания содействия своим государствам-членам в отношении выполнения конвенций и кодексов ИМО и прохождения проверок в рамках Системы проверки государств — членов ИМО. Такой мерой в настоящее время является разработка «Руководства в отношении IMSAS для содействия в осуществлении Кодекса ОДИ», которую осуществляет ИМО.

Подробно рассмотрен раздел Руководства, посвященный типовым замечаниям, выявляемым при проверках государств-членов и систематизированным по темам и проверяемым аспектам. Выявленные типовые замечания могут использоваться государствами в качестве основы для самопроверки и самооценки степени собственной готовности к проверке. Актуальной задачей в этой связи является разработка соответствующих контрольных листов и перечней контрольных вопросов. Сделан вывод о том, что проект Руководства, который, как ожидается, будет принят на 33-м заседании Ассамблеи ИМО в конце 2023 г., представляет собой полезный документ достаточно высокой степени готовности и детализации содержащихся в нем положений и может факультативно использоваться государствами при самоподготовке к проверке ИМО.

Представляется целесообразным проведение ИМО работы по повышению информированности государств-членов в отношении результатов проводимых проверок, типовых проблемных областей и мер по их устранению. Для этого секретариатом ИМО могут быть организованы специальные семинары для освещения указанных вопросов.

В качестве дальнейшего совершенствования Системы проверки государств — членов ИМО возможно издание рекомендации или обязательного документа ИМО, регламентирующего проведение государствами периодических (например, ежегодных) внутренних проверок с целью самооценки степени соответствия установленным требованиям ИМО. Дополнительным мероприятием может являться периодическое обучение персонала государств-членов, вовлеченного и назначенного для проведения таких внутренних проверок.

Указанные мероприятия и рекомендации являются возможными мерами по улучшению деятельности государств в части выполнения требований ИМО и совершенствованию Системы проверки государств — членов ИМО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернов О. А. Система проверки государств — членов ИМО: современное состояние и переход к дистанционному формату / О. А. Чернов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64–65. — С. 19–26.

2. Итоги 128-й сессии Совета ИМО. 28 ноября — 02 декабря 2022 г. Международная морская организация [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/Council,-128th-session.aspx> (дата обращения: 01.12.2022).
3. Механизм дистанционной проверки ИМО. Рабочий документ С 125/6/1. 19.04.2021 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.imo.org/Shared/Download.aspx?did=129000> (дата обращения: 01.12.2022).
4. Итоги 125-й сессии Совета ИМО. 28 июня-2 июля 2021 г. (дистанционная сессия) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/C125.aspx> (дата обращения: 01.12.2022).
5. Итоги 8-й сессии Подкомитета по осуществлению документов ИМО. 25–29 июля 2022 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/III-8th-session.aspx> (дата обращения: 01.12.2022).
6. *Barchue L. D.* The voluntary IMO Member State Audit Scheme: An accountability regime for states on maritime affairs / L. D. Barchue // *WMU Journal of Maritime Affairs*. — 2009. — Vol. 8. — Is. 1. — Pp. 61–70. DOI: 10.1007/BF03195153.
7. *Afriyie K. A.* An analysis of the voluntary IMO member state audit scheme: Dissertation / K. A. Afriyie. — Malmö, Sweden: World Maritime University, 2007. — 117 p.
8. *Seo D. M.* A comparative study on the effective implementation of the mandatory IMO member state audit scheme: a case study of the Republic of Korea: Dissertation / D. M. Seo. — Malmö, Sweden: World Maritime University, 2010. — 88 p.
9. *Liejun Y.* Implications and impacts of making mandatory the voluntary IMO member state audit scheme: from legal and practical perspectives: Dissertation / Y. Liejun. — Malmö, Sweden: World Maritime University, 2013. — 65 p.
10. *Kim S. H.* Developing key performance indicators for IMO member states in the context of IMO member state audit scheme: Dissertation / S. H. Kim. — Malmö, Sweden: World Maritime University, 2017. — 172 p.
11. *Lata S.* The pandemic: impact on IMO member state audit on the Pacific Island member states: Dissertation / S. Lata. — Malmö, Sweden: World Maritime University, 2022. — 103 p.
12. *Lost-Siemińska D.* Implementation of IMO treaties into domestic legislation: Implementation and enforcement as the key to effectiveness of international treaties / D. Lost-Siemińska // *Maritime Safety in Europe*. — Informa Law from Routledge, 2020. — Pp. 3–21.
13. *Nam D.* Identification and Analysis of the Legal Status of International Maritime Organization Instruments / D. Nam // *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*. — 2021. — Vol. 27. — Is. 3. — Pp. 421–428. DOI: 10.7837/kosomes.2021.27.3.421
14. Резолюция А.1067(28). Рамочные принципы и процедуры Системы проверки государств-членов ИМО [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1067\(28\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1067(28).pdf) (дата обращения: 01.12.2022).
15. Резолюция А.1070(28) «Кодекс по осуществлению документов ИМО (Кодекс ОДИ)» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1070\(28\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1070(28).pdf) (дата обращения: 01.12.2022).
16. *Christodoulou A.* Maritime Governance and International Maritime Organization instruments focused on sustainability in the light of United Nations' sustainable development goals / A. Christodoulou, J. Echebarria Fernández // *Sustainability in the Maritime Domain*. — Springer, Cham, 2021. — Pp. 415–461. DOI: 10.1007/978-3-030-69325-1_20.
17. *Peppas S.* The Importance of Measuring the Performance of IMO Member States / S. Peppas // *SNAME 7th International Symposium on Ship Operations, Management and Economics*. — OnePetro, 2021. DOI: 10.5957/SOME-2021-008.
18. *Al-mahariq E. N.* Maritime casualty investigation in Jordan: current implementation of IMO standards and future development: Dissertation / E. N. Al-mahariq. — Malmö, Sweden: World Maritime University, 2019. — 74 p.
19. *Hebbar A. A.* Simple, intuitive key performance indicators for flag state performance and its pilot application in Latin-America / A. A. Hebbar, S. J. Geymonat // *Journal of Safety Science and Resilience*. — 2021. — Vol. 2. — Is. 3. — Pp. 101–110. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2021.06.003.

REFERENCES

1. Chernov, O. A. "IMO Member State Audit Scheme. Current state and transition to remote mode." Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping 64–65 (2021): 19–26.
2. Summary of 128th session of Council, 28 November–2 December 2022. International Maritime Organisation. Web. 1 Dec. 2022 <<https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/Council,-128th-session.aspx>>.
3. IMO remote audit mechanism. Working document C 125/6/1. Web. 1 Dec. 2022 <<https://docs.imo.org/Shared/Download.aspx?did=129000>>.
4. Summary of 125th session of Council, 28 June–2 July. International Maritime Organisation. Web. 1 Dec. 2022 <<https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/C125.aspx>>.
5. Summary of 8th session of Sub-Committee on Implementation of IMO Instruments (III 8), 25–29 July 2022 Web. 1 Dec. 2022 <[https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/III 8th-session.aspx](https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/III%208th-session.aspx)>.
6. Barchue, Lawrence D. "The voluntary IMO Member State Audit Scheme: An accountability regime for states on maritime affairs." *WMU Journal of Maritime Affairs* 8.1 (2009): 61–70. DOI: 10.1007/BF03195153.
7. Afriyie, Kwaku Anthony. An analysis of the voluntary IMO member state audit scheme. Dissertation. Malmö, Sweden: World Maritime University, 2007.
8. Seo, Dong Min. A comparative study on the effective implementation of the mandatory IMO member state audit scheme: a case study of the Republic of Korea. Dissertation. Malmö, Sweden: World Maritime University, 2010.
9. Liejun, Yang. Implications and impacts of making mandatory the voluntary IMO member state audit scheme: from legal and practical perspectives. Dissertation. Malmö, Sweden: World Maritime University, 2013.
10. Kim, Sang Ho. Developing key performance indicators for IMO member states in the context of IMO member state audit scheme. Dissertation. Malmö, Sweden: World Maritime University, 2017.
11. Lata, Shaleen. The pandemic: impact on IMO member state audit on the Pacific Island member states. Dissertation. Malmö, Sweden: World Maritime University, 2022.
12. Lost-Siemńska, Dorota. "Implementation of IMO treaties into domestic legislation: Implementation and enforcement as the key to effectiveness of international treaties." *Maritime Safety in Europe*. Informa Law from Routledge, 2020. 3–21.
13. Nam, Dong. "Identification and Analysis of the Legal Status of International Maritime Organization Instruments." *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety* 27.3 (2021): 421–428. DOI: 10.7837/kosomes.2021.27.3.421.
14. Resolution A.1067(28). Framework and procedures for the IMO member State audit scheme. Web. 1 Dec. 2022 <[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1067\(28\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1067(28).pdf)>.
15. Resolution A.1070(28). IMO Instruments Implementation Code (III Code). Web. 1 Dec 2022 <[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1070\(28\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1070(28).pdf)>.
16. Christodoulou, Anastasia, and Jonatan Echebarria Fernández. "Maritime Governance and International Maritime Organization instruments focused on sustainability in the light of United Nations' sustainable development goals." *Sustainability in the Maritime Domain*. Springer, Cham, 2021. 415–461. DOI: 10.1007/978-3-030-69325-1_20.
17. Peppas, Sofia. "The Importance of Measuring the Performance of IMO Member States." *SNAME 7th International Symposium on Ship Operations, Management and Economics*. OnePetro, 2021. DOI: 10.5957/SOME-2021-008.
18. Al-mahariq, Enas Nadi. Maritime casualty investigation in Jordan: current implementation of IMO standards and future development. Dissertation. Malmö, Sweden: World Maritime University, 2019.
19. Hebbar, Anish Arvind, and Santiago Juan Geymonat. "Simple, intuitive key performance indicators for flag state performance and its pilot application in Latin-America." *Journal of Safety Science and Resilience* 2.3 (2021): 101–110. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2021.06.003.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Чернов Олег Александрович —
начальник Международного отдела
ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
191186, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Дворцовая набережная, 8
e-mail: chernov.oa@rs-class.org

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Chernov, Oleg A. —
Head of International Affairs Department
Russian Maritime Register of Shipping
8 Dvortsovaya Embankment, St. Petersburg, 191186,
Russian Federation
e-mail: chernov.oa@rs-class.org

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2022 г.
Received: November 29, 2022.

EXPANDING THE PROCEDURES FOR MANAGING THE STATES OF SHIP OPERATIONS DURING THE FIGHT FOR SURVIVABILITY IN EMERGENCY SITUATIONS

D. V. Penkovsky¹, A. A. Ershov², A. N. Anisimov³

¹ — Murmansk State Technical University, Murmansk, Russian Federation

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

³ — Arkhangelsk branch of FSUE “Rosmorport”, Arkhangelsk, Russian Federation

The problem of building a procedure for managing the emergency state of the ship and its resolution, as a central problem in ensuring the survivability of the ship in emergency situations is analyzed in the paper. Drawing up a procedure for managing the ship state in emergency situations, in the form of a core formalized model, is presented as a series of operations: content analysis of the emergency operation scenario; theory of ship's damage control operation; structure formalization of the ship emergency operation as a process; logical action program of the emergency operation management procedure with a fixed goal which is represented by a matrix. If the logical operator finds that it is impossible to obtain a given goal during the implementation of the emergency operation, then the model of the emergency control procedure is extended. The extended model of the emergency procedure for managing the state of the vessel survivability contains the following additional series of operations: content analysis of the extended scenario in emergency situations; development of an extended theory of emergency operation; drawing up an extended structure of an emergency operation; descriptions of an extended operation in emergency situations as a process; drawing up an extended logical program of actions for the emergency operation control procedure with a fixed goal depicted in the form of a matrix. Finally, the algorithm (sequence) for developing a shipboard procedure for managing the state of an emergency operation within the program-target approach will be an iterative process that will ensure the achievement of the set goal — the effective implementation of a shipboard emergency operation to ensure the ship survivability, by using an extended procedure.

Key words: management, vessel safety status, operation, procedure, two-phase cargo, “pulp”.

For citation:

Penkovsky, Denis V., Andrey A. Ershov, and Alexander N. Anisimov. “Expanding the procedures for managing the states of ship operations during the fight for survivability in emergency situations.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 42–51. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-42-51.

УДК 656.61.08

РАСШИРЕНИЕ ПРОЦЕДУР УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯМИ СУДОВЫХ ОПЕРАЦИЙ В БОРЬБЕ ЗА ЖИВУЧЕСТЬ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Д. В. Пеньковский¹, А. А. Ершов², А. Н. Анисимов³

¹ — ФГАОУ ВО «Мурманский государственный технический университет»,
Мурманск, Российская Федерация.

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

³ — Архангельский филиал ФГУП «Росморпорт», Архангельск, Российская Федерация

В работе выполнено исследование проблемы обеспечения живучести судна в аварийных ситуациях при формировании процедуры управления аварийным состоянием судна и приведены способы ее разрешения. Показана процедура управления состоянием судна в АС в виде стержневой формализованной модели, представленная в виде последовательности операций: контентного анализа сценария аварийной операции; теории судовой операции по борьбе за живучесть судна; структуры формализации судовой аварийной операции

как процесса; логической программы действий (процедура управления аварийной операцией) при фиксированной цели, представляемой матрицей. Отмечается, что в случае обнаружения логическим оператором невозможности получения в процессе реализации аварийной операции заданной цели выполняется расширение модели аварийной процедуры управления. Расширенная модель аварийной процедуры управления состоянием живучести судна содержит следующие дополнительные операции: контентный анализ расширенного сценария АС; разработку расширенной теории аварийной операции; составление расширенной структуры аварийной операции; описание расширенной операции в АС как процесса; составление расширенной логической программы действий (процедура управления аварийной операцией) при фиксированной цели, изображаемой в виде матрицы. Сделан вывод о том, что окончательно алгоритмизация (последовательность) разработки судовой процедуры управления состоянием аварийной операции в рамках программно-целевого подхода представляет собой итеративный процесс, обеспечивающий достижение поставленной цели — эффективное выполнение судовой аварийной операции по обеспечению живучести судна путем использования расширенной процедуры.

Ключевые слова: управление, состояние безопасности судна, операция, процедура, двухфазный груз, «пульпа».

Для цитирования:

Пеньковский Д. В. Расширение процедур управления состояниями судовых операций в борьбе за живучесть в аварийных ситуациях / Д. В. Пеньковский, А. А. Ершов, А. Н. Анисимов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 42–51. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-42-51.

Введение (Introduction)

Повышение результативности эксплуатации технических средств с обеспечением безопасности мореплавания судна в эксплуатационных, нестандартных и аварийных ситуациях и разрешение возникающих при этом вопросов можно считать важными и актуальными направлениями исследований, позволяющими увеличить эффективность работы морской транспортной, нефтегазовой и рыболовной отраслей России.

Уровень разработки проблемы показал, что построение процедур по управлению состоянием безопасности судов в эксплуатационных, нестандартных и аварийных ситуациях можно причислить к *слабоформализуемым задачам*. Так, например, столкновения и посадку на мель судов в условиях увеличения количества мирового флота можно отнести к наиболее часто наблюдающимся «затратным» ситуациям, при которых нарушение целостности корпуса рефрижераторных и рыболовных судов (например, в шторм) может привести к переходу охлажденного груза из его твердого состояния в жидкое в виде «пульпы» или «монолита». Такие переходы рефрижераторного груза из твердого в другое фазовое состояние оказывают влияние на параметры аварийной посадки и остойчивость судна. Поэтому при составлении сценариев аварийных операций и управляющих процедур необходимо учитывать, что в процессе проектирования судовых устройств и систем надлежащего обеспечения ресурсами для борьбы за непотопляемость последние могут быть нерациональными и неэффективными на стадиях борьбы за живучесть судна, когда рефрижераторный груз переходит в состояние «пульпы» или «монолита».

Составление процедуры управления аварийным судном при борьбе за непотопляемость судна с аварийным рефрижераторным грузом должно быть ориентировано на их быстроедействие. На этапе преобразования груза из твердого охлажденного состояния в состояние «пульпы» даже небольшие воздействия окружающей среды, такие как ветер и волнение, еще в большей степени оказывают влияние на аварийную посадку и остойчивость судна. Особенно важно при составлении процедур управления состоянием аварийного судна учитывать морально-психологическое состояние «человеческого элемента». Его способность к борьбе за живучесть судна можно оценить во время прохождения обучения на тренажерах (в период возможного формирования «потенциальной жертвы» аварийных ситуаций, таких как оставление судна, борьба с поступлением воды в корпус, борьба с пожаром и др.) [1]–[4].

Анализ аварий и гибели рыболовных судов показал, что даже правильное понимание экипажем конструктивных особенностей судна в борьбе за живучесть, но непонимание скрытого фактора, связанного с изменением состояния груза, приводит к неправильному прогнозированию поведения

судна и ошибочному принятию решений. В свою очередь ошибочное решение в ходе борьбы за живучесть судна может явиться причиной гибели судна и людей.

Таким образом, в рамках проблемы *слабой формализуемости* задача формирования процедур по управлению аварийным состоянием судна заключается в том, чтобы построить взаимную и гармоничную внутреннюю и внешнюю саморегуляцию системы: «судно — окружающая среда — человеческий элемент» [5]–[7]. Структурообразующие факторы этой системы при взаимодействии друг с другом придают процедурам управления свойства *динамичности, нелинейности, многомерности и несогласованности* целей управления.

В настоящее время общетеоретических методов анализа и синтеза процедур управления в многомерных нелинейных системах по безопасному управлению состоянием судна в окончательном разработанном виде не существует ввиду следующих причин:

- нарушение выполнения условий суперпозиции; описание динамики нелинейных систем с использованием разнообразных классов функций;
- разнообразие условий функционирования системообразующих факторов и в процессе перехода из режима в режим появления различных требований к качеству процессов;
- управляемые и управляющие системообразующие факторы различного уровня сложности [8]–[11].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Методика формирования процедуры по контролю состояния готовности судна к борьбе за живучесть в аварийной ситуации. Можно считать, что задача по составлению аварийной процедуры по управлению состоянием судна в АС, а также ее разрешение, являются в настоящее время главной проблемой в теории по обеспечению безопасности мореплавания и борьбе за живучесть, которую можно представить формализованной схемой (рис. 3) [12]. Из рис. 3 следует, что узловая формальная модель построения аварийной процедуры управления состоянием борьбы за живучесть в СУБ судна может быть представлена в виде следующего логического чередования операций:

- контентного анализа $K(\cdot)$ сценария S_a формирования теории судовой аварийной операции T_a :

$$S_a \xrightarrow{K(\cdot)} T_a;$$

- построение структуры судовой аварийной операции Σ_a по теории системы T_a :

$$T_a \xrightarrow{\text{СОЛАС}} \Sigma_a \equiv (X_a, Y_a, Z_a);$$

- формализации судовой аварийной операции в виде процесса по структуре Σ_a :

$$X_a \xrightarrow{Z_a} Y_a,$$

где Z_a — технология преобразования действий в процедуру управления, представленная в виде

$$Z_a \equiv (R_a, Y_a, U_a, G_a) \equiv (R_a, \text{ЛП}_a).$$

Тогда логическую программу действий ЛП_a (процедуру управления аварийной операцией) в условиях АС при акцентированной цели R_a можно представить матрицей вида

$$\text{ЛП}_a \equiv \begin{vmatrix} Y_{a1}, U_{a1}, G_{a1} \\ Y_{a2}, U_{a2}, G_{a2} \\ \dots\dots\dots \\ Y_{an}, U_{an}, G_{an} \\ Y_a, 0, 0 \end{vmatrix},$$

где Y_{an} — состояние аварийной операции;

U_{an} — управление состоянием аварийной операции;

G_{an} — потребный ресурс, обеспечивающий достижение цели R_a в процессе выполнения судовой аварийной операции.

Постановка задач и цели. Анализ АС с транспортными рефрижераторными и рыболовными судами с затоплением трюмов показал, что коэффициент проницаемости трюма с мороженой рыбной продукцией не отвечает рекомендуемому в Правилах Регистра значению $\mu_j = 0,6$ [13]. Также следует отметить, что в загруженном рефрижераторном трюме размеры и положение пробоины, находящейся ниже ватерлинии, определить предлагаемыми «инструментариями» в «Наставлении по борьбе за живучесть судна» практически невозможно. В этом случае размеры и положение пробоины можно оценить либо согласно информации, полученной от непосредственных свидетелей происшествия, либо полагаясь на интуицию капитана.

Замороженный груз в поврежденном помещении со временем переходит в физическое состояние типа «пульпа», которая выводит из строя осушительную систему судна. Поэтому при осушении трюма должно быть предусмотрено применение погружных насосов, которые не являются обязательным ресурсом по Правилам Регистра. Удельный вес «пульпы» γ_{Π} можно определить по формуле $\gamma_{\Pi} = G^0/v$, где $G^0 = G + p_v$ — общий вес «пульпы» (груз, вода, тара); G — вес груза брутто; $p_v = v\gamma_{ж\mu_j}$ — вес поступившей в аварийное помещение забортной воды; v — геометрический объем грузового помещения; $\gamma_{ж}$ — удельный вес забортной воды.

Следует отметить, что в процессе затопления аварийного трюма состояние последнего необходимо оценивать в виде его последовательного перехода в *третью, первую и во вторую категории* отсеков. При большой пробоине, расположенной ниже ватерлинии, затопление трюма как отсека третьей категории происходит за считанные минуты, и в случае его затопления при не заделанной пробоине он является *отсеком первой категории*. После установки пластыря на пробоину в процессе осушения трюм можно классифицировать как *отсек второй категории*.

Параллельно в процессе откачки и дефростации рефрижераторного груза коэффициент удельного веса «пульпы» γ_{Π} приобретает еще большее значение, и свободная поверхность «пульпы» в трюме оказывает значительное влияние на остойчивость судна. Изменение метацентрической высоты $\delta h_{\text{сп}}$ будет существенным: $\delta h_{\text{сп}} = i_x \gamma_{\Pi} / \Delta_0$, где i_x — момент инерции затопленного трюма относительно оси абсцисс Ox ; $\Delta_0 = \Delta + p_v$ — весовое водоизмещение судна после затопления отсека; Δ — весовое водоизмещение судна до затопления. Поэтому в подобных случаях с рефрижераторными и рыболовными судами отсек второй категории с грузом в состоянии «пульпа» будет являться *наиболее опасным* [14].

На рис. 1 приведена схема из аварийного дела одного из рефрижераторных судов, где средний твиндек 2В с грузом в «голых» блоках в состоянии «монолит»; трюм 2С с грузом в картонной таре в состоянии обезвоженной «пульпы»; ψ — угол естественного откоса обезвоженной «пульпы».

Окончательно с откачкой забортной воды из аварийного трюма в результате обезвоживания и усадки «пульпа» представляет собой плотную перетекающую массу со свободной поверхностью, по влиянию на остойчивость судна подобную сыпучему грузу с неизвестным углом естественного откоса (рис. 1). Рефрижераторный груз без упаковки в «голых» блоках (кальмар) после осушения и охлаждения трюма может перейти в состояние «монолит», выгрузить который можно будет лишь после формирования удобных для этого массивов.

В настоящее время не существует методов для определения и исключения влияния «пульпы» на остойчивость судна, а также отсутствуют технологии по выгрузке двухфазного рефрижераторного груза типа «пульпа» или «монолит» из поврежденного трюма и методы для определения и исключения влияния их на посадку и остойчивость судна. Вследствие этого еще на стадии конструкторских разработок и производства стационарных систем осушения трюмов необходимо учитывать вероятность качественного изменения груза и его влияние на работу осушительных средств. Отсюда следует, что при составлении сценария аварийной операции и разработке процедур управления аварийным состоянием рефрижераторных и рыболовных судов необходимо учитывать вероятность физического изменения груза в затопленном и впоследствии осушенном грузовом трюме.

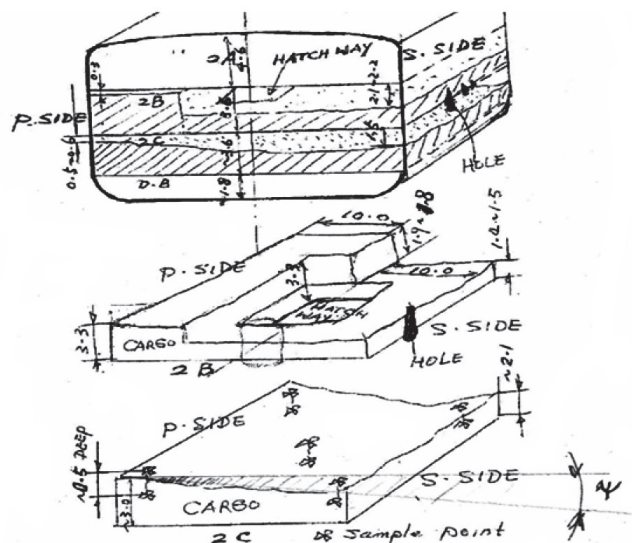


Рис. 1. Расположение груза рыбопродукции в аварийном трюме

При симметричном затоплении отсека допускается проведение спрямления судна одновременно с работами по прекращению поступления и откачке воды. Правилами Регистра установлен допустимый уровень непотопляемости судна, который характеризуется вероятностным A и требуемым R индексами деления судна на отсеки так, чтобы выполнялось отношение $A \geq R$. Однако использование в расчетах коэффициентов проницаемости аварийного трюма, принятого Правилами Регистра $\mu = 0,6$, не вполне корректно в ситуации с грузом в состоянии «пульпа» (рис. 2).

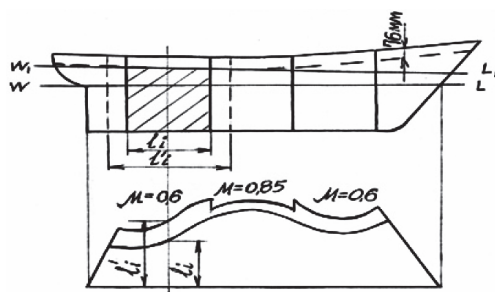


Рис. 2. Кривая предельных длин отсеков с учетом коэффициента проницаемости

Ввиду того, что существующая конструктивная длина отсеков может оказаться значительно завышенной по отношению к установленной Правилами Регистра, в расчетах коэффициент проницаемости следует принимать равным максимальному значению: $\mu_j = 0,95$, что не противоречит Правилам РС.

Завышение длины отсека оказывает значительное влияние на параметры аварийной посадки и остойчивости рыболовных и рефрижераторных судов с грузом «пульпа», поэтому еще на стадии их проектирования необходимы дополнительные исследования вопроса установления предельных длин отсеков таких типов судов, а также необходимо выполнение корректуры существующих «Информаций капитану об аварийной посадке и остойчивости судна». Таким образом, составление сценариев операций по борьбе за живучесть и разработка процедур управления подобными операциями на рефрижераторных и рыболовных судах должны выполняться с привлечением алгоритма актуализации, а результаты применения процедур включаться в «Информацию капитану по аварийной посадке и остойчивости судна».

Результаты (Results)

Актуализация последовательности операций методики формирования аварийной процедуры по эффективному контролю состояния готовности судна к борьбе за живучесть. В алгоритмизации построения процедуры управления операцией, завершающей стадией является ответ на вопрос, о возможности с помощью рассмотренной процедуры (ЛП_а) обеспечить достижение цели R_a по эффективному выполнению судовой аварийной операции. Если логический оператор продемонстрирует невозможность получения в процессе выполнения аварийной операции заданной цели, то необходимо осуществить дальнейшее расширение модели аварийной процедуры управления (рис. 3).

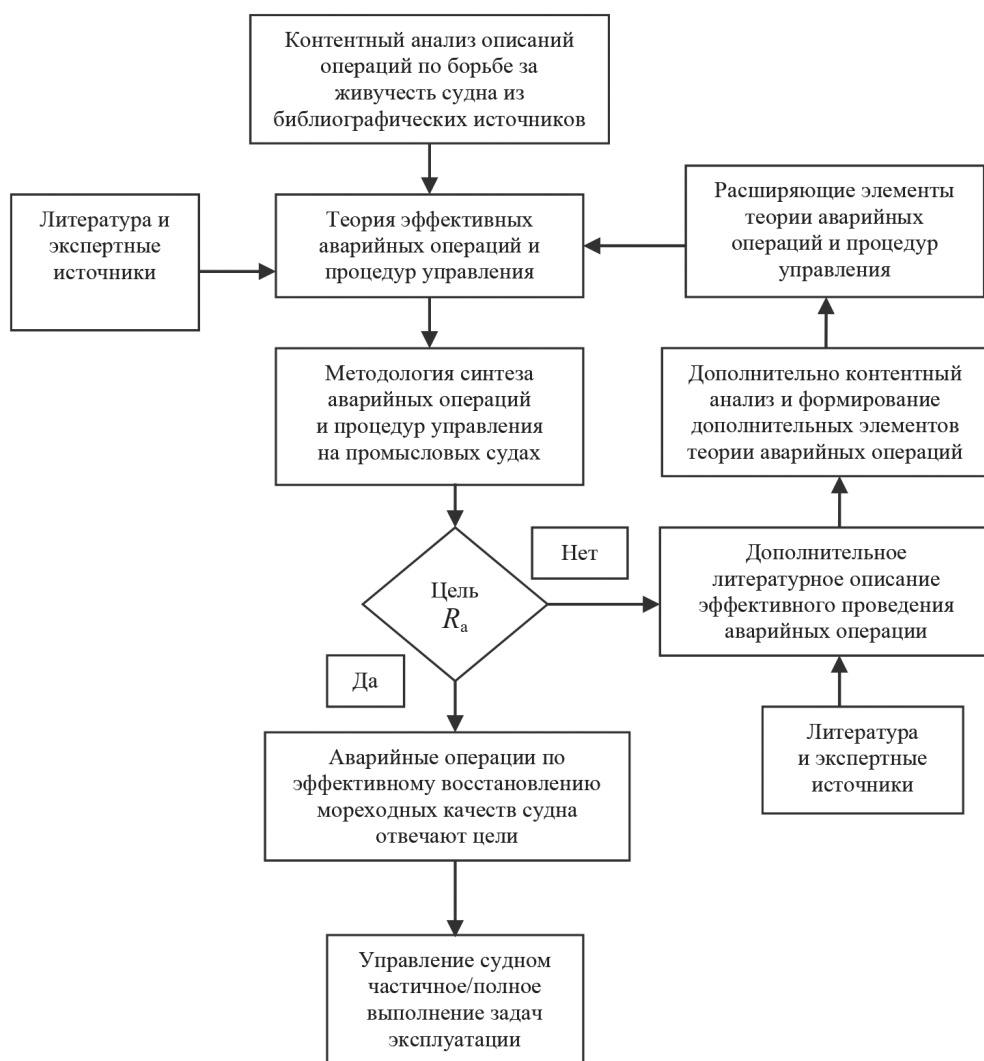


Рис. 3. Схема расширения модели аварийной судовой операции и управленческой процедуры к ней

Расширенная модель аварийной процедуры управления состоянием борьбы за живучесть судна предполагает приведенную последовательность операций:

1. Контентный анализ $K(\cdot)$ расширенного сценария $S_{p,a}$ и построение расширенной теории аварийной операции $T_{p,a}$:

$$S_{p,a} \xrightarrow{K(\cdot)} T_a + \Delta T_{p,a} \equiv T_{p,a}.$$

2. Построение расширенной структуры $\Sigma_{p,a}$ операции

$$T_{pa} \xrightarrow{\text{СОЛАС}} \Sigma_{pa} \equiv (X_{p,a}, Y_{p,a}, Z_{p,a}),$$

описываемой как расширенный процесс при АС:

$$X_{p.a} \xrightarrow{Z_{p.a}} Y_{p.a}.$$

При этом процесс преобразования расширенных действий с дополнительным ресурсом в аварийной процедуре управления представлен в виде

$$Z_{p.a} \equiv (R_{p.a}, Y_{p.a}, U_{p.a}, G_{p.a}) \equiv (R_{p.a}, ЛП_{p.a}).$$

3. Построение расширенной логической программы действий $ЛП_{p.a}$ (процедура управления аварийной операцией) при фиксированной цели $R_{p.a}$, представленной в виде матрицы

$$ЛП_{p.a} \equiv \begin{vmatrix} Y_{p.a1}, U_{p.a1}, G_{p.a1} \\ Y_{p.a2}, U_{p.a2}, G_{p.a2} \\ \\ Y_{p.an}, U_{p.an}, G_{p.an} \\ Y_{p.an} & 0, & 0 \end{vmatrix},$$

где $Y_{p.an}$ — состояние расширенной аварийной операции;

$U_{p.an}$ — управление расширенной операцией при АС;

$G_{p.an}$ — ресурсы, обеспечивающие достижение цели $R_{p.a}$ при реализации расширенной аварийной судовой операции.

Обсуждение (Discussion)

Формализованная алгоритмизация построения расширенной процедуры управления состоянием судовой аварийной операции должна включать шесть логических этапов.

На первом этапе применяется контентный анализ словесной информации, полученной из литературных источников и от экспертов. На данном этапе выделяются элементы теории операций и процедур управления борьбой за живучесть (состоянием безопасности), которая может обеспечить движение рыболовного судна, управляемость и использование его по назначению на промысле, даже ограниченное.

На втором этапе последовательности операций в границах разработанной теории, отвечающей методологии синтеза результатов контентного анализа словесной информации, строятся модели эффективного проведения мероприятий по борьбе за живучесть рыболовного судна, представляющих собой *акцентированные процедуры управления*.

На третьем этапе последовательности операций осуществляется оценка мер и действий по борьбе за живучесть промыслового судна согласно критериям безопасности и результативности, представляющим собой фиксированные процедуры управления, и окончательно вырабатывается решение об их возможном практическом применении. При этом если составленное описание аварийной операции и процедуры управления позволяет достигнуть поставленной цели, то они вводятся в *культуру управления промысловыми судами* в «Руководство СУБ» в части организации борьбы за живучесть при АС. В противном случае необходимо проводить расширение модели аварийной операции и разрабатывать процедуры управления.

На четвертом этапе последовательности операций осуществляется сбор дополнительной информации, формируется расширенное языковедческое описание аварийных операций и процедур управления и на основе результатов контентного анализа дополнительно выделяются элементы теории, совершенствующие теорию исходных моделей.

На пятом этапе последовательности операций, полученные дополняющие элементы теории и расширяющие теорию первичных моделей заносятся в *реестр основной теории*, и процесс объединения аварийных операций и процедур управления повторяется (на первой–третьей стадиях) до момента получения необходимой эффективной оценки.

На шестом этапе расширенные модели результативных аварийных операций и процедуры управления состоянием промыслового судна в АС принимаются, утверждаются руководством и вносятся в «Руководство СУБ» с судами компании.

Представленная алгоритмизация процедуры управления аварийной операцией может быть эффективно использована непосредственно в реальных аварийных условиях. Для этого актуализация алгоритма аварийной процедуры должна происходить в предельно минимальные сроки и доводиться до штаба по борьбе с чрезвычайными ситуациями в компании и непосредственно до штаба аварийных работ на судне. С этой целью необходимо сократить до минимума время процесса формирования $\Delta T_{p.a}$ — дополнительных новых методов и приемов для построения расширенной теории $T_{p.a}$ аварийной операции, доставки и применения на место аварии необходимых ресурсов, обеспечивающих достижение цели $R_{p.a}$. Поэтому логический оператор должен «отслеживать» и содержать применяемые в настоящее время нормы и правила международных конвенций и национальных руководящих документов, а также последние научные открытия и разработки, публикации в этой области, инженерные разработки и технологии, используемые в производстве. Такая работа оператора будет способствовать разрешению вопросов организации и принятию оперативных мер в процессе выполнения аварийных работ и, соответственно, повышению результативности работ по вопросам борьбы за живучесть судна.

Заключение (Conclusion)

На основании проведенного исследования можно сделать вывод о том, что алгоритмизация программно-целевой разработки процедуры эффективного управления (логической программы) состоянием аварийной операции в процессе борьбы за живучесть судна представляет собой *итеративный процесс*, направленный на поддержание и восстановление эксплуатационных качеств поврежденного судна, обеспечивающий выполнение аварийной процедуры достижением поставленной цели в случае аварийной ситуации, а именно *результативным выполнением аварийной операции по восстановлению мореходных качеств судна*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимов А. Н. Особенности социального управления в системах менеджмента безопасностью / А. Н. Анисимов, В. И. Меньшиков // Вестник МГТ: труды Мурманского государственного технического университета. — 2003. — Т. 6. — № 1. — С. 9–16.
2. Ларичев О. И. Наука и искусство принятия решения / О. И. Ларичев. — М.: Наука, 1979. — 200 с.
3. Леонтьев В. А. Формирование профессиональных навыков судоводителей / В. А. Леонтьев. — М.: Транспорт, 1987. — 224 с.
4. Позняков С. И. Методы разрешения нештатных ситуаций при управлении судовыми технологическими процессами / С. И. Позняков, В. И. Меньшиков. — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2017. — 184 с.
5. Анисимов А. Н. Диссипативное ассоциативно-структурное описание системы безопасности и ее функционирование в рамках теории фазовых переходов / А. Н. Анисимов, А. А. Анисимов, А. А. Бутаков, В. И. Меньшиков // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. — 2013. — Т. 16. — № 1. — С. 13–16.
6. Развозов С. Ю. Структура системы безопасности мореплавания в рамках теории фазовых переходов / С. Ю. Развозов, В. И. Меньшиков, А. Н. Анисимов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2. — С. 109–115.
7. Анисимов А. Н. Элементы методологии анализа и синтеза операций и процедур по поддержанию безопасной эксплуатации судов в компаниях / А. Н. Анисимов, С. Ю. Развозов, Д. В. Пеньковский // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2022. — № 4. — С. 27–37. DOI: 10.24143/2073–1574–2022–4–27–37.
8. Ершов А. А. Теоретические основы и методы решения приоритетных проблем безопасности мореплавания: автореф. дис. ... д-ра техн. наук; специальность: 05.22.16 «Судовождение» / А. А. Ершов. — СПб., 2000. — 44 с.

9. Анисимов А. Н. Методологические проблемы в процедурах планирования алгоритма программно-целевого управления состояниями безопасности судна / А. Н. Анисимов, Д. М. Фургаса, В. И. Меньшиков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2020. — № 4. — С. 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-4-7-15.

10. Меньшиков В. И. Особенности эксплуатации судов компаниями с интегрированной системой менеджмента / В. И. Меньшиков, М. А. Пасечников, К. В. Пеньковская, Д. В. Пеньковский. — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2014. — 195 с.

11. Пеньковская К. В. Живучесть структур безопасности мореплавания с учетом человеческого фактора: автореф. дисс. ... канд. техн. наук; специальность 05.22.19: «Эксплуатация водного транспорта, судовождение» / К. В. Пеньковская. — Мурманск, 2007. — 22 с.

12. Бобрович М. С. Составление плана размещения ресурса в судовой ключевой операции по матрице «риски — выделенные ресурсы» / М. С. Бобрович, Д. В. Пеньковский, А. В. Матонин, В. И. Меньшиков // Наука и образование-2020: материалы Всеросс. науч.-практ. конф. — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2021. — С. 69–73.

13. Анисимов А. Н. Об аварийной посадке и остойчивости рефрижераторного судна при изменении коэффициента проницаемости груза / А. Н. Анисимов // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 3. — С. 119–130.

14. Кацман Ф. М. Теория и устройство судов / Ф. М. Кацман, Д. В. Дорогостайский, А. В. Коннов, Б. П. Коваленко. — Л.: Судостроение, 1991. — 416 с.

REFERENCES

1. Anisimov, A. N., and V. I. Menshikov. “Features of social management in security management systems.” *Vestnik of MSTU* 6.1 (2003): 9–16.

2. Larichev, O. I. *Nauka i iskusstvo prinyatiya resheniya*. M.: Nauka, 1979.

3. Leont'ev, V. A. *Formirovanie professional'nykh navykov sudovoditelei*. M.: Transport, 1987.

4. Poznyakov, S. I., and V. I. Men'shikov. *Metody razresheniya neshtatnykh situatsii pri upravlenii sudovymi tekhnologicheskimi protsessami*. Murmansk: Izd-vo MGTU, 2017.

5. Anisimov, A. N., A. A. Anisimov, A. A. Butakov, and V. I. Menshikov. “Dissipative associative-structural description of the security system and its functioning within the framework of the theory of phase transitions.” *Vestnik of MSTU* 16.1(2013): 13–16.

6. Razvozov, S. Yu., V. I. Men'shikov, and A. N. Anisimov. “Structure of navigation system safety within the theory of phase transitions.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiralа S. O. Makarova* 2 (2013): 109–115.

7. Anisimov, Alexander Nikolaevich, Sergey Yurievich Razvozov, and Denis Vladimirovich Penkovskiy. “Elements of methodology of analysis and synthesis of operations and procedures for maintaining vessel safe operation in companies.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 4 (2022): 27–37.

8. Ershov, A. A. *Teoreticheskie osnovy i metody resheniya prioritetnykh problem bezopasnosti moreplavaniya*. Abstract of Dr. diss. SPb., 2000.

9. Anisimov, Alexander Nikolaevich, Desalegn Merdasa Furgasa, and Vyacheslav Ivanovich Menshikov. “Methodological problems in algorithm planning procedures of program and target management of vessel safety.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies*. 4 (2020): 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-4-7-15.

10. Men'shikov, V. I., M. A. Pasechnikov, K. V. Pen'kovskaya, and D. V. Pen'kovskii. *Osobennosti ekspluatatsii sudov kompaniyami s integrirovannoi sistemoi menedzhmenta*. Murmansk: Izd-vo MGTU, 2014.

11. Pen'kovskaya, K. V. *Zhivuchest' struktur bezopasnosti moreplavaniya s uchetoм chelovecheskogo faktora*. Abstract of PhD diss. Murmansk, 2007.

12. Bobrovich, M. S., D. V. Penkovsky, A. V. Matonin, and V. I. Menshikov. “Drawing up a plan for the allocation of a resource in a ship's key operation according to the matrix “risks — allocated resources.” *Nauka i obrazovanie-2020: materialy vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Murmansk: Izd-vo MGTU, 2021. 69–73.

13. Anisimov, A. N. “On the emergency landing and the stability of vessel with a change in the coefficient of the permeability of the load of the refrigerator vessel.” *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 3 (2011): 119–130.

14. Katsman, F. M., D. V. Dorogostaiskii, A. V. Konnov, and B. P. Kovalenko. *Teoriya i ustroistvo sudov*. L.: Sudostroenie, 1991.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пеньковский Денис Владимирович — аспирант

Научный руководитель:

Позняков Сергей Иванович —

кандидат технических наук

ФГАОУ ВО «Мурманский государственный
технический университет»

183010, Российская Федерация, Мурманск,

ул. Спортивная, 13

e-mail: penkovskiydvl@mstu.edu.ru

Ершов Андрей Александрович —

доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: ershov_63@mail.ru

Анисимов Александр Николаевич —

кандидат технических наук

Архангельский филиал ФГУП «Росморпорт»

163000, Российская Федерация, Архангельск,

ул. Карла Либкнехта, 34

e-mail: anisimov.54@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Penkovsky, Denis V. — Postgraduate

Supervisor:

Poznyakov, Sergey I. —

PhD

Murmansk State Technical University

13 Sportivnaja Str.,

Murmansk, 183010,

Russian Federation

e-mail: penkovskiydvl@mstu.edu.ru

Ershov, Andrey A. —

Dr. of Technical Sciences, professor

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: ershov_63@mail.ru

Anisimov, Alexander N. —

PhD

Arkhangelsk branch of FSUE “Rosmorport”

34 Karl Liebknecht Str., Arkhangelsk, 163000,

Russian Federation

e-mail: anisimov.54@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2022 г.

Received: December 24, 2022.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-52-63

ANALYSIS OF CONDITIONS FOR SELECTING THE NUMBER OF TEETH OF PLANETARY GEARBOXES

S. O. Baryshnikov, A. N. Ivanov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The issues of selecting the number of teeth for 2k-h type A mechanisms based on the study of the known conditions for their assembly used in the development of planetary gearboxes of various shipboard both deck and main power ship installations are highlighted in the paper. Considering the design practice, when selecting the number of teeth, it is important to maintain a given gear ratio, ensure the alignment of the mechanism gears, withstand the condition of the neighborhood of satellites, ensure the assembly condition and the absence of interference of internal gearing. These conditions are expressed in terms of the number of teeth of gears and impose restrictions on the parameters of 2k-h mechanisms. Checking the interference condition of internal gearing at the stage of selecting the number of teeth in existing methods is usually not done, but it is performed at the stage of checking the quality of gearing according to geometric conditions. With this approach, the selection of tooth numbers is considered as a problem solved by the method of successive approximations: selection of tooth numbers — calculation of geometric dimensions — checking the quality of gearing — selection of a new combination of tooth numbers, etc. The condition of interference of internal gearing obtained in the work is represented by a closed formula, which eliminates the use of the iteration method, which requires a large amount of computational work and allows it to be tested at an early stage of product development. The neighborhood condition is expressed by an equation in which the design parameter is associated with the maximum possible number of satellites and a guaranteed gap between their initial circles. It makes it possible to theoretically explain well-known constructions that do not agree with the theoretical views existing at that time. The alignment condition allows for both an even and an odd difference in the number of teeth of the central wheels. Thus, the results obtained make it possible to solve the problems of creating a mechanism with the maximum possible number of satellites for reducing the size of a planetary mechanism as a unit completing a marine gearbox of any complexity, to expand the set of possible combinations of the teeth numbers that provide a given design and require less computational work.

Keywords: single-row planetary mechanisms, design parameter, alignment condition, assembly condition, neighborhood condition, interference condition of internal gearing.

For citation:

Baryshnikov, Sergey O., and Anatoly N. Ivanov. "Analysis of conditions for selecting the number of teeth of planetary gearboxes." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 52–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-52-63.

УДК 621.873.019.3

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПОДБОРА ЧИСЕЛ ЗУБЬЕВ ПЛАНЕТАРНЫХ РЕДУКТОРОВ

С. О. Барышников, А. Н. Иванов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе рассмотрены вопросы подбора чисел зубьев для механизмов 2k-h типа А на основе исследования известных условий для их сборки, применяемых при разработке планетарных редукторов раз-

личных судовых как палубных, так и главных энергетических судовых установок. Отмечается, что учитывая практику проектирования, при подборе чисел зубьев важно выдержать заданное передаточное отношение, обеспечить соосность зубчатых передач механизма, выдержать соблюдение условия соседства сателлитов, обеспечить условия сборки и отсутствие интерференции внутреннего зацепления. Данные условия, выраженные через числа зубьев зубчатых колес, накладывают ограничения на параметры механизмов $2k-h$. Проверка условия интерференции внутреннего зацепления на стадии подбора чисел зубьев в существующих методах, как правило, не делается, а выполняется на этапе проверки качества зубчатого зацепления по геометрическим условиям. Подчеркивается, что при таком подходе подбор чисел зубьев рассматривается как задача, решаемая методом последовательных приближений: подбор чисел зубьев — расчет геометрических размеров — проверка качества зацепления — подбор новой комбинации чисел зубьев и т. д. Полученное в работе условие интерференции внутреннего зацепления представлено замкнутой формулой, позволяющей устранить применение метода итерации, требующего большого объема расчетных работ, дает возможность производить его проверку на ранней стадии разработки изделия. Условие «соседства», выраженное уравнением, в котором конструктивный параметр связан с максимально возможным числом сателлитов и гарантированным зазором между их начальными окружностями, позволяет объяснить известные конструкции, не согласующиеся с существующими теоретическими положениями. Условие соосности допускает как четную, так и нечетную разность чисел зубьев центральных колес. Полученные результаты исследования позволяют решать задачи создания механизма с максимально возможным числом сателлитов для уменьшения размеров планетарного механизма как единицы, комплектующей судовой редуктор любой сложности, расширить множество возможных комбинаций чисел зубьев, обеспечивающих заданный конструктив требуя при этом меньшего объема расчетных работ.

Ключевые слова: однорядные планетарные механизмы, конструктивный параметр, условие соосности, условие сборки, условие соседства, интерференция внутреннего зацепления.

Для цитирования:

Барышников С. О. Анализ условий подбора чисел зубьев планетарных редукторов / С. О. Барышников, А. Н. Иванов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 52–63. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-52-63.

Введение (Introduction)

Широкое применение в судовых и крановых приводах нашли планетарные редукторы и редукторы планетарно-дифференциального типа, созданные на основе однорядных механизмов $2k-h$ типа А (по классификации В. Н. Кудрявцева). Присущий им принцип многопоточности, высокая технологичность, использование высокотвердого внешнего зацепления и эвольвентного внутреннего зацепления, реализующего выпукло-вогнутый контакт, позволяют получать редукторы любой мощности и быстроходности и создавать различные многофункциональные приводы.

На стадии проектирования подобных устройств разработчик сталкивается с рядом ограничений рациональных значений их параметров. Так, при подборе чисел зубьев необходимо учитывать следующие условия, а именно: соблюдение заданного передаточного отношения, обеспечение соосности зубчатых передач механизма, соблюдение условия соседства сателлитов, обеспечение условия сборки и отсутствия интерференции внутреннего зацепления [1], [2]. Указанные условия выражены математическими зависимостями, в которых аргументами является число зубьев колес.

В ряде отраслей машиностроения находят применение конструкции с использованием максимального числа сателлитов, что позволяет резко снизить массогабаритные размеры планетарного редуктора и сопряженных с ним узлов. Отмеченные ранее математические зависимости обуславливают жесткие ограничения на применение конструкций с максимально возможным числом сателлитов, реализующих заданное передаточное отношение. Так, в планетарном редукторе ТВД АИ-20 установлено шесть $n_w = 6$ сателлитов при значении конструктивного параметра ряда $p = z_b / z_a = 97/35 = 2,771$ и числе зубьев сателлитов $z_g = 0,5(z_b - z_a) = 31$ (z_b, z_a — числа зубьев центральных колес механизма $2k-h$). В то же время условие соседства: $(z_a + z_g) \sin(\pi / n_w) > z_g + 2 = (35 + 31) \sin(180/6) = 33 > 31 + 2 = 33$, показывает, что выполнить данное решение невозможно, поскольку в этом случае будет наблюдаться отсутствие зазора между

зубьями сателлитов. Не дает обоснования применению данной конструкции также рекомендация [3] об установлении значения конструктивного параметра p^* для заданного числа сателлитов в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Рекомендуемые значения конструктивного параметра в зависимости от числа сателлитов

n_w	p^*	p^{**}	p_{09}	n_w	p^*	p^{**}	p_{09}
3	11,0	12,0	9,472	6	2,0	2,7	2,663
4	3,5	5,2	4,705	7	1,8	2,2	2,295
5	2,5	3,4	3,309	8	1,6	2,0	2,059

Условие соседства, представленное в работе [4] в виде неравенства $n_w < 0,9\pi / \arcsin(p - 1/p + 1)$, накладывает еще более жесткие ограничения на значения конструктивного параметра с заданным числом сателлитов. Доказательством этого являются значения p_{09} (см. табл. 1), полученные в результате решения данного неравенства. Более широкие возможности в выборе наибольшего числа сателлитов для данного значения конструктивного параметра p^{**} приведены в работе [5], однако и в этом случае рассматриваемая конструкция с использованием максимального числа сателлитов не находит подтверждения.

Выполнение условия интерференции внутреннего зацепления, исключающего контакт продольной кромки колеса с переходной поверхностью сателлита, в большинстве работ на стадии подбора чисел зубьев не используется. Выполнение данного условия учитывают на этапе проверки качества зубчатого зацепления по геометрическим условиям¹ [6], [7]. При таком подходе подбор чисел зубьев рассматривается как задача, решаемая методом последовательных приближений: подбор чисел зубьев – расчет геометрических размеров – проверка качества зацепления – подбор новой комбинации чисел зубьев и т. д., требующая большого объема расчетных работ.

Для использования условия интерференции внутреннего зацепления на ранней стадии проектирования с целью исключения метода итерации при решении задачи подбора чисел зубьев предлагается известное из теории зубчатых зацеплений неравенство вида $z_2 \geq (z_1^2 - 34)/(2z_1 - 34)$, которому соответствуют числа зубьев, указанные в табл. 2. Как видно, данное условие интерференции внутреннего зацепления связывает между собой число зубьев сателлита с числом зубьев центрального колеса с внутренними зубьями (например, при числе зубьев шестерни, равном 18, колесо с внутренними зубьями должно иметь число зубьев более 144, а при числе зубьев шестерни 17 зацепление неосуществимо, что не соответствует действительности). Данное условие определено способом нарезания шестерни методом деления с применением фасонного инструмента, т. е. с использованием технологии, которая в настоящее время не находит применения на производстве. Как правило, в планетарных редукторах зубчатые колеса с внешними зубьями нарезают инструментом реечного типа, а колесо с внутренними зубьями обрабатывают долбяком, при этом для подобного способа изготовления данное неравенство оказывается несправедливым.

Таблица 2

Рекомендуемые числа зубьев колеса в зависимости от числа зубьев сателлитов

$z_1 = z_g$	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27-79	Св. 79
$z_2 = z_b$	∞	> 144	> 81	> 60	> 50	> 44	> 41	> 38	> 36	> 35	> $z_1 + 8$	> $z_1 + 7$

Целью данной статьи в связи с проблемами математического представления условий подбора чисел зубьев является получение условий, позволяющих расширить множество возможных комбинаций чисел зубьев и обеспечить получение наибольшего числа сателлитов для заданного значения конструктивного параметра.

¹ ГОСТ 19274–73. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внутреннего зацепления. Расчет геометрии. М.: Изд-во стандартов, 1973. 64 с.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Планетарные редукторы и редукторы планетарно-дифференциального типа, построенные на основе однорядных механизмов $2k-h$ типа A , нашли применение в конструкторских разработках судовых и крановых механизмов (рис. 1, a). В качестве примера на рис. 1, b показано размещение данных редукторов на судах гражданского типа: в румпельном механизме винто-рулевой колонки для привода главного винта, в механизме подъема, механизме вращения, в канатном механизме изменения вылета стрелового судового крана, а также в различных палубных механизмах.

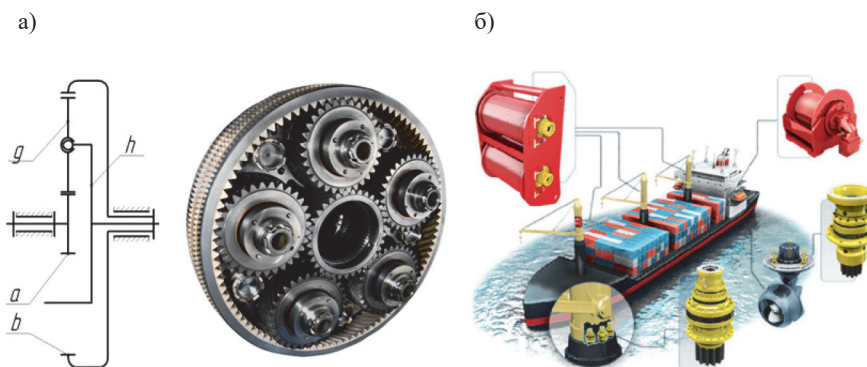


Рис. 1. Конструкторские разработки судовых и крановых приводов:

a — схема и конструкция типового элемента планетарных редукторов привода (механизм $2k-h$ типа A : a, g, b — зубчатые колеса; h — водило);

b — размещение планетарных редукторов, созданных на типовом элементе на судах

Приведенные в работе математические выражения условий для подбора чисел зубьев соответствуют обозначениям, принятым в справочнике [3]. Для вновь вводимых обозначений даны соответствующие пояснения в тексте. Поскольку в механизме (рис. 2, a) каждая его передача определяется посредством формул цилиндрической рядовой зубчатой передачи, в передаче зубчатому колесу помимо буквенных обозначений присваивают также числовые индексы: 1 — шестерне, 2 — колесу (рис. 2, $b, в$).

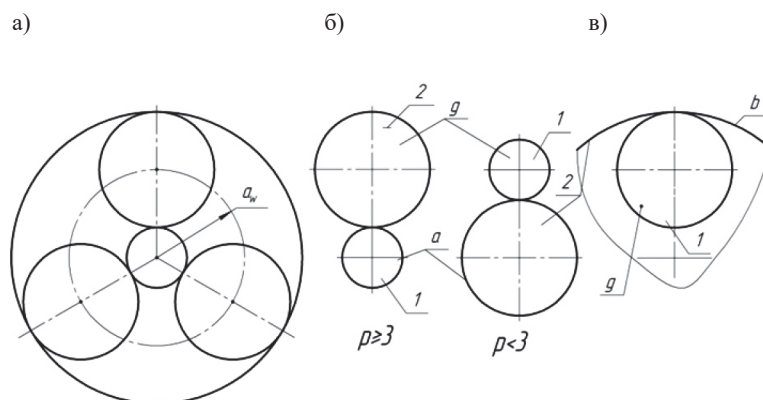


Рис. 2. Механизм $2k-h$ типа A :

a — схема зацеплений; b — передачи с внешним зацеплением;

$в$ — передача с внутренним зацеплением;

1 — шестерня; 2 — колесо

Условие соседства обеспечивает гарантированный зазор δ между вершинами зубьев соседних сателлитов (рис. 3, a). В этом случае сателлит, установленный на центр C_1 , не мешает постановке второго сателлита на центр C_2 , позволяя собрать механизм. Используя рис. 3, a , условие соседства в общем виде представляют в виде неравенства

$$(d_a)_g < 2a_w \sin(\pi/n_w) \text{ или } [(d_a)_g / 2a_w] < \sin(\pi/n_w), \quad (1)$$

которое можно проверить графически (рис. 3, а).

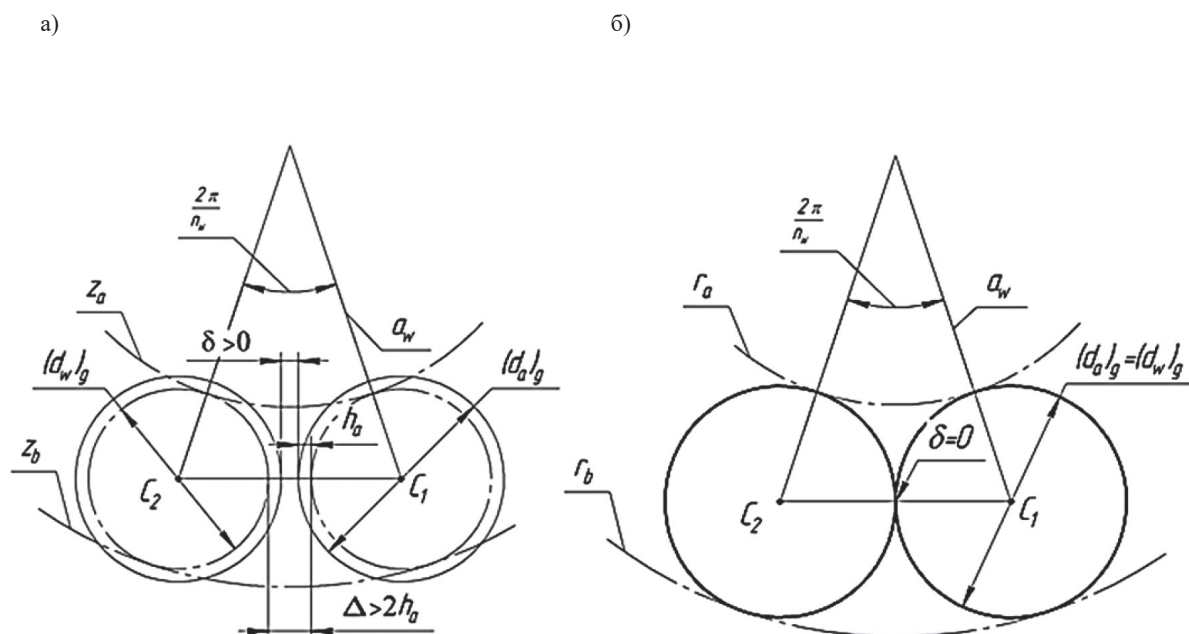


Рис. 3. Размещение сателлитов:

а — при наличии зазора между зубьями соседних сателлитов;

б — при касании между собой начальными окружностями

Условие сборки обеспечивает свободный вход зубьев сателлитов во впадины зубьев центральных колес. Для сателлитов, равномерно отстоящих друг от друга (для упрощения изготовления и для уравнивания их на водиле), условие сборки имеет вид

$$(z_a + z_b) / n_w = Q, \quad (2)$$

где Q — целое число, т. е. сумма чисел зубьев центральных колес должна быть кратна числу сателлитов, при этом каждое из чисел зубьев центральных колес может быть не кратно числу сателлитов.

Примечание. Предложение проф. М. К. Кристи о допустимости отклонения величины Q от целого числа на 1–2 % за счет зазоров в зацеплениях зубчатых колес не нашло применения в области судовых и крановых механизмов.

Условие соосности в планетарном однорядном механизме типа А представляет собой равенство межосевых расстояний во внешнем ($a - g$) и внутреннем ($b - g$) зацеплении (рис. 2):

$$(a_w)_{ag} = (a_w)_{bg}. \quad (3)$$

Так как зубчатые колеса z_a и z_g внешнего, z_g и z_b внутреннего зацеплений кинематически связаны между собой, равенство межосевых расстояний (3) выражено через числа зубьев формулой

$$(z_a + z_g) \cos \alpha_{twb} = (z_b - z_g) \cos \alpha_{twa} \quad (4)$$

применительно к механизму с равными углами зацепления: $\cos \alpha_{twb} = \cos \alpha_{twa}$. В частности, данное равенство справедливо для механизма с несмещенными зубчатыми колесами, в котором коэффициенты смещения $x_b = x_g = x_a = 0$. Условие соосности принимает вид:

$$z_{g0} = 0,5(z_b - z_a). \quad (5)$$

Во многих работах условие (5), согласно которому разность чисел зубьев центральных колес должна быть четной, является обязательным, однако при этом сужается множество комбинаций чисел зубьев, реализующих заданное значение конструктивного параметра $p = z_b / z_a$.

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Введем в условие соосности (4) параметр $C = \cos \alpha_{twa} / \cos \alpha_{twb} = z_{\Sigma} / z_d$, где $z_{\Sigma} = (z_a + z_g)$ — сумма чисел зубьев внешнего зацепления, $z_d = (z_b - z_g)$ — разность чисел зубьев внутреннего зацепления. В результате получим равенство

$$z_g = (z_b C - z_a) / (1 + C), \quad (6)$$

в соответствии с которым разность $z_b - z_a$ может быть не только четной ($C = 1$), но и нечетной при $C \neq 1$ (параметр C был впервые использован в работах канд. техн. наук В. А. Ткаченко).

На практике формулу (6) не применяют для определения числа зубьев сателлита, его находят по формуле [3]:

$$z_g = z_{g0} + \theta, \quad (7)$$

где величина θ — разность между действительным числом зубьев сателлита и z_{g0} .

Если представить условие (5) в виде $z_{g0} = 0,5z_a(p - 1)$, то получим следующие зависимости:

$$z_{\Sigma} = 0,5z_a(p + 1) + \theta; z_d = 0,5z_a(p + 1) - \theta; z_{\Sigma} - z_d = 2\theta, \quad (8)$$

которые выражают величину θ , соответственно, через сумму $z_{\Sigma} = (z_a + z_g)$ и разность $z_d = (z_b - z_g)$ чисел зубьев.

Равенства вида (8) позволяют установить между формулой (7) и следующей формулой [8]:

$$z_g = z_{g0} - 0,5\Delta, \quad (9)$$

связь вида: $\Delta = (z_b - z_g) - (z_a + z_g) = -2\theta$. При $\theta = 0$ получим известное решение, в котором разность $z_b - z_a$ должна быть четной. Когда разность $z_b - z_a$ является нечетной, $\theta = \pm 0,5, \pm 1,5$, благодаря этому существенно расширяется множество возможных комбинаций чисел зубьев, обеспечивающих заданное значение конструктивного параметра. При $\theta < 0$, без увеличения диаметральных размеров передачи, можно значительно улучшить условия работы зацепления $z_a - z_g$, так как при этом $\alpha_{twa} > \alpha_{twb}$ [3]. В научных публикациях [8], [9] приведены рекомендации при $\theta = 1,5$.

При условии $\theta \neq 0$ заданную несоосность компенсируют изготовлением зубчатых колес со смещением исходного контура. Так, например, для передачи с числом сателлитов $n_w = 3$ с конструктивным параметром $p = 4$ и числом зубьев солнечного колеса $z_a = 21$ число зубьев колеса с внутренним зацеплением определяется из равенства $z_b = z_a \cdot p = 21 \cdot 4 = 84$. Из условия соосности число зубьев сателлита составляет

$$z_{g0} = 0,5(z_b - z_a) = 0,5(84 - 21) = 31,5.$$

Для назначения числа зубьев сателлита целым с целью получения $\alpha_{twa} > \alpha_{twb}$ примем, например, на основании [3], параметр $\theta = -0,5$. Тогда

$$z_g = z_{g0} + \theta = 31,5 - 0,5 = 31.$$

Для соблюдения условия соосности при $\theta \neq 0$ ($z_a + z_g \neq z_b - z_g$) зададим во внутреннем зацеплении ($b - g$) угол $\alpha_{twb} = 20^\circ$. Тогда угол зацепления во внешней передаче ($a - g$) равен

$$\alpha_{twa} = \arccos \left(\frac{z_a + z_g}{z_b - z_g} \cos \alpha_{twb} \right) = \arccos \left(\frac{21 + 31}{84 - 31} \cos 20^\circ \right) = 22,804^\circ,$$

а коэффициент суммы смещения —

$$x_{\Sigma} = \frac{(\operatorname{inv} \alpha_{twa} - \operatorname{inv} \alpha_{twb})(z_a + z_g)}{2 \operatorname{tg} \alpha} = \frac{(0,02244 - 0,01490) \cdot (21 + 31)}{2 \operatorname{tg} 20^\circ} = 0,538,$$

где $x_{\Sigma} = x_a + x_g$.

Если назначить коэффициент смещения солнечного колеса $x_a = x_{\Sigma} = 0,538$, то при угле зацепления $\alpha_{twb} = 20^\circ$ коэффициент разности смещений $x_b - x_g = 0$, а значит, и коэффициент смещения зубчатого колеса z_b при $x_g = 0$ окажется равным нулю, т. е. $x_b = 0$. Вместе с тем в передачах, где $\theta \neq 0$,

возможны также другие варианты выбора как величины θ , так и коэффициентов смещения исходного контура [10].

Следует отметить особенности планетарной однорядной передачи, при которой выполняется условие $\theta \neq 0$. Во-первых, в данной передаче равенство $z_a = z_g = z_1$ реализуется при значении конструктивного параметра

$$p_z = 3 - 2\theta/z_1, \quad (10)$$

где $p_z \neq 3$.

При $\theta = -1,5$, $z_1 = 12$ равенство $z_a = z_g = z_1$ реализуется, если $p_z = 3,25$; если $p < p_z = 3,25$, то $z_1 = z_g$ и шестерней является сателлит, в противном случае $z_1 = z_a$. При $\theta = 0$ получим известное решение $p_z = 3$, при котором реализуется равенство $z_a = z_g$. Во-вторых, поскольку при $\theta \neq 0$ отношение начальных диаметров $(d_{wg})_b / (d_{wg})_a = \cos \alpha_{wa} / \cos \alpha_{wb} = C = 1 + 2\theta / z_d$ не равно единице, сателлит будет иметь две начальные окружности: с диаметром $(d_{wg})_a$, относящимся к зацеплению с центральным колесом a , и с диаметром $(d_{wg})_b$, относящимся к зацеплению с центральным колесом b (рис. 4). Ввиду различия в углах зацепления формула для силы имеет вид

$$F_h = \frac{T_h \Omega}{n_w a_w \cos \delta}, \quad (11)$$

где δ — угол действия силы на ось сателлита, $\delta = |0,5(\alpha_{wa} - \alpha_{wb})|$; F_n — нормальная сила, направленная под углом α_{wa} в зацеплении сателлита с солнечным колесом и под углом α_{wb} в зацеплении сателлита с эпициклом; $\cos \delta = 1$ при одинаковых углах зацепления.

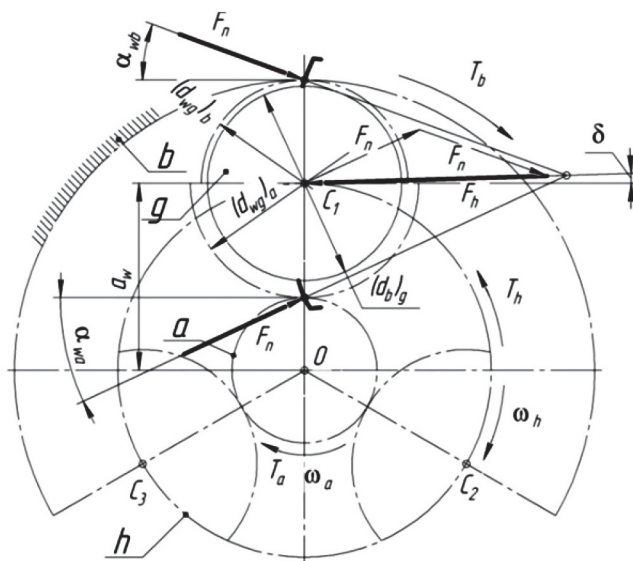


Рис. 4. Зацепление планетарной однорядной передачи с $\theta < 0$

Таким образом, для выбранного числа зубьев центральных колес условие соосности выполняются подбором числа зубьев сателлита с назначением соответствующих коэффициентов смещения для зубчатых колес a , b и g . При этом числа зубьев у центральных колес не зависят от условия соосности, они определяются условием сборки, а максимальное значение конструктивного параметра планетарного ряда зависит от числа сателлитов и других конструктивных параметров ряда (например, от размеров зуба ряда).

Достаточно точное для практических целей представление условия соседства найдем следующим образом. Подставляя в неравенство (1) на место диаметра вершин сателлита равенство (6) при $C = 1$ с учетом высоты головки зуба, а на место межосевого расстояния первое равенство (8), после подстановки $z_b = z_d$ неравенство (1) для планетарного ряда с несмещенным зацеплением примет вид

$$\frac{z_a(p-1)+4}{z_a(p+1)} < \sin \frac{\pi}{n_w} \text{ или } n_w < \frac{\pi}{\arcsin \left[\frac{z_a(p-1)+4}{z_a(p+1)} \right]}, \quad (12)$$

где $4 = 2(2h_a)/m = 2(2h_a^*)$, $h_a^* = 1$ — коэффициент высоты головки зуба исходного контура.

Условие соседства, тождественное неравенству (12), в работе [6] выражено через числа зубьев центральных колес:

$$\frac{z_b - z_a + 4}{z_b + z_a} < \sin(\pi/n_w). \quad (13)$$

Действительно, после подстановки в условие (13) равенства $z_b = z_a p$ легко убедиться в том, что условия (13) и (12) являются равнозначными выражениями, но в отличие от условия (13), в условии (12) максимальное число сателлитов определено в зависимости от конструктивного параметра с косвенным учетом размеров зуба через число зубьев солнечного колеса. Действительно, из известного равенства $m = d/z$ видно, что при изменении числа зубьев изменяется модуль m , определяющий размеры зуба зубчатых колес. В частности, при $z_a \rightarrow \infty$ модуль зубьев $m \rightarrow 0$ и в этом случае неравенство (12) принимает вид

$$n_w < \frac{\pi}{\arcsin(p-1/p+1)}, \quad (14)$$

справедливый для фрикционного планетарного однорядного механизма, в котором зубчатые колеса представлены гладкими катками с касанием между собой (см. рис. 3, б), имеет сугубо теоретическое значение. Заменяя в нем знак неравенства на знак равенства, найдем для заданного числа «сателлитов-катков» предельное значение $p_{\lim}$ конструктивного параметра (табл. 3).

Таблица 3

Предельные значения конструктивного параметра фрикционного планетарного однорядного механизма для заданного числа сателлитов

n_w	3	4	5	6	7	8
$p_{\lim}$	13,928	5,828	3,851	3	2,532	2,239

Введем в условие соседства (1) величину относительного гарантированного зазора $e = \Delta/(d_w)_g$, где Δ — гарантированный зазор между начальными диаметрами (см. рис. 3, а): $(d_a)_g + \delta < 2a_w \sin(\pi/n_w)$ или $[(d_w)_g + \Delta] + 2m < 2a_w \sin(\pi/n_w)$. Связь между Δ , зазором δ и вершинами зубьев выражается равенством $\delta = \Delta - 2h_a$, где h_a — высота головки зуба. Поскольку зазор δ можно принять практически равным $\sim 0,5$ мм, то в силу его малости, для получения $\delta \geq 0$ необходимо, чтобы $\Delta \geq 2h_a = 2h_a^* m$ или в относительных величинах при $h_a^* = 1$: $e = \Delta/(d_w)_g \geq 2h_a/(d_w)_g = 4/z_a(p-1)$. С учетом принятых обозначений неравенство (12) запишется в виде

$$n_w < \frac{\pi}{\arcsin \left[(1+e) \frac{p-1}{p+1} \right]} \text{ при } e \geq 4/z_a(p-1). \quad (15)$$

В приведенной формуле конструктивный параметр связан с максимальным числом сателлитов и гарантированным зазором между начальными окружностями сателлитов.

На рис. 5, а наибольшее число сателлитов (ось ординат), полученное расчетным способом с использованием неравенства (15), приведено в зависимости от конструктивного параметра. Это неравенство справедливо для однорядной передачи $2k-h$ типа А с несмещенными зубчатыми колесами.

Кривая $p_{\lim}$ ($2,24 \leq p_{\lim} \leq 13,93$) представляет собой передачу, в которой зубья срезаны и соприкасаются с начальными окружностями ($e = 0$). Ее координаты (см. табл. 3) не могут быть параметрами передачи и поэтому кривая $p_{\lim}$ показана штриховой линией. Кривая $e = 0,05$ ($2,15 \leq p \leq 10,41$) представляет собой верхние значения параметра, которые могут использоваться непосредственно

в передаче. Эти верхние значения конструктивного параметра находят отражение в судовых реверсивных редукторах ГТУ, в авиационных редукторах с турбовинтовыми двигателями (ТВД) и вертолетных с газотурбинными двигателями (ГТД). Так, конструкция редуктора ТВД АИ-20 имеет при шести сателлитах верхнее значение конструктивного параметра $p = 2,771$. Данному редуктору с $n_w = 6$ отвечает относительный зазор $e = 0,065$, при котором из условия (15) число зубьев солнечного колеса должно устанавливаться в соответствии с неравенством: $z_a \geq 4/e(p - 1) = 4/0,065(2,771 - 1) = 34,769$. В рассматриваемой конструкции редуктора ТВД АИ-20 принято $z_a = 35$.

Кривая $e = 0,1$ определяет параметры, соответствующие интервалу $2 \leq p \leq 8$. На практике данный интервал значений рекомендован по конструктивным причинам, связанным, в частности, с недостаточным диаметром оси сателлита, используемой для его опоры при малых p , или с пониженной крутильной жесткостью центрального колеса a при высоких значениях p . В общем случае на выбор значения p оказывают влияние также требования компоновки привода. Например, если через внутреннее отверстие центрального колеса a должен проходить вал соседней ступени, то параметр p ограничивают значением $p \leq 3$ [11], [12].

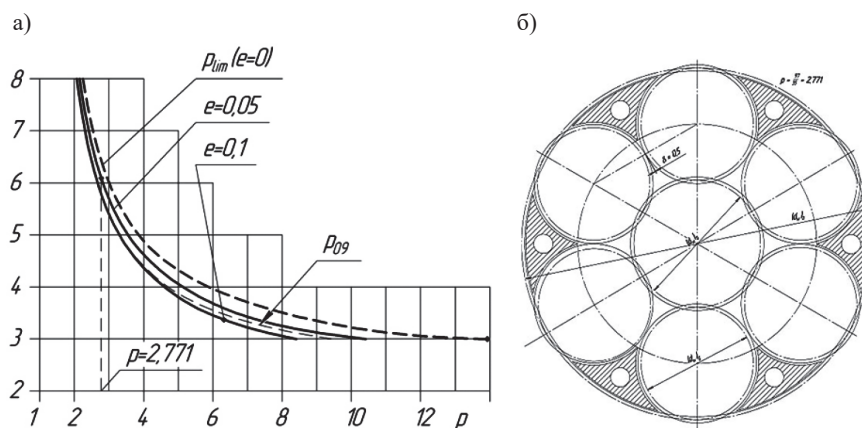


Рис. 5. Условие соседства:

a — рациональные пределы конструктивного параметра при данном числе сателлитов;
 b — схема размещения зубчатых колес планетарной передачи при $p = 2,771$

Рассматривая предельное положение (рис. 6, a), когда кромка зуба колеса с внутренними зубьями проходит через граничную точку L профиля зуба шестерни (в этом случае окружность вершин колеса 2 будет иметь радиус $r_{a2} = O_2L$), видно, что интерференции не будет в случае, если

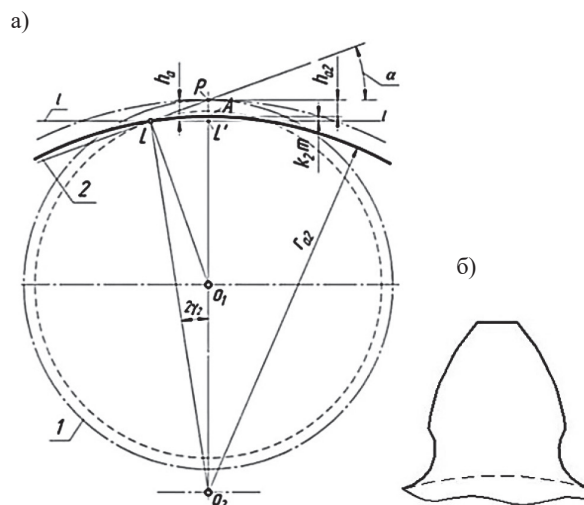


Рис. 6. Условие интерференции во внутреннем зацеплении:

a — геометрия внутреннего зацепления;
 b — конструкция зуба шестерни при полнопрофильном внутреннем зацеплении

выполняется условие $r_{a2} \geq O_2L$ или когда высота головки колеса с внутренними зубьями меньше высоты головки зуба исходного контура: $h_{a2} < h_a$. Естественно, при $h_{a2} = h_a$, т. е. при полной высоте головки зуба колеса, внутреннее зацепление неосуществимо. При необходимости изготовления зубчатого внутреннего зацепления с полной высотой зуба колеса способы, обеспечивающие правильное зацепление, используют при изготовлении шестерни, нарезая ее с *поднутрением профиля зуба* (рис. 6, б). Данное решение нашло применение в механизме поворота перегрузочного крана «Атлант». Изготовление подобной шестерни на стадии восстановления без поднутрения неизбежно приведет к поломке зубьев.

Рассмотрим величину $\Delta h_a = k_2 m$, на которую следует укоротить высоту головки зуба колеса. При этом диаметр вершин колеса с внутренними зубьями будет определяться формулой $d_{a2} = m(z_2 - 2) + k_2 m$. Из рис. 6, а отсутствие интерференции можно записать в виде

$$r_{a2} \geq \frac{LL'}{\sin 2\gamma_2},$$

где $LL' = h_a / \operatorname{tg} \alpha$, $LL' = h_a / \operatorname{tg} \alpha$, $\operatorname{tg} \gamma_2 = AL' / LL' = k_2 m / (h_a / \operatorname{tg} \alpha)$.

С учетом выражения $d_{a2} = m(z_2 - 2) + k_2 m$ окончательно получим [13]:

$$z_2 \geq \frac{2h_a^*}{\operatorname{tg} \alpha \sin \left(2 \arctg \frac{k_2 \operatorname{tg} \alpha}{h_a^*} \right)} + 2(h_a^* - k_2), \forall z_1 \geq 17, \quad (16)$$

где $\forall$ — квантор общности, читаемый как «для всех...».

Согласно ГОСТу 19274–73, рекомендовано принимать $k_2 = 0,2$, если режущий инструмент не оговаривается, и $k_2 = 0,25$, если колесо изготавливается *долбяком*; для смещенных колес $k_2 = c^*(1 - 0,5x_2)$, если $x_2 < 2$, в противном случае коэффициент укорочения рекомендуется принимать равным нулю.

В табл. 4 приведены значения коэффициента укорочения k_2 , предложенные немецким инженером Р. Риттером.

Таблица 4

Коэффициент укорочения головки зуба колеса с внутренними зубьями

z_2	25–30	31–40	41–50	51–75	76–130	св. 130
k_2	0,35	0,30	0,20	0,15	0,10	0,05

Таким образом, данное исследование показывает, что в отличие от значений, приведенных в табл. 2, внутреннее несмещенное зацепление осуществимо также при числе зубьев шестерни, равном 17, при этом нет необходимости в подборе для данного числа зубьев шестерни нужного числа зубьев колеса.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выполнен анализ условий подбора числа зубьев планетарных однорядных механизмов $2k-h$ типа А, на которых созданы судовые редукторы и редукторы планетарно-дифференциального типа.
2. В процессе исследования изучаемой проблемы в условиях подбора чисел зубьев условие соседства получено в виде, когда конструктивный параметр связан с числом сателлитов и гарантированным зазором между начальными окружностями сателлитов. Это позволило теоретически объяснить известные конструкции, которые не согласовывались с существующими в это время теоретическими представлениями, и обосновать правомерность этих конструкций с максимально возможным числом сателлитов, целесообразным для уменьшения размеров и массы планетарного редуктора.
3. Условие интерференции внутреннего зацепления найдено в виде замкнутой формулы, которая не требует применения метода итерации и исключает необходимость подбора числа

зубьев методом последовательных приближений, перенося выполнение условия на раннюю стадию создания конструкции.

4. Условие соосности представлено в виде, не допускающем как четную, так и нечетную разность чисел зубьев центральных колес.

5. Использование полученных решений увеличивает множество возможных комбинаций чисел зубьев, обеспечивающих заданное значение конструктивного параметра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников С. О. Основы расчета и конструирования деталей машин крановых устройств / С. О. Барышников, А. Н. Иванов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2020. — 276 с.
2. Барышников С. О. Некоторые проблемные вопросы в оценке несущей способности планетарных редукторов крановых механизмов / С. О. Барышников, А. Н. Иванов, Е. Н. Андрианов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 1051–1067. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1051-1067.
3. Кудрявцев В. Н. Планетарные передачи: справочник / В. Н. Кудрявцев, Ю. Н. Кирдяшев, Е. Г. Гинзбург [и др.]. — Л.: Машиностроение, 1977. — 536 с.
4. Жильников Е. П. Расчет и проектирование дифференциального редуктора с двумя соосными воздушными винтами / Е. П. Жильников, В. Б. Балякин, А. В. Суслин. — Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. — 76 с.
5. Dleg J. Epicyclic gears design principles, advantages and limitations / J. Dleg // Proc. Int. Conf. Gear. — 1988. — Vol. 2. — Pp. 873–876.
6. Болотовский И. А. Цилиндрические эвольвентные зубчатые передачи внутреннего зацепления / И. А. Болотовский, Б. И. Гурьев, В. Э. Смирнов, Б. И. Шендерей. — М.: Машиностроение, 1977. — 192 с.
7. Нгуен З. Т. Оптимальный геометрический синтез цилиндрических зубчатых передач внутреннего зацепления / З. Т. Нгуен // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2020. — № 2. — С. 388–397.
8. Державец Ю. А. Планетарные редукторы в судовых дизельных и комбинированных дизель-газотурбинных установках / Ю. А. Державец, П. Н. Полуканин // Судостроение. — 1965. — № 11. — С. 38–43.
9. Тесленко Н. А. Планетарные передачи судовых энергетических установок / Н. А. Тесленко, Ю. В. Добровольский. — Л.: Изд-во «Румб», 1974. — 140 с.
10. Черкашин В. П. Выбор коэффициентов смещения и комбинаций чисел зубьев колес однорядных планетарных передач / В. П. Черкашин // Вестник машиностроения. — 1979. — № 1. — С. 34–35.
11. Пишизов А. К. К теории проектирования и расчета конструкции судовой лебедки со встроенным планетарным редуктором / А. К. Пишизов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 39–49. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-39-49.
12. Иванов А. Н. Перспективы развития грузоподъемных машин / А. Н. Иванов, С. Н. Федотов // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2009. — № 3. — С. 22–32.

REFERENCES

1. Baryshnikov, S. O., and A. N. Ivanov. *Osnovy rascheta i konstruirovaniya detalei mashin kranovykh ustroystv*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2020.
2. Baryshnikov, Sergey O., Anatoly N. Ivanov, and Evgenii N. Andrianov. "Several problematic issues in assessing the carrying capacity of planetary gearboxes of crane mechanisms." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.6 (2020): 1051–1067. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1051-1067.
3. Kudryavtsev, V. N., Yu. N. Kirdyashev, E. G. Ginzburg, Yu. A. Derzhavets, A. N. Ivanov, E. S. Kistochkin, I. S. Kuz'min, and A. L. Filipenkov. *Planetarnye peredachi: spravochnik*. L.: Mashinostroenie, 1977.
4. Zhil'nikov, E. P., V. B. Balyakin, and A. V. Suslin. *Raschet i proektirovanie differentsial'nogo reduktora s dvumya soosnymi vozduzhnymi vintami*. Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta, 2019.
5. Dleg, J. "Epicyclic gears design principles, advantages and limitations." *Proc. Int. Conf. Gear*. Vol. 2. 1988. 873–876.

6. Bolotovskii, I. A., B. I. Gur'ev, V. E. Smirnov, and B. I. Shenderai. *Tsilindricheskie evol'ventnye zubchatye peredachi vnutrennego zatsepleniya*. M.: Mashinostroenie, 1977.
7. Nguyen, Duy The. "Optimal geometric synthesis of internal cylindrical gears." *Izvestiya Tula State University* 2 (2020): 388–397.
8. Derzhavets, Yu. A., and P. N. Polukanin. "Planetarnye reduktory v sudovykh dizel'nykh i kombinirovannykh dizel'-gazoturbinnnykh ustanovkakh." *Sudostroenie* 11 (1965): 38–43.
9. Teslenko, N. A., and Yu. V. Dobrovol'skii. *Planetarnye peredachi sudovykh energeticheskikh ustanovok*. L.: Izd-vo Rumb, 1974.
10. Cherkashin, V. P. "Vybor koeffitsientov smeshcheniya i kombinatsii chisel zub'ev koles odnoryadnykh planetarnykh peredach." *Vestnik mashinostroeniya* 1 (1979): 34–35.
11. Pshizov, Aydamir K. "For the theory of designing and calculation construction of shipboard hoisting winches with integrated planetary gearbox." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 39–49. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-39-49.
12. Ivanov, A. N., and S. N. Fedotov. "Perspectives of development of load-lifting machines." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 3 (2009): 22–32.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Барышников Сергей Олегович —
доктор технических наук, профессор
ФБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: BarychnikovSO@gumrf.ru

Иванов Анатолий Николаевич —
кандидат технических наук, доцент
ФБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: ivanovgumrf@yandex.ru, fkt_pt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Baryshnikov, Sergey O. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: BarychnikovSO@gumrf.ru

Ivanov, Anatoly N. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: ivanovgumrf@yandex.ru, fkt_pt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 21 октября 2022 г.
Received: October 21 2022.

DESTRUCTION MECHANISMS OF EPOXY-BASED COMPOSITE FILLED WITH METAL POWDER UNDER CAVITATION ATTACK

Ya. O. Fiaktistov¹, Yu. N. Tsvetkov¹, N. S. Zaytseva²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² — JSC “Admiralty Shipyards”, St. Petersburg, Russian Federation

The samples of epoxy compound with a powder filler and without it are tested on cavitation wear. The powder of aluminum bronze BrAZhNMts9–4–4–1 is used as a filler. The powder is obtained by filing the rod of the bronze. The composition of the epoxy compound is 100 parts of the resin K-153 plus 12 parts of the hardener (polyethylene epolyamine). The distribution of the bronze particles in the epoxy compound follows the law close to the exponential one, the average particle size is equal to approximately 27 μm, and the volume fraction of the bronze powder in the compound is about 9,5 percent. The tests are conducted using the ultrasonic magnetostrictive vibrator UZDN-2T in fresh water of room temperature, the frequency and amplitude of the vibrator horn end equal to 22 kHz and 28 μm respectively. The distance between the horn end and the sample surface is 0,5 mm. During the experiments the wear of the samples is evaluated by their weighting on analytical scales with step-type indication of 0,1 mg, measuring the surface roughness and the microhardness of the bronze particles in the composite is carried out as well. It has been shown that the addition of the bronze particles into the epoxy compound not only changes the kinetics of cavitation wear of the polymer but also decreases its cavitation resistance. The decrease in cavitation resistance caused by bronze particles addition is attributed to the fact, that the boundary between a metal particle and epoxy matrix is a «weak» spot, and the destruction of polymer begins from this boundary area under cavitation attack.

Keywords: epoxy compound, powder filler, bronze particles, ultrasonic vibratory device, fresh water, cavitation attack, cavitation wear kinetics, wear, wear mechanisms.

For citation:

Fiaktistov, Yaroslav O., Yuriy N. Tsvetkov, and Nataliya S. Zaytseva. “Destruction mechanisms of epoxy-based composite filled with metal powder under cavitation attack.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 64–72. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-64-72.

УДК 620.193.16

МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОРОШКОВЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ПРИ КАВИТАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Я. О. Фиактистов¹, Ю. Н. Цветков¹, Н. С. Зайцева²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — АО «Адмиралтейские верфи», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе рассмотрены результаты испытаний на кавитационный износ образцов эпоксидного компаунда без наполнителя и с наполнителем. В качестве последнего применен порошок из алюминиевой бронзы BrAZhNMts9-4-4-1, полученный опилованием прутка из этой бронзы. Был использован следующий состав компаунда: 100 частей смолы K-153 и 12 частей отвердителя (полиэтиленполиамин). Распределение частиц бронзы в компаунде по размеру подчинялось закону, близкому к показательному, средний размер частиц составил порядка 27 мкм, объемная доля бронзового порошка в компаунде — примерно 9,5 %. Отмечается, что испытания проводили на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе УЗДН-2Т в пресной воде при комнатной температуре с частотой и амплитудой колебаний торца концентратора вибратора 22 кГц и 28 мкм соответственно. Расстояние между торцами концентратора и цилиндрического образца выставилось равным 0,5 мм. В процессе испытаний износ образцов оценивали взвешиванием на аналитических

весах с дискретностью показаний 0,1 мг, а также проводили измерения шероховатости изнашиваемой поверхности и микротвердости частиц бронз в составе композита. Показано, что добавка в эпоксидной компаунд частиц бронзы не только изменяет кинетику кавитационного изнашивания, но и снижает кавитационную износостойкость полимера. Изменение кинетики заключается в том, что кавитационное изнашивание эпоксидного компаунда с порошковым наполнителем происходит без инкубационного периода, тогда как ненаполненный компаунд изнашивается с выраженным инкубационным периодом. В процессе проведенного исследования сделан вывод о том, что снижение кавитационной износостойкости после добавки частиц бронзы обусловлено тем, что границы между металлической частицей и полимерной матрицей являются «слабым» местом, и именно с этих граничных районов начинается разрушение полимера при кавитационном воздействии.

Ключевые слова: эпоксидный компаунд, порошковый наполнитель, частицы бронзы, ультразвуковой магнитострикционный вибратор, пресная вода, кавитационное воздействие, кинетика кавитационного изнашивания, износ, механизм разрушения поверхности.

Для цитирования:

Фиактистов Я. О. Механизм разрушения эпоксидных композитов с металлическим порошковым наполнителем при кавитационном воздействии / Я. О. Фиактистов, Ю. Н. Цветков, Н. С. Зайцева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 64–72. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-64-72.

Введение (Introduction)

Кавитационное изнашивание является одной из наиболее распространенных причин ремонта судовых движителей [1], [2]. На гребных винтах (ГВ) водоизмещающих судов очаги кавитационного износа возникают в концевых сечениях лопастей [2]. Очаг износа имеет грубую рваную поверхность, что оказывает отрицательное влияние на КПД движителя [3], и при обнаружении первых признаков кавитационного разрушения ГВ ремонтируют. Основной целью ремонта ГВ с очагами износа, расположенными в концевых сечениях лопастей, является восстановление качества поверхности, так как именно в этих районах лопастей данное качество имеет решающее значение для КПД ГВ [4]. Перспективным для восстановления изношенных районов лопастей является использование полимерных материалов, позволяющее существенно снизить трудоемкость ремонта [5], [6]. Как правило, применяют находящие композитные материалы на основе эпоксидных смол; последние отличаются *высокой технологичностью и хорошей адгезией к металлу* [7]. Однако в отличие от ситуации, когда композиты на основе полимерных материалов применяют для изготовления ГВ, в таких композитах для обеспечения общей прочности ГВ используют *волоконистые и тканевые наполнители* [8], в ремонтных составах для обеспечения технологичности используется *порошковый наполнитель* [5], [6].

Известно, что напряжения, возникающие в материале при кавитационном воздействии, носят *локальный характер*, поэтому неоднородность материала: многофазность структуры, наличие твердых включений и т. п., оказывает иное действие на прочность поверхностных слоев при кавитационном воздействии, чем это имеет место при традиционном «объемном» статическом нагружении, когда прочность оценивается *интегральными характеристиками* [9], [10]. Даже при использовании ненаполненных компаундов кавитационное разрушение их поверхности начинается от изначально существующих в них неоднородностей — локализованных дефектов, образовавшихся на поверхности компаунда после полимеризации [11]. По-видимому, частицы порошкового наполнителя должны играть роль *искусственно внесенных в полимер дефектов* и ухудшать его кавитационную износостойкость. Однако сведения о влиянии порошкового наполнителя на кавитационную износостойкость эпоксидного композита имеют противоречивый характер. Так, в работах [12], [13] показано, что порошковые добавки в эпоксидном компаунде ухудшают кавитационную износостойкость получаемого композита по сравнению с ненаполненным эпоксидным компаундом, а в статье [14] отмечается, что, наоборот, повышают. Много неясного также в механизме разрушения поверхности композитов при кавитационном изнашивании. Например, в статье [12] установлено, что разрушение композита при кавитационном воздействии происходит путем отделения частиц наполнителя и распространения трещин от кромок пор в эпоксидной

матрице. В работе [14] утверждается, что при добавке частиц порошкового наполнителя происходит повышение кавитационной износостойкости за счет снижения вероятности хрупкого разрушения, так как наличие частиц наполнителя обеспечивает замедление процесса распространения трещин.

Несмотря на ранее изложенное, при восстановлении очагов кавитационном воздействии продолжают использовать полимерные составы с порошковыми наполнителями, как правило, в виде частиц металлических сплавов (бронз, титановых сплавов). Поэтому целью работы является исследование механизма разрушения эпоксидных составов с порошковым наполнителем из бронзы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследование проводили на образце из эпоксидного компаунда с добавками частиц алюминиевой бронзы. Состав эпоксидного компаунда следующий: 100 частей смолы К-153 и 12 частей отвердителя (полиэтиленполиамин). Использовали бронзу БрАЖНМц9–4–4–1 (ГОСТ 18175–78). Порошок получали опиливанием прутка из указанной бронзы.

Образец для испытания подготовили следующим образом. Из металлопластиковой трубы диаметром 15,5 мм отрезали мерную заготовку высотой примерно 15 мм. Торцы заготовки тщательно шлифовали, а потом установили на липкую ленту, уложенную на жесткой ровной (стеклянной) поверхности липким слоем вверх. В мерном стакане смешали составные части эпоксидного компаунда, добавили в него бронзовый порошок и тщательно перемешали. Полученный состав залили в трубчатую форму, а после полимеризации компаунда торцы образца шлифовали на шкурках разной зернистости и полировали на влажном сукне, не вынимая образец из формы во избежание «заваливания» кромок образца при шлифовании. Затем образец выдавливали из трубчатой формы и провели анализ размеров частиц бронзы в компаунде и их объемной доли в композите на металлографическом микроскопе, оснащенный окуляр-микрометром и фотонасадкой. Предварительно провели калибровку окуляр-микрометра. Анализ выполняли с использованием основных стереометрических соотношений [15]. Как видно из рис. 1, распределение частиц бронзы по размеру подчиняется закону, близкому к показательному [16]. В качестве размера h частиц использовали длину хорды, т. е. длину отрезка, получаемого при случайном пересечении частиц секущей линией [15]. Объемная доля бронзы в образце составила 9,5 %.

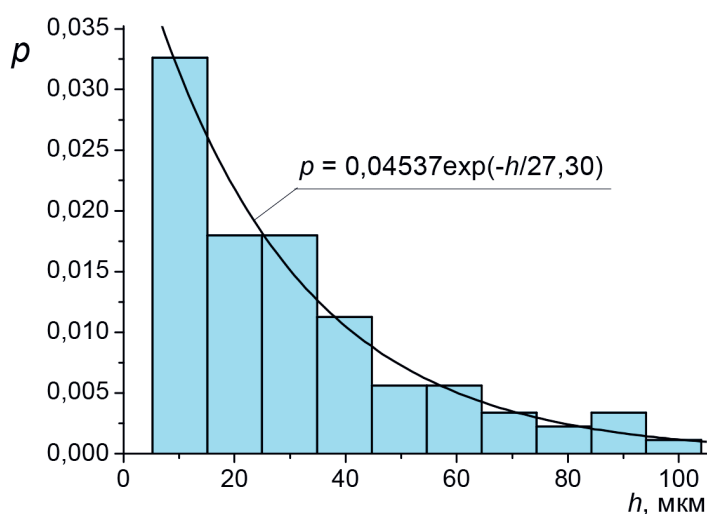


Рис. 1. Распределение частиц бронзы в эпоксидном компаунде

Кавитационное изнашивание образца осуществляли на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе (МСВ) УЗДН-2Т (рис. 2). Испытания проводили в пресной воде при температуре $20 \pm 3^\circ\text{C}$.

Образец 5 с помощью крепежной оправки 6 установили в емкость 7 с водой 8 таким образом, чтобы его испытываемая поверхность находилась от торца колеблющегося концентратора 4 на расстоянии 0,5 мм.

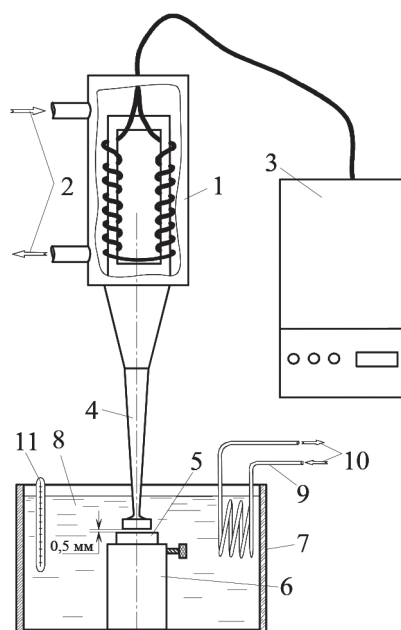


Рис. 2. Схема испытаний на магнитострикционном вибраторе:

- 1 — ультразвуковой излучатель; 2 и 10 — подводы охлаждающей воды;
3 — генератор ультразвуковых колебаний; 4 — концентратор колебаний;
5 — образец; 6 — крепежная оправка; 7 — емкость с водой; 8 — вода;
9 — охлаждающий змеевик; 11 — термометр

Колебания торца концентратора МСВ наблюдались с частотой около 22 кГц и амплитудой 28 мкм. Периодически во время испытаний МСВ выключали, образец вынимали из емкости, высушивали в течение 30 мин и взвешивали на аналитических весах ВЛ-224В с дискретностью показаний 0,1 мг. После этого изнашиваемую поверхность фотографировали с использованием металлографического микроскопа при помощи меток, нанесенных на предметный столик микроскопа, устанавливая каждый раз образец таким образом, чтобы получить фотографию одного и того же участка изнашиваемой поверхности. Это позволило более обоснованно провести анализ изменений, происходящих на изнашиваемой поверхности.

Затем выполнили оценку шероховатости поверхности с помощью прибора *MahrSurf PSI*. Базовая длина составляла 0,8 мм, а длина оценки включала пять базовых длин. Трассирование очага износа при регистрации профиля производили от центра очага к периферии трижды, каждый раз поворачивая образец на 120°. В качестве параметра шероховатости использовали среднее арифметическое отклонение профиля R_a .

После этого измеряли микротвердость бронзовых частиц на изнашиваемой поверхности образца. Значения микротвердости определяли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор Виккерса, равной 0,196 Н. Последнюю выбирали из условия, чтобы отпечаток находился в пределах сечения частицы. Получали по десять отпечатков, каждый на разных частицах. За окончательный результат брали среднее арифметическое.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

По результатам испытаний построили зависимости потерь массы образца ΔM и среднего арифметического отклонения профиля поверхности R_a от продолжительности t кавитационного воздействия (рис. 3).

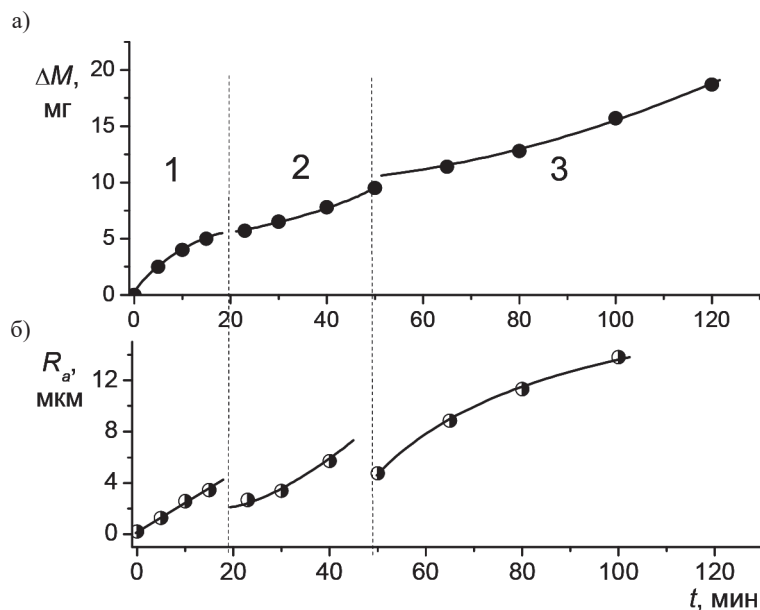


Рис. 3. Зависимость потерь массы образца (а) и высотного параметра шероховатости (б) его поверхности от продолжительности кавитационного воздействия

Из графика $\Delta M(t)$ видно, что кинетика кавитационного изнашивания композита характеризуется отсутствием инкубационного периода, т. е. потери массы начинаются с первых секунд кавитационного воздействия. Процесс изнашивания композита можно разделить на три периода: 1, 2 и 3 (рис. 3). Границами между указанными периодами являются точки, в которых происходит изменение аналитического вида зависимости $\Delta M(t)$. Переход от периода 1 к периоду 2, а затем к периоду 3 сопровождается разрывами на зависимости $R_a(t)$. Если для сравнения посмотреть на кинетику кавитационного изнашивания эпоксидного компаунда того же состава, но без наполнителя (рис. 4), то видно, что она во многом схожа с кинетикой изнашивания металлических материалов, а именно в этом случае четко просматривается *инкубационный период*, т. е. период, когда потери массы практически отсутствуют и условная продолжительность инкубационного периода (обозначена цифрой 1 на рис. 4), определенная согласно рекомендациям [17], составляет около 60 мин.

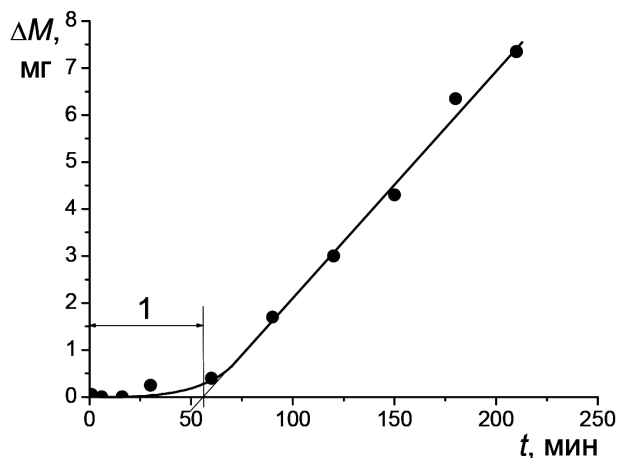


Рис. 4. Зависимость потерь массы ненаполненного эпоксидного компаунда от продолжительности кавитационного воздействия:
1 — условная продолжительность инкубационного периода

Такое очевидное различие в кинетике кавитационного изнашивания ненаполненного и наполненного компаундов обусловлено присутствием в последнем частиц металлического наполнителя.

Анализ фотографий (рис. 5) одного и того же участка изнашиваемой поверхности композита после различной продолжительности кавитационного воздействия показывает, что потери массы в период 1 изнашивания определяются отделением тех частиц бронзы, которые слабо удерживаются в эпоксидной матрице. Для примера на рис. 5 и 6 после 5 мин испытаний места отделения частиц бронзы обведены линиями красного цвета. При этом начинается разрушение участков полимера, примыкающих к частицам наполнителя, о чем свидетельствует появления каемок черного цвета вдоль границ бронзовых частиц: примеры таких участков показаны стрелками синего цвета на рис. 5, б после 5 мин испытаний. Также начинается разрушение полимера, примыкающего к порам, оставшимся от пузырьков воздуха в смоле после ее полимеризации (показаны стрелками зеленого цвета на рис. 5, б). Таким образом, для обеспечения кавитационной износостойкости предпочтительно следует отдавать *гомогенным*, т. е. ненаполненным полимерным составам.

По всей видимости, синхронное появление характерных точек на зависимостях $\Delta M(t)$ и $R_a(t)$ (см. рис. 3) указывает на смену механизмов, обеспечивающих потерю массы образца при изнашивании. На стадии 1 потери массы обусловлены главным образом уносом с поверхности слабо закрепленных частиц бронзы, унос же полимера из областей, примыкающих к частицам наполнителя, не оказывает на этой стадии существенного влияния на изменение массы образца, так как плотность бронзы примерно в 6 раз превышает плотность эпоксидного компаунда. На стадии 2 скорость изнашивания существенно снижается, так как потери металлических частиц почти прекратились, идет накопление повреждений в полимерной матрице в районах, удаленных от частиц бронзы с одновременно продолжающимся удалением полимера из дефектных мест композита: кромок пор, областей, примыкающих к поверхности частиц. На стадии 3 начинается отделение полимера с участков поверхности композита, не примыкающим к частицам бронзы. На фотографиях поверхности после 50 мин воздействия видно существенное потемнение поверхности компаунда, свет отражают только оставшиеся частицы бронзы (рис. 5).

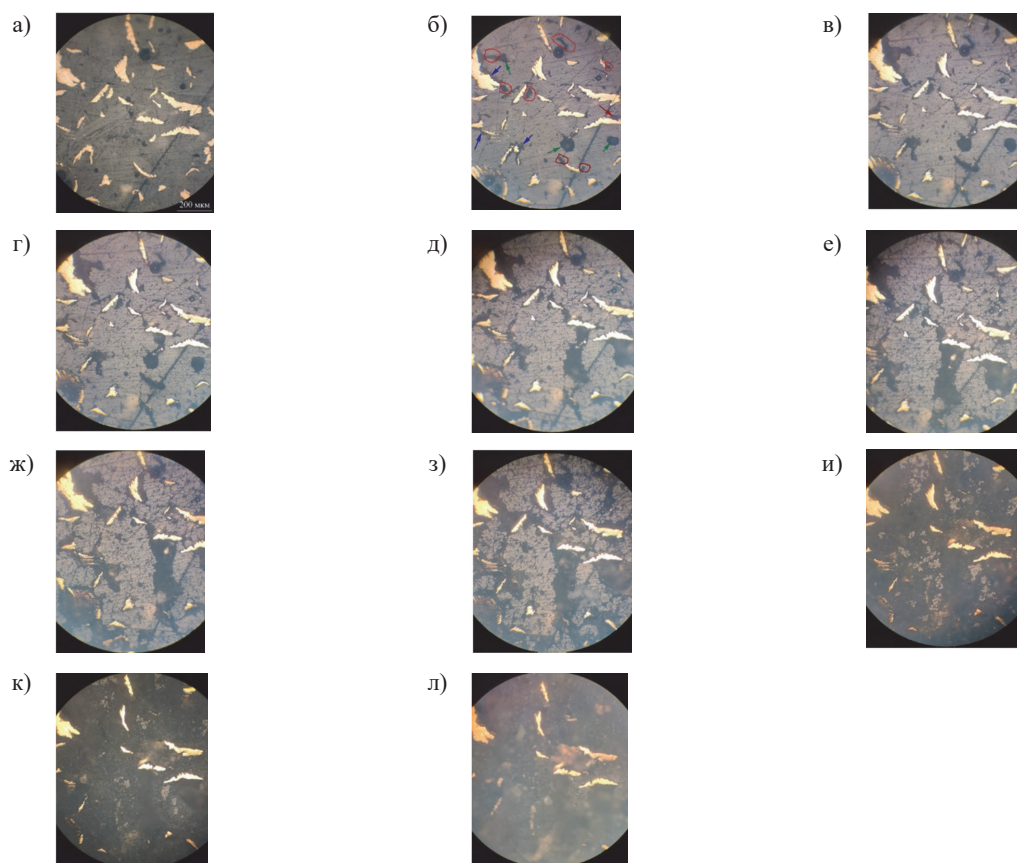


Рис. 5. Вид поверхности композита после различной продолжительности кавитационного воздействия:
а — 0 мин; б — 5 мин; в — 10 мин; г — 15 мин; д — 23 мин; е — 30 мин; ж — 40 мин;
з — 50 мин; и — 65 мин; к — 80 мин; л — 100 мин

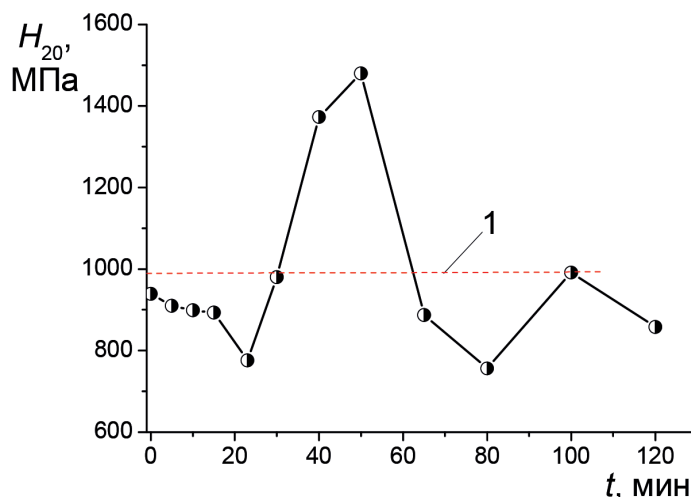


Рис. 6. Изменение микротвердости частиц бронзы с увеличением продолжительности кавитационного воздействия:
1 — микротвердость прутка алюминиевой бронзы, из которого получены частицы

Следует отметить, что несмотря на исходную существенную степень наклепа частиц бронзы, которые получали опилованием бронзового прутка, при кавитационном воздействии на поверхность композита частицы наполнителя испытывают, как показали измерения их микротвердости (рис. 6), значительное упрочнение. Последнее вызвано пластической деформацией частиц при кавитационных ударах. Это значит, что частицы бронзы изменяют свои размеры в плане, поэтому в полимере, примыкающем к поверхности частиц, возникают дополнительные напряжения, что может способствовать его разрушению.

Выводы

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Добавка частиц металлического сплава в полимер на основе эпоксидного компаунда не увеличивает, а наоборот, уменьшает кавитационную износостойкость композита, так как границы между металлической частицей и полимерной матрицей являются *слабым местом*, и именно с этих граничных районов начинается разрушение полимера при кавитационном воздействии.
2. В отличие от ненаполненного эпоксидного компаунда изнашивание композита с наполнителем из металлического порошка происходит без инкубационного периода ввиду того, что практически с первых минут кавитационного воздействия начинается отделение частиц металла, которые слабо удерживаются в полимерной матрице.
3. Образовавшиеся после удаления таких металлических частиц дефектные места в полимерной матрице наряду с существующими дефектами в виде пор служат очагами дальнейшего кавитационного разрушения полимера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Billet M. L. The Specialist Committee on Cavitation Erosion on Propellers and Appendages on High Powered/High Speed Ships / M. L. Billet, M. Mehmel // Proceedings of the 24th ITTC. — UK, 2005. — Vol. III. — Pp. 699–704.
2. Георгиевская Е. П. Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней / Е. П. Георгиевская. — Л.: Судостроение, 1978. — 206 с.
3. Пустошный А. В. Влияние шероховатости поверхности гребного винта на его пропульсивные характеристики / А. В. Пустошный, А. В. Сверчков, С. П. Шевцов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № 4 (390). — С. 11–26. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-11-26.

4. Кацман Ф. М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна / Ф. М. Кацман. — М.: Транспорт, 1987. — 223 с.
5. Горбаченко Е. О. Кавитационный износ гребных винтов и технологические методы борьбы с ним / Е. О. Горбаченко // Материалы VIII межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» 17 мая 2017 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — С. 120–125.
6. Фиактистов Я. О. Ремонт гребных винтов, изношенных при кавитации, с применением полимерных составов / Я. О. Фиактистов // Материалы X межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России», 22 мая 2019 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. — С. 279–282.
7. Чурсова Л. В. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе / Л. В. Чурсова, Н. Н. Панина, Т. А. Гребнева, И. Ю. Кутергина. — Санкт-Петербург: ЦОП «Профессия», 2020. — 576 с.
8. Yamatogi T. Study on cavitation erosion of composite materials for marine propeller / T. Yamatogi, H. Murayama, K. Uzawa, K. Kageyama, N. Watanabe // 17th International Conference on Composite Materials Edinburgh, Scotland. — 2009.
9. Preece C. M. Cavitation erosion / C. M. Preece // Treatise on Materials Science and Technology, Volume 16: Erosion. — Academic Press New York, 1979. — Pp. 249–308.
10. Фомин В. В. Гидроэрозия металлов / В. В. Фомин. — М.: Машиностроение, 1977. — 287 с.
11. Garcia G. L. Cavitation resistance of epoxy-based multilayer coatings: Surface damage and crack growth kinetics during the incubation stage/ G. L. Garcia, V. Lopez-Rios, A. Espinosa, J. Abenojar, F. Velasco, A. Toro // Wear. — 2014. — Vol. 316. — Is. 1–2. — Pp. 124–132. DOI: 10.1016/j.wear.2014.04.007
12. Correa C. E. Wear mechanisms of epoxy-based composite coating submitted to cavitation/ C. E. Correa, G. L. Garcia, A. N. Garcia, W. Bejarano, A. A. Guzman, A. Toro // Wear. — 2011. — № 271. — Is. 9–10. — Pp. 2274–2279. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.088
13. Qiu N. Research on cavitation erosion and wear resistance performance of coatings / N. Qiu, L. Wang, S. Wu, D. S. Likhachev // Engineering Failure Analysis. — 2015. — Vol. 55. — Pp. 208–223. DOI: 10.1016/j.eng-failanal.2015.06.003
14. Abenojar J. Erosion-wear, mechanical and thermal properties of silica filled epoxy nanocomposites / J. Abenojar, J. Tutor, Y. Ballesteros, J. C. del Real, M. A. Martinez // Composites Part B: Engineering. — 2017. — Vol. 120. — Pp. 42–53. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.03.047
15. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. — М.: Металлургия, 1976. — 271 с.
16. Гурский Е. И. Теория вероятностей с элементами математической статистики / Е. И. Гурский. — М.: Высшая школа, 1971. — 328 с.
17. ASTM G32–10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus. — ASTM International, 2010. — 19 p.

REFERENCES

1. Billet, Michael L., and Manfred Mehmel. “The Specialist Committee on Cavitation Erosion on Propellers and Appendages on High Powered/High Speed Ships.” *Proceedings of the 24th ITTC*. Vol. III. UK, 2005. 699–704.
2. Georgievskaya, E. P. *Kavitatsionnaya eroziya grebnykh vintov i metody bor'by s nei*. L.: Sudostroenie, 1978.
3. Pustoshny, Alexander V., Andrey V. Sverchkov, and Sergey P. Shevtsov. “Roughness of propeller blade surface and its implications for propulsion performance.” *Transactions of the Krylov state research centre* 4(390) (2019): 11–26. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-11-26/
4. Katsman, F. M. *Ekspluatatsiya propul'sivnogo kompleksa morskogo sudna*. M.: Transport, 1987.
5. Gorbachenko, E. O. “Kavitatsionnyi iznos grebnykh vintov i tekhnologicheskie metody bor'by s nim.” *Materialy VIII mezhvuzovskoi nauch.-praktich. konferentsii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii»*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017. 120–125.
6. Fiaktistov, Ya. O. “Remont grebnykh vintov, iznoshennykh pri kavitatsii, s primeneniem polimernykh sostavov.” *Materialy X mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii»*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2019. 279–282.

7. Chursova, L. V., N. N. Panina, T. A. Grebneva, and I. Yu. Kutergina. *Epoksidnye smoly, otverditeli, modifikatory i svyazuyushchie na ikh osnove*. Sankt-Peterburg: TsOP «Professiya», 2020.
8. Yamatogi, Toshio, Hideaki Murayama, Kiyoshi Uzawa, Kazuro Kageyama, and Naoko Watanabe. “Study on cavitation erosion of composite materials for marine propeller.” *17th International Conference on Composite Materials Edinburgh, Scotland*. 2009.
9. Preece, C. M. “Cavitation erosion”. *Treatise on Materials Science and Technology, Volume 16: Erosion*. New York: Academic Press, 1979. 249–308.
10. Fomin, V. V. *Gidroeroziya metallov*. M.: Mashinostroenie, 1977.
11. Garcia, G. L., V. Lopez-Rios, A. Espinosa, J. Abenojar, F. Velasco and A. Toro. “Cavitation resistance of epoxy-based multilayer coatings: Surface damage and crack growth kinetics during the incubation stage.” *Wear* 316.1–2 (2014): 124–132. DOI: 10.1016/j.wear.2014.04.007.
12. Correa, C. E., G. L. Garcia, A. N. Garcia, W. Bejarano, A. A. Guzman, and A. Toro. “Wear mechanisms of epoxy-based composite coating submitted to cavitation.” *Wear* 271.9–10 (2011): 2274–2279. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.088.
13. Qiu, Ning, Leqin Wang, Suhuan Wu, and Dmitriy S. Likhachev. “Research on cavitation erosion and wear resistance performance of coatings.” *Engineering Failure Analysis* 55 (2015): 208–223. DOI: 10.1016/j.eng-failanal.2015.06.003.
14. Abenojar, J., J. Tutor, Y. Ballesteros, J. C. del Real, and M. A. Martinez. “Erosion-wear, mechanical and thermal properties of silica filled epoxy nanocomposites.” *Composites Part B: Engineering* 120 (2017): 42–53. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.03.047.
15. Saltykov, S. A. *Stereometricheskaya metallografiya*. M.: Metallurgiya, 1976.
16. Gurskii, E. I. *Teoriya veroyatnostei s elementami matematicheskoi statistiki*. M.: Vysshaya shkola, 1971.
17. *ASTM G32–10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus*. ASTM International, 2010.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фиактистов Ярослав Олегович —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: yaroslav3373@mail.ru, kaf_tsr@gumrf.ru

Цветков Юрий Николаевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru

Зайцева Наталия Сергеевна — инженер-технолог
АО «Адмиралтейские верфи»
190121, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
наб. р. Фонтанки, 203
e-mail: nati.zaytseva@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fiaktistov, Yaroslav O. —
Senior Lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: yaroslav3373@mail.ru, kaf_tsr@gumrf.ru

Tsvetkov, Yuriy N. — Dr. of Technical Sciences,
professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru

Zaytseva, Nataliya S. — Production Engineer
JSC “Admiralty Shipyards”
203, Fontanka Emb., St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: nati.zaytseva@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10 января 2023 г.
Received: January 10, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-73-81

THE EFFECT OF THE NOZZLE BLADE PITCH ON THE VELOCITY COEFFICIENT OF THE INFLOW TURBINE WITH PARTIAL BLADING OF THE RUNNER

A. A. Kryukov

Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russian Federation

A numerical experiment with three groups of low-consumption inflow turbine with partial blading of the runner is considered in the paper. Geometric models of turbine stages with partial flapping of the runner with different grid spacing of the nozzle diaphragm have been developed. The object of this study is centripetal turbine stages with partial flapping of the impeller. The subject of the study is the efficiency coefficient and the velocity coefficient of the nozzles of the inflow turbine. The research method is numerical simulation of the working fluid flow using elements of computational gas dynamics. The aim of the study is to determine the effect of the nozzle blade pitch on the efficiency of the nozzle diaphragm of low-consumption inflow turbine with partial blading of the runner. The main objectives of the study are creating geometric models of turbine stages with different nozzle pitch, determining the boundary conditions of the experiment, conducting and processing the results of the experiment. The graphs of the dependence of the nozzle velocity coefficient and the efficiency of the low-consumption inflow turbine stage are provided. A comparative analysis of the nozzle velocity coefficient and the efficiency coefficient of three turbine stages with different grid spacing of the nozzle diaphragm is carried out. The velocity fields of the flow part of the turbine stages and the integral values of the parameters necessary for the three-dimensional calculation are obtained. The influence of the nozzle blade pitch on the velocity coefficient of the nozzle diaphragm and the efficiency coefficient of the turbine stage is determined. The nature and dependence of this geometric parameter on the efficiency of the study object is established, conclusions on further improvement of turbine stages with partial blading of the runner are made.

Keywords: nozzle diaphragm, loss coefficient, runner, kinetic energy, numerical method, experiment, calculation grid, gas dynamics, low-consumption turbine, experiment.

For citation:

Kryukov, Aleksey A. "The effect of the nozzle blade pitch on the velocity coefficient of the inflow turbine with partial blading of the runner." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 73–81. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-73-81.

УДК 621.515.001.5

ВЛИЯНИЯ ШАГА СОПЛОВОЙ ЛОПАТКИ НА КОЭФФИЦИЕНТ СКОРОСТИ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ ТУРБИНЫ С ЧАСТИЧНЫМ ОБЛОПАЧИВАНИЕМ РАБОЧЕГО КОЛЕСА

А. А. Крюков

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет», г. Владивосток, Российская Федерация

В работе рассмотрен численный эксперимент с тремя группами малорасходных центростремительных турбин с частичным облопачиванием рабочего колеса. Разработаны геометрические модели турбинных ступеней с частичным облопачиванием рабочего колеса при различном шаге решетки соплового аппарата. Объектом данного исследования являются центростремительные турбинные ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса. Предметом исследования являются коэффициенты полезного действия и скорости сопел центростремительной турбины. Методом исследования является численное моделирование течения рабочего тела с применением элементов вычислительной газодинамики. Целью исследования является определение влияния шага сопловой лопатки на эффективность соплового аппарата центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса. Основными задачами исследования являются: создание геометрических моделей турбинных ступеней с различным шагом сопел, определение граничных условий эксперимента, проведение и обработка результатов эксперимента. В исследовании

приведены графики зависимости коэффициента скорости сопел и коэффициента полезного действия ступени центростремительной малорасходной турбины. Выполнен сравнительный анализ коэффициента скорости сопла и коэффициента полезного действия трех турбинных ступеней с различным шагом решетки соплового аппарата. Получены поля скоростей проточной части турбинных ступеней и интегральные значения параметров, необходимых для проведения трехмерного расчета. Определено влияние шага сопловой лопатки на коэффициент скорости соплового аппарата и коэффициент полезного действия турбинной ступени. Установлены природа и зависимость данного геометрического параметра на эффективность объекта исследования, сделаны выводы о необходимости дальнейшего совершенствования турбинных ступеней с частичным облопачиванием рабочего колеса.

Ключевые слова: сопловой аппарат, коэффициент потерь, кинетическая энергия, численный метод, эксперимент, расчетная сетка, газодинамика, малорасходная турбина.

Для цитирования:

Крюков А. А. Влияния шага сопловой лопатки на коэффициент скорости центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 73–81. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-73-81.

Введение (Introduction)

Приоритетной целью развития мирового водного транспорта является повышение безопасности, экологичности и энергоэффективности грузоперевозок. Одной из задач для выполнения данной цели является поиск методов повышения эффективности судовых энергетических установок [1], [2]. Возможность повышения эффективности работы судовых энергетических установок за счет вторичных источников тепла, применения утилизационных котлов (УК) и турбогенераторов (УТГ) положительно отразится на экономических и экологических показателях СЭУ [3].

При освоении ресурсов Мирового океана ведущая роль отводится подводной технике, выполняющей различные задачи по поиску, исследованию и добыче полезных ископаемых, биоресурсов, а также получению фундаментальных знаний в области геологии и живой природы. Обеспечение энергии подобных аппаратов зависит от степени их энергооснащенности. Более компактными и энергонезависимыми являются малорасходные турбины (микротурбины) [4].

Актуальность темы заключается в применении повышения эффективности СЭУ методом совершенствования элементов, утилизирующих отработанные газы. Моделирование турбинной ступени позволяет заменить физический эксперимент численным, что дает возможность существенно упростить определение влияния конструктивных изменений на эффективность турбины.

Целью исследования является определение влияния шага сопловой лопатки на эффективность соплового аппарата центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса.

Задачи исследования:

- создание геометрических трехмерных моделей турбинных ступеней с различным шагом сопел;
- проведение и анализ численного эксперимента с турбинными ступенями с использованием виртуального стенда;
- сравнение значений коэффициента скорости сопел и КПД турбинных ступеней с различным относительным шагом сопловой лопатки.

Объект исследования — центростремительные турбинные ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса.

Предмет исследования — коэффициент полезного действия и коэффициент скорости сопел центростремительной турбины.

Методом исследования является численное моделирование течения рабочего тела с применением элементов вычислительной газодинамики.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Стремление к снижению потерь энергии от парциальности привело к возникновению различных типов турбин, одним из которых являются турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса.

Выявление КПД турбинной ступени и коэффициента скорости соплового аппарата при различном значении относительного шага соплового аппарата позволяет судить о возможном совершенствовании турбомашин. Применение программного обеспечения для моделирования течения газа методами вычислительной газодинамики позволяет заменить физические опыты численными, что дает возможность внедрять современные компьютерные технологии в качестве виртуального стенда.

Существует значительное количество научных исследований в сфере малорасходных турбомашин, опубликованных в отечественных [5]–[7] и зарубежных изданиях [8], [9] с применением элементов численного моделирования течения газообразной среды, которые описывают перетекание потока газа в проточной части турбины. Проведение численных экспериментов с использованием виртуального газодинамического стенда состоит из пяти этапов [10], [11]:

- 1-й этап — создание трехмерной модели проточной части малорасходной турбины;
- 2-й этап — создание конечно-элементной сетки;
- 3-й этап — создание расчетной модели с граничными условиями и требованиями;
- 4-й этап — решение системы уравнений в численном решателе;
- 5-й этап — анализ и сравнение основных результатов численного моделирования.

В качестве виртуальной трехмерной модели выбрана турбинная ступень с техническими параметрами, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Основные габаритных параметров ступени центростремительной турбины

Угол наклона сопел соплового аппарата, град.	Высота сопла	D_0	D_1	D_2	Шаг сопел t_{CA}			Высота сопла l_1	Z_{CA}	Z_{PK}
					Ширина горла a_1					
					мм					
16,31	2,53	60	50	27,5	7,55	5,88	4,53	2,53	21	34
					1,86	1,45	1,12		27 35	

Конструктивная схема объекта исследования приведена на рис. 1.

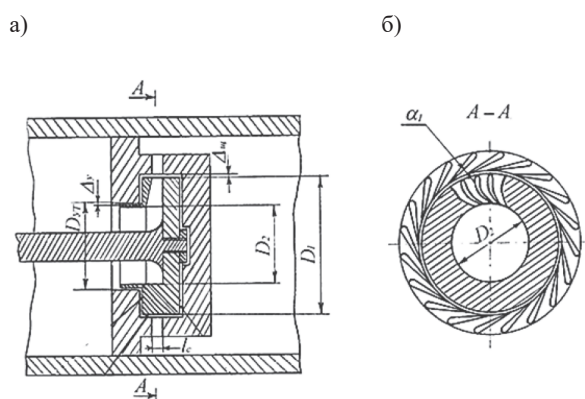


Рис. 1. Конструктивная схема объекта исследования:
а — сечение вдоль оси вращения РК; б — поперечное сечение турбинной ступени

В численном эксперименте заданы следующие граничные условия [12]:

- постановка задачи — нестационарная задача;
- газообразная среда — воздух;
- модель турбулентности — Shear Stress Transport;
- давление торможения потока газа на входе в сопловые каналы — $2,0 \cdot 10^5$ Па;
- температура торможения потока газа на входе в сопловые каналы — 293 К;
- давление потока газа на выходе из рабочих каналов — $1,0 \cdot 10^5$ Па.

Результаты (Results)

В проведенном численном эксперименте на виртуальном стенде степень парциальности осталась неизменной, так как относительный шаг рабочей лопатки был постоянным. Эксперимент проводился с парциальностью, равной 0,059; 0,118; 0,206; 0,412 и 1,00 [11].

Газодинамические процессы, происходящие в исследуемых ступенях, в целом схожи. В крайнем левом сопловом канале (на рис. 2 обозначен буквой «А») наблюдаются зоны сгущения (рециркуляции), которые начинают исчезать при отрывании сопла. Процесс перемещения рабочего тела из этого соплового канала сопровождается явлением *дросселирования*. В крайнем правом сопловом канале застойные зоны не обнаруживаются, однако в нем происходит скачок скорости в области горла сопла. Перемещение газа в рабочих каналах зависит от течения потока в неподвижной решетке. Скачок скорости на выходе из рабочего колеса наблюдается также в крайнем правом рабочем канале (на рис. 2 обозначен буквой «Б»). На входе в рабочие каналы наблюдается падение скорости в области кромки вследствие потерь от угла атаки, а на спинке рабочей лопатки — отрыв пограничного слоя [12].

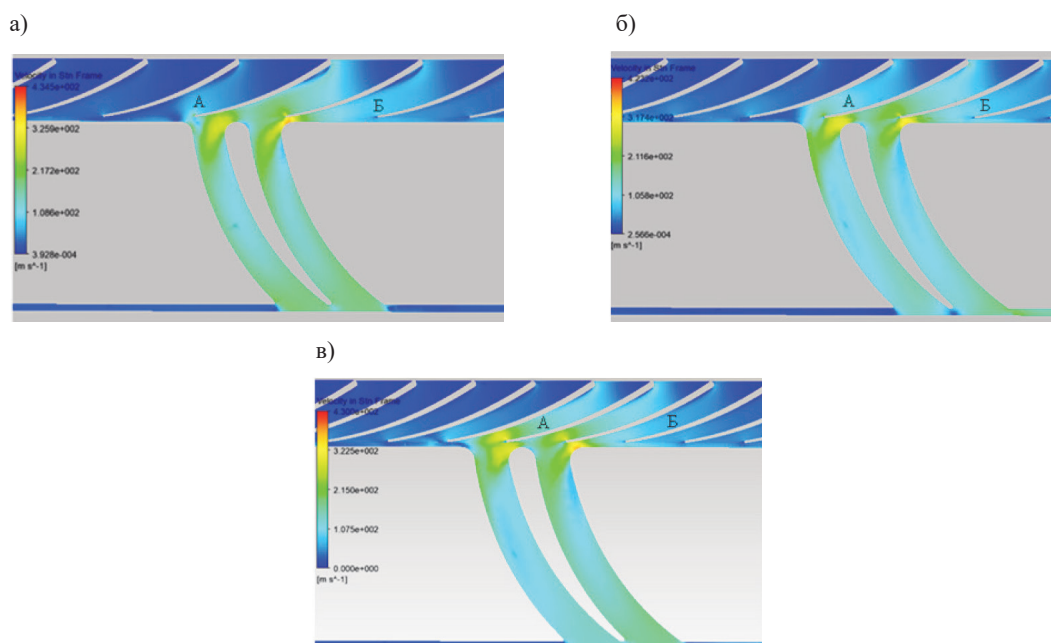


Рис. 2. Поле скоростей в проточной части турбомшины:
а — при $t/b = 0,342$; б — при $t/b = 0,444$; в — $t/b = 0,570$

Для определения значений основных результатов используются следующие формулы:

1. Фактическая степень расширения в ступени:

$$\pi_t = \frac{p_0^*}{p_2}, \quad (1)$$

где p_0^* — давление рабочего тела на входе в сопло.

2. Располагаемый перепад энтальпий на ступень:

$$H_0 = R \frac{k}{k-1} T_0^* \left(1 - \left(\frac{1}{\pi_t} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right), \quad (2)$$

где T_0^* — температура рабочего тела на входе в сопло;

R — газовая постоянная рабочего тела;

k — изэнтропический показатель рабочего тела;

p_2 — давление рабочей тела на выходе из колеса;

π_t — степень расширения в ступени.

3. Перепад энтальпий на сопловой аппарат:

$$H_{SA} = R \frac{k}{k-1} T_0^* \left(1 - \left(\frac{P_1}{P_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right). \quad (3)$$

4. Коэффициент скорости соплового аппарата:

$$\varphi = \frac{c_1}{\sqrt{2H_{SA}}}, \quad (4)$$

где c_1 — абсолютная скорость на входе в рабочее колесо;

H_{SA} — перепад энтальпий на сопловой аппарат.

5. Внутренний КПД:

$$\eta_i = \frac{M_{RK} \pi n}{30 G_{\Sigma} H_0}, \quad (5)$$

где M_{RK} — крутящий момент рабочего колеса;

G_{Σ} — расход рабочего тела;

n — частота вращения.

В табл. 2 показаны результаты экспериментов, проведенных с турбинными ступенями с различным значением относительного шага t/b сопловых лопаток.

Таблица 2

Результаты проведенного исследования значений коэффициента скорости соплового аппарата и КПД

Величина	Результат эксперимента						Единица измерения
при $t / b = 0,342$ и $\varepsilon = 0,059$							
Частота вращения РК	26 000	36 000	46 000	56 000	66 000	76 000	мин ⁻¹
Давление на выходе из соплового аппарата p_1	0,149	0,150	0,151	0,153	0,154	0,155	МПа
Скорость потока на выходе из СА c_1	178,3	177,14	175,12	172,55	169,02	164,79	м/с
Коэффициент скорости соплового аппарата φ	0,818	0,821	0,825	0,828	0,821	0,811	—
Внутренний КПД	2,384	2,837	3,034	3,128	2,787	1,336	%
при $t / b = 0,444$ и $\varepsilon = 0,059$							
Давление на выходе из соплового аппарата p_1	0,148	0,150	0,151	0,153	0,154	0,155	МПа
Скорость потока на выходе из СА c_1	180,874	177,433	176,727	173,118	170,424	166,527	м/с
Коэффициент скорости соплового аппарата φ	0,821	0,823	0,829	0,831	0,828	0,818	—
Внутренний КПД	2,4124	3,213	3,443	3,814	3,453	1,862	%
при $t / b = 0,570$ $\varepsilon = 0,059$							
Давление на выходе из соплового аппарата p_1	0,149	0,15	0,151	0,152	0,153	0,154	МПа
Скорость потока на выходе из СА c_1	191,01	190,74	188,01	186,55	183,02	179,47	м/с
Коэффициент скорости соплового аппарата φ	0,876	0,885	0,882	0,885	0,878	0,872	—
Внутренний КПД	2,423	3,552	4,238	4,529	4,117	2,341	%

На значение скоростной составляющей, а также потери кинетической энергии, кроме геометрии проточной части, шероховатости каналов неподвижной решетки, оказывают влияние также режимы открытия и закрытия крайних сопловых каналов. На рис. 3 показаны зависимости коэффициента φ и КПД от t/b при различных значениях u_1/C_0 . Увеличение коэффициента φ при увеличении относительного шага объясняется уменьшением профильных потерь.

Обсуждение (Discussion)

Уменьшение относительного шага, а, следовательно, и повышение количества сопловых лопаток в традиционных турбинных ступенях, как правило, приводит к повышению потерь от трения и потерь в кромках. Проанализировав рис. 3, можно сделать вывод, что данный тип турбины имеет те же газодинамические свойства, что и традиционный.

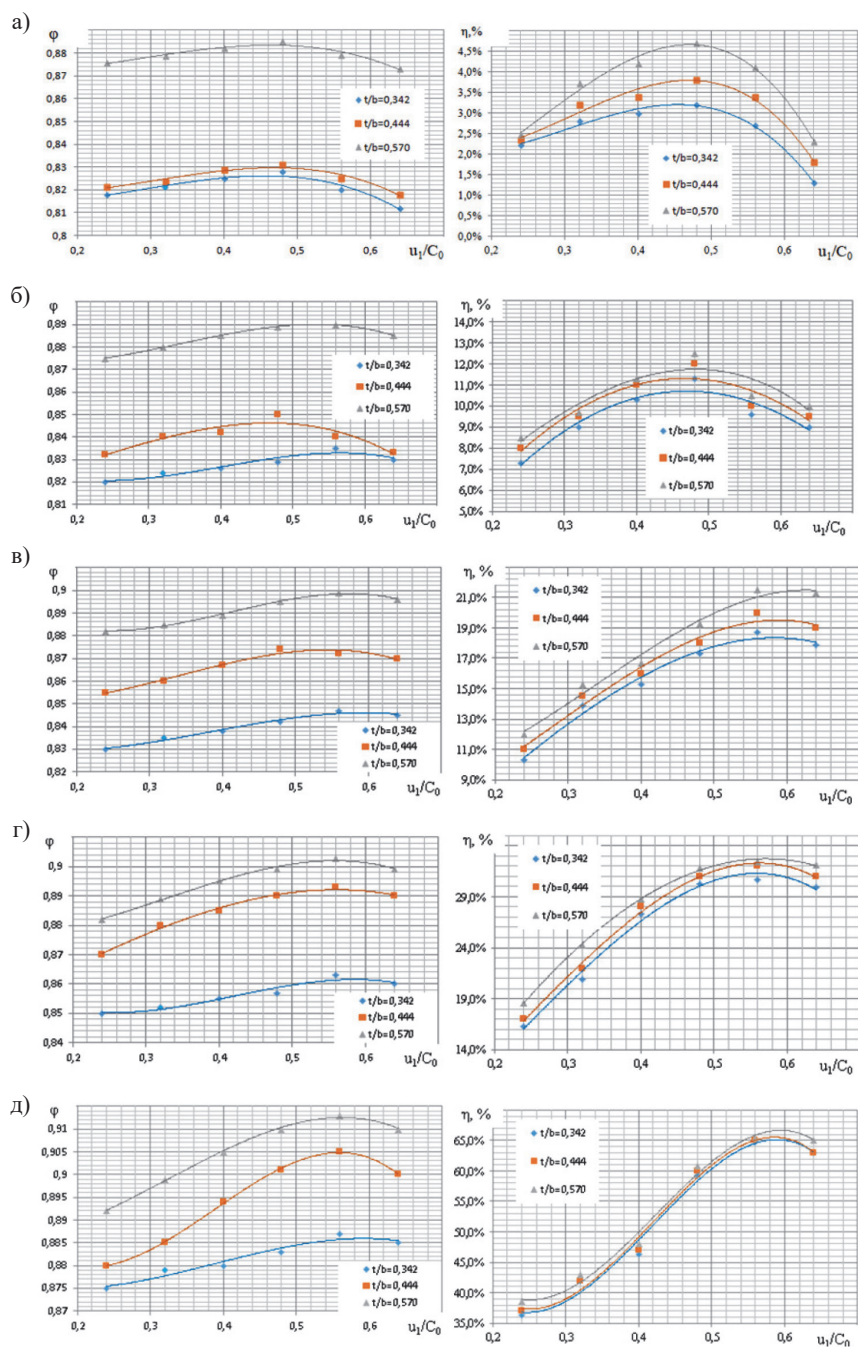


Рис. 3. Графики зависимости φ и η от t/b при различных значениях u_1/C_0 и степени частичности ступени ε : а — при $\varepsilon = 0,059$; б — при $\varepsilon = 0,118$; в — при $\varepsilon = 0,206$; г — при $\varepsilon = 0,412$; д — при $\varepsilon = 1,00$

При уменьшении значения t/b повышается число сопловых каналов, которые находятся в ядре потока. В этой области значение коэффициента скорости сопла максимальное и постоянное в отличие от крайних сопел. График зависимости коэффициента φ при $t/b = 0,342$ ниже, чем при $t/b = 0,444$. Это явление объясняется увеличением кромочных и профильных потерь кинетической энергии.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования влияния шага сопловой лопатки на эффективность центростремительной турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса можно сделать следующие выводы:

1. Построены трехмерные модели турбинных ступеней с различным относительным шагом сопловой лопатки t/b .
2. В ходе проведенного исследования получены значения коэффициентов скорости соплового аппарата в промежутке $t/b = 0,342-0,570$; понижение значения коэффициента скорости сопел при снижении t/b способствует повышению потерь в кромках и потерь трения.
3. Увеличение относительного шага t/b приводит к снижению профильных потерь, а сравнение эффективности турбинных ступеней показывает, что наивысшее значение КПД имеет ступень с $t/b = 0,570$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев А. В. Повышение эффективности судовых энергетических установок / А. В. Соловьев, М. М. Чиркова, Н. Ф. Попов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 4. — С. 101–106. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-101-106.
2. Ерофеев В. Л. О возможностях использования вторичных энергетических ресурсов в судовых ДВС / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, О. В. Мельник // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 570–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-570-580.
3. Абул К. А. Оценка возможностей утилизационных установок главных двигателей крупнотоннажных судов транспортного флота / К. А. Абул // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2009. — № 1. — С. 121–125.
4. Матвеев В. Т. Характеристики рабочих процессов воздухонезависимых одноконтурных микрогазотурбинных установок для подводной техники / В. Т. Матвеев, В. А. Очеретяный, А. В. Дологлонян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 612–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-612-618.
5. Епифанов А. А. Расчет трехмерного течения в ступенях малорасходных турбин / А. А. Епифанов, А. И. Кириллов, В. А. Рассохин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2012. — № 1 (142). — С. 65–70.
6. Забелин Н. А. Исследование особенностей течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ / Н. А. Забелин, Г. Л. Раков, В. А. Рассохин, А. А. Себелев, М. В. Смирнов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2013. — № 1 (166). — С. 45–53.
7. Нгуен А. К. Характеристики и структура потока турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности / А. К. Нгуен, К. Л. Лапшин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2016. — № 2 (243). — С. 163–173. DOI: 10.5862/JEST.243.17.
8. Rassokhin V. The design of microturbine units with low-consumed turbines constructed by LPI for heat recovery of exhaust gases of internal combustion engines / V. Rassokhin, N. Zabelin, H. Kunte, J. Seume, S. Olennikov, M. Cherkasova, A. Sebelev // Results of joint research activity of scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover. — Polytechnical University Publishing House, 2014. — Pp. 139–155.
9. Rakov G. A low emission axial-flow turbine for the utilization of compressible natural gas energy in the gas transport system of Russia / G. Rakov, V. Rassokhin, N. Zabelin, S. Olennikov, A. Sebelev, A. Sukhanov, S. Schislyaev // International Journal of environmental & science education. — 2016. — Vol. 11. — No. 18. — Pp. 11721–11733.

10. Крюков А. А. Численное моделирование коэффициента скорости соплового аппарата малорасходной турбины / А. А. Крюков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 849–857. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-849-857.

11. Крюков А. А. Сравнение значений коэффициентов скорости в турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 257–265. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-257-265.

12. Крюков А. А. Трехмерное численное моделирование малорасходной центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 1. — С. 74–80. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-74-80.

REFERENCES

1. Soloviev, Alexey Valerievich, Margarita Makarovna Chirkova, and Nikolay Frolovich Popov. “Improving the efficiency of ship power plants.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 4 (2018): 101–106. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-101-106.

2. Erofeev, Valentin L., Vladimir A. Zhukov, and Olesya V. Melnik. “On the possibilities of using secondary energy resources in marine engine.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 570–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-570-580.

3. Abul, Kalam Azad. “Estimation of possibilities of heat recovery plants of the propulsion engines of large-capacity vessels of transport fleet.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2019): 121–125.

4. Matviienko, Valerii T., Volodymyr A. Ocheretianyi, and Andrey V. Dologlonyan. “Characteristics of operational processes of air independent single-circuit micro gas-turbine installations for underwater technology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 612–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-612-618.

5. Epifanov, A. A., A. I. Kirillov, and V. A. Rassokhin. “Raschet trehmernogo techeniya v stupenjah malorashodnykh turbin.” *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* 1(142) (2012): 65–70.

6. Zabelin, N. A., G. L. Rakov, V. A. Rassokhin, A. A. Sebelev, and M. V. Smirnov. “Research of flow characteristics in low flow rate LPI turbine stages.” *St. Petersburg State Polytechnical University Journal* 1(166) (2013): 45–53.

7. Nguyen, A. Q., and K. L. Lapshin. “Characteristics and structure of the flow in a turbine stage with a negative gradient of the degree of reactivity.” *St. Petersburg State Polytechnical University Journal* 2(243) (2016) 163–173. DOI: 10.5862/JEST.243.17

8. Rassokhin, V., N. Zabelin, H. Kunte, J. Seume, S. Olennikov, M. Cherkasova, and A. Sebelev. “The design of microturbine units with low-consumed turbines constructed by LPI for heat recovery of exhaust gases of internal combustion engines.” *Results of joint research activity of scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover*. Polytechnical University Publishing House, 2014. 139–155.

9. Rakov, Gennadiy, Viktor Rassokhin, Nikolay Zabelin, Sergey Olennikov, Aleksandr Sebelev, Aleksandr Sukhanov, and Sergey Schislyayev. “A Low Emission Axial-Flow Turbine for the Utilization of Compressible Natural Gas Energy in the Gas Transport System of Russia.” *International Journal of environmental & science education* 11.18 (2016): 11721–11733.

10. Kryukov, Aleksey A. “Numerical simulation of the velocity coefficient of the nozzle diaphragm of a low-consumption turbine.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 849–857. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-849-857.

11. Kryukov, Aleksey A., and Sergei V. Chekhranov. “Comparison of the velocity coefficients values in the turbine stage with partial blading of the runner.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 257–265. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-257-265.

12. Kriukov, Aleksei Alekseevich, and Sergei Valentinovich Chekhranov. “Three-dimensional numerical simulation of low-consumption inflow turbine with partial blading of runner.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2021): 74–80. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-74-80.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Крюков Алексей Алексеевич —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный
технический рыбохозяйственный университет»
690087, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Луговая, 52б
e-mail: aleksey902@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kryukov, Aleksey A. —
Senior lecturer
Far Eastern State Technical
Fisheries University
52B Lugovaya Str., Vladivostok, 690087,
Russian Federation
e-mail: aleksey902@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 3 ноября 2022 г.
Received: November 3, 2022.*

MODELING THE DEADWOOD BEARINGS WEAR SURFACE BY OPTICAL SCANNING

G. A. Kushner, V. A. Mamontov, D. A. Volkov

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

The development of a methodology for modeling the wear surface of deadwood bearings based on optical scanning is considered in the paper. It is noted that the deadwood bearings of the ship's shaft line wear out unevenly during operation, which affects the stress-strain state of the shaft and the system parameters responsible for the occurrence of resonance of transverse, torsional and longitudinal vibrations. The methodology and results of an experimental study of bearing wear surfaces are presented. The applied optical scanning scheme makes it possible to obtain high-precision digital models of objects due to synchronous shooting of an object with two cameras. The measurement results are obtained by processing with specialized software. The results obtained are an addition to the methodology for determining the elastic force acting on the shaft from the side of a bearing that is unevenly worn along the length with a non-constant gap. Based on the obtained wear values, a solid-state model is constructed and the natural frequencies of transverse, torsional and longitudinal vibrations are determined. For the constructed model, the forms of natural oscillations for practically significant frequencies are obtained. It is noted that bearing wear affects not only the displacement of the natural frequencies values, but also the oscillations shape. The impact of the wear of the aft bearing on the bearing capacity of the shaft line, taking into account the contact interaction, is evaluated. The simulation has shown that the bearing wear surface forms an area of increased contact pressures that arise from the impact of the propeller shaft. Analysis of the propeller shaft tip has revealed the presence of an area of increased concentration of equivalent stresses formed at the place of bearing wear formation. The proposed method of modeling the deadwood bearings wear allows us to evaluate its effect on the magnitude of the displacement of natural frequencies and the change in the bearing capacity of the shaft line. The results obtained in this work are an addition to the existing calculations in the design and evaluation of the ship's power plant reliability.

Keywords: ship shaft line, wear of deadwood bearings, 3-D scanning, wear surface, modal analysis, stress-strain state.

For citation:

Kushner, Guriy A., Victor A. Mamontov, and Dmitry A. Volkov. "Modeling the deadwood bearings wear surface by optical scanning." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 82–92. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-82-92.

УДК 629.5.035

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ИЗНОСА ДЕЙДВУДНЫХ ПОДШИПНИКОВ МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ

Г. А. Кушнер, В. А. Мамонтов, Д. А. Волков

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,
Астрахань, Российская Федерация

Темой исследования является разработка методики моделирования поверхности износа кормовых дейдвудных подшипников на основе оптического сканирования. Отмечается, что дейдвудные подшипники судового валопровода в процессе эксплуатации изнашиваются неравномерно, что оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние вала и параметры системы, отвечающие за возникновение резонанса поперечных, крутильных и продольных колебаний. Рассмотрены методика и результаты экспериментального исследования поверхностей износа подшипников. Примененная схема оптического сканирования позволяет получать высокоточные цифровые модели объектов за счет синхронной съемки объекта двумя камерами. Результаты измерений, полученные путем обработки специализированным программным обеспечением, являются дополнением методики определения силы упругости, действующей на вал со стороны

неравномерно изношенного по длине подшипника с непостоянным зазором. На основе полученных значений износа построена твердотельная модель и определены собственные частоты поперечных, крутильных и продольных колебаний. Для построенной модели получены формы собственных колебаний для практически значимых частот. Отмечено, что износ подшипника оказывает влияние не только на смещение значений собственных частот, но и на форму колебаний. Выполнена оценка влияния износа кормового подшипника на несущую способность валопровода с учетом контактного взаимодействия. Моделирование показало, что поверхность износа подшипника формирует область повышенных контактных давлений, возникающих в результате воздействия гребного вала. Анализ кормовой оконечности гребного вала позволил выявить наличие области повышенной концентрации эквивалентных напряжений, формируемых в месте формирования износа подшипника. Предложенная в работе методика моделирования износа дейдвудных подшипников позволяет оценить его влияние на величину смещения собственных частот и изменение несущей способности валопровода. Полученные в работе результаты являются дополнением к существующим расчетам при проектировании и оценке надежности судовой энергетической установки.

Ключевые слова: судовой валопровод, износ дейдвудных подшипников, 3-D сканирование, поверхность износа, модальный анализ, напряженно-деформированное состояние.

Для цитирования:

Кушнер Г. А. Моделирование поверхности износа дейдвудных подшипников методом оптического сканирования / Г. А. Кушнер, В. А. Мамонтов, Д. А. Волков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 82–92. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-82-92.

Введение (Introduction)

Работоспособность судового валопровода напрямую связана с характеристиками его опор — дейдвудных подшипников. По типу конструкций подшипников дейдвудные устройства бывают с подшипниками скольжения и качения. Чаще всего применяют дейдвудные устройства с подшипниками скольжения. Подшипники скольжения могут быть как с *неметаллическим антифрикционным слоем* (текстолиты, бакаут, древесно-слоистый пластик, резинометаллические и резиноэбонитовые сегменты, капрографит, капролон и различные композиты), так и с *металлическим на масляной смазке*, когда антифрикционный слой опорных подшипников изготовлен из баббита. Теме исследования условий эксплуатации подшипников посвящены многие отечественные и зарубежные работы [1]–[6].

Опыт эксплуатации и исследования дейдвудных подшипников из различных материалов свидетельствует о том, что капролоновые подшипники являются одними из наиболее износостойких неметаллических подшипников, предназначенных для тяжелых условий эксплуатации. Альтернативой капролоновых подшипников для работы в воде под нагрузкой до 40 МПа могут являться только *эпоксидные углепластики горячего прессования*. При этом износ подшипников оказывает существенное влияние на устойчивость работы валопровода в процессе эксплуатации, изменяя параметры колебаний, а также вибрационные и теплотехнические параметры [7]–[11].

Следует отметить, что общим свойством всех эксплуатируемых антифрикционных вкладышей является их неравномерный износ по длине, приближенно описываемый полиномом четвертого порядка [12], и по окружности, вызванный кормовым опиранием гребного вала [7], [13]. Форма износа оказывает непосредственное влияние на распределение нагрузки по поверхности подшипника, формируя области повышенных контактных давлений, возникающих от воздействия гребного вала на подшипник и приводящих к последующему ускоренному износу [14]. Неравномерность износа также оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние гребного вала, в особенности на ряд параметров системы, отвечающих за возникновение резонанса поперечных, крутильных и продольных колебаний, приводящих к износу и повреждениям элементов судовой энергетической установки.

Целью исследования является разработка методики математического моделирования поверхности износа кормовых дейдвудных подшипников. Методика моделирования на основе оптического сканирования позволяет использовать результаты измерений при проектировании, а также является основой для прогностических расчетов показателей надежности системы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для изучения поверхностей износа натуральных капролоновых кормовых дейдвудных подшипников было проведено экспериментальное исследование с использованием оптического 3D-сканера, работающего по технологии использования структурированного подсвета. Данное устройство, официально одобренное в качестве измерительного прибора Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии, позволяет при различных значениях заданного рабочего расстояния обеспечить точность измерений до 40 мкм и 3D-разрешение до 0,06 мм со сшивкой по геометрии модели на поворотном столе. Объектом исследований являлась выборка из кормовых капролоновых цельных бесфланцевых подшипников (тип I исполнение 1) для мелководных и загрязненных абразивными частицами водоемов. Подшипники, изготовленные согласно ОСТ5.4183, отработали во внутренних водоемах от двух до четырех лет в условиях нормальной эксплуатации *без подплавления*. Измерения проводились с предварительной выдержкой дейдвудных подшипников при температуре 25 °С в течение более 12 ч.

Элементы сканирования представлены на рис. 1, показан закрепленный на поворотном столе 1 капролоновый кормовой дейдвудный подшипник 2, на штативе 3 закреплено светодиодное проецирующее устройство 4, которое формирует поток излучаемого структурированного света, представляющий собой контрастный узор из черных и белых полос. Фиксация изображения осуществляется при помощи камер 5 и 6. Камеры, расположенные на фиксированном от дейдвудного подшипника расстоянии при помощи опоры 7, передают изображения в обработку программного обеспечения на компьютер пользователя, которое по искажениям полос формирует цифровую модель поверхности износа подшипника.

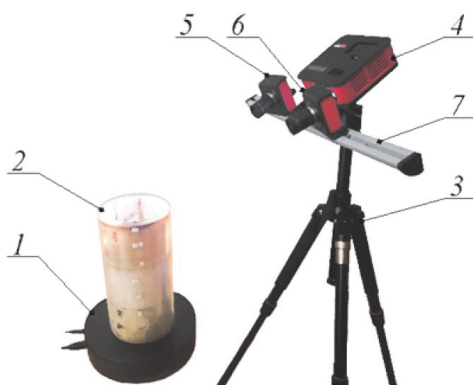


Рис. 1. Элементы сканирования поверхности износа дейдвудного подшипника

Примененная технология структурированного подсвета позволяет получать высокоточные цифровые модели объектов за счет синхронной съемки объекта двумя камерами, формирующими массив стереоизображений съемками объекта с разных ракурсов со структурными линиями подсветки. Полученный массив данных обрабатывается программным обеспечением, объединяясь в один отсканированный цифровой 3D-объект в виде облака точек, формирующих полигоны.

Результаты (Results)

Статистически обработанная цифровая модель внутренней поверхности дейдвудного подшипника, полученная методом оптического сканирования, приведена на рис. 2, а, на рис. 2, б — выбранная схема для интерпретации результатов. Основные параметры валопровода для построений: номинальный диаметр облицовки вала $d_b = 100$ мм, диаметр неизношенного подшипника $D_n = 101,2$ мм, монтажный диаметральный зазор $\delta_0 = 1,2$ мм, предельно допустимый диаметральный зазор в эксплуатации 3,5 мм, длина кормового подшипника $L = 285$ мм.

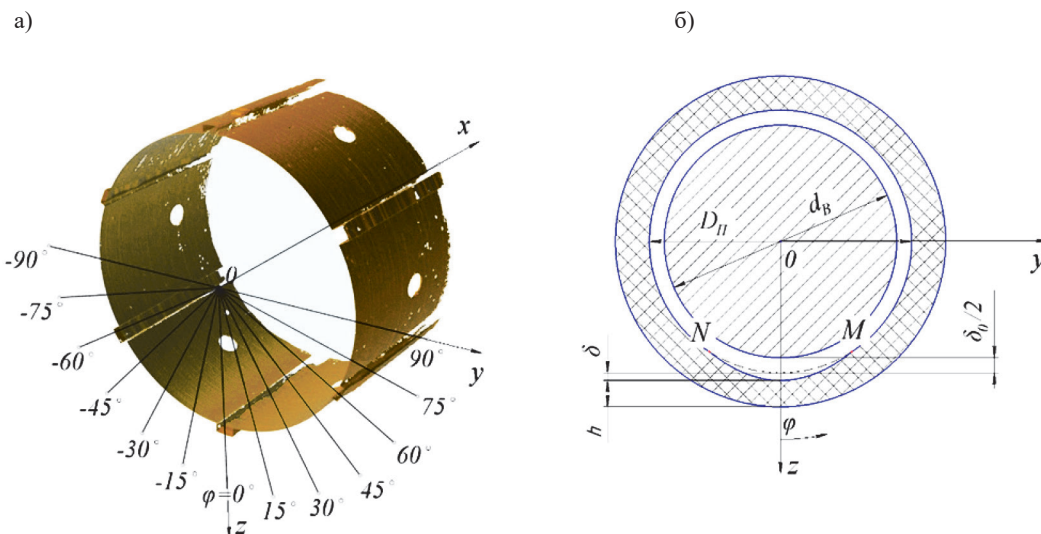


Рис. 2. Результаты сканирования кормового подшипника:
а — вид цифровой модели поверхности износа;
б — схема измерения размеров вала и подшипника

Результаты измерений, полученные путем обработки программным обеспечением ScanCenter NG и Fusion 360 (значения износа подшипника в отдельных точках), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений износа подшипника δ , мм

$\varphi, ^\circ$	x , мм											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
-60	0											
-45	0,41	0,24	0,14	0								
-30	0,86	0,71	0,58	0,42	0,29	0,12	0,06	0				
-15	1,15	0,97	0,86	0,78	0,69	0,55	0,40	0,17	0,07	0		
0	1,74	1,54	1,49	1,42	1,32	1,18	1,04	0,83	0,59	0,24	0,10	0
15	1,26	1,03	0,95	0,86	0,75	0,60	0,43	0,17	0,10	0		
30	1,03	0,85	0,71	0,49	0,35	0,15	0,10	0				
45	0,62	0,47	0,29	0,13	0							
60	0											

Примечание. Пустые ячейки соответствуют нулевым значениям.

Полученные результаты измерений являются дополнением методики определения силы упругости, действующей на вал со стороны неравномерно изношенного по длине подшипника с непостоянным зазором [15]:

$$F = \frac{1}{r} \int_0^L dx \int_{\theta_N(x)}^{\theta_M(x)} Z(\theta, x, \delta) E_n(\theta, x) (r + d) \left((d \cos \theta + \sqrt{r^2 - d^2 \sin^2 \theta}) \cos \theta - d \right) d\theta,$$

где $r = d_B / 2$ — радиус сечения вала;

$\theta_M(x); \theta_N(x)$ — угловые координаты точек M и N , являющихся границами контакта вдавленного вала и подшипника, определяемые переходом значения износа к нулевому значению;

$Z(\theta, x, \delta)$ — отношение величины осадки подшипника Δh (при вдавливании вала) к толщине антифрикционного слоя h ;

$E_n(\theta, x)$ — распределение модуля Юнга;

d — сумма радиального зазора при несмещенном вале и величины вдавливания вала в подшипник.

Для вычислений в системах автоматизированного проектирования полученный результат измерений можно представить в прямоугольной декартовой системе координат при помощи последовательности, приведенной в табл. 2 и реализованной в программе символьных вычислений Maple.

Таблица 2

Последовательность задания пространственных координат поверхности износа

№ п/п.	Этап	Программная реализация
1	Подключение пакета LinearAlgebra для работы с матрицами, задание точности вычислений с программными числами с плавающей запятой	<i>with(LinearAlgebra):</i> <i>Digits:=5;</i>
2	Задание переменной для перевода величин углов из градусов в радианы	<i>rad:=x->evalf(Pi/180*x);</i>
3	Формирование однострочных матриц <i>G</i> и <i>A</i> для угла φ	<i>G:=Matrix(1,9,[-60,-45,-30,-15,0,15,30,45,60]);</i> <i>A:=Matrix(1,9,[0,0,0,0,0,0,0,0,0]);</i>
4	Задание цикла для последовательного заполнения матрицы <i>A</i>	<i>for i from 1 to 9 do A[1, i]:=rad(G[1, i]) end do;</i>
5	Формирование однострочных матриц <i>X</i> , <i>Y</i> , <i>Z</i> для пространственных координат поверхности подшипника	<i>X:=Matrix(1,12,[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]);</i> <i>Y:=Matrix(1,9,[0,0,0,0,0,0,0,0,0]);</i> <i>Z:=Matrix(1,9,[0,0,0,0,0,0,0,0,0]);</i>
6	Заполнение матрицы координаты <i>X</i>	<i>dx:=10;</i> <i>for i from 0 to 8 do X[1, i+1]:=i*dx end do;</i>
7	Задание радиуса неизношенного подшипника	<i>r:=101.2/2;</i>
8	Формирование однострочной матрицы <i>M</i> , содержащей величину износа подшипника в выбранном сечении	<i>M:=Matrix(1,9,[0,0.41,0.86,1.15,1.74,1.26,1.03,0.62,0]);</i>
9	Задание циклов для заполнения матриц <i>Y</i> и <i>Z</i> с переходом от полярных координат к декартовым	<i>for i from 1 to 9 do Y[1, i]:=(r+M[1, i]) * sin(A[1, i]) end do;</i> <i>for i from 1 to 9 do Z[1, i]:=-(r+M[1, i]) * cos(A[1, i]) end do;</i>
10	Вывод пространственных координат точек поверхности износа (на примере кормовой оконечности подшипника при $x = 0$)	<i>[X[1,1], Y[1,1], Z[1,1]]; [X[1,1], Y[1,2], Z[1,2]];</i> <i>[X[1,1], Y[1,3], Z[1,3]];</i> <i>[X[1,1], Y[1,4], Z[1,4]]; [X[1,1], Y[1,5], Z[1,5]];</i> <i>[X[1,1], Y[1,6], Z[1,6]];</i> <i>[X[1,1], Y[1,7], Z[1,7]]; [X[1,1], Y[1,8], Z[1,8]];</i> <i>[X[1,1], Y[1,9], Z[1,9]];</i>

Приведенная в табл. 2 последовательность является основой для формализации и автоматизации этапа перехода к прямоугольной системе координат при задании поверхности износа подшипника.

Обсуждение (Discussion)

Определение частот собственных колебаний имеет существенное значение для несущей способности гребного вала при его проектировании. Особое внимание в расчетах уделяется колебаниям, поскольку работа валопровода в режиме резонанса недопустима. Методика моделирования позволяет использовать результаты измерений при проведении модального анализа, под которым понимается задача определения собственных частот и форм собственных колебаний.

На основе полученных значений координат точек определены собственные частоты колебаний системы вал — подшипники скольжения с зазором с использованием программного комплекса Fusion 360. Расчетная схема гребного вала предусматривает собственную массу вала m_0 , массу на консоли M_0 , моделирующую гребной винт, а также носовой и кормовой дейдвудные подшипники (рис. 3) с учетом следующих ограничений степени свободы: подшипники зафиксированы от пере-

мещений по осям и не вращаются, носовая оконечность вала имеет жесткую заделку у фланцевого соединения, взаимное расположение вала и подшипников определено зонами контакта в нижнем положении.

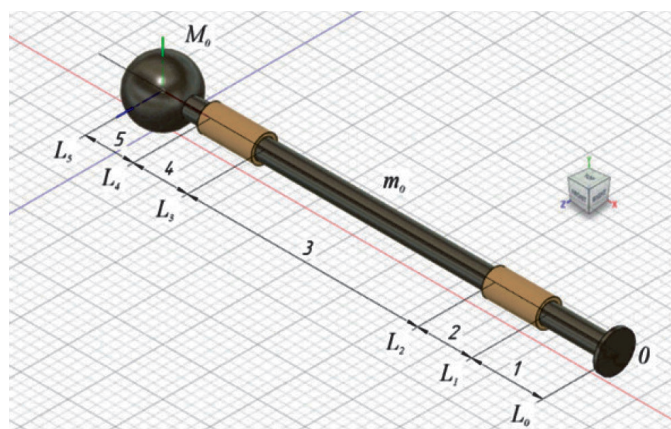


Рис. 3. Твёрдотельная модель гребного вала на подшипниках

Расчет собственных частот выполнен при значениях основных параметров, представленных в табл. 3, для физико-механических характеристик стали 35 и капролона.

Таблица 3

Исходные данные для задачи модального анализа

№ п/п.	Параметры	Значение
1	Длина гребного вала	2,54 м
2	Длины участков 1–5 гребного вала	1–0,355 м; 2–0,285 м; 3–1,215 м; 4–0,285 м; 5–0,400 м
3	Массы гребного винта и вала	$M_0 = 110$ кг; $m_0 = 160$ кг (63 кг/м)
4	Диаметр гребного вала	0,1 м
5	Модуль Юнга материала вала (сталь 35)	$2,06 \cdot 10^{11}$ Па
6	Модуль Юнга материала подшипника	$2,790 \cdot 10^9$ Па
7	Коэффициент Пуассона материала подшипника	0,44

Значения собственных частот, полученные для пяти различных вариантов контакта вала и кормового подшипника, приведены в первой графе табл. 4 (№ п/п.): 1 — подшипник не изношен и находится в состоянии поставки, зона контакта определена монтажным зазором; 2 — износ подшипника задан по результатам сканирования; 3–5 — увеличение значений износа на 30, 60 и 90 % соответственно.

Таблица 4

**Значения собственных частот колебаний
для различных вариантов контакта, Гц**

№ п/п.	Порядок колебаний											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	115,9	118,3	232,9	233,1	234,2	609,5	618,4	640,2	1016	1048,0	1077,0	1168,0
2	81,5	85,2	204,4	230,9	232,4	577,1	615,7	623,2	773,0	812,5	1083,0	1164,0
3	79,2	82,4	201,4	230,8	232,4	568,4	614,9	621,9	753,7	789,0	1084,0	1164,0
4	77,3	79,8	198,0	230,7	232,5	557,9	615,0	620,4	741,7	768,4	1078,0	1165,0
5	71,3	73,1	187,9	229,0	231,0	541,4	606,2	615,7	697,9	720,7	1068,0	1161,0

Формы собственных колебаний для первых двенадцати практически значимых частот приведены на рис. 4.

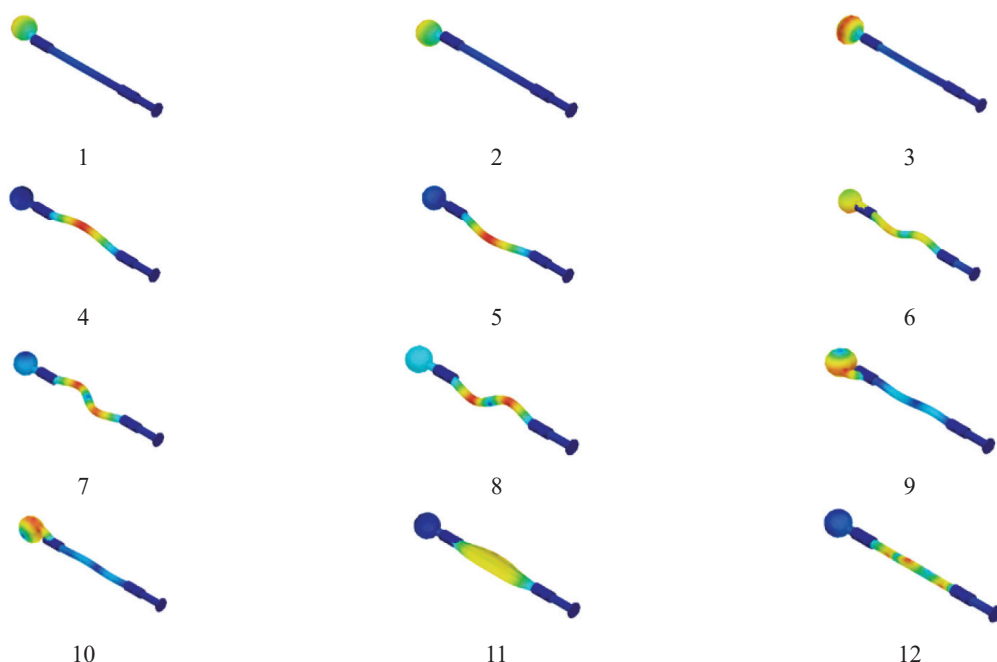


Рис. 4. Результаты модального анализа для второго варианта контакта:
1 — $p_1 = 81,5$ Гц; 2 — $p_2 = 85,2$ Гц; 3 — $p_3 = 204,4$ Гц; 4 — $p_4 = 230,9$ Гц; 5 — $p_5 = 232,4$ Гц;
6 — $p_6 = 577,1$ Гц; 7 — $p_7 = 615,7$ Гц; 8 — $p_8 = 623,2$ Гц; 9 — $p_9 = 773,0$ Гц;
10 — $p_{10} = 812,5$ Гц; 11 — $p_{11} = 1083,0$ Гц; 12 — $p_{12} = 1164,0$ Гц

Анализ покадровой визуализации процесса колебаний вала в подшипнике с различным износом (варианты контакта 2–5 табл. 4) показал, что частоты порядка 1, 5, 7, 9 соответствуют поперечным колебаниям в горизонтальной плоскости, порядка 2, 4, 6, 8, 10, 12 — поперечным в вертикальной плоскости, порядка 3 и 11 — крутильным. Следует отметить, что для частот порядка 6 и 8 поперечные колебания сопровождались смещением в сторону носовой оконечности вала, т. е. помимо поперечных возникали продольные колебания. Таким образом, система в двенадцати рассмотренных режимах совершает поперечные, крутильные и продольные колебания и обладает наименьшей жесткостью при изгибе в области кормовой оконечности модели гребного вала.

Интерес также представляет первый вариант контакта вала и неизношенного подшипника. В рассмотренном случае собственные частоты отличаются тем, что порядок 3 и 12 соответствуют поперечным колебаниям в горизонтальной плоскости, а крутильным — порядок 5. Таким образом, износ подшипника оказывает влияние не только на смещение значений собственных частот, но и на форму колебаний. Дальнейший модальный анализ позволяет сделать вывод о том, что учет формы износа натурального подшипника при расчетах собственных частот колебаний оказывает значительное влияние на частоты порядка 1–3, соответствующие номинальным частотам вращения 778 об/мин, 813 об/мин, 1915 об/мин, среднее снижение частоты для которых составило 23 %. Практически значимая разница в частотах колебаний порядка 1–3 также отмечается при увеличении значений износа на 90 %. При этом среднее снижение частоты относительно второго варианта контакта составило 12 %. В рассмотренной системе частоты колебаний высших порядков менее подвержены влиянию износа подшипников.

В работе также выполнена оценка влияния износа кормового подшипника на несущую способность валопровода. Учет контактного взаимодействия позволяет моделировать взаимодействие вала и подшипника с износом в процессе деформирования и, следовательно, более точно определять компоненты напряженно-деформированного состояния. Линейный статический анализ конструкции выполнен на твердотельной модели вала, опирающегося на подшипники из капрлона (рис. 3).

Расчетная схема предполагает учет веса винта и вала, а также одновременные узловые нагрузки от крутящего момента $M_{кр} = 3000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и сжимающей вал силы упора $F_{уп} = 12\,000 \text{ Н}$. Распределение эквивалентных напряжений Мизеса для второго варианта контакта вала и изношенного подшипника представлено на рис. 5 и 6, где уровни напряжений в МПа соответствуют цветовой шкале в левой части рисунков.

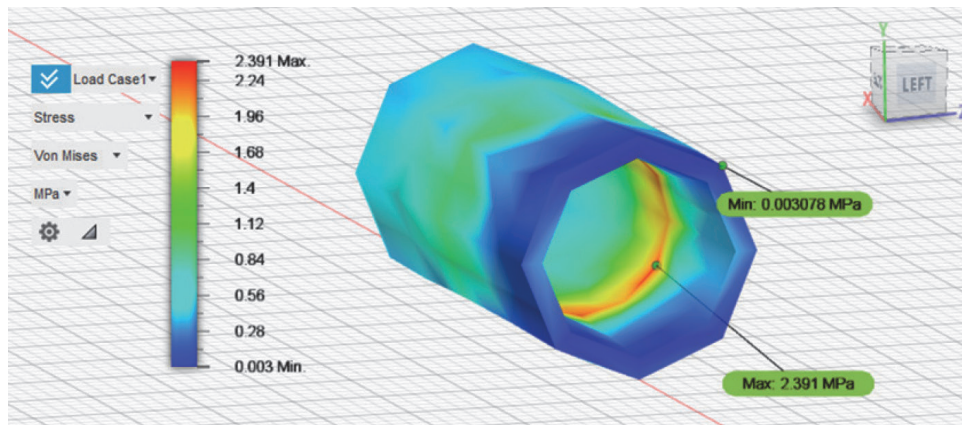


Рис. 5. Напряженное состояние действующего подшипника с износом при взаимодействии с валом

Моделирование показало, что поверхность износа подшипника формирует область повышенных контактных давлений, превышающих 2,3 МПа, которые возникают от воздействия гребного вала. Область наибольших напряжений, расположенная на расстоянии от торцевой поверхности подшипника, имеет локальный характер, повторяющий форму износа. Наличие такой области подтверждает влияние кормового опирания гребного вала [7] на увеличение скорости износа подшипника. Моделирование взаимодействия вала с подшипником большего износа для вариантов контакта 3–5 показало увеличение напряжений до 2,4, 3,0 и 3,3 МПа соответственно.

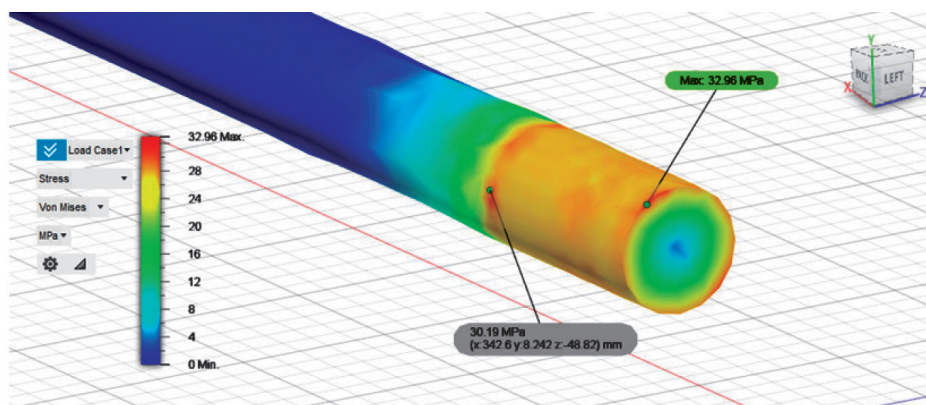


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений Мизеса по валу

Анализ кормовой оконечности гребного вала выявил наличие области повышенной концентрации эквивалентных напряжений, формируемых в месте появления износа подшипника и достигающих 30,19 МПа. Увеличение износа подшипника, в соответствии с вариантами контакта 3–5, вызывает смещение области повышенных концентраций вала в сторону носовой оконечности.

При моделировании первого варианта контакта вала с неизношенным подшипником расчеты показали, что максимальные нагрузки локализованы в нижней части кормового торца подшипника. В этом случае эквивалентные напряжения Мизеса составили 3,8 МПа для подшипника и 32,1 МПа для вала за счет уменьшенного пятна контакта.

Заключение (Conclusion)

Предложенная в работе методика моделирования износа дейдвудных подшипников позволяет оценить его влияние на величину смещения собственных частот и изменение несущей способности валопровода, что является дополнением к существующим расчетам при проектировании и оценке надежности судовой энергетической установки. Отличительной особенностью данной методики является построение трехмерной модели взаимодействия вала и подшипника с различным износом. Рассмотренная методика основана на технологии оптического сканирования и пригодна к использованию в других расчетах систем автоматизированного проектирования. Накопление массива экспериментальных данных о поверхностях износа дейдвудных подшипников различных судов позволит применять ее при проектировании и выполнении прогностических расчетов натурных валопроводов более сложной конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. К. Опыт эксплуатации неметаллических роликовых подшипников с водяной смазкой. Влияние частоты воздействия нагрузки на величину деформации резинового и капролонового роликов / А. К. Григорьев, В. А. Ермолаев // Судостроение. — 2012. — № 5 (804). — С. 25–30.
2. Кушнер Г. А. Анализ причин повреждений и отказов судовых валопроводов / Г. А. Кушнер, В. А. Мамонтов, Д. А. Волков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 3. — С. 33–39. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-33-39.
3. Цветков Ю. Н. Анализ молекулярного строения полимерных материалов для дейдвудных подшипников / Ю. Н. Цветков, М. Ю. Власов, В. А. Петров // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — СПб.: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2022. — С. 276–282.
4. Lei J. Experimental investigation of effects of ship propulsion shafting alignment on shafting whirling and bearing vibrations / J. Lei, R. Zhou, H. Chen, Y. Gao, G. Lai // Journal of Marine Science and Technology. — 2022. — Vol. 27. — Is. 1. — Pp. 151–162. DOI: 10.1007/s00773-021-00822-0.
5. Litwin W. Water-lubricated bearings of ship propeller shafts-problems, experimental tests and theoretical investigations / W. Litwin // Polish Maritime Research. — 2009. — Vol. 16. — No. 4 (62). — Pp. 42–50. DOI: 10.2478/v10012-008-0055-z.
6. Leilei C. Optimization of Bearing Displacement in Ship Shafting Alignment Based on Workbench / C. Leilei, L. Junsong, L. Cunming, Z. Ruiping // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 1939. — No. 1. — Pp. 012099. DOI: 10.1088/1742-6596/1939/1/012099.
7. Григорьев А. К. Опыт эксплуатации дейдвудных подшипников с капролоновыми планками на атомном ледоколе «Ямал» в 1999–2009 гг / А. К. Григорьев // Судостроение. — 2011. — № 5 (798). — С. 52–53.
8. Михайлова М. А. Анализ изнашивания дейдвудных подшипников в зависимости от физико-механических характеристик материала вкладышей и условий эксплуатации судна / М. А. Михайлова // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2005. — № 2 (25). — С. 135–140.
9. Кукарина А. Ю. Влияние износов дейдвудных подшипников и гидродинамического момента на устойчивость вращения гребного вала / А. Ю. Кукарина, А. И. Миронов, А. Р. Рубан // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 145–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-145-153.
10. Кушнер Г. А. Экспериментальное исследование поперечных колебаний валопровода судна проекта ВКМ-3 / Г. А. Кушнер, В. А. Мамонтов, А. А. Халявкин, В. В. Шахов // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 1–1 (39). — С. 77–80.
11. Герасиди В. В. К вопросу оценки технического состояния дейдвудных подшипников валопроводов морских судов / В. В. Герасиди // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2021. — № 1 (34). — С. 20–23.
12. Кушнер Г. А. Исследование изменений формы и коэффициента жесткости моделей дейдвудных подшипников из капролона / Г. А. Кушнер, В. А. Мамонтов, А. А. Халявкин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 151–157. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-151-157.

13. Кушнер Г. А. Механика контактного взаимодействия гребного вала с дейдвудным подшипником при поперечных колебаниях / Г. А. Кушнер, В. А. Мамонтов, А. А. Халыавкин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2017. — Т. 44. — № 2. — С. 28–36. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-28-36.

14. Миронов А. И. Поперечные колебания гребного вала при его одностороннем взаимодействии с дейдвудным подшипником / А. И. Миронов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2012. — № 2. — С. 26–34.

15. Kushner G. A. Stiffness Coefficients and Elastic Forces Under Interaction Between Shafts and Plain Bearings / G. A. Kushner // International Conference on Industrial Engineering. — Springer, Cham, 2021. — Pp. 832–840. DOI: 10.1007/978-3-030-54814-8_96.

REFERENCES

1. Grigoryev, A. K., and V. A. Ermolaev. “Non-metal water-lubricated roller bearings operating experience. effect of loading frequency on rubber and caprolon rollers’ strain value.” *Shipbuilding* 5(804) (2012): 25–30.

2. Kushner, Guriy Alekseevich, Victor Andreevich Mamontov, and Dmitry Aleksandrovich Volkov. “Analysis of damage and failure of ship propulsion shafts.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 3 (2021): 33–39. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-33-39.

3. Tsvetkov, Yu. N., M. Yu. Vlasov, and V. A. Petrov. “Evaluation of the molecular structure of deadwood bearings polymers.” *Sbornik nauchnykh statei natsional’noi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel’skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova»*. SPb.: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2022. 276–282.

4. Lei, Junsong, Ruiping Zhou, Hao Chen, Yakun Gao, and Guojun Lai. “Experimental investigation of effects of ship propulsion shafting alignment on shafting whirling and bearing vibrations.” *Journal of Marine Science and Technology* 27.1 (2022): 151–162. DOI: 10.1007/s00773-021-00822-0.

5. Litwin, Wojciech. “Water-lubricated bearings of ship propeller shafts-problems, experimental tests and theoretical investigations.” *Polish Maritime Research* 16.4(62) (2009): 42–50. DOI: 10.2478/v10012-008-0055-z.

6. Leilei, Cui, Lei Junsong, Lin Cunming, and Zhou Ruiping. “Optimization of Bearing Displacement in Ship Shafting Alignment Based on Workbench.” *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1939. No. 1. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1939/1/012099.

7. Grigoryev, A. K. “Operational experience of stern tube bearings with caprolan insert on atomic icebreaker “Yamal”.” *Shipbuilding* 5(798) (2011): 52–53.

8. Mikhailova, Marina Aleksandrovna. “Analysis of degradation of stern-shaft bearings regarding physicom-mechanical parameters of bushing material and operating conditions of a ship.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University* 2(25) (2005): 135–140.

9. Kukarina, Alla Jur’evna, Alfred Ivanovich Mironov, and Anatolij Rashidovich Ruban. “The effect of wear of stern bearings and hydrodynamic moments on stability of rotation of the propeller shaft.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(35) (2016): 145–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-145-153.

10. Kushner, Guriy A., Victor A. Mamontov, Alexei A. Khaljavkin, and Vasilij V. Shakhov. “Experimental research of transverse vibrations of project VKM-3 ship shaft.” *Marine intelligent technologies* 1–1(39) (2018): 77–80.

11. Gerasidi, V. V. “On the issue of assessing the technical condition of deadwood bearings of marine shaft lines.” *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F. F. Ushakova* 1(34) (2021): 20–23.

12. Kushner, Guriy Alexeevich, Viktor Andreyevich Mamontov, and Alexei Alexandrovich Haljavkin. “Research into the change of the form and stiffness coefficient of polyamide sleeve models.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(34) (2015): 151–157. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-151-157.

13. Kushner, Guriy A., Viktor A. Mamontov, and Aleksey A. Khalyavkin. “Mechanics of contact interaction of a propeller shaft with a stern tube bearing during transverse vibrations.” *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences* 44.2 (2017): 28–36. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-28-36.

14. Mironov, Alfred Ivanovich. “Transverse vibrations of the propeller shaft in its one-way interaction with stern bearing.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2012): 26–34.

15. Kushner, G. A. “Stiffness Coefficients and Elastic Forces Under Interaction Between Shafts and Plain Bearings.” *International Conference on Industrial Engineering*. Springer, Cham, 2021. 832–840. DOI: 10.1007/978-3-030-54814-8_96.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кушнер Гурий Алексеевич —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация,
Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: guriy.kushner@mail.ru

Мамонтов Виктор Андреевич —

доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация,
Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: secmt@astu.org

Волков Дмитрий Александрович — ассистент

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация,
Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: volkovdima95@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kushner, Guriy A. —

PhD, associate professor
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str.,
Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: guriy.kushner@mail.ru

Mamontov, Victor A. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str.,
Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: secmt@astu.org

Volkov, Dmitry A. — Assistant

Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str.,
Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: volkovdima95@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2022 г.

Received: November 29, 2022.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-93-108

SHIP POWER PLANT WITH RE-LIQUEFACTION INSTALLATION FOR TANKERS TRANSPORTING HYDROGEN

D. V. Koniaev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The use of hydrogen as a fuel for tankers carrying liquefied hydrogen is discussed in the paper. As a solution to the problem of the world industry decarbonization, the possibility of competitive use of hydrogen as a fuel on sea tankers transporting liquefied hydrogen over long distances is discussed. The main reasons that encourage countries with sea and river vessels to develop in the direction of improving the ship power plants, in anticipation of tightening the national and international requirements for environmental pollution prevention, are indicated. A brief overview of the development of hydrogen energy is given on the example of leading projects in Europe and Asia, the most successful of which should include the transportation of compressed hydrogen by an experienced tanker of the Japanese company Kawasaki "Suiso Frontier" from Australia to Japan. A strategy for choosing the optimal propulsion unit for a liquefied hydrogen tanker is given. As research methods, the analysis of data obtained in similar studies, as well as the analysis of thermodynamic characteristics of promising systems, is used. Integrated power system designs and re-liquefaction systems for ocean tankers transporting hydrogen are proposed. Data on existing projects with low and high pressure gas engines, solid oxide fuel cells are given. Five prospective energy systems and a re-liquefaction system with a Claude cycle, using hydrogen and liquid natural gas as fuel and refrigerant, are suggested. Their technological feasibility and environmental impact are evaluated. The re-liquefaction systems' exergy efficiency and specific energy consumption ranges are 26.79–46.27 % and 3–7.45 kWh/kg, respectively. A system with a low pressure engine, solid oxide fuel cells and a re-liquefaction system is determined to be optimal.

Keywords: liquefied hydrogen tanker, boil-off hydrogen, re-liquefaction, "green" ecology, decarbonization, marine energy.

For citation:

Koniaev, Dmitry V. "Ship power plant with re-liquefaction installation for tankers transporting hydrogen." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 93–108. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-93-108.

УДК 629.5.06, 629.543

СУДОВАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ «ВОДОРОДНЫХ» ТАНКЕРОВ С УСТАНОВКОЙ ПОВТОРНОГО СЖИЖЕНИЯ

Д. В. Коняев

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предметом предлагаемого исследования является возможность использования водорода в качестве топлива для танкеров, перевозящих сжиженный водород. Отмечается, что вариантом решения проблемы декарбонизации мировой промышленности является возможность конкурентоспособного использования водорода в качестве топлива на морских танкерах, перевозящих сжиженный водород

на значительные расстояния. Указаны основные факторы, способствующие изучению проблем совершенствования энергетических установок судов с учетом ужесточения национальных и международных требований по предотвращению загрязнения окружающей среды. Выполнен краткий обзор направлений развития водородной энергетики на примере ведущих проектов в Европе и Азии, наиболее перспективным из которых является транспортировка сжатого водорода опытным танкером японской компании Кавасаки Suiso Frontier из Австралии в Японию. Приведена стратегия выбора оптимальной пропульсивной установки сжиженного водородного танкера. В качестве методов исследования используется анализ данных, полученных в аналогичных исследованиях, а также термодинамических характеристик перспективных систем. Предлагаются интегрированные компоновочные варианты энергетических систем с учетом повторного сжижения испаряющейся части груза для танкеров, перевозящих водород. Приведены данные о существующих проектах с двигателями при подаче газа низкого и высокого давления твердооксидными топливными элементами. Рассмотрены пять перспективных энергетических систем и система повторного сжижения с циклом Клода, использующие в качестве топлива и хладагента водород и сжиженный природный газ. В результате выполненной оценки их технологической реализуемости и воздействия на окружающую среду диапазоны эксергетического КПД и удельного энергопотребления систем повторного сжижения составили 26,79–46,27 % и 3–7,45 кВтч/кг соответственно. Определена оптимальная система с двигателем низкого давления, твердооксидными топливными элементами и системой повторного сжижения.

Ключевые слова: танкер для перевозки сжиженного водорода, выпарной водород, повторное сжижение, «зеленая» экология, декарбонизация, судовая энергетика.

Для цитирования:

Коняев Д. В. Судовая энергетическая установка для «водородных» танкеров с установкой повторного сжижения / Д. В. Коняев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 93–108. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-93-108.

Введение (Introduction)

Широко обсуждаемая мировой общественностью *проблема декарбонизации* предполагает не только ужесточение экологических требований к защите окружающей среды и предотвращению глобального потепления, но и к неизбежному формированию конкурентных способов исполнения подобного рода задач. Очевидно, что одним из приоритетных в мире является направление водородной энергетики. В процессе изучения вопросов водородной энергетики необходимы серьезные проработки в части установок для сжигания сжиженных природных газов (СПГ) с изучением термодинамических процессов и экономической оценки. В мире апробированы и широко используются СПГ и сжиженные углеводородные газы (СУГ). Однако снижение выбросов окислов серы, сжигание СПГ и СУГ не решает проблемы парниковых газов в виде углекислоты.

Судовая энергетика в этих условиях тоже проходит путь трансформации. Страны, имеющие суда морского и речного флота, занимаются разработками в направлении совершенствования энергетических установок судов, предвидя ужесточение национальных и международных требований по предотвращению загрязнения окружающей среды. В данном случае прил. 6 Конвенции МАРПОЛ содержит не только нормативы Международной морской организации, но и широкомасштабные правовые акты. Например, для решения проблем экологии на Конференции ООН по изменению климата (COP21) в Париже 12 декабря 2015 г. было выработано Парижское соглашение по климату, являющееся первым универсальным соглашением подобного рода [1]. Согласно требованиям данного документа, необходимо, чтобы страны предоставили на добровольной основе свои планы по сокращению выбросов парниковых газов (ПГ), выходящие за пределы данной конвенции в рамках Организации Объединенных Наций об изменении климата [2]. В общей сложности участниками проекта по сокращению выбросов парниковых газов являются 186 стран.

Во Франции запущен новый проект Les Hauts de France, направленный на строительство пяти электролизных установок по производству водорода мощностью 100 МВт в течение пяти лет. В Великобритании целью проекта Gigastack является добыча большого масштаба недорогого водорода с нулевым углеродным следом с помощью электролизных установок на основе протонно-обменных мембран. Япония реализует проект строительства первой в мире полномасштабной линии поставок водорода к 2030 г. [3]. Первое в мире японское судно Suiso Frontier, предназначенное для пере-

возки жидкого водорода (LH_2), совершило рейс из Австралии в Японию в начале 2022 г. После постройки двух коммерческих судов для импорта 225 000 т водорода к 2030 г. компания Кавасаки (Япония) планирует построить к 2050 г. еще 80 водородных танкеров для импорта 9 млн т водорода в год [4]. В январе 2019 г. Корея объявила о своей «дорожной карте» водородной экономики, в которой изложена цель производства 6,2 млн электромобилей на топливных элементах и развертывания не менее 1200 заправочных станций к 2040 г. [5]. Российская Федерация тоже активно прорабатывает «Концепцию водородной промышленности», утвержденную Правительством РФ 05 августа 2021 г. [6].

Реализация мировой водородной экономики предполагает *ценовую конкурентоспособность водорода*, которая будет достигнута за счет его производства, транспортировки и использования в больших масштабах. Ввиду того, что не каждая страна может удовлетворить свои потребности в энергии за счет собственных возобновляемых источников из-за сложных географических условий, установленных правил и т. д., крупнотоннажные межконтинентальные перевозки водорода неизбежны. Существует несколько вариантов водородных носителей для морской транспортировки водорода: жидкий водород (LH_2), жидкие носители органического водорода (ЛОHC) и аммиак (NH_3). Поиск наиболее подходящего носителя водорода для крупнотоннажной транспортировки водорода зависит от множества факторов, таких как безопасность, технологическая сложность, окружающая среда и экономическая целесообразность [7]–[10].

Межконтинентальные перевозки LH_2 предпринимались в течение нескольких десятилетий. Так, в 1991 г. предлагалось использовать 270 океанских танкеров вместимостью по 125 000 м³ LH_2 с применением в качестве топлива для установок с двигателем, имеющим КПД около 35 % [11], всего водорода, испаряющегося во время рейса. Предполагается, что КПД в большинстве установок с использованием всего объема *отпарного газа* составляет около 40 %, что приводит к потреблению 237 кг/ч водородного топлива. В целом состав пропульсивной установки на криогенных газозолах должен быть тесно связан с системой распределения отпарного водорода, который может использоваться в качестве топлива или повторно сжижаться для возврата в грузовой танк. Согласно данным проведенных исследований LH_2 танкеров, в пропульсивной и силовой установках и системе распределения отпарного водорода приняты следующие допущения:

1. Все силовые установки танкеров используют весь отпарной водород в качестве топлива для двигателя.
2. Скорость образования газообразного водорода постоянная как в грузовом, так и в балластном рейсах.
3. Рассматриваются только репрезентативные операции.
4. Детали энергосистемы (пропульсивного комплекса и системы выработки электроэнергии) не указываются.
5. Потери LH_2 на испарение не учитываются при погрузочно-разгрузочных работах.

С учетом введенных условий основные параметры конструкции океанских танкеров LH_2 могут быть упрощены. Таким образом, чтобы преодолеть ограничения существующих исследований и представить реалистичную и выполнимую конструкцию танкера LH_2 , в исследовании может использоваться следующий подход. Во-первых, проводится интегрированное проектирование пропульсивной установки, электроэнергетики и системы повторного сжижения; оптимальное решение определяется посредством технико-экономического анализа. Во-вторых, разрабатывается система повторного сжижения с открытым циклом, подходящая для морских судов, компактность которой обеспечивается за счет отсутствия дополнительных хладагентов. В-третьих, точность оценки может быть повышена за счет учета конкретных режимов работы судна и оценки нагрузок электрической системы в зависимости от режима работы и скорости судна. В-четвертых, экономический анализ в таком исследовании касается анализа жизненного цикла и стоимости доставки посредством прогнозирования чартерных сборов для повышения надежности анализа реализации системы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Существующая тенденция морских перевозок СПГ заключается в минимизации расхода топлива в процессе доставки максимального количества груза и минимальном воздействии на окружающую среду. В настоящее время большинство судов с СПГ используют высокоэффективные двигатели внутреннего сгорания. Двигатели двух ведущих компаний: MAN ME-GI и Wartsila X-DF, имеют тепловой КПД более 50 %. Небольшие системы повторного сжижения применяются для обработки отпарного газа (ОГ/BOG). Для LH_2 танкеров может быть использовано несколько вариантов энергосистемы, аналогичных танкерам СПГ. До сих пор многие исследования, связанные с энергетическими системами LH_2 танкеров и системами обработки отпарного водорода, проводились исключительно на основе качественного анализа, т. е. на уровне *предварительного концептуального проектирования*. В настоящее время ведутся многочисленные дискуссии об альтернативных видах топлива для судов. СПГ является наиболее приемлемым топливом для танкеров LH_2 с точки зрения технологического совершенства, экономичным в вопросах эксплуатационных затрат и степени готовности инфраструктуры. В качестве основного топлива могут использоваться СПГ, чистый водород или их смесь.

Основным двигателем могут быть выбраны двигатель ME-GI, двигатель X-DF или газотурбинная установка с комбинированным циклом. Технология сжигания смешанного топлива СПГ и водорода в газовых турбинах имеет высокую степень освоенности по сравнению с другими двигателями внутреннего сгорания. Также в силовой установке может использоваться двухтопливный дизельный двигатель (ДТДД/DFDE) вместе с твердооксидными топливными элементами (ТОТЭ) [12]. Конфигурация энергетической системы определяет тип судового топлива и методы обработки отпарного водорода. В рассматриваемом исследовании конфигурации системы предлагаются на основе использования в качестве топлива только СПГ или использования смеси СПГ и водорода. Перспективные системы энергетических установок LH_2 танкера приведены на рис. 1.

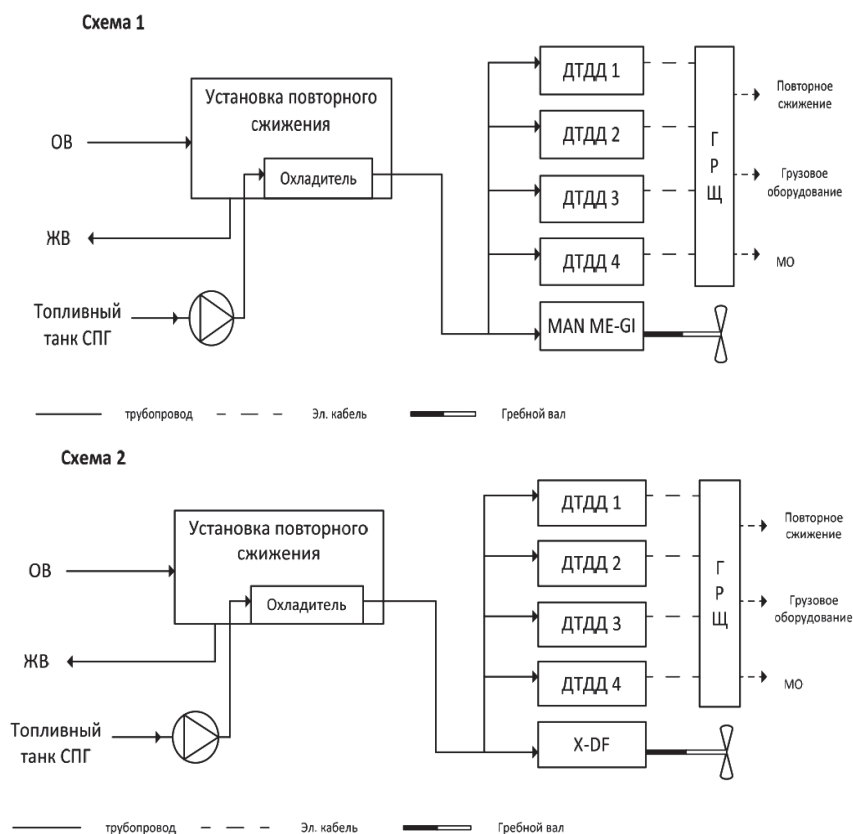


Рис. 1. Перспективные системы энергетических установок LH_2 танкера:

ОВ — отпарной водород; ЖВ — жидкий водород; ГРЩ — главный распределительный щит; МО — машинное отделение; ТОТЭ — твердооксидные топливные элементы (Начало)

Схема 3

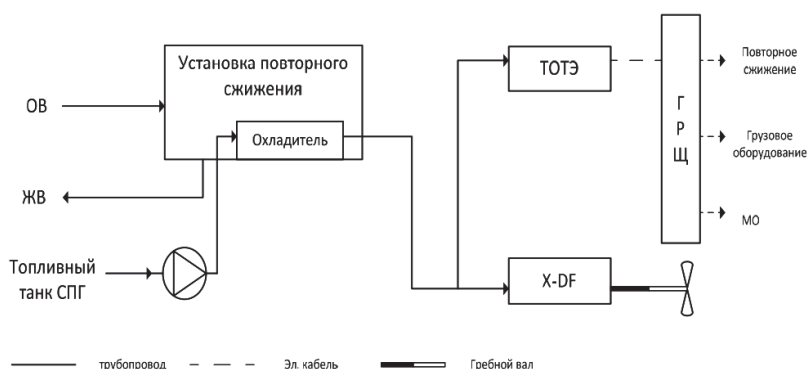


Схема 4

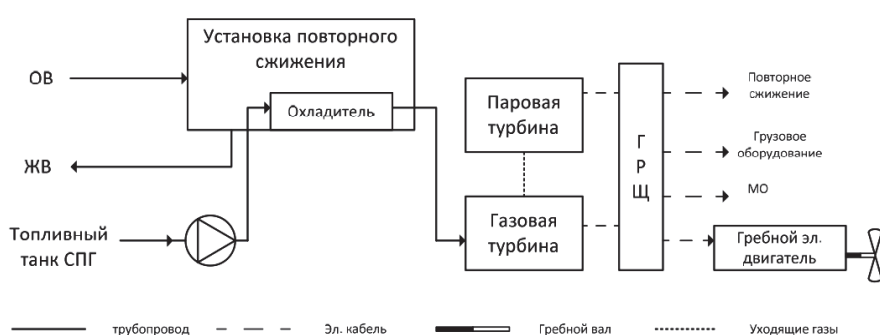


Схема 5

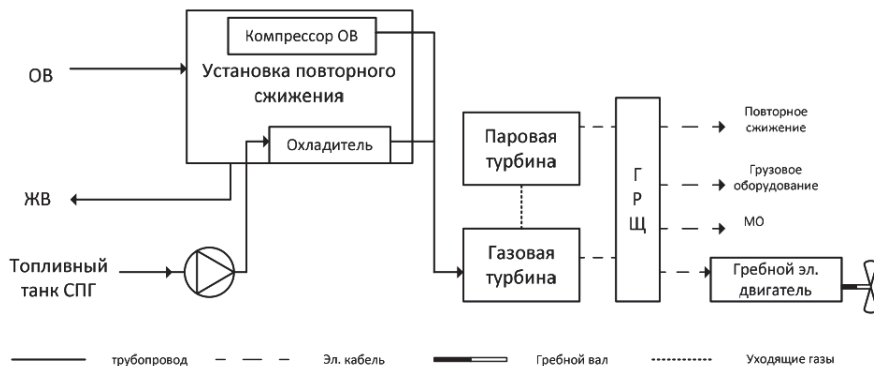


Рис. 1. Перспективные системы энергетических установок LH_2 танкера:
ОВ — отпарной водород; ЖВ — жидкий водород; ГРЩ — главный распределительный щит;
МО — машинное отделение; ТОНЭ — твердоокисные топливные элементы (Окончание)

В предлагаемых на рис. 1 схемах 1–4 системы повторного сжижения конденсируют отпарной водород, возвращая его в грузовые танки. Система в схеме 5 предусматривает повторное сжижение оставшегося отпарного водорода (за исключением смешанного с СПГ водородного топлива) и его перемещение в грузовые танки. Двигатель ME-GI с дизельным циклом применяется в схеме 1. Двигатель X-DF с циклом Отто применяется в схемах 2 и 3. Системы в схемах 4 и 5 имеют газотурбинные установки с комбинированным циклом для электрического движения. В частности, в системе схемы 5 используется газовая турбина с комбинированным циклом, в которой смешивается водород с СПГ для снижения выбросов CO_2 . В системах схем 1 и 2 для выработки электроэнергии применяются двигатели типа DFDE. В системе схемы 3 применяются ТОНЭ. ТОНЭ, работающие на СПГ, имеют относительно длительное время запуска и плохо реагируют на колебания нагрузки, при этом у них отмечается преимущество в эффективности, достигающей 60 %. Таким образом, они подходят для больших морских судов [13].

Параметры машин и топлива приведены в табл. 1. Термодинамические характеристики двигателей ME-GI, X-DF и DFDE получены на основе данных каждого производителя [14]–[16]. Газовые турбины с комбинированным циклом в системах схем 4 и 5 моделируются и проверяются при частичных нагрузках (20 %, 40 %, 60 %, 80 % и 100 %) [17], [18]. Кроме того, TOTЭ в системе схемы 3 моделируется и проверяется [19].

Таблица 1

Параметры установок

Модель двигателя	Пропульсивная установка			Силовая установка	
	MAN 5G70ME-C9.5-GI	WINGD 5X72DF	GE 10–1	Wartsila 8L20DF	Топливные элементы
Мощность, кВт	10000	10000	14272	1480	4500
Количество	1	1	1	4	1
Тип топлива	СПГ	СПГ	СПГ или H ₂	СПГ	СПГ
Параметры топлива	300 бар/45 °С	13 бар/45 °С	25 бар/45 °С	6 бар/45 °С	13 бар/45 °С
Низшая теплотворная способность (кДж/кг)	49200	49200	49200 (СПГ) 120000 (H ₂)	49200	49200
Удельный расход топливного газа (г/кВт)	136,1	138	–	165	–
Удельный расход топлива (г/кВт)	1,2	1,1	–	3,5	–

Для более полного анализа сводные данные по электрической нагрузке для каждой системы получены путем прогнозирования на основе источников [20]–[22] и сведены в табл. 2. Они создаются на основе оперативного профиля LH2 танкера. Во время рейса судна с грузом или в балласте существуют четкие различия в электрических нагрузках грузовой системы, так как эффективность повторного сжижения каждой системы различна. В порту погрузки высокопроизводительный компрессор для возвратного отпарного водорода является большим потребителем электроэнергии. В порту выгрузки грузовые насосы потребляют значительное количество электроэнергии (табл. 3). Силовые установки настроены таким образом, что их нагрузка не превышает 85 % максимальной потребляемой мощности. В частности, мощность электрической силовой установки, используемой в системах 4 и 5, увеличена до 10 800 кВт из-за потерь в электрической передаче.

Образование отпарного водорода, вызванное притоком тепла из атмосферы при транспортировке криогенных грузов, неизбежно. Давление в грузовом танке должно эффективно регулироваться с точки зрения конструктивной прочности грузового танка и качества груза, температура которых должна сохраняться низкой. Количество отпарного водорода, образующегося во время рейса и операций погрузки / разгрузки, представляет собой потери и является важным фактором в экономической цепочке формирования стоимости водорода. Судовые системы повторного сжижения должны иметь другие характеристики в отличие от береговых заводов по сжижению.

Необходимый объем повторного сжижения на борту относительно невелик, а температура исходного потока намного ниже, чем на берегу. Следовательно, для LH₂ танкеров может оказаться целесообразным применение термодинамических циклов, отличных от циклов береговых установок. Морские суда имеют очень ограниченное пространство для размещения дополнительных систем по сравнению с наземными установками. Термодинамическая эффективность, компактность, простота эксплуатации и простота обслуживания являются важными критериями судовой системы повторного сжижения. Кроме того, образование избыточного отпарного водорода после операции погрузки на экспортном терминале выше, чем номинального отпарного водорода во время рейса с грузом, но тем не менее это не считается «расчетной точкой», поскольку частота операции загрузки намного меньше. В табл. 4 приведены проектные данные для моделирования процесса.

Таблица 2

Нагрузка на электрическую сеть систем 1–5

Система 1 — ГД: MAN 5G70ME-C9.5GI × 1 шт., КПД генератора: 96 %, электродвигатель: 8L20DF (1,200 об/мин) × 4						
Режим работы	Балласт	Груз	в порт/из порта	Разгрузка	Погрузка	в простое
1	2	3	4	5	6	7
Непрерывная нагрузка (кВт)	835,5	835,5	971,3	1085,1	1002,4	541,7
Прерывистая нагрузка (кВт)	168,9	168,9	181,7	115,5	115,5	115,5
Фактор группового разнообразия	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Фактическая повторно-кратковременная нагрузка	50,7	50,7	54,5	34,7	34,7	34,7
Частичная загрузка груза (кВт)	900,0	2539,5	500,0	1943,0	2330,2	319,7
Нагрузка на палубное оборудование (кВт)	0,0	0,0	0,0	85,0	85,0	20,0
Общая нагрузка (кВт)	1786,2	3425,7	1525,8	3147,8	3452,3	916,1
Количество генераторов	2 × 1,42	3 × 1,42	2 × 1,42	3 × 1,42	3 × 1,42	1 × 1,42
Коэффициент нагрузки (генератор)	62,9 %	80,4 %	53,7 %	73,9 %	81,0 %	64,5 %
Система 2 — ГД: WINGD 5X72DF × 1 шт., КПД генератора: 96 %, электродвигатель: 8L20DF (1,200 об/мин) × 4						
Непрерывная нагрузка (кВт)	835,5	835,5	971,3	1085,1	1002,4	541,7
Прерывистая нагрузка (кВт)	168,9	168,9	181,7	115,5	115,5	115,5
Фактор группового разнообразия	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Фактическая повторно-кратковременная нагрузка	50,7	50,7	54,5	34,7	34,7	34,7
Частичная загрузка груза (кВт)	760,0	1639,5	500,0	1943,0	2330,2	319,7
Нагрузка на палубное оборудование (кВт)	0,0	0,0	0,0	85,0	85,0	20,0
Общая нагрузка (кВт)	1646,2	2525,7	1525,8	3147,8	3452,3	916,1
Количество генераторов	2 × 1,42	3 × 1,42	2 × 1,42	3 × 1,42	3 × 1,42	1 × 1,42
Коэффициент нагрузки (генератор)	58,0 %	59,3 %	53,7 %	73,9 %	81,0 %	64,5 %
Система 3 — ГД: WINGD 5X72DF × 1 шт., КПД преобразователей: 94,09 %, электродвигатель: 4,5 МВт ТОВЭ						
Непрерывная нагрузка (кВт)	835,5	835,5	971,3	1085,1	1002,4	541,7
Прерывистая нагрузка (кВт)	168,9	168,9	181,7	115,5	115,5	115,5
Фактор группового разнообразия	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Фактическая повторно-кратковременная нагрузка	50,7	50,7	54,5	34,7	34,7	34,7
Частичная загрузка груза (кВт)	750,0	1959,5	500,0	1943,0	2330,2	319,7
Нагрузка на палубное оборудование (кВт)	0,0	0,0	0,0	85,0	85,0	20,0

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
Общая нагрузка (кВт)	1636,2	2875,7	1525,8	3147,8	3452,3	916,1
Количество генераторов	1 × 4,234	1 × 4,234	1 × 4,234	1 × 4,234	1 × 4,234	1 × 4,234
Коэффициент нагрузки (генератор)	38,6 %	67,9 %	36,0 %	74,3 %	81,5 %	21,6 %
Система 4 — ГД: GE 10 (ГД+ПТ), КПД генератора: 96 %, электрогенератор для ГД и ПТ: 96 %						
Непрерывная нагрузка (кВт)	835,5	835,5	971,3	1085,1	1002,4	541,7
Нагрузка пропульсивная (кВт)	10800,0	10800,0	3200,0	0,0	0,0	0,0
Прерывистая нагрузка (кВт)	168,9	168,9	181,7	115,5	115,5	115,5
Фактор группового разнотечения	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Фактическая повторно-кратковременная нагрузка	50,7	50,7	54,5	34,7	34,7	34,7
Частичная нагрузка груза (кВт)	780,0	1469,5	500,0	1943,0	2330,2	319,7
Нагрузка на палубное оборудование (кВт)	0,0	0,0	0,0	85,0	85,0	20,0
Общая нагрузка (кВт)	12466,2	13155,7	4725,8	3147,8	3452,3	916,1
Количество генераторов	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27
Коэффициент нагрузки (генератор)	87,3 %	92,2 %	33,1 %	22,1 %	24,2 %	6,4 %
Система 5 — ГД: GE 10 (ГД+ПТ), КПД генератора: 96 %, электрогенератор для ГД и ПТ: 96 %						
Непрерывная нагрузка (кВт)	835,5	835,5	971,3	1085,1	1002,4	541,7
Нагрузка пропульсивная (кВт)	10800,0	10800,0	3200,0	0,0	0,0	0,0
Прерывистая нагрузка (кВт)	168,9	168,9	181,7	115,5	115,5	115,5
Фактор группового разнотечения	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Фактическая повторно-кратковременная нагрузка	50,7	50,7	54,5	34,7	34,7	34,7
Частичная нагрузка груза (кВт)	400,0	769,5	500,0	1943,0	2330,2	319,7
Нагрузка на палубное оборудование (кВт)	0,0	0,0	0,0	85,0	85,0	20,0
Общая нагрузка (кВт)	12466,2	13155,7	4725,8	3147,8	3452,3	916,1
Количество генераторов	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27	1 × 14,27
Коэффициент нагрузки (генератор)	84,7 %	87,3 %	33,1 %	22,1 %	24,2 %	6,4 %

Таблица 3

Параметры главного электрогенератора

Режим работы	Система 1	Система 2	Система 3	Система 4	Система 5
Общая нагрузка, кВт	1420	1420	4234	14272	14272
Количество установок	4	4	1	1	1
Напряжение, В	6600 В	6600 В	6600 В	6600 В	6600 В
Количество фаз / частота, Гц	3/ 60 Гц	3/ 60 Гц	3/ 60 Гц	3/ 60 Гц	3/ 60 Гц
Первичный двигатель	ДФ	ДФ	ТОТЭ	ГТ + ПТ	ГТ + ПТ

Таблица 4

Проектные данные для системы повторного сжижения отпарного водорода

Параметр	Единицы измерения	Значение
Скорость выкипания	% / сут	0,2 [23]
Скорость образования ОВ в грузу	кг/ч	290
Скорость образования ОВ в балласте	кг/ч	116 [24]
Температура ОВ в грузу	К	53,15 [25]
Температура ОВ в балласте	К	73,15
Давление всасывания компрессора ОВ	бар	2
Состав ОВ	%	Параводород 99,8, ортоводород 0,02

Существенным звеном в рассматриваемых процессах является операция сжижения выпара груза. Технологическая схема системы повторного сжижения приведена на рис. 2.

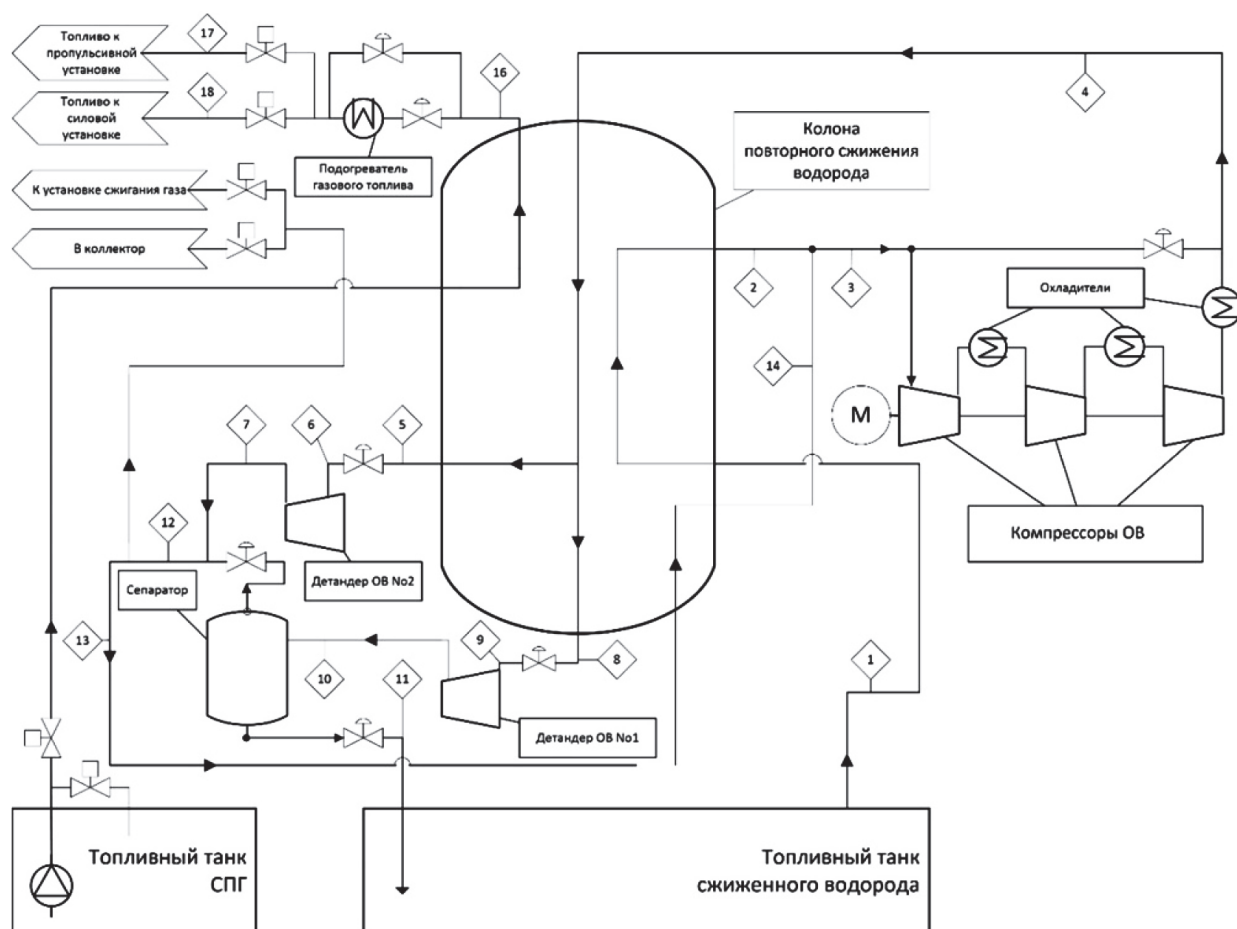


Рис. 2. Схема процессов повторного сжижения водорода

Системы схем 1–5 состоят из установки повторного сжижения и системы подготовки СПГ для использования в качестве топлива. Предлагаемый цикл повторного сжижения модифицирован по сравнению с циклом Клода для использования низких энергетических уровней СПГ, поступающего в топливную систему. Отпарной водород направляется на всасывание компрессора отпарного водорода (ОВ), поэтому его температура в грузовом рейсе принимается равной $-220\text{ }^{\circ}\text{C}$, что выше температуры хранения груза [25]. Сжатый отпарной водород проходит через охладитель, предварительно охлаждаясь топливом СПГ для топливной системы. После предварительного охлаждения горячий отпарной водород 4 (рис. 2) охлаждается отпарным водородом 1 из грузовых танков. Часть отпарного водорода 8, направляется в расширитель отпарного водорода № 1, остальная его часть 5 — в детандер отпарного водорода № 2, который вводится для повышения эффективности по сравнению с расширительными клапанами. Доля пара 10 составляет 0,4–0,6. Поток разделяется на *жидкость* и *пар* в сепараторе. Сжиженный отпарной водород 11 направляется в грузовые танки, пар, объединенный с потоком 7, охлаждает 8 (см. рис. 2).

Для анализа цикла повторного сжижения приняты следующие допущения:

1. Минимальная точность определения температуры для теплообменников 0,5 К [26]–[28].
2. Отпарной водород (ОВ) состоит из 99,8 % параводорода и 0,02 % ортоводорода.
3. Во время обычного рейса не происходит превращения параводорода в ортоводород [25], [29].
4. Компрессор ОВ представляет собой поршневой компрессор без смазки.
5. Адиабатический КПД компрессора ОВ, детандеров ОВ № 1 и 2 составляет 85 %, 80 %, 85 % соответственно.
6. Падение давления в теплообменниках незначительное.

Термодинамические характеристики системы повторного сжижения можно оценить по необходимой работе на единицу массы повторно сжиженного отпарного водорода, называемой *удельным потреблением электроэнергии* (УПЭ / SEC), и может быть представлен следующим отношением:

$$SEC = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{m}_{RQL}}, \quad (1)$$

где $\dot{W}_{net}$ — полная работа, необходимая для повторного сжижения отпарного водорода;

$\dot{m}_{RQL}$ — массовый расход повторно сжиженного отпарного водорода.

Полная энергия повторного сжижения рассчитывается по уравнению

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{comp} - \dot{W}_{exp1} - \dot{W}_{exp2}, \quad (2)$$

где $\dot{W}_{comp}$ — работа, затраченная на привод компрессора;

$\dot{W}_{exp}$ — экспериментальная работа детандера.

Полезная работа двух расширителей, передаваемая на главный распределительный щит танкера, используется для работы компрессора ОВ. Эксергетическая эффективность является одной из оценок термодинамических характеристик системы повторного сжижения, определяемой как минимальная работа, деленная на фактическую работу:

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{RLQ-in} - \dot{E}_{RLQ-out}}{\dot{W}_{net} - (\dot{E}_{RLQ-out} - \dot{E}_{RLQ-in})}, \quad (3)$$

где η_{ex} — эксергетическая эффективность;

$\dot{W}_{net}$ — полная работа, необходимая для повторного сжижения отпарного водорода;

$\dot{E}_{RLQ-in}$ — эксергия физического потока отпарного водорода;

$\dot{E}_{RLQ-out}$ — эксергия физического потока сжиженного водорода.

Системы повторного сжижения оцениваются по УПЭ и эксергетической эффективности, потребляемая мощность и выбросы CO_2 — путем сопряжения с предлагаемыми пропульсивными и силовыми установками.

Результаты (Results)

Энергетическая эффективность и эксергетическая эффективность анализируются для оценки термодинамических характеристик систем сжижения. Термодинамические характеристики систем, полученные на основе формул (1)–(3), приведены в табл. 5.

Таблица 5

Термодинамические характеристики систем 1–5

Энергетическая система	Обозначение	Единица измерения	Рейс	
			в грузу	в балласте
Система 1	$\dot{W}_{net}$	кВт	2159,92	484,88
	$\dot{m}_{RQL}$	кг/ч	290,00	116,00
	УПЭ (SEC)	кВт·ч/кг	7,45	43191,00
	η_{ex}	%	26,79	—
	P_{lng}	бар	300,00	—
Система 2	$\dot{W}_{net}$	кВт	1289,63	355,54
	$\dot{m}_{RQL}$	кг/ч	290,00	116,00
	УПЭ (SEC)	кВт·ч/кг	4,45	3,07
	η_{ex}	%	36,97	—
	P_{lng}	бар	13,00	—
Система 3	$\dot{W}_{net}$	кВт	1611,89	342,91
	$\dot{m}_{RQL}$	кг/ч	290,00	116,00
	УПЭ (SEC)	кВт·ч/кг	5,59	2,95
	η_{ex}	%	31,26	—
	P_{lng}	бар	13,00	—
Система 4	$\dot{W}_{net}$	кВт	1080,54	368,76
	$\dot{m}_{RQL}$	кг/ч	290,00	116,00
	УПЭ (SEC)	кВт·ч/кг	3,73	3,18
	η_{ex}	%	43,40	—
	P_{lng}	бар	25,00	—
Система 5	$\dot{W}_{net}$	кВт	419,30	—
	$\dot{m}_{RQL}$	кг/ч	140,00	—
	УПЭ (SEC)	кВт·ч/кг	3,00	—
	η_{ex}	%	46,27	—
	P_{lng}	бар	25,00	—

УПЭ (SEC), эксергический КПД, давление и расход топлива СПГ на груженом рейсе показаны на рис. 3.



Рис. 3. Удельное потребление электроэнергии и эксергетическая эффективность

Количество номинального отпарного водорода во время рейса в грузу выбрано в качестве расчетной точки установки повторного сжижения. Система *схемы 1* имеет наихудшие УПЭ и эксергетический КПД, а *система 5* — наилучшие из имеющихся альтернатив.

Температура нагнетания насоса СПГ с давлением 300 бар для двигателя ME-GI выше, чем у насоса СПГ с давлением 13 бар для двигателя X-DF, на 30 °С, что оказывает существенное влияние на разницу в производительности между *системами 1 и 2*. *Системы 2 и 3* используют один и тот же двигатель X-DF для движения, но характеристики повторного сжижения различаются из-за разных электросиловых установок. В *системе 3* используется высокоэффективный ТОТЭ, поэтому низкотемпературная энергия СПГ и эффективность повторного сжижения данной системы снижаются. *Система 4* имеет газовую турбину с комбинированным циклом с максимальным КПД 43 %, что является наихудшим тепловым КПД среди принятых энергетических систем. По сравнению с другими СЭУ в *системе 4* используется наибольшее количество СПГ-топлива. Таким образом, данная система имеет самую высокую производительность повторного сжижения при достаточной низкотемпературной энергии. В *системе 5* в газовую турбину подается 150 кг/ч водорода и только оставшиеся 140 кг/ч водорода повторно сжижаются. Система повторного сжижения не работает во время балластной операции, поэтому весь ОВ 116 кг/ч используется в качестве топлива для газовой турбины.

В завершение термодинамического анализа установлено, что система повторного сжижения в *системе 5* имеет наилучшую эксергетическую эффективность 46,27 % и УПЭ 3 кВт·ч/кг. Это связано с тем, что повторно сжижается только 140 кг/ч ОВ, а достаточное количество СПГ под давлением 25 бар охлаждает горячий водород, поступающий из компрессора ОВ [12].

Заключение (Conclusion)

Предложена оптимальная интегрированная конструкция судовой энергетической системы и системы повторного сжижения для океанского танкера, перевозящего жидкий водород, вместимостью 50 000 м³. Выполнена оценка пяти энергетических систем с учетом технологических аспектов судоходства. Системы повторного сжижения оценивались с помощью термодинамического анализа производительности, выполненного на основе расчетов эффективности использования энергии

и эксергии. Предложены конфигурации системы, основанные на использовании только топлива СПГ или использовании смешанного топлива: СПГ и водорода. Используемые характеристики предложенных пяти систем: в качестве силовой установки в *системе 1* (см. рис. 1–5) применялся двигатель ME-GI с дизельным циклом, в *системах 2 и 3* применялся двигатель X-DF с циклом Отто. В *системах 4 и 5* использовалась газотурбинная система с комбинированным циклом для электрического движения. В частности, *системе 5* использовано комбинированное сжигание СПГ и водорода для снижения выбросов CO₂.

В качестве установки выработки электроэнергии в *системах 1 и 2* использовался двухтопливный двигатель DFDE, а в *системе 3* использовались твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ). Также была предложена конструкция системы повторного сжижения отпарного водорода, образующегося из-за притока тепла в грузовой танк жидкого водорода. Судовая система повторного сжижения должна быть простой в обслуживании и в эксплуатации, а также компактной. Использование модифицированного цикла Клода (без отдельного хладагента) для повторного сжижения удовлетворяет этим условиям. Предлагаемый цикл повторного сжижения модифицирован по сравнению с циклом Клода для использования низкотемпературной энергии СПГ, поступающего в энергетическую систему.

В термодинамическом анализе было установлено, что система повторного сжижения в *системе 5* имеет наилучшую эксергетическую эффективность 46,27 % и УПЭ (SEC) 3 кВт·ч/кг. Это связано с тем, что повторно сжижается только 140 кг/ч ОВ, а достаточное количество СПГ под давлением 25 бар охлаждает горячий водород из компрессора ОВ. Система 3 является наиболее эффективной в экологическом аспекте и показывает самые низкие выбросы CO₂ в год. Система 4, имеющая самый низкий КПД, выделяет наибольшее количество CO₂, несмотря на то, что термодинамические характеристики системы повторного сжижения являются лучшими. В *системе 5* выбросы CO₂ снижены на 27,5 % по сравнению с *системой 4* за счет совместного сжигания 150 кг/ч водорода с СПГ, однако *система 5* по-прежнему выделяет больше CO₂ по сравнению с *системами 1–3* из-за ее низкой эффективности. Судовая энергетическая *система 3*, состоящая из двигателя низкого давления, ТОТЭ и системы повторного сжижения отпарного водорода, представляется наиболее целесообразной с учетом различных аспектов. Несмотря на то, что в данном исследовании расчетные параметры были получены максимально рационально, оно содержит много неопределенностей в вопросах технического анализа, устранить которые позволят разработки технологий на основе топливных элементов и аккумуляторов большой емкости, а также водородных двигателей внутреннего и внешнего сгорания.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на поиск оптимальной энергетической системы и системы управления ОВ, которые могут минимизировать стоимость доставки в соответствии с новыми системами хранения груза, размерами грузовых танков, количеством ОВ, разнообразием альтернативных видов топлива и новыми пропульсивными установками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Darby M. IMF calls for carbon tax on ships and planes // The Guardian [Электронный ресурс] / M. Darby. — Режим доступа: <https://www.theguardian.com/environment/2016/jan/13/imf-calls-for-carbon-tax-on-ships-and-planes> (дата обращения: 22.12.2022).
2. Joungh T. H. The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050 / T. H. Joungh, S. G. Kang, J. K. Lee, J. Ahn // Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping. — 2020. — Vol. 4. — Is. 1. — Pp. 1–7. DOI: 10.1080/25725084.2019.1707938.
3. Nishimura M. Activities for Realization of International Liquefied Hydrogen Energy Supply Chain / M. Nishimura, K. Shindo, K. Yoshimura, Ya. Yoshino // Kawasaki Technical Review. — 2021. — No.182 — Pp. 9–16.
4. Pekic S. Suiso Frontier brings world's 1st LH2 shipment to Japan [Электронный ресурс] / S. Pekic. — Режим доступа: <https://www.offshore-energy.biz/suiso-frontier-brings-worlds-1st-lh2-shipment-to-japan> (дата обращения: 22.12.2022).

5. Hydrogen roadmap Korea [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://elecseed.com.au/wp-content/uploads/2022/05/Hydrogen-Road-Map_Korea.pdf (дата обращения: 22.12.2022).
6. Распоряжение Правительства РФ от 5 августа 2021 года № 2162-р. «Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/news/42971/> (дата обращения: 22.12.2022).
7. Ahn J. Strategy for selecting an optimal propulsion system of a liquefied hydrogen tanker / J. Ahn, H. You, J. Ryu, D. Chang // International journal of hydrogen energy. — 2017. — Vol. 42. — Is. 8. — Pp. 5366–5380. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.037.
8. Sekkesæter Ø. Evaluation of Concepts and Systems for Marine Transportation of Hydrogen: Master's thesis / Ø. Sekkesæter. — Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2019. — 192 p.
9. Mizuno Y. Economic analysis on international hydrogen energy carrier supply chains / Y. Mizuno, Y. Ishimoto, S. Sakai, K. Sakata // Journal of Japan Society of Energy and Resources. — 2017. — Vol. 38. — Is. 3. — Pp. 11–17. DOI: 10.24778/jjser.38.3_11.
10. Raab M. Comparative techno-economic assessment of a large-scale hydrogen transport via liquid transport media / M. Raab, S. Maier, R. U. Dietrich // International Journal of Hydrogen Energy. — 2021. — Vol. 46. — Is. 21. — Pp. 11956–11968. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.213
11. Hiraoka K. Energy analysis and CO2 emission evaluation of a solar hydrogen energy system for the transportation system in Japan — I. Conceptual design of the system / K. Hiraoka, K. Watanabe, T. Morishita, M. Nomura, S. Kan, M. Ikame, T. Senda // International journal of hydrogen energy. — 1991. — Vol. 16. — Is. 9. — Pp. 631–638. DOI: 10.1016/0360-3199(91)90088-Z.
12. Lee J. Integrated design evaluation of propulsion, electric power, and re-liquefaction system for large-scale liquefied hydrogen tanker / J. Lee, Y. Choi, S. Che, M. Choi, D. Chang // International Journal of Hydrogen Energy. — 2022. — Vol. 47. — Is. 6. — Pp. 4120–4135. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.004.
13. Gianni M. Outlook of future implementation of PEMFC and SOFC onboard cruise ships / M. Gianni, A. Pietra, R. Taccani // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2021. — Vol. 238. — Pp. 04004. DOI: 10.1051/e3s-conf/202123804004.
14. Программа CEAS (Computerized engine application system) / MAN [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/ceas-engine-calculations> (дата обращения: 22.12.2022).
15. Программа Winterthur Gas & Diesel (WinGD). General Technical Data (GTD) n. d. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.wingd.com/en/media/general-technical-data/> (дата обращения: 22.12.2022).
16. Wärtsilä 20DF. Product Guide. — Wärtsilä Finland Oy, 2021. — 186 p.
17. Qd100 gas-steam combined — cycle 15MW power set proposal. — China aviation gas turbine company, Ltd., 2006. — 50 p.
18. Hydrogen fueled gas turbines. General Electric. GE 10–1 Gas turbine [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ge.com/gas-power/future-of-energy/hydrogen-fueled-gas-turbines> (дата обращения: 22.12.2022).
19. Borglum B. P. Development of solid oxide fuel cells at versa power systems and fuel cell energy / B. P. Borglum, H. Ghezal-Ayagh // ECS Transactions. — 2013. — Vol. 57. — No. 1. — Pp. 61. DOI: 10.1149/05701.0061ecst.
20. Kim K. Case study on boil-off gas (BOG) minimization for lng bunkering vessel using energy storage system (ESS) / K. Kim, K. Park, G. Roh, K. Chun // Journal of Marine Science and Engineering. — 2019. — Vol. 7. — Is. 5. — Pp. 130. DOI: 10.3390/jmse7050130.
21. Su C. L. Ship electrical load analysis considering power generation efficiency / C. L. Su, C. H. Liao // 015 IEEE/IAS 51st Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). — IEEE, 2015. — Pp. 1–11. DOI: 10.1109/ICPS.2015.7266439.
22. NSMV phase 3 design. Basis of Design [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.maritime.dot.gov/sites/marad.dot.gov/files/docs/national-defense/office-ship-operations/rff/2606/nsmv-phase-3-basis-design-r1.pdf> (дата обращения: 22.12.2022).
23. Ishimoto Y. Large-scale production and transport of hydrogen from Norway to Europe and Japan: Value chain analysis and comparison of liquid hydrogen and ammonia as energy carriers / Y. Ishimoto, M. Voldsund, P. Nekså, S. Roussanaly, D. Berstad, S. O. Gardarsdottir // International journal of hydrogen energy. — 2020. — Vol. 45. — Is. 58. — Pp. 32865–32883. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.017.
24. Jang E. K. Prediction method of the BOG for the membrane type LNGC in Middle East route / E. K. Jang, Y. C. Jung // Journal of Navigation and Port Research. — 2004. — Vol. 28. — Is. 5. — Pp. 365–372. DOI: 10.5394/KINPR.2004.28.5.365.

25. Lee H. Analysis and assessment of partial re-liquefaction system for liquefied hydrogen tankers using liquefied natural gas (LNG) and H₂ hybrid propulsion / H. Lee, Y. Shao, S. Lee, G. Roh, K. Chun, H. Kang // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2019. — Vol. 44. — Is. 29. — Pp. 15056–15071. DOI: 10.5394/KINPR.2004.28.5.365.
26. Groznik J. Boil-off gas handling from liquefied hydrogen storage: Master Thesis in Mechanical Engineering / J. Groznik. — Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2020. — 115 p.
27. Faramarzi S. A novel hydrogen liquefaction process based on LNG cold energy and mixed refrigerant cycle / S. Faramarzi, S. M. M. Nainiyan, M. Mafi, R. Ghasemiasl // *International Journal of Refrigeration*. — 2021. — Vol. 131. — Pp. 263–274. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2021.07.022.
28. Cardella U. Process optimization for large-scale hydrogen liquefaction / U. Cardella, L. Decker, J. Sundberg, H. Klein // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2017. — Vol. 42. — Is. 17. — Pp. 12339–12354. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.167.
29. Choi M. Thermal Efficiency and Economics of a Boil-Off Hydrogen Re-Liquefaction System Considering the Energy Efficiency Design Index for Liquid Hydrogen Carriers / M. Choi, W. Jung, S. Lee, T. Joung, D. Chang // *Energies*. — 2021. — Vol. 14. — Is. 15. — Pp. 4566. DOI: 10.3390/en14154566.

REFERENCES

1. Darby, M. “IMF calls for carbon tax on ships and planes.” *The Guardian*. Web. 22 Dec. 2022 <<https://www.theguardian.com/environment/2016/jan/13/imf-calls-for-carbon-tax-on-ships-and-planes>>.
2. Joung, Tae-Hwan, Seong-Gil Kang, Jong-Kap Lee, and Junkeon Ahn. “The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050.” *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping* 4.1 (2020): 1–7. DOI: 10.1080/25725084.2019.1707938.
3. Nishimura, Motohiko, Kenjiro Shindo, Kenji Yoshimura, and Yasushi Yoshino. “Activities for Realization of International Liquefied Hydrogen Energy Supply Chain.” *Kawasaki Technical Review* 182 (2021): 9–16.
4. Pekic, Sanja. Suiso Frontier brings world’s 1st LH₂ shipment to Japan. Web. 22 Dec. 2022 <<https://www.offshore-energy.biz/suiso-frontier-brings-worlds-1st-lh2-shipment-to-japan>>.
5. Hydrogen roadmap Korea. Web. 22 Dec. 2022 <https://elecseed.com.au/wp-content/uploads/2022/05/Hydrogen-Road-Map_Korea.pdf>.
6. Rasporazhenie Pravitel'stva RF ot 5 avgusta 2021 goda № 2162-r. «Kontseptsiya razvitiya vodo-rodnoi energetiki v Rossiiskoi Federatsii». Web. 22 Dec. 2022 <<http://government.ru/news/42971/>>.
7. Ahn, Junkeon, Hwalong You, Jiheon Ryu, and Daejun Chang. “Strategy for selecting an optimal propulsion system of a liquefied hydrogen tanker.” *International journal of hydrogen energy* 42.8 (2017): 5366–5380. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.01.037.
8. Sekkesæter, Øyvind. Evaluation of Concepts and Systems for Marine Transportation of Hydrogen. Master’s thesis. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2019.
9. Mizuno, Yuji, Yuki Ishimoto, Susumu Sakai, and Ko Sakata. “Economic analysis on international hydrogen energy carrier supply chains.” *Journal of Japan Society of Energy and Resources* 38.3 (2016): 11–17. DOI: 10.24778/jjser.38.3_11.
10. Raab, Moritz, Simon Maier, and Ralph-Uwe Dietrich. “Comparative techno-economic assessment of a large-scale hydrogen transport via liquid transport media.” *International Journal of Hydrogen Energy* 46.21 (2021): 11956–11968. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.213.
11. Hiraoka, K., K. Watanabe, T. Morishita, M. Nomura, S. Kan, M. Ikame, and T. Senda. “Energy analysis and CO₂ emission evaluation of a solar hydrogen energy system for the transportation system in Japan — I. Conceptual design of the system.” *International journal of hydrogen energy* 16.9 (1991): 631–638. DOI: 10.1016/0360-3199(91)90088-Z.
12. Lee, Jinkwang, Younseok Choi, Sanghyun Che, Minsoo Choi, and Daejun Chang. “Integrated design evaluation of propulsion, electric power, and re-liquefaction system for large-scale liquefied hydrogen tanker.” *International Journal of Hydrogen Energy* 47.6 (2022): 4120–4135. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.004.
13. Gianni, Marco, Andrea Pietra, and Rodolfo Taccani. “Outlook of future implementation of PEMFC and SOFC onboard cruise ships.” *E3S Web of Conferences*. Vol. 238. EDP Sciences, 2021. DOI: 10.1051/e3s-conf/202123804004.
14. CEAS program (Computerized engine application system). Web. 22 Dec. 2022 <<https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/ceas-engine-calculations>>.

- Статья поступила в редакцию 19 декабря 2022 г.
Received: December 19, 2022.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-109-125

FEATURES OF MANEUVERABLE OPERATION MODES OF NUCLEAR ICEBREAKERS REACTOR INSTALLATIONS WHEN WORKING IN THE ARCTIC

V. I. Korolev

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

It is noted that the requirements for the reactor installations of new atomic icebreakers of 22220, 10510, 10570 projects suggest an increase in safety (reliability), efficiency and maneuverability. At the same time, the maneuverability of reactor installations in specific features is limited and does not have an unambiguous connection with the maneuverability of the nuclear energy installation in general and rowing electric motors in particular. For this, the separate principle of controlling the reactor and steam turbine installation is implemented on the projects of atomic icebreakers. It is indicated that the development of new projects of atomic icebreakers with increased consumer properties requires processing the statistical information based on the results of the operation of atomic icebreakers of already implemented 10520, 10521, 10580 projects with various input terms and the duration of operation in the Arctic. This allows us to ensure the development of a reasonable approach when determining the operation of atomic icebreakers. It is noted that in order to compare maneuvering operating modes of reactor installations of individual icebreakers and the development of generalizing characteristics, information obtained from specific icebreakers is required. The collection of statistical data from the organized on all nuclear icebreakers and grouped materials are annually received for processing and generalization in the «OKBM Africantov». Assignment calculations are made on statistical information accumulated from 1975 to 2000 by the quantity and depth of change in reactors power when working in the Arctic conditions. A new approach to taking into account the number of equivalent cycles during maneuvering the reactor installation is proposed in the paper. In features of the existing approach with the determination of the above number of cycles in a new approach, the significance of the sublayer is taken into account by the impact on the reliability of the active zone. It is shown that this approach gives a more adequate assessment of the active zone resource expenditure during the campaign. The evaluation of the cycles density of the reactor installation power changing over the reporting period of time is also proposed. It is shown that at maneuverable operation of individual icebreakers there are an individual emphasis and increased maneuverable load of single-reactor icebreakers in relation to dual-reactor.

Keywords: inertial objects, maneuvering ability, reactor installation, main turbogenerator, rowing electric motor, separate control, maneuvering restriction, warm-up state, critical elements, technical conditions, active zone, pipe system, corps structures, permissible number of cycles.

For citation:

Korolev, Vladimir I. "Features of maneuverable operation modes of nuclear icebreakers reactor installations when working in the Arctic." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.1 (2023): 109–125. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-109-125.

УДК 629.12-8:621.039

ОСОБЕННОСТИ МАНЕВРЕННЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛОВ ПРИ РАБОТЕ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

В. И. Королёв

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе отмечается, что требования, предъявляемые к реакторным установкам новых атомных ледоколов пр. 22220, 10510, 10570, предполагают повышение безопасности (надежности), экономичности и маневренности. При этом маневренность реакторных установок по специфическим особенностям ограничена и не имеет однозначной связи с маневренностью ядерной энергетической установки в целом и гребных

электродвигателей в частности. С этой целью в проектах атомных ледоколов реализуется отдельный принцип управления реакторной и паротурбинной установки. Указывается, что при разработке новых проектов атомных ледоколов с повышенными потребительскими свойствами требуется обработка статистической информации по результатам эксплуатации атомных ледоколов, реализованных в пр. 10520, 10521, 10580 с различными сроками ввода и продолжительностью эксплуатации в Арктике, что позволяет обеспечить выработку обоснованного подхода при определении модели эксплуатации атомных ледоколов. Отмечается, что для сопоставления маневренных режимов эксплуатации реакторных установок отдельных ледоколов и разработки обобщающих характеристик необходима информация, получаемая с конкретных ледоколов. Сбор статистических данных организован на всех атомных ледоколах и сгруппированные материалы ежегодно поступают для обработки и обобщения в «ОКБМ Африкантов». Проведены оценочные расчеты на основе имеющейся статистической информации 1975–2000 гг. по количеству и глубине изменения мощности реакторов при работе в условиях Арктики. В статье предложен новый подход к учету количества эквивалентных циклов при маневрировании реакторной установкой. В отличие от существующего подхода с определением приведенного числа циклов новый подход учитывает значимость поддиапазона по воздействию на надежность активной зоны. Показано, что такой подход дает более адекватную оценку расходования ресурса активной зоны в течение кампании. Предложена также оценка плотности циклов изменения мощности реакторной установки за отчетный период времени. Показано, что в маневренной эксплуатации отдельных ледоколов наблюдается индивидуальный характер и повышенная маневренная нагрузка однореакторных ледоколов по отношению к двухреакторным.

Ключевые слова: инерционные объекты, способность к маневрированию, реакторная установка, главный турбогенератор, гребные электродвигатели, отдельное управление, ограничение на маневрирование, теплонепряженное состояние, критические элементы, технические условия, активная зона, трубная система, корпусные конструкции, допустимое число циклов.

Для цитирования:

Королёв В. И. Особенности маневренных режимов эксплуатации реакторных установок атомных ледоколов при работе в условиях Арктики / В. И. Королёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 109–125. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-109-125.

Введение (Introduction)

Эффективное использование Северного морского пути (СМП) как транспортной системы для организации круглогодичной транспортировки СПГ и других поставок предполагает привлечение атомных ледоколов. При этом возникают дополнительные требования к маневрированию и средней скорости движения судов на трассе, которая должна быть в среднем не менее 10 уз для обеспечения ритмичности поставок [1].

Особенности взаимодействия ледоколов с крупнотоннажными судами (КТС) определяются соотношением ширины судна и ширины прокладываемого ледоколом (ледоколами) канала. При этом в общем случае канал может быть образован одним или двумя ледоколами [2]. Ширина корпуса КТС должна быть сопоставима с шириной канала. При этом кромки ледяного канала препятствуют процессам раздвигания льда. КТС уплотняет и частично толкает перед собой битый лед в канале, который частично пропускается под корпус. Этот процесс является энергоёмким и приводит к возрастанию ледового сопротивления КТС при движении по «широкому» каналу. Результаты модельных испытаний, выполненных в ледовом бассейне Крыловского научного центра [3], показали, что взаимодействие с битым льдом в канале является основным препятствием для повышения скорости движения КТС в «широком» канале. Таким образом, возникают дополнительные трудности для маневренного сопровождения атомными ледоколами судов в Арктике.

Атомный ледокол — это судно, которое должно обладать высокой маневренностью и максимально возможной автономностью. Аналогичными свойствами должна обладать также ядерная энергетическая установка (ЯЭУ), обеспечивающая движение и обитаемость судна. Поскольку источником энергии на судне является реакторная установка (РУ), значит, на нее также распространяются специфические свойства атомных ледоколов — способность РУ к максимально возможной маневренности и обеспечению приемлемой безопасности (надежности). При этом надежность и маневренность находятся в противоречивой взаимосвязи. Повышение надежности РУ обуславливает

ограничение количества и глубины изменения мощности, количество вводов-выводов установки и т. д. Существует также взаимосвязь между маневренностью и длительностью кампании активной зоны, т. е. количеством заменяемых активных зон в течение всего жизненного цикла РУ [4].

Получение оптимального сочетания необходимых свойств РУ является сложной задачей проектирования, изготовления и эксплуатации атомных ледоколов, поэтому решается постепенно и поэтапно от проекта к проекту. При разработке каждого нового проекта атомного ледокола (пр. 22220, 10510) решается задача повышения маневренности РУ по отношению к предыдущим проектам (пр. 10520, 10521, 10580). Для этого на основании изучения опыта эксплуатации формируется новый комплекс требований к маневренности РУ [5], [6].

С точки зрения маневренности судовую ЯЭУ можно рассматривать как последовательность трех разноинерционных энергетических объектов: ядерного реактора (парогенераторов), главных турбогенераторов (ГТГ) и гребных электродвигателей (ГЭД) [7], [8]. При этом реактор имеет *невысокие маневренные возможности*, ограниченные, с одной стороны, нейтронно-физическими характеристиками активной зоны (температурный и мощностной эффекты реактивности, стационарное и нестационарное отравление ядерного топлива ксеноном). С другой стороны, оборудование РУ по I контуру находится под высоким давлением теплоносителя (воды), что, согласно условиям статической прочности, требует значительной толщины стенок корпусов реактора, парогенераторов, гидрокамер и другого оборудования, находящегося под высоким давлением теплоносителя. В этой связи при изменении температурного режима теплоносителя (варьирование мощностью, разогрев / расхолаживание, срабатывании АЗ, ЭСМ и т. д.) в толстостенных элементах основного оборудования РУ в динамике возникают высокие термические напряжения в пристенной зоне, омываемой теплоносителем, приводящие к знакопеременной пластической деформации металла. Таким образом, при проведении маневров наибольшая повреждаемость характерна для *массивных элементов конструкции* из-за неравномерности их прогрева / охлаждения в глубину.

Наиболее массивным оборудованием в составе РУ являются корпуса реактора, парогенераторов, гидрокамеры ЦНПК, а также емкости систем, находящиеся под давлением теплоносителя. Именно здесь возникают наибольшие термодинамические напряжения, способствующие к накоплению пластической деформации металла и развитию локальных усталостных трещин, которые могут привести в циклических процессах к разгерметизации оборудования I контура (малоцикловая усталость металла). Следовательно, маневренность РУ также ограничивается термоциклической усталостью основного оборудования, включенного в I контур. Назначаемые нормативы по маневрированию РУ в основном определяются условиями эксплуатации активных зон, трубной системы парогенераторов и корпусных конструкций РУ.

Главные турбогенераторы, включающие главные турбоагрегаты (ГТА) и главные электрогенераторы переменного и постоянного тока, обладают *относительно хорошими маневренными возможностями*, превышающими маневренные возможности РУ. Главные электрогенераторы в сочетании с гребными электродвигателями (ГЭД) составляют главную электрическую установку (ГЭУ). При этом ГЭД отличается высокой маневренной способностью, а также возможностью к реверсированию. Из ранее изложенного следует, что передача энергии от РУ к ГЭД (гребным винтам) осуществляется при различных возможностях маневрирования последовательно включенного энергетического оборудования ядерной энергетической установки.

На рис. 1 показана схема согласования мощностей при передаче энергии от основных объектов управления (РУ, ГТГ и ГЭД) на атомных ледоколах. Здесь необходимую мощность РУ по *запросу судоводителя задает инженер-оператор* (из ЦПУ) дистанционно при помощи задатчика режимов (ЗР). Электрогидравлическая система управления при этом изменяет положения питательного клапана (ПК) — $m_{ПК}$, и в парогенераторы поступает питательная вода в количестве $G_{пв}$. Установленная при этом мощность реактора с учетом коэффициента преобразования энергии является наибольшей возможной мощностью для ГЭУ. Для судоводителя это наибольшая располагаемая мощность, которую называют *ограничением мощности* (ОМ) ГЭУ. При этом курсовая мощность ГЭУ (ГТГ) по условиям движения во льдах задается судоводителем независимо от инженера-оператора РУ путем изменения

ного в РУ, в конденсатор и ускоренным выжиганием ядерного топлива (ЯТ). Однако при этом РУ не требуется повторение всех маневров ГЭД и, соответственно, количество изменений мощности ГЭД будет значительно превышать количество изменений мощности РУ.

В процессе эксплуатации атомного ледокола *главной целью судоводителя считается обеспечение безопасных условий проводки судов в ледовых условиях*. По мнению специалистов Атомфлота, при любой скорости маневрирования РУ останутся режимы с травлением пара (работа с запасом паропроизводительности). Это необходимо для того, чтобы эксплуатационники были уверены в том, что судоводитель предпринял все возможные меры по исключению столкновения судов при проводке в сопровождении ледоколов. Однако при этом актуальными являются вопросы экономии энергозапаса активной зоны и сохранения максимального ресурса оборудования. Если ледокол идет по открытой воде, то целесообразно перейти на систему взаимосвязанного управления (СВУ) РУ и ГЭУ, предусмотренную на всех проектах атомных ледоколов. При такой работе ЯЭУ в статике мощность РУ равна мощности ГЭУ с учетом энергетических потерь на преобразование энергии, длительного травления пара в главный конденсатор не производится, выжигание ЯТ при прочих равных условиях уменьшается, но при этом РУ должна повторять все маневры ГЭД. При работе атомных ледоколов с другими судами СВУ никогда не использовалась, поскольку в этом случае *приоритетным требованием является обеспечение безопасности судовождения*, за которую отвечает персонально капитан судна.

При СРУ РУ и ГТГ заданная РУ мощность (установленная мощность) на текущем (контрольном) интервале времени $\Delta\tau_j$, составляет величину $Q_{pj}^{уст}$, как правило, превышающую мощность, необходимую в данный момент для работы ГЭУ на величину $\Delta Q_p^{оп}(\Delta\tau_j)$ — оперативный запас мощности на маневрирование. При этом возможны следующие варианты:

$$Q_{p,j}^{уст} - \frac{N_{ГЭУ}(\Delta\tau_j)}{\bar{\eta}_{ЯЭУj}} = \Delta Q_p^{оп}(\Delta\tau_j) \geq 0; \quad (1)$$

$$Q_{p,j}^{уст} - \frac{N_{ГЭУj}^{ом}}{\bar{\eta}_{ЯЭУj}} = \Delta Q_p^{оп} = 0, \quad (2)$$

где $N_{ГЭУ}(\Delta\tau_j)$ — мощность ГЭУ на интервале времени $\Delta\tau_j$;

$\bar{\eta}_{ЯЭУj}$ — средний КПД ЯЭУ на контрольном интервале времени.

Величина $\Delta Q_p^{оп}(\Delta\tau_j)$, при эксплуатации атомных ледоколов во льдах может изменяться в широких пределах и определяется, как правило, интуитивно судоводителем из условия обеспечения безопасности мореплавания [4]. При этом судоводитель ориентируется на ОМ ГЭУ — $N_{ГЭУj}^{ом}$ введенного на интервале времени $\Delta\tau_j$ при котором оперативный запас мощности РУ по отношению к установленной инженером-оператором равен нулю: $\Delta Q_{p,j}^{оп} = 0$ (формула (2)).

Методы и материалы (Methods and Materials)

При проведении анализа работы активных зон и оборудования РУ атомных ледоколов оцениваются ряд отчетных показателей за нормативный промежуток времени (календарный год, кампанию активной зоны и т. д.):

- энерговыработка j -й активной зоны W_p^j , ГВт·ч;
- время работы j -й активной зоны на мощности τ_k^j , ч;
- средняя мощность РУ, $\bar{Q}_p$ МВт;
- средний коэффициент загрузки оборудования (использования номинальной мощности) ϕ_m ;
- средний коэффициент использования календарного времени ϕ_k ;
- энерговыработка за эффективный год $W_{p\text{эф}}^{\text{год}}$, ГВт·ч;
- общее время работы реактора данного судна на мощности, $\sum_{j=1}^{n_1} \tau_k^j$, ч;
- суммарная энерговыработка РУ $\sum_{j=1}^{n_1} W_p^j$.

Средняя мощность РУ за время эксплуатации оценивается по формуле

$$\bar{Q}_p = \frac{\sum_{j=1}^{n_1} W_p^j}{\sum_{j=1}^{n_1} \tau_k^j} \quad (3)$$

Средний коэффициент использования номинальной мощности

$$\Phi_M = \frac{1}{Q_{p0}} \sum_{j=1}^{n_1} W_p^j \tau_k^j \quad (4)$$

Средний коэффициент использования календарного времени

$$\Phi_k = \frac{1}{T_k^j \cdot 8760} \sum_{j=1}^{n_1} \tau_k^j \quad (5)$$

Энерговыработка РУ за эффективный год (учитывается только время работы на мощности)

$$W_{p \text{ эф}}^{\text{год}} = 8760 \frac{\sum_{j=1}^n W_p^j}{\sum_{j=1}^{n_1} \tau_k^j} \quad (6)$$

где T_k^Σ — полное количество календарных лет эксплуатации реактора (с учетом простоев);

$Q_{p,0}$ — номинальная мощность реактора;

8760 — количество часов в календарном году;

n_1 — количество загруженных в реактор активных зон.

Для активных зон существуют ограничения по количеству и размаху циклов изменения мощности, предусмотренные техническими условиями (ТУ). При этом рассматривается количество допустимых циклов при глубине изменения мощности ± 25 МВт. В реальной эксплуатации изменение мощности РУ могут быть больше регламентируемой величины (± 25 МВт), поэтому, согласно предложению «ОКБМ Африкантов», определяется количество приведенных циклов изменения мощности по сумме перемещений ПК. При общем количестве изменений N сумму перемещений ПК можно записать в следующем виде:

$$\sum_{i=0}^N m_{\text{ПК}_i} = m_{\text{ПК}_0} + \sum_{i=1}^N \left(m_{\text{ПК}_0} + \sum_{i=1}^N \Delta m_{\text{ПК}_i} \right) \quad (7)$$

а приведенное число циклов изменения мощности можно представить в виде

$$z_{\text{ц}}^{\text{пр}} = \frac{171}{50 \cdot 100} \sum_{i=1}^N m_{\text{ПК}_i} = 0,034 \sum_{i=1}^N m_{\text{ПК}_i} \leq [z_{\text{ц}}^{\text{пр}}] \quad (8)$$

где $m_{\text{ПК}_i}$ — относительное положение ПК для i -го режима работы РУ, %;

$\Delta m_{\text{ПК}_i}$ — величина перемещения ПК по отношению к предыдущему положению $i = 0, 1, 2 \dots N$;

$m_{\text{ПК}_0}$ — начальное положение ПК перед измерениями;

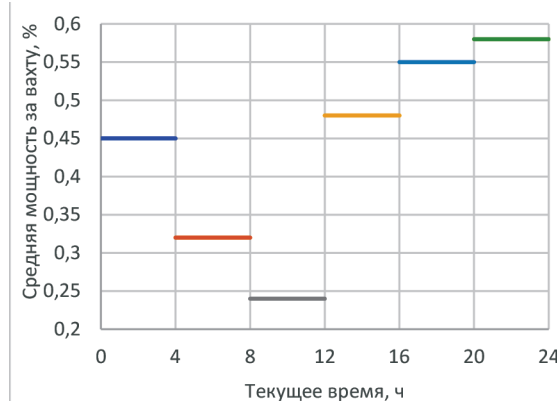
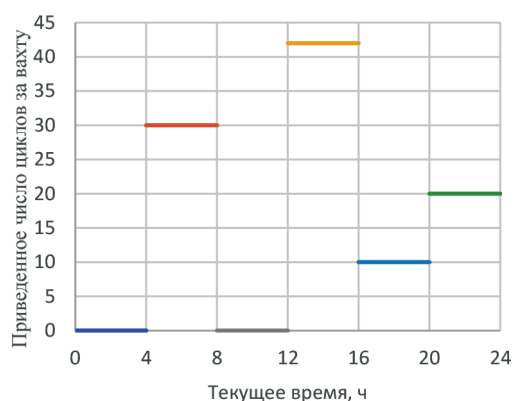
171 — номинальная мощность реактора, МВт;

50 (± 25 МВт) — базовый размах изменения мощности РУ в соответствии с ТУ на поставку активных зон или ~ 30 % (± 15 %) номинальной мощности активной зоны;

$[z_{\text{ц}}^{\text{пр}}]$ — допустимое число приведенных циклов изменения мощности в соответствии с ТУ на поставку активных зон.

На рис. 2 в качестве примера приведена случайная выборка суточной работы РУ атомного ледокола «Вайгач» в маневренном режиме в весенне-летний период эксплуатации. В течение вахты (4 ч) определяется приведенное число циклов по перемещению питательного клапана (формула (8)) и средняя мощность РУ (активной зоны) по суммарной энергоснабжению. Сумма перемещений ПК отмечается оператором РУ в почасовом и вахтенном журнале наблюдений.

а)



б)

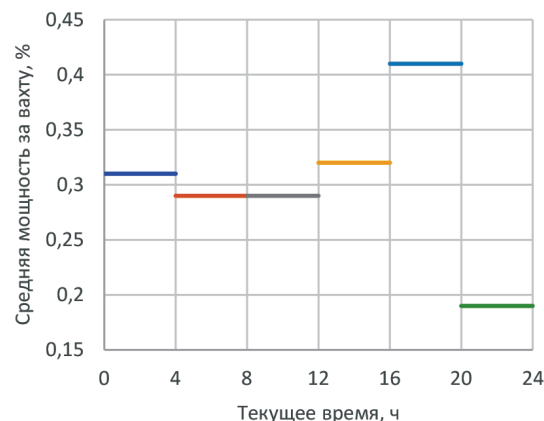
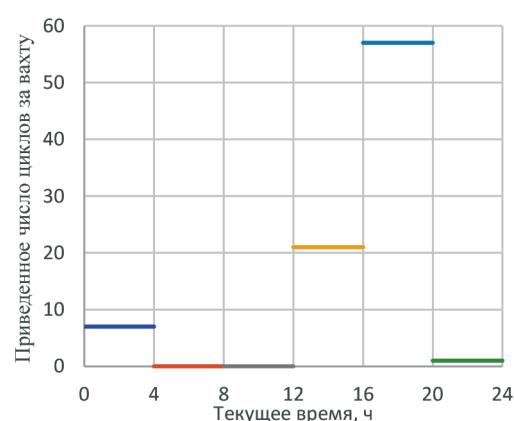


Рис. 2. Результаты наблюдений за суточный работой РУ а/л «Вайгач»:

- а — сумма приведенных циклов за сутки $z_{пр} = 102$ (07.05.2000 г.) —
среднесуточная относительная мощность 0,43;
б — сумма приведенных циклов за сутки $z_{пр} = 86$ (16.07.2000 г.) —
среднесуточная относительная мощность 0,3

Из приведенной выборки следует, что перемещение ПК в течение вахт весьма неравномерное. Некоторые вахты проходят без изменения положения ПК, а другие, наоборот, при частом изменении положения ПК. Данное обстоятельство можно объяснить различием ледовой обстановки для конкретной вахты, а также индивидуальным подходом вахтенного персонала к вопросам маневрирования РУ. Из приведенных данных наблюдения следует, что отсутствие перемещений ПК может быть при относительно высокой средней мощности, что указывает либо на стабильность ледовой обстановки, либо на увеличенное травление пара через КТ. Отсутствие перемещений ПК при малой средней мощности указывает на работу РУ в стояночном режиме. В целом количество перемещений ПК и средняя мощность РУ снижаются в летний период эксплуатации.

В табл. 1 приведена выборка перемещений ПК при эксплуатации а/л «Вайгач», откуда следует, что большая часть маневров мощности РУ осуществляется за пределами, регламентированными техническими условиями на поставку активных зон. Из формулы (7) следует, что при учете перемещений клапана несколько раз учитывается величина перемещения ПК по отношению к предыдущему положению и начальное положение ПК. Кроме того, при изменении положения ПК 15 раз ($N = 15$) количество приведенных циклов, вычисленных по формуле (8), равно 27. При этом количество перемещений ПК, превышающее базовую глубину изменения $\pm 15\%$, составляет 10, количество перемещений ПК, превышающее базовую амплитуду изменения 30% — 4. Таким образом, возникает противоречивая ситуация: эксплуатационники предоставили информацию о двадцати

семи приведенных циклах, влияющих на надежность активной зоны, но при этом было всего выполнено пятнадцать изменений положения ПК, причем базовую глубину превысили только десять измерений, а базовую амплитуду — всего четыре.

Таблица 1

**Случайная выборка перемещений ПК
при эксплуатации а/л «Вайгач» в период 7–10 мая 2000 г.**

Наименование	Обозначение	Последовательность измерений на а/л «Вайгач», i							
		0	1	2	3	4	5	6	7
1. Положение ПК, %	$m_{ПК, i}$	46	24	56	66	30	56	50	24
2. Изменение положения ПК по отношению к предыдущему измерению, %	$\Delta m_{i+1} = m_{i+1} - m_i$	–	–22	32	10	–36	26	–6	–26
3. Сумма положений ПК	$\Sigma m_{ПКi}$	46	70	126	192	222	278	328	352
4. Количество приведенных циклов	$m_{ПК} = 0,034 \sum_{i=1}^{n_i} m_{ПК i}$		2,4	4,3	6,5	7,5	9,4	11,1	12
Наименование	Обозначение	Последовательность измерений на а/л «Вайгач», i							
		8	9	10	11	12	13	14	15
1. Положение ПК, %	$m_{ПКi}$	56	66	56	50	24	56	82	56
2. Изменение положения ПК по отношению к предыдущему измерению, %	$\Delta m_{i+1} = m_{i+1} - m_i$	32	10	–10	–6	–26	32	26	–26
3. Сумма положений ПК	$\Sigma m_{ПКi}$	408	474	530	580	604	660	742	798
4. Количество приведенных циклов	$m_{ПК} = 0,034 \sum_{i=1}^{n_i} m_{ПК i}$	13,8	16,1	18	19,7	20,5	22,4	25,2	27,1

Рассчитанное количество приведенных циклов дает существенно завышенную консервативную оценку о выполнении предусмотренной ТУ допустимой эксплуатации активных зон. При этом при увеличении глубины изменения мощности количество приведенных циклов снижается, а повреждаемость активной зоны возрастает. Следовательно, предложенный метод не дает возможности провести достаточно убедительный анализ расходования ресурса активной зоны и может лишь косвенно охарактеризовать возможную *повреждаемость активной зоны* от всей совокупности приведенных циклов, поскольку не учитывается *глубина цикла изменения мощности*. Поэтому этот показатель маневренности можно рассматривать как формальный.

В процессе накопления опыта эксплуатации судовых активных зон и совершенствования их конструкции увеличивается количество регламентированных режимов согласно ТУ. В частности, растет количество допустимых циклов изменения мощности реактора (количество маневров) в нормальной эксплуатации с $2,5 \cdot 10^3$ до $2,0 \cdot 10^4$ при глубине изменения мощности ± 25 МВт. Более достоверную информацию о повреждаемости оборудования может дать подсчет количества циклов в определенном поддиапазоне значений изменений мощности (размаха циклов), но для этого необходима паспортная регламентация количества циклов в каждом поддиапазоне мощностей. Для первого этапа развития активных зон [7] проблема осложнялась высокой проектной энергонапряженностью активных зон, конструктивными недоработками, а также отсутствием необходимой статистики. Ввиду этих обстоятельств в течение длительного времени не удавалось обеспечить выработку *назначенного энергоресурса* активных зон [7], [8].

При увеличении глубины изменения мощности растут температурные напряжения и деформации оболочек твэл и топливной композиции. Это, в свою очередь, приводит к интенсификации процессов трещинообразования в оболочках твэл и их преждевременной разгерметизации.

Для определения эквивалентного числа циклов использования загруженной в реактор активной зоны с учетом глубины изменения мощности предлагается следующее соотношение:

$$z_{\text{и}}^{\text{ЭКВ}} = \sum_{i=1}^N k_j n_j f(\Delta Q_j) \leq [z_{\text{и}}^{\text{нп}}], \quad (9)$$

где k_j — коэффициент значимости j -го поддиапазона по степени воздействия на ресурс активной зоны;

n_j — количество изменений мощности в j -м поддиапазоне;

$f(\Delta Q_j)$ — статистическое распределение изменений мощности в j -м поддиапазоне;

ΔQ_j — величина (глубина) поддиапазона изменения мощности ($j = 1, 2, 3, \dots, N$).

На данном интервале времени эксплуатации выделяется общий диапазон глубины изменения мощностей РУ, который делится на количество предполагаемых поддиапазонов. В каждом j -м поддиапазоне ($j \in [1, 2, 3, \dots, n_j]$) оценивается количество изменений мощности по глубине и статистическое распределение по интервалу количества изменения мощности.

Основными элементами активной зоны, определяющими ее ресурс, являются твэлы. Зона выгружается, когда некоторое количество твэлов теряет герметичность и образуется «открытый уран». В этом случае из топлива вымываются легкорастворимые водой изотопы (например, изотопы йода) и активность теплоносителя растет, усложняя доступ к остановленному или работающему реактору. В работе принимается, что при увеличении глубины изменения мощности напряженное состояние твэл возрастает и, соответственно, снижается энергоресурс активной зоны.

Для учета воздействия глубины изменения мощности на ресурсные характеристики активных зон принята следующая модель нагружения оболочки твэл при изменении режима работы активной зоны (реакторной установки):

– величина перемещения ПК относительно предыдущего положения $\Delta m_{\text{ПК}i}$ примерно равна величине изменения мощности РУ на данном интервале времени ΔQ_{pi} ;

– на оболочку твэл воздействуют эквивалентные напряжения, учитывающие напряжения, возникающие в оболочке из-за изменения ее температуры и деформации ввиду разности линейного расширения оболочки и топливной композиции при увеличении мощности и обратный эффект при уменьшении мощности, т. е.

$$\sigma_t^{\text{ЭКВ}} = \sigma_t^{\text{об}} + \Delta \sigma_t^{\text{об}}, \quad (10)$$

где $\sigma_t^{\text{об}}$ — термические напряжения возникающие в оболочке при изменении температуры;

$\Delta \sigma_t^{\text{об}}$ — температурные напряжения, возникающие в оболочке за счет разницы деформации топливной композиции и оболочки.

Выражение (10) можно записать в следующем виде [10]:

$$\sigma_t^{\text{ЭКВ}} = \frac{\beta'_{\text{об}} E'_{\text{об}}}{1 - \mu} \Delta t_{\text{об}}(\Delta Q_{p,i}) + \frac{E'_{\text{об}}}{r_{\text{об}}} \left[\beta'_{\text{ТК}} r_{\text{ТК}} \Delta t_{\text{ТК}}(\Delta Q_{p,i}) - \beta'_{\text{об}} \delta_{\text{об}} \Delta t_{\text{об}}(\Delta Q_{p,i}) \right]. \quad (11)$$

Перепад температур на оболочке твэл с продольной координатой z при изменении мощности на величину $\Delta Q_{p,i}$ можно определить из выражения, приведенного в [8]:

$$\Delta t_{\text{об}}(z, \Delta Q_{p,i}) = \chi_{\text{ТК}} \frac{q_z^{\text{max}} \Delta Q_{p,i}}{\pi d_{\text{об}}^{\text{ТВЭЛ}} \lambda_{\text{об}}} f_q(z). \quad (12)$$

Перепад температур между центральной частью топливной композиции (ТК) и ее наружным диаметром в сечении твэл с координатой z [8], [9]:

$$\Delta t_{\text{ТК}}(z, \Delta Q_{p,i}) = \chi_{\text{ТК}} \frac{q_z^{\text{max}} \Delta Q_{p,i}}{\pi d_{\text{об}}^{\text{ТВЭЛ}} 2\lambda_{\text{ТК}}} f_q(z), \quad (13)$$

где q_z^{max} — максимальная линейная плотность теплового потока в активной зоне, МВт/м;

$f_q(z)$ — функция распределения тепловыделения по высоте активной зоны (твэл);

$\chi_{\text{ТК}}$ — доля энергосодержания в топливной композиции;

$d_{об}^{ТВЭЛ}$ — диаметр оболочки ТВЭЛ;
 $\delta_{об}$ — толщина оболочки ТВЭЛ;
 $r_{ТК}$ — радиус топливной композиции;
 $\lambda_{об}; \lambda_{ТК}$ — удельная теплопроводность материала, соответственно, оболочки ТВЭЛ и топливной композиции;

$\beta'_{об}; \beta'_{ТК}$ — температурный коэффициент линейного расширения материала, соответственно, оболочки ТВЭЛ и топливной композиции при рабочей температуре;

$E'_{об}$ — модуль упругости материала оболочки при рабочей температуре, МПа;

μ — коэффициент Пуассона.

Коэффициент значимости j -го поддиапазона по степени воздействия на ресурс активной зоны оценивается из соотношения

$$k_j = \sigma_{t,j}^{ЭКВ} / \sigma_{t,б}^{ЭКВ}, \quad (14)$$

где $\sigma_{t,j}^{ЭКВ}; \sigma_{t,б}^{ЭКВ}$ — амплитудные напряжения, возникающие в оболочке ТВЭЛ, соответственно, в j -м и базовом поддиапазонах изменений мощности.

В дальнейших расчетах по формулам (11)–(14) приняты значения в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Механические и теплофизические свойства материала оболочки и ТК

Наименование материала	Механические свойства			Теплофизические свойства	
	E , МПа	β , 1/град	μ , –	λ , Вт/(м·°С)	C_p , кДж/(кг·°С)
Циркониевый сплав Э635	$97 \cdot 10^3$	$6,9 \cdot 10^{-6}$	0,34	18,5	–
Топливная композиция	$101 \cdot 10^3$	$(17-20) \cdot 10^{-6}$	0,33	50	0,590

На рис. 3 показаны рассчитанные значения коэффициента значимости j -го поддиапазона по отношению к базовому поддиапазону, заданному ТУ на поставку активной зоны.

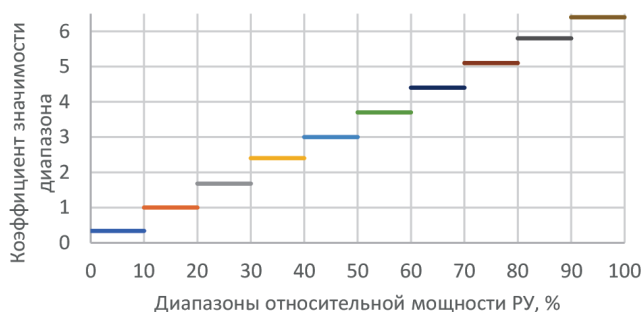


Рис. 3. Значения коэффициента значимости j -го поддиапазона

Дополнительную информацию об условиях эксплуатации можно получить, введя понятие *средняя плотность эквивалентных циклов на контрольном интервале времени* (вахта, сутки, календарный год, кампания активной зоны), соответственно, на РУ и активную зону:

$$\bar{z}_w = \frac{1}{\varphi_k \tau_k} \sum_{i=1}^N k_j n_j f(\Delta Q_j), \quad (15)$$

где τ_k — количество часов работы на k -м контрольном интервале времени;

φ_k — коэффициент использования календарного времени на контрольном интервале времени.

Сопоставление результатов расчетов показывает, что при малых и частых изменениях мощности (малых перемещениях ПК) приведенное число циклов, определенное по формуле (8), будет превышать количество эквивалентных циклов, определенных по формуле (9). Однако при увеличении доли более глубоких изменений мощности по отношению к базовому значению количество

эквивалентных циклов опережает количество приведенных циклов в течение длительного срока эксплуатации РУ и активной зоны.

Результаты (Results)

В первую очередь интерес представляют показатели, формирующие представления о характере использования реакторных установок и активных зон ледоколов за конкретный период эксплуатации: средняя эксплуатационная мощность, коэффициенты использования номинальной мощности и календарного времени, а также годовая энерговыработка как отдельных ледоколов, так и групп ледоколов (например, с двумя реакторами и одним реактором). На рис. 4 приведены статистические данные работы РУ атомных ледоколов до 2000 г. [11]. Средняя мощность РУ за время эксплуатации с момента ввода до начала 2000 г. по атомным судам находится в диапазоне 55–87 МВт. Наибольшая средняя мощность у ледоколов с одной РУ типа «Таймыр» составляет в среднем 84 МВт, у ледоколов с двумя РУ типа «Россия» средняя мощность — 67 МВт, т. е. средняя мощность загрузки РУ двухреакторных ледоколов меньше средней мощности РУ однореакторных ледоколов. При этом следует отметить появление тенденции к снижению средней эксплуатационной мощности за счет увеличения времени стоянки в труднопроходимых районах арктических морей в ожидании проводки транспортных судов.

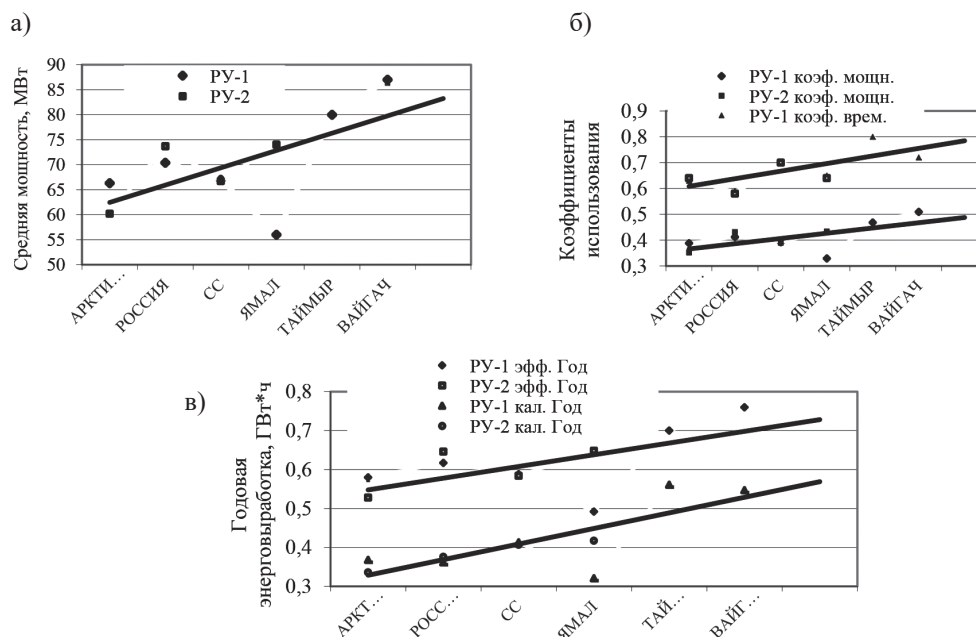


Рис. 4. Статистические данные по работе РУ атомных ледоколов с начала эксплуатации до 2000 г. (включительно): а — средняя мощность; б — коэффициенты использования номинальной мощности и календарного времени; в — годовая энерговыработка

Энерговыработка за эффективный год для ледоколов с двумя РУ находится в пределах 0,5–0,65 ГВт · ч (средняя 0,587 ГВт · ч). Средняя энерговыработка за эффективный год для ледоколов с одним реактором составляет 0,73 ГВт · ч. Таким образом, при более интенсивном выгорании ядерного топлива на однореакторных ледоколах следует ожидать более частых перегрузок топлива. Средняя энерговыработка за календарный год (с учетом вынужденных простоев при неработающем реакторе) для двухреакторных ледоколов составляет 0,374 ГВт · ч, для однореакторных — 0,55 ГВт · ч. Простои в основном связаны с перегрузкой топлива, ремонтом парогенераторов и докованием.

Средний коэффициент использования номинальной мощности для ледоколов с двумя реакторами составляет $\varphi_m = 0,4$, для ледоколов с одним реактором — $\varphi_m = 0,5$. Коэффициент использования

календарного времени в среднем для ледоколов типа «Россия» составляет $\varphi_k = 0,64$, типа «Таймыр» — $\varphi_k = 0,76$. При более интенсивном выжигании ЯТ на однореакторных ледоколах увеличивается коэффициент использования календарного времени, однако при этом возрастает время простоев при перегрузке топлива. В целом наблюдается возрастание всех показателей (средняя мощность, коэффициентов использования и годовой энерговыработки) для вновь вводимых атомных ледоколов. Наименьшие показатели из двухреакторных ледоколов для а/л «Арктика» и наибольшие для а/л «Ямал».

На рис. 5 и 6 представлены обобщенные данные режимов эксплуатации парогенераторов на атомных ледоколах за период 1974–2000 гг. по данным [12]. Для атомных ледоколов с двумя РУ характерна длительная работа (37 % времени) в диапазоне мощностей 10–20 %, что соответствует *стояночному режиму ледокола* с работающим реактором. Второй пик соответствует относительной продолжительности работы РУ 23 % общего времени эксплуатации с мощностью РУ в диапазоне 40–60 %. Анализ статистики по режимам использования РУ в процессе эксплуатации ледоколов показывает, что значительное время они находятся в режиме ожидания проводки.

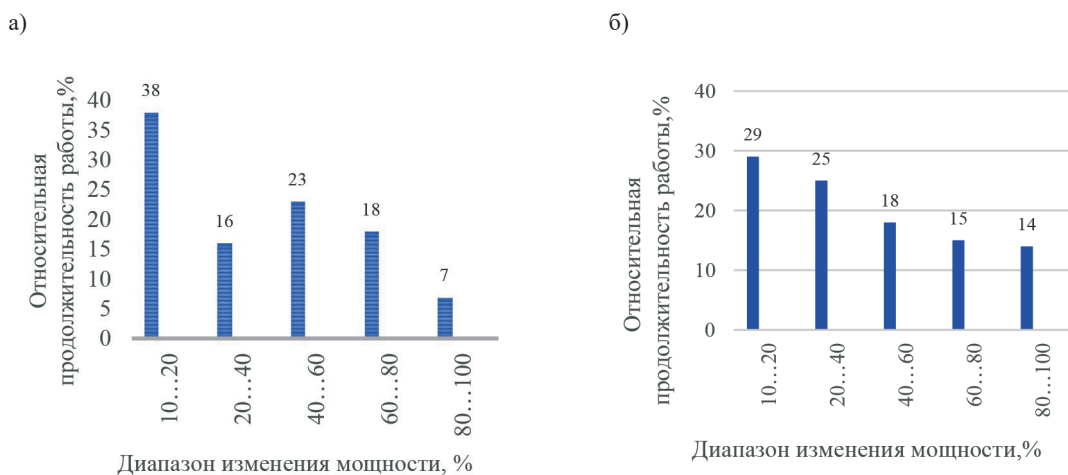


Рис. 5. Обобщенные гистограммы относительной продолжительности работы ПГ (РУ) ледоколов с двумя и одной РУ в заданном диапазоне мощности: а — две РУ; б — одна РУ

Для ледоколов с одной РУ относительное время работы в стояночном режиме составляет около 29 % общего времени. Однако также значительным является время использования РУ в диапазоне мощности 80–100 %, которое составляет около 14 %. В целом характер распределения относительного времени использования РУ в различных диапазонах мощности далек от *нормального закона* и близок к *экспоненциальному закону*. Наибольшее количество изменений мощности (более 80 % от общего числа) парогенераторов ПГ-18 осуществляется с глубиной менее 15 % Q_{p0} , а с глубиной более 15 % Q_{p0} составляет менее $5 \cdot 10^3$ циклов (рис. 6).

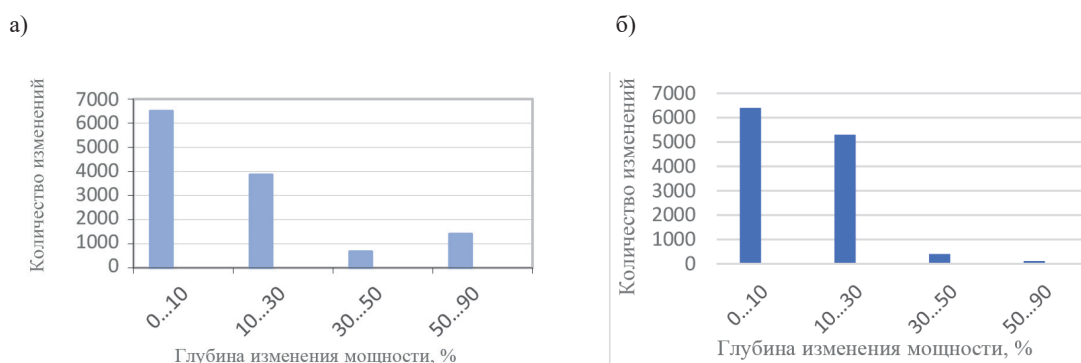


Рис. 6. Обобщенные гистограммы количества изменений мощности ПГ-18 и ПГ-28 на заданную глубину за период 1974–2000 гг.: а — ПГ-18; б — ПГ-28

На рис. 7 показаны гистограммы по количеству изменений мощности РУ в фиксированных диапазонах мощности для ледоколов с двумя и одним реактором, построенные по данным «ОКБМ Африкантов» [11].

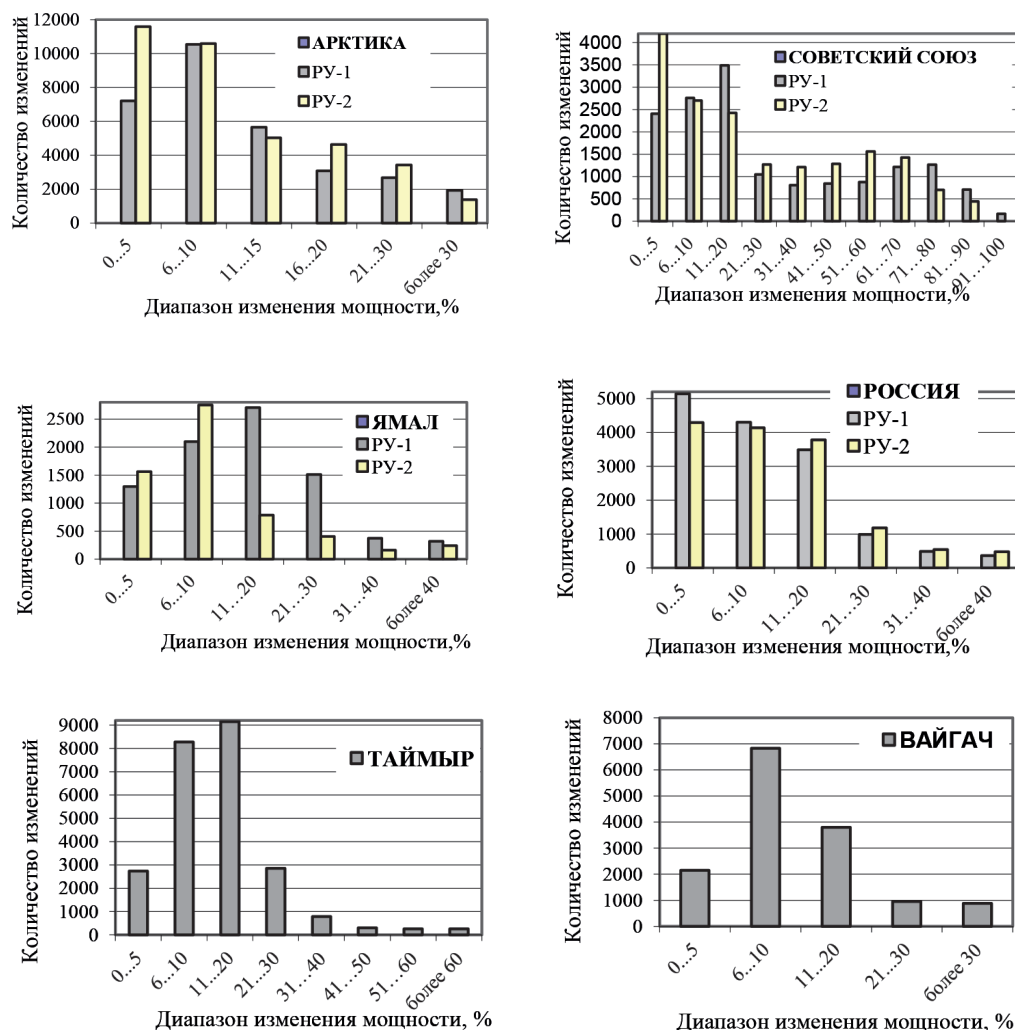


Рис. 7. Количество изменений мощности РУ в фиксированных диапазонах мощности для ледоколов с одним и двумя реакторами

При этом общее количество маневров мощностью возрастает одновременно с длительностью использования ледоколов в Арктике. Однако в относительном сопоставлении режимов можно выявить индивидуальный «подчерк» работы ледоколов в ледовых условиях. В целом наблюдается существенный разброс маневренных режимов использования по отдельным ледоколам, что дает основания для анализа реальных возможностей РУ по маневренности. По ряду ледоколов просматривается статистическое распределение, близкое к нормальному закону, а также экспоненциальному.

Обсуждение (Discussion)

В табл. 3 приведены результаты оценочных расчетов с использованием формул (4), (5), (9), (15) и статистических данных, приведенных на рис. 7. Следует отметить, что адекватность результатов оценочных расчетов во многом зависит от достоверности предоставляемых ледоколами данных. Например, приведенные статистические данные по маневренности РУ а/л «Советский Союз» отличаются большей детализацией по поддиапазонам изменения мощности РУ. Данные, полученные с а/л «Арктика», «Россия», «Ямал» и «Вайгач», не отражают значительную часть поддиапазонов с глубокими изменениями мощности.

Таблица 3

**Маневренные режимы эксплуатации РУ и активных зон атомных ледоколов
на момент подведения общих итогов**

Характеристика	Ледоколы									
	Арктика		Россия		СС		Ямал		Таймыр	Вайгач
	РУ1	РУ2	РУ1	РУ2	РУ1	РУ2	РУ1	РУ2	РУ1	РУ1
Время эксплуатации, лет	25		15		11		8		11	10
Примерное количество полностью или частично использованных активных зон	5	5	3	3	2	2	1,6	1,6	2	1,8
Коэффициент использования календарного времени	0,63		0,58		0,7		0,65		0,8	0,7
Доля изменений мощности в диапазоне 0–15 %	73	75	78	80	50	52	65	80	80	80
Суммарное количество эквивалентных циклов на РУ	$2,5 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4$	10^4	$1,1 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^3$	$4,5 \cdot 10^3$	$2,27 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$
Среднее количество эквивалентных циклов на активную зону	$5 \cdot 10^3$	$5,6 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^4$	$5,6 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^4$	$0,6 \cdot 10^4$
Средняя плотность эквивалентных циклов изменения мощности на активную зону, 1/сут	4,4	4,9	3,1	3,4	11,9	12,7	4,7	2,4	7,6	4,8

Анализ выполненных изменений мощности в различных поддиапазонах для ледоколов с двумя реакторами позволяет установить, что наибольшее количество этих изменений приходится на поддиапазоны до 15 % номинальной мощности. Если рассматривать конкретные ледоколы по *детализации отчетности*, то наибольшее количество эквивалентных циклов для двухреакторных ледоколов выполнено на а/л «Советский Союз» ($3,1 \cdot 10^4$ – $3,2 \cdot 10^4$), для одnoreакторных — на а/л «Таймыр» ($2,27 \cdot 10^4$). Возможно, что данный результат для ледокола «Советский Союз» получен в результате более полной детализации отчетности по режимам изменения мощности. При этом доля изменений мощности для а/л «Советский Союз» с глубиной до 15 % составляет 50 и 52 % от общего количества, что совсем не характерно для других атомных ледоколов, на которых данные маневры составляют 73–80 % от общего количества изменений мощности.

Наибольшая средняя плотность эквивалентных циклов изменения мощности в сутки на активную зону также характерна для а/л «Советский Союз» и а/л «Таймыр». При этом для остальных ледоколов плотность эквивалентных циклов находится в пределах 3–5 в сутки. Наибольшее среднее эквивалентное число циклов изменения мощности на активную зону с учетом значимости интервала характерно для а/л «Советский Союз» ($1,5 \cdot 10^4$ – $1,6 \cdot 10^4$), и «Таймыр» ($1,1 \cdot 10^4$), причем эти значения меньше предусмотренных для активных зон по ТУ — $2 \cdot 10^4$.

Статистический анализ режимов эксплуатации (маневрирования) действующих атомных ледоколов позволяет сформировать адекватную модель эксплуатации для плавучих объектов с ЯЭУ. При этом более детальная модель эксплуатации в технической документации разработана в проекте ПЭБ «Академик Ломоносов», так как условия ее эксплуатации более предсказуемы. Здесь степень детализации проектных условий эксплуатации значительно выше, чем для РУ атомных ледоколов, находящихся в эксплуатации. Регламентированы глубины изменения мощности и диапазоны мощностей, в которых осуществляется маневрирование, количество и скорость работающих ЦНПК, скорость изменения мощности в каждом поддиапазоне и т. д.

Анализ показал, что для эксплуатируемого и вновь проектируемого оборудования РУ установлены различные требования по ее маневрированию и учету. Наибольшие ограничения на маневрирование связаны с активной зоной реактора и трубной системой парогенераторов. Таким образом, выполнение этих требований с большой вероятностью обеспечивают надежность всего оборудования РУ. Однако ледовые условия Арктики требуют большей маневренности от РУ, поскольку при этом увеличиваются экономические показатели атомных ледоколов [4]. При раздельном управлении РУ и ГЭУ за счет повышения маневренности можно добиться лучших технико-экономических показателей эксплуатации ледокола. Кроме того, в данном случае может дать значительный *эффект перехода* на «скользящее» давление в главном паропроводе при отключении функциональной связи АВ (см. рис. 1) [4].

Заключение (Conclusion)

Проведенные расчетно-теоретические исследования статистических материалов по маневренной эксплуатации реакторных установок атомных ледоколов при работе в условиях Арктики показали ряд особенностей. Учет маневренности (количества циклов) по глубине изменения мощности РУ осуществляется на основании оценки количества приведенных циклов *изменения мощности* по сумме перемещений питательного клапана. При этом учитывается базовое изменение мощности, предусмотренное ТУ на поставку активных зон. Показано, что данная оценка ведет к завышенному числу циклов при малой глубине изменения мощности, что можно считать приемлемым при консервативном подходе. Однако при увеличении глубины изменения мощности, когда повреждаемость активной зоны значительно возрастает, данный способ дает заниженную оценку количества приведенных циклов по отношению к базовому значению.

При учете значимости циклов с точки зрения степени воздействия на активную зону, оценивая эквивалентное число циклов, можно получить более адекватную оценку расходования ресурса за кампанию активной зоны. С учетом данного подхода выявлено, что на всех рассмотренных атомных ледоколах («Арктика», «Советский Союз», «Ямал», «Таймыр» и «Вайгач») эквивалентное число циклов не превышает значения заданного ТУ на поставку активных зон. Кроме того, наблюдается индивидуальный подход при маневрировании мощностью РУ на отдельных ледоколах. Исследования показали, что однореакторные ледоколы работают при более высокой средней мощности и количестве эквивалентных циклов изменения мощности РУ, что в большей степени влияет на деградационные процессы в активной зоне, приводя к увеличению количества перегрузок активных зон в течение периода эксплуатации РУ.

Отмечается также, что среднестатистические мощности отдельных реакторов на двухреакторных ледоколах, как правило, регулярно отличаются на величину до 30 %. При этом, как правило, количество маневров, осуществляемых отдельными РУ, также имеют отличия, что свидетельствует о ведущей роли в управлении одного из реакторов. Следует также отметить важность предоставления объективных данных по маневрированию с конкретных ледоколов. Полученные в статье результаты могут быть использованы при проектировании новых ядерных энергетических установок перспективных объектов морской техники гражданского назначения [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пустошный А. В. Проблемы, связанные с увеличением скорости круглогодичной работы крупнотоннажных транспортных судов в Арктике / А. В. Пустошный, К. Е. Сазонов // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3 (27). — С. 103–110. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-103-110.
2. Добродеев А. А. Проводка крупнотоннажных судов ледоколами с увеличенной скоростью: исследования в ледовом бассейне / А. А. Добродеев, К. Е. Сазонов // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 3 (31). — С. 76–83. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-76-83.
3. Добродеев А. А. Экспериментальные исследования возможности проводки ледоколом крупнотоннажных судов при буксировке вплотную / А. А. Добродеев, К. Е. Сазонов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 645–655. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655.

4. Королёв В. И. Повышение экономических показателей эксплуатации атомных ледоколов при проводке судов в Арктике / В. И. Королёв // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11. — № 2. — С. 244–253. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-244-253.

5. Зверев Д. Л. Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние / Д. Л. Зверев, Ю. П. Фадеев, А. Н. Пахомов [и др.] // Атомная энергия. — 2020. — Т. 129. — № 1. — С. 29–37.

6. Зверев Д. Л. Опыт создания и перспективы развития ядерных энергетических установок для ледокольного флота и энергообеспечения / Д. Л. Зверев, Ю. П. Фадеев, А. Н. Пахомов, В. И. Полуниничев // Атомная энергия. — 2018. — Т. 125. — № 6. — С. 318–322.

7. Королёв В. И. Основы эксплуатации и ремонта реакторных установок плавучих объектов с ядерной энергетической установкой: учеб. пособие: в 2 ч. / В. И. Королёв. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. — Ч. I. — 312 с.

8. Королёв В. И. Обеспечение надежности ядерных реакторов плавучих объектов при проектировании и эксплуатации: монография / В. И. Королёв, А. Ю. Ластовцев. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — 204 с.

9. Кириллов П. Л. Справочник по теплоэнергетическим расчетам: (Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / П. Л. Кириллов, Ю. С. Юрьев, В. П. Бобков; Под общ. ред. П. Л. Кириллова. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 296 с.

10. ПНАЭ Г-7-002-87. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок / Госатомэнергонадзор СССР. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 527 с.

11. Макаров В. И. Опыт создания и эксплуатации реакторных установок гражданских судов / В. И. Макаров, Б. Г. Пологих, Н. С. Хлопкин [и др.] // Атомная энергия. — 2000. — Т. 89. — № 3. — С. 179–189.

12. Кудинович И. В. Ядерные энергетические установки перспективных объектов морской техники гражданского назначения / И. В. Кудинович, А. Ж. Сутеева, В. Г. Хорошев // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № 4 (386). — С. 95–106. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-95-106.

REFERENCES

1. Pustoshny, Alexander V., and Kirill E. Sazonov. “Issues related to raising the speeds of heavy-tonnage cargo vessels during year-round arctic operations.” *Arctic: Ecology and Economy* 3(27) (2017): 103–110. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-103-110.

2. Dobrodeev, Aleksei Alekseevich, and Kirill Evgenevich Sazonov. “Fast-speed escorting of heavy tonnage vessels by icebreakers: researching in ice model tank.” *Arctic: Ecology and Economy* 3(31) (2018): 76–83. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-76-83.

3. Dobrodeev, Aleksei A., and Kirill E. Sazonov. “Experimental studying a possibility of close-coupled towing of large-sized vessels by icebreaker.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 645–655. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655.

4. Korolev, Vladimir I. “Improving the economic performance of nuclear icebreakers when navigating ships in the Arctic.” *Arctic: ecology and economy* 11.2 (2021): 244–253. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-244-253.

5. Zverev, D. L., Y. P. Fadeev, A. N. Pakhomov, V. Y. Galitskikh, V. I. Polunichiev, K. B. Veshnyakov, S. V. Kabin, and A. Y. Turusov. “Reactor installations for nuclear icebreakers: origination experience and current status.” *Atomic Energy* 129.1 (2020): 18–26. DOI: 10.1007/s10512-021-00706-x.

6. Zverev, D. L., Y. P. Fadeev, A. N. Pakhomov, and V. I. Polunichiev. “Nuclear power plants for the icebreaker fleet and power generation in the arctic region: development experience and future prospects.” *Atomic Energy* 125.6 (2019): 359–364. DOI: 10.1007/s10512-019-00494-5.

7. Korolev, V. I. *Osnovy ekspluatatsii i remonta reaktornykh ustanovok plavuchikh ob'ektov s yadernoi energeticheskoi ustanovkoi*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2019.

8. Korolev, V. I., and A. Yu. Lastovtsev. *Obespechenie nadezhnosti yadernykh reaktorov plavuchikh ob'ektov pri proektirovanii i ekspluatatsii: monografiya*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017.

9. Kirillov, P. L., Yu. S. Yur'ev, and V. P. Bobkov. *Spravochnik po teploenergeticheskim raschetam: (Yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory)*. Edited by P. L. Kirillov. M.: Energoatomizdat, 1984.

10. Rules and regulations in the nuclear power industry G-7-002-87. Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok / Gosatomenergonadzor SSSR. M.: Energoatomizdat, 1989.

11. Makarov, V. I., B. G. Pologikh, N. S. Khlopin, F. M. Mitenkov, Y. K. Panov, V. I. Polunichev, and O. A. Yakovlev. "Experience in building and operating reactor systems for civilian ships." *Atomic Energy* 89.3 (2000): 691–700. DOI: 10.1023/a:1009454731116.

12. Kudinovich, Igor V., Adelina Zh. Suteeva, and Vitaly G. Khoroshev. "Nuclear power plants for advanced civil marine technology." *Transactions of the Krylov State Research Centre* 4(386) (2018): 95–106. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-95-106.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Королёв Владимир Ильич —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: vlikor2007@yandex.ru, kaf_snef@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Korolev, Vladimir I. —
PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: vlikor2007@yandex.ru, kaf_snef@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 23 декабря 2022 г.
Received: December 23, 2022.*

EXPERIMENTAL METHODS FOR ASSESSING THE MATERIALS QUALITY OF LINING FOR THE SHIP BOILERS COMBUSTION CHAMBERS

V. A. Zhukov¹, I. V. Ershova²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

² — Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russian Federation

Autonomous boilers, the most important element of which is the combustion chamber, are widely used in ship power plants. A necessary condition for a high resource of boilers and their trouble-free operation is the high quality of the lining of the furnace space, operating under variable thermal conditions. The quality of the material from which it is made has a decisive influence on the reliability of the lining. The methods of experimental research that can be used to assess the quality of materials for lining the furnace spaces of autonomous boilers are described in the paper. The methodology of conducting research using the method of equivalent materials is presented, laboratory installations for conducting vibroacoustic studies and modal analysis of spectrograms and thermal imaging studies of samples of lining materials are described. As a result of the research, information on the influence of conditions for the formation of equivalent materials samples on their thermophysical properties, spectrograms of the state of brickwork bricks made of various materials, thermal images of lining elements in a stationary temperature field at different locations on the heater is obtained. The results obtained indicate the expediency of using the proposed methods at all stages of the life cycle of autonomous boilers: when designing for a rational choice of lining materials taking into account operational factors, during manufacture and repair during operation to control the quality of materials used and detect hidden defects. In order to increase the effectiveness of the proposed experimental methods for assessing the quality of lining materials of boiler combustion chambers, it is necessary to expand the practice of their use, the accumulation of the results obtained and their statistical processing, which allows us to determine the error of the methods and improve laboratory installations.

Keywords: autonomous boilers, combustion chambers, lining material, equivalent materials, experimental methods, modal analysis, non-destructive thermal imaging control, recommendations for use.

For citation:

Zhukov, Vladimir A., and Irina V. Ershova. "Experimental methods for assessing the materials quality of lining for the ship boilers combustion chambers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 126–134. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-126-134.

УДК 621.18

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ ФУТЕРОВКИ ТОПОЧНЫХ КАМЕР СУДОВЫХ КОТЛОВ

В. А. Жуков¹, И. В. Ершова²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», Архангельск, Российская Федерация

Предметом исследования являются автономные котлы, важнейшим элементом которых служит топочная камера, получившие широкое применение в судовых и корабельных энергетических установках. Подчеркивается, что необходимым условием высокого ресурса эксплуатации котлов и их безаварийной эксплуатации является высокое качество футеровки топочного пространства, работающей в условиях переменных тепловых режимов, а также отмечается, что определяющее влияние на надежность футеровки оказывает качество материала, из которого она изготовлена. В статье описаны методы экспериментальных исследований, которые могут быть использованы для оценки качества материалов обмуровки топочных пространств автономных котлов. Представлена методика проведения исследований с использованием эквивалентных материалов, описаны лабораторные установки для проведения виброакустических исследований и проведения модального анализа спектрограмм и тепловизионных исследований образцов

материалов футеровки. В результате проведенных исследований получены сведения о влиянии условий формирования образцов эквивалентных материалов на их теплофизические свойства, спектрограммы состояния кирпичей обмуровки из различных материалов, тепловые изображения элементов футеровки в условиях стационарного температурного поля при их различном расположении на нагревателе. Полученные результаты исследования свидетельствуют о целесообразности применения предложенных методов на всех этапах жизненного цикла автономных котлов: от проектирования в целях рационального выбора материалов футеровки с учетом эксплуатационных факторов до изготовления и ремонта в процессе эксплуатации в целях контроля качества используемых материалов и обнаружения скрытых дефектов. С целью повышения эффективности применения предложенных экспериментальных методов оценки качества материалов футеровки топочных камер котлов необходимо увеличение практики их использования, накопление полученных результатов и их статистическая обработка, позволяющая определить погрешность методов и усовершенствовать лабораторные установки.

Ключевые слова: автономные котлы, топочные камеры, материал футеровки, эквивалентные материалы, экспериментальные методы, модальный анализ, неразрушающий тепловизионный контроль, рекомендации по применению.

Для цитирования:

Жуков В. А. Экспериментальные методы оценки качества материалов футеровки топочных камер судовых котлов / В. А. Жуков, И. В. Ершова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 126–134. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-126-134.

Введение (Introduction)

В состав энергетических установок судов и кораблей различного назначения в качестве главных и вспомогательных элементов входят *автономные котлы* — первые тепловые машины, появившиеся на флоте [1]. Несмотря на более чем двухсотлетнюю историю применения котлов в судовой и корабельной энергетике задачи, связанные с их модернизацией, остаются актуальными. Непрерывное увеличение энерговооруженности судов и кораблей приводит к форсированию основных элементов энергетических установок, в том числе котлов. Наиболее теплонагруженным элементом автономных котлов являются топочные устройства, нарушения в работе которых приводят к выходу котлов из строя и серьезным авариям [2]–[4]. Условия работы судовых котлов осложняются также быстрой и частой сменой нагрузки. Для продолжительной и надежной работы котлов необходимо обеспечить прочность их конструкций, в частности футеровки.

Судовые котельные агрегаты футеруются огнеупорными материалами, во многом определяющими срок службы котла. При тепловом воздействии на теплоизоляционные материалы футеровки возникают термические напряжения, приводящие к деформации, растрескиванию и разрушению кирпичной кладки. Кроме того, многолетняя практика эксплуатации судовых паровых котлов показывает, что разрушение обмуровочных поверхностей топок остается одной из наиболее распространенных причин аварий, сопровождающихся выходом котлов из строя. В настоящее время уровень аварийности котлов продолжает оставаться существенно выше аварийности остального судового энергетического оборудования [5].

При выборе материалов для футеровки котла и технологии кладки необходимо учитывать как эксплуатационные воздействия на футеровку [6]–[8], так и свойства материалов [9]. К основным из них относятся теплопроводность, огнестойкость, термостойкость и механическая прочность. Наиболее достоверные сведения о свойствах материалов можно получить, используя сочетание различных методов исследования. Результаты, полученные с использованием методов численного моделирования процессов теплообмена в футеровке котла, описаны в работах [10], [11]. Дополнительная информация о свойствах материалов футеровки может быть получена в результате проведения физических экспериментов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При проведении экспериментальных исследований свойств футеровочных материалов, используемых в автономных котлах, применялись три метода: метод эквивалентных материалов (МЭМ),

метод модального анализа спектрограмм и тепловизионный метод. Сущность МЭМ заключается в том, что на физических моделях при соблюдении условий подобия изучаются зависимости физических свойств материалов от различных факторов с целью разработки рекомендаций по использованию материалов. Корректность выбора эквивалентного материала (ЭМ) оказывает существенное влияние на результат решения конкретной задачи моделирования. Эквивалентные материалы представляют собой разновидность широкого класса композитных материалов (КМ) многокомпонентных систем на основе наполнителя и связующего.

Существует несколько способов представления и описания структуры КМ. Одним из наиболее общих является рассмотрение ее как частного случая структур дисперсных систем. П. А. Ребиндером выделено три типа структур: коагуляционная, конденсационная и кристаллизационная. Для моделирования кирпичной кладки наиболее предпочтительной является *конденсационная структура*, характеризующаяся наличием непосредственного контакта между частицами, обеспечивающего высокую прочность. Одновременно существует *жидкая фаза* в виде тончайших прослоек. При выборе эквивалентного материала рекомендуется использовать соотношение [12]:

$$R_m = \frac{L_m \rho_m}{L_n \rho_n} R_n, \quad (1)$$

где R_m, R_n — соответственно предел прочности на сжатие материала модели и натуре;

L_m, L_n — линейные размеры материала модели и натуре;

ρ_m, ρ_n — соответственно плотности материала модели и натуре.

Для соблюдения подобия при моделировании упругих систем необходимо выполнение следующих условий:

$$E_m = \frac{L_m \rho_m}{L_n \rho_n} E_n; \quad (2)$$

$$\mu_m = \mu_n, \quad (3)$$

где E_m, E_n — модули упругости материалов модели и натуре соответственно;

μ_m, μ_n — коэффициенты Пуассона.

На основании указанных рекомендаций предложены ЭМ для изучения влияния условий формирования материала на его теплофизические свойства. В качестве ЭМ при проведении исследований использовались *композитные материалы* на основе древесной стружки, имитирующие футеровочные материалы. Эквивалентный материал помещался в матрицу диаметром 104 мм, высотой 50 мм (рис. 1) и подвергался *сжатию гидравлическим прессом* П6334 (рис. 2). Давление, создаваемое прессом в опытных образцах, изменялось в диапазоне от 25 МПа до 100 МПа.

Определение теплопроводности исходных материалов и образцов ЭМ осуществлялось с помощью прибора МИТ-1, определение теплоемкости исходных материалов и образцов — с помощью прибора ИТ-С-400.



Рис. 1. Матрица для формирования опытных образцов



Рис. 2. Гидравлический пресс П6334

Модальный анализ является эффективным экспериментальным методом определения динамических характеристик конструкций и материалов на основе результатов измерений и анализа вынужденных механических колебаний. Соединенные с анализатором датчик силы и акселерометр позволяют проводить одновременные измерения вынуждающей динамической силы и результирующих механических колебаний исследуемой конструкции. В результате обработки данных, осуществляемой анализатором, может быть получена информация, необходимая для определения динамических характеристик исследуемой конструкции или материала.

Существует два метода модального анализа: традиционный и операционный. В случае использования *традиционного модального метода* создается контролируемое входное возбуждение и проводится анализ между выходным откликом и входным возбуждением. Источником входного возбуждения является ударный молоток или электродинамический возбудитель со встроенным датчиком силы. В реальных условиях эксплуатации для сложных конструкций с многомодальными колебаниями не существует возможности проведения традиционного модального анализа. *Операционный модальный метод* позволяет выполнить анализ с использованием только выходного отклика конструкции. Частотный анализ кирпича, изготовленного из футеровочного материала, проводился на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 3 [13].

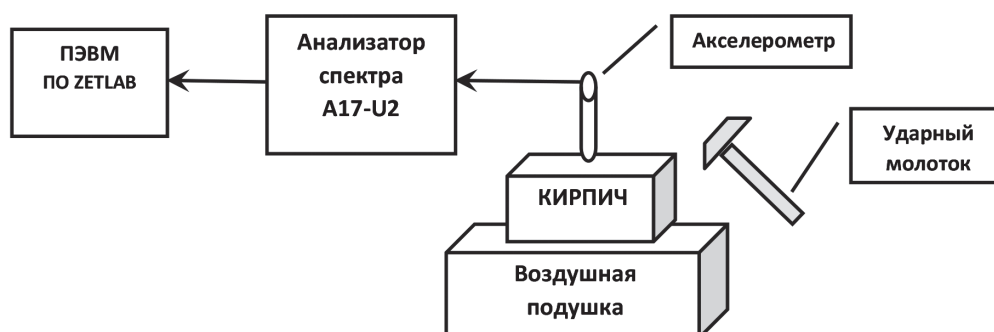


Рис. 3. Функциональная схема экспериментальной установки для модального анализа материала

Для предотвращения повреждений обмуровки котлоагрегатов рекомендуется тщательно проверять поступающие огнеупоры. При внешнем осмотре изделий они должны иметь чистый и однородный вид, минимальное количество темных пятен, правильные размеры и звонкость.

Не допускаются слоистость, кривизна, перекосы и трещины. Обычная система контроля качества обмуровки основана на отборе изделий и последующем испытании выпиленных из изделий образцов. Стремление сохранить готовую продукцию от разрушения и одновременно повысить оперативность контроля привело к разработке *методов неразрушающего контроля*. В огнеупорной промышленности нашли применение методы звукового и радиометрического (изотопного) контроля, при применении которых изделия не разрушаются. Первый метод применяют при паспортизации готовых изделий, второй — преимущественно при контроле технологического процесса.

Возможности неразрушающих методов могут быть расширены за счет применения *тепловизионного контроля*. Методы неразрушающего контроля тепловизионного вида используют при исследовании тепловых процессов в изделии, причем в большинстве случаев регистрируют поверхностное тепловое или температурное поле объекта контроля, в пространственно-временной структуре которого содержатся «отпечатки» внутренних геометрических или теплофизических аномалий [14]. Методы теплового контроля основаны на взаимодействии теплового поля объекта с термометрическими чувствительными элементами (термопарой, фотопремником и др.), преобразовании параметров поля (интенсивности, температурного градиента и др.) в электрический или другой сигнал и передаче его на регистрирующий прибор. Необходимым условием применения теплового контроля является отличие интегральной или локальной температуры изделий от температуры окружающей среды, которое создается либо искусственно с помощью внешних источников теплового нагружения, либо в силу естественных причин при изготовлении или функционировании изделий.

Стендовые и промышленные испытания обмуровок котлов рекомендуются стандартами, однако для формованных изделий при стендовом тепловом контроле следует учесть их конструктивные особенности и способы теплового воздействия. Схема разработанного и использованного в экспериментальных исследованиях стенда приведена на рис. 4.

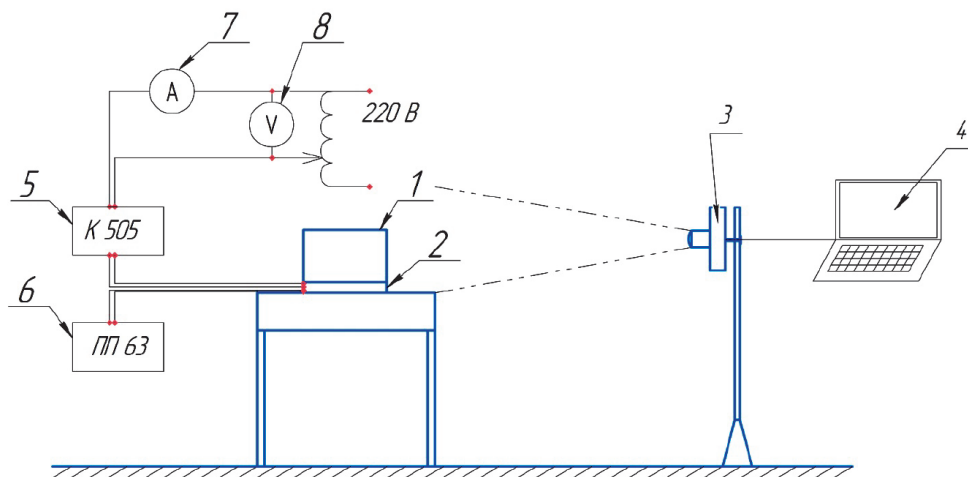


Рис. 4. Схема экспериментального стенда тепловизионного контроля:
1 — образец; 2 — источник теплового нагружения; 3 — тепловизор;
4 — персональный компьютер; 5 — измерительный комплект K-505;
6 — потенциометр ПП-63; 7 — амперметр; 8 — вольтметр

Мощность теплового электрического нагревателя (ТЭН) составила 500 Вт, время нагрева образца — 5 мин. Температурное поле при проведении эксперимента регистрировалось тепловизором с одной стороны ложковой и постельной граней образца. Образцами при проведении виброакустических и тепловизионных исследований являлись кирпичи наиболее распространенных марок, используемых при изготовлении футеровки: кирпич шамотный ША-5, кирпич шамотный ША-8, кирпич пенодиатомитовый КПД-400, а также кирпич силикатный М-150 и кирпич строительный красный.

Результаты (Results)

В результате применения МЭМ установлено, что давление, оказываемое при формировании опытных образцов, влияет на их теплофизические характеристики: плотность и теплопроводность материала возрастают практически линейно, а его теплоемкость меняется менее значительно. Изменение коэффициента температуропроводности a (рис. 5) рассчитывается по формуле

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho},$$

где λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

c_p — удельная изобарная теплоемкость материала, кДж/(кг·К);

ρ — плотность материала, кг/м³.

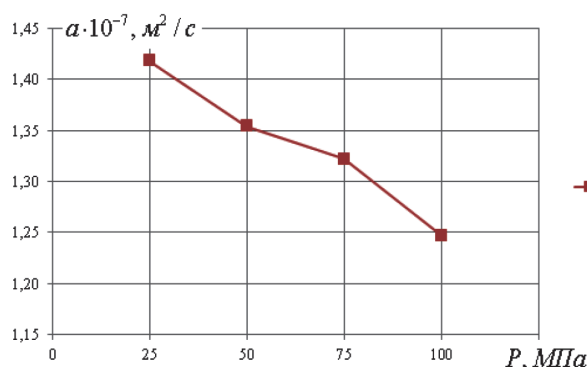


Рис. 5. Изменение коэффициента температуропроводности эквивалентных материалов в зависимости от давления сжатия образца

В результате применения *модального метода исследований* была получена серия спектрограмм для футеровочных кирпичей, изготовленных из различных материалов. Пример спектрограммы приведен на рис. 6.

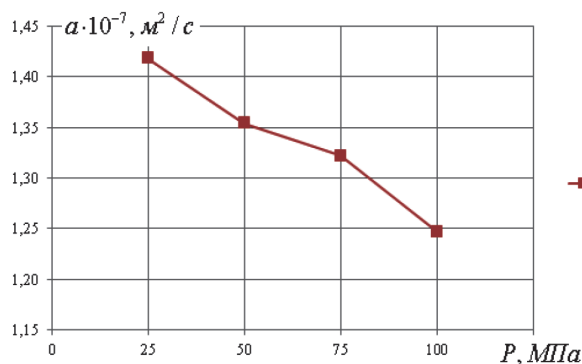


Рис. 6. Спектрограмма состояния кирпича шамотного марки ША-5, расположенного постельной гранью после входного возбуждения (удара)

Обработка модальных характеристик различных футеровочных материалов позволяет сделать вывод о том, что применение данного метода целесообразно при выборе материала футеровки и определении расположения кирпича в кладке. Спектрограммы позволяют также выявлять внутренние дефекты в элементах футеровки. Результатами тепловизионного контроля являются тепловые изображения, которые характеризуют распределение температур в кирпичах, изготовленных из различных материалов. Пример такого изображения приведен на рис. 7.

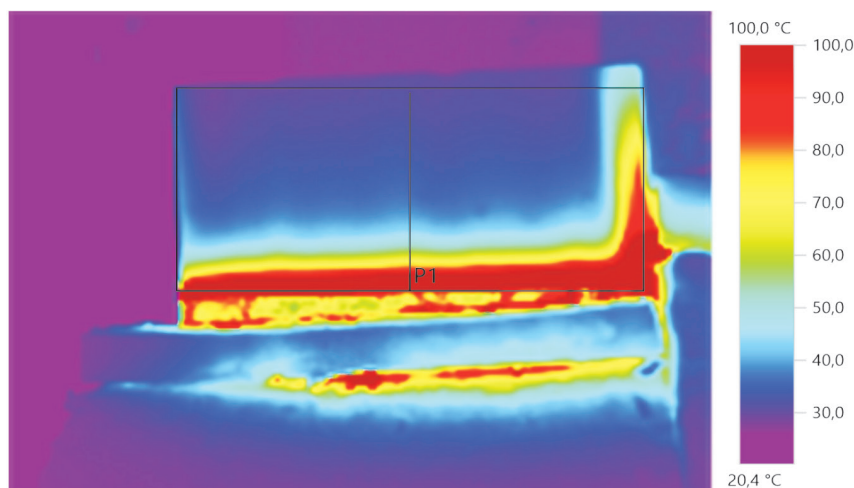


Рис. 7. Тепловое изображение кирпича пенодиатомитового КПД-400

Вид теплового изображения элемента футеровки позволяет определить *зоны тепловых неоднородностей*, которые могут быть связаны с изменением плотности, теплоемкости или теплопроводности структурных элементов огнеупора. Изломы изотермических поверхностей неоднозначно свидетельствуют о внутренних геометрических или теплофизических аномалиях изделия, снижающих его качество.

Обсуждение (Discussion)

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что применение физических методов различной природы позволяет получать информацию о качестве материалов футеровки топочных камер автономных котлов и достоверно с высокой точностью определять расположение внутренних дефектов. Рассмотренные экспериментальные методы позволяют осуществлять рациональный выбор материала при проектировании котлов в зависимости от эксплуатационных факторов, выполнять входной контроль качества материалов футеровки, а также разрабатывать мероприятия по совершенствованию технологии изготовления футеровочных материалов и монтажа обмуровки топочных камер.

Разработанные экспериментальные установки могут быть использованы как на предприятиях, выпускающих футеровочные материалы, так и на предприятиях, осуществляющих проектирование, производство и ремонт судовых и корабельных автономных котлов на всех этапах жизненного цикла изделий. Для более эффективного использования предложенных методов необходимо расширение их практического применения, анализ накопленного опыта и статистическая обработка полученных результатов, позволяющая определить погрешность методов и усовершенствовать лабораторные установки.

Выводы (Summary)

На основании проведенных исследований и полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Использование метода эквивалентных материалов целесообразно использовать для предварительного определения теплофизических свойств материалов (теплоемкости, теплопроводности, температуропроводности) в зависимости от структуры материала и способов его получения, а также оценки возможных температурных напряжений в футеровках энергетических котлов, работающих в условиях переменных температурных режимов.

2. Применение виброметрических исследований обмуровочных материалов котельных агрегатов является перспективным для выявления некачественных материалов на стадии подготовки производства, а также в процессе изготовления и ремонта судовых и корабельных автономных котлов.

3. Полученные результаты тепловой диагностики опытных образцов обмуровки, изготовленных из различных материалов, свидетельствуют о перспективности данного метода для оперативного неразрушающего контроля изоляционных и обмуровочных материалов энергетических котлов с целью выявления скрытых дефектов и аномалий плотности и теплопроводности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казенов С. В. Паровая турбина — главный двигатель надводных кораблей ВМФ / С. В. Казенов, В. С. Казенов. — СПб.: Фонд «Отечество», 2016. — 400 с.
2. Денисенко Н. И. Идентификация повреждений элементов судовых котельных установок / Н. И. Денисенко, И. И. Костылев. — СПб.: Элмор, 2007. — 152 с.
3. Петров А. И. Оценка причин повреждений обмуровок в топках судовых паровых котлов / А. И. Петров // Вестник МГТУ: труды Мурманского гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 18. — № 1. — С. 17–19.
4. Жуков В. А. Характерные повреждения судовых автономных котлов в процессе эксплуатации / В. А. Жуков, И. В. Ершова // Сборник тезисов докладов национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2022. — С. 30–31.
5. Епихин А. И. Безопасность эксплуатации судовых котлов / А. И. Епихин // Global science. Development and novelty. Collection of scientific papers, on materials of the VI International Scientific Conference. — Geneva: Ed. SPC “LJournal”, 2017. — Vol. Part 3. — Pp. 33–36. DOI: 10.18411/gdsn-25-12-2017-39.
6. Бразновский В. К. Анализ качества эксплуатации вспомогательных котельных установок судов флота рыбной промышленности / В. К. Бразновский, В. Т. Томилко // Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии: материалы IV Междунар. науч. конф. — Калининград: Калининградский гос. техн. ун-т, 2018. — С. 262–268.
7. Яковлев П. В. Безопасная эксплуатация судовых паровых котлов, отработавших нормативный срок службы / П. В. Яковлев, Н. Н. Панасенко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: морская техника и технология. — 2010. — № 2. — С. 119–124.
8. Жуков В. А. Анализ эксплуатационных воздействий на стенки камер сгорания судовых котлов / В. А. Жуков, И. В. Ершова // Актуальные проблемы морской энергетики: материалы одиннадцатой междунар. науч.-техн. конф. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2022. — С. 200–202. DOI: 10.52899/9785883036322_200_202.
9. Петров А. И. Применение огнеупорных материалов при ремонте топок судовых котлов и инсинераторов / А. И. Петров, А. А. Егоров // Наука производству: материалы междунар. науч.-практ. конф. — Мурманск: Мурманский гос. техн. ун-т, 2016. — С. 285–290.
10. Bşhan V. Application of Fuzzy Dematel Technique to Assess Most Common Critical Operational Faults of Marine Boilers / V. Bşhan, H. Demirel // Politeknik Dergisi. — 2019. — Vol. 22. — Is. 3. — Pp. 545–555.
11. Стенин В. А. Моделирование тепловых процессов в футеровке судового котла / В. А. Стенин, И. В. Ершова, В. А. Жуков // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 4–1 (54). — С. 112–116. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.040.
12. Стенин В. А. Метод эквивалентных материалов в исследовании деформаций футеровки котла / В. А. Стенин, И. В. Ершова, И. С. Светлов // Наука и инновации — современные концепции: сборник научных статей по итогам работы междунар. науч. форума / Отв. ред. Д. Р. Хисматуллин. — М.: Изд-во «Инфинити», 2020. — С. 105–111.
13. Стенин В. А. Модальный анализ в диагностике кирпичной кладки / В. А. Стенин, И. В. Ершова, Е. А. Хорохонов // Там же / Отв. ред. Д. Р. Хисматуллин. — М.: Изд-во «Инфинити», 2019. — С. 141–149.
14. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В. П. Вавилов. — М.: ИД «Спектр», 2009. — 544 с.

REFERENCES

1. Kazenov, S. V., and V. S. Kazenov. *Parovaya turbina — glavnyi dvigatel' nadvodnykh korablei VMF*. SPb.: Fond «Otechestvo», 2016.
2. Denisenko, N. I., and I. I. Kostylev. *Identifikatsiya povrezhdenii elementov sudovykh kotel'nykh ustanovok*. SPb.: «Elmor», 2007.

3. Petrov, A. I. "Estimation of reasons of refractory damage in ship steam boilers" furnaces." *Vestnik of MSTU* 18.1 (2015): 17–19.
4. Zhukov, V. A., and I. V. Ershova. "Kharakternye povrezhdeniya sudovykh avtonomnykh kotlov v protsesse ekspluatatsii." *Sbornik tezisev dokladov natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S. O. Makarova»*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2022. 30–31.
5. Epikhin, A. I. "Operational safety of marine boilers." *Global science. Development and novelty. Collection of scientific papers, on materials of the VI International Scientific Conference*. Part 3. Geneva: Ed. SPC "LJournal", 2017. 33–36.
6. Braznovsky, Victor Krishevich, and Vladimir Timofeevich Tomilko. "Analysis of the quality of operation of auxiliary boilers vessels of the fishing industry fleet." *BALTIISKII MORSKOI FORUM. Materialy VI Mezhdunarodnogo Baltiiskogo morskogo foruma*. Kaliningrad: Kaliningradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2018. 262–268.
7. Yakovlev, Pavel Viktorovich, and Nickolay Nickitovich Panasenko. "Safe exploitation of ship steam-boilers worked for normative service term." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2010): 119–124.
8. Zhukov, V. A., and I. V. Ershova. "Analysis of operational impacts on the walls of combustion chambers of marine boilers." *Aktual'nye problemy morskoi energetiki: materialy odinnadtsatoi mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2022. 200–202. DOI: 10.52899/9785883036322_200_202.
9. Petrov, A. I., and A. A. Egorov. "Primenenie ognepurnykh materialov pri remonte topok sudovykh kotlov i insineratorov." *Nauka — proizvodstvu: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Murmansk: Murmanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016. 285–290.
10. Başhan, Veysi, and Hakan Demirel. "Application of fuzzy dematel technique to assess most common critical operational faults of marine boilers." *Politeknik Dergisi* 22.3 (2019): 545–555.
11. Stenin, Valery A., Irina V. Ershova, and Vladimir A. Zhukov. "Simulation of thermal processes in the lining of the ship's boiler." *Marine intellectual technologies* 4–1(54) (2021): 112–116. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.040
12. Stenin, V. A., I. V. Ershova, and I. S. Svetlov. "Metod ekvivalentnykh materialov v issledovanii deformatsii futerovki kotla." *NAUKA I INNOVATsii — SOVREMENNYE KONTSEPTsii. Sbornik nauchnykh statei po itogam raboty Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma*. Edited by D. R. Khismatullin. M.: Izdatel'stvo Infiniti, 2020. 105–111.
13. Stenin, V. A., I. V. Ershova, and E. A. Khorokhonov. "Modal'nyi analiz v diagnostike kirpichnoi kladki." *Nauka i innovatsii — sovremennye kontseptsii. Sbornik nauchnykh statei po itogam raboty Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma*. Edited by D. R. Khismatullin. M.: Izdatel'stvo Infiniti, 2019. 141–149.
14. Vavilov, V. P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoi kontrol'*. M.: ID Spektr, 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: zhukovva@gumrf.ru
Ershova Ирина Валерьевна — соискатель
ФГАОУ ВО «Северный (Арктический)
федеральный университет им. М. В. Ломоносова»
163002, Российская Федерация, г. Архангельск,
наб. Северной Двины, 17
e-mail: iv.ershova@nafu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhukov, Vladimir A. —
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: zhukovva@gumrf.ru
Ershova, Irina V. — Applicant
Lomonosov Northern (Arctic) Federal University
17 Severnaya Dvina embankment,
Arkhangelsk, 163002,
Russian Federation
e-mail: iv.ershova@nafu.ru

Статья поступила в редакцию 8 января 2023 г.
Received: January 8, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-135-144

INCREASING THE EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF SHIP POWER PLANTS COOLING SYSTEMS WITH JET HEAT REMOVAL DEVICES

K. Yu. Fedorovsky, N. K. Grinenko

Sevastopol State university, Sevastopol, Russian Federation

There are numerous cases when during the ship operation it is advisable to exclude for some time the intake of sea water used to cool the ship's power plant. The issues of the possibility of such operation of widely used open double-circuit cooling systems are considered. To this end, the systems can be switched to the sea water tanks available on board. Work according to this scheme is limited by the time of heating the available water to the maximum allowable temperature. The issues of increasing this time by rising the heat removal through the ship's plating are considered. To do this, the heated water is not simply discharged into the tank, but is jet supplied through the pipeline system directly to the inner surface of the ship's plating. Conducted visual and thermal engineering studies have shown that the best results are achieved with the use of a jet supply, supplemented by a screen one. As a result, a channel for hot water movement is formed between the screen and the ship's plating. Water radially spreads outward from the center of the screen, forming a fan jet. At the same time, the maximum flow velocity around the ship's plating and the temperature difference between hot and outboard water are ensured. The advantages of this method for supplying cooled water are confirmed by the thermal engineering studies. It is shown that in this case the heat transfer increases by 25...30 %, compared with the case of a simple jet water supply. As a result of processing numerous experimental data, generalizing similarity equations have been obtained. They allow you to calculate the heat transfer for various water flow regimes. The use of these devices allows you to increase the time of systems operation in a closed loop without receiving outside water. These devices are quite simple in design and can be used both at the stage of building a new ship, and when modernizing existing ships. An example of such devices introduction on self-propelled floating cranes is given.

Keywords: ecology, cooling system, ship power plant, heat transfer, screen supply, ship plating.

For citation:

Fedorovskiy, Konstantin Yu., and Nadezhda K. Grinenko. "Increasing the efficiency and environmental safety of ship power plants cooling systems with jet heat removal devices." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 135–144. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-135-144.

УДК: 629.12(075.4) 574.5

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК СО СТРУЙНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ ТЕПЛОТВОДА

К. Ю. Федоровский, Н. К. Гриненко

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Севастополь, Российская Федерация

Темой исследования является подтверждение целесообразности в процессе эксплуатации судна включения в течение некоторого промежутка времени приема забортной воды, используемой для охлаждения судовой энергетической установки. Рассмотрены вопросы возможности такой работы на примере широко распространенных разомкнутых двухконтурных систем охлаждения при условии, что эти системы могут быть переключены на имеющиеся на судне цистерны с забортной воды. Отмечается, что работа по такой схеме ограничена временем нагрева имеющейся воды до максимально допустимой температуры. Рассматриваются вопросы увеличения этого времени за счет повышения теплоотвода через судовую обшивку. Для этого нагретая вода не просто сбрасывается в цистерну, а струйно подается через систему трубопроводов непосредственно на внутреннюю поверхность судовой обшивки. Проведенные визуальные

и теплотехнические исследования показали, что оптимальные результаты достигаются при применении струйного подвода, дополненного экраном. В результате между экраном и судовой обшивкой формируется канал для движения горячей воды, которая радиально растекается от центра экрана наружу, формируя веерную струю. При этом обеспечиваются максимальные скорость обтекания судовой обшивки и температурный напор между горячей и забортной водой. Подчеркиваются преимущества данного метода подвода охлаждаемой воды, подтвержденные теплотехническими исследованиями. Показано, что при этом теплоотдача увеличивается на 25–30 % по сравнению с простым струйным подводом воды. В результате обработки многочисленных экспериментальных данных получены обобщающие уравнения подобия, позволяющие рассчитать теплоотдачу при различных режимах течения воды. Применение указанных устройств позволяет увеличить время работы систем по замкнутому контуру без приема забортной воды, что с экологической точки зрения дает возможность снизить негативное воздействие на морские ресурсы. Отмечается, что ввиду достаточно простой конструкции данных устройств, они могут применяться как на этапе постройки нового судна, так и при модернизации существующих судов. В работе приведен пример внедрения таких устройств на самоходных плавкранах.

Ключевые слова: экология, система охлаждения, судовая энергетическая установка, теплоотдача, экранный подвод, судовая обшивка.

Для цитирования:

Федоровский К. Ю. Повышение эффективности и экологической безопасности систем охлаждения судовых энергетических установок со струйными устройствами теплоотвода / К. Ю. Федоровский, Н. К. Гриненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 135–144. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-135-144.

Введение (Introduction)

Важную роль среди систем, обеспечивающих работу судовой энергетической установки (СЭУ), играет система охлаждения, осуществляющая в большинстве случаев отвод теплоты в окружающую акваторию. Как правило, такие системы выполняются *двухконтурными*. Через охлаждаемое оборудование циркулирует пресная вода, которая охлаждается забортной водой, циркулирующей по другому контуру. Нарушение в работе системы охлаждения может привести к прекращению работы СЭУ и, как следствие, — к аварийной ситуации судна. Такому развитию событий может способствовать нахождение судна в сильно загрязненной акватории, ледовой шуге и т. д. Кроме того, необходимо отметить важность *экологического аспекта*. Если судно заходит в район интенсивного рыболовства, то разомкнутая система охлаждения негативно воздействует на рыбные ресурсы этого района. Суть этого воздействия состоит в том, что происходит уничтожение кормовой базы рыб (планктона), икринок рыб и рыбной молоди. Проходя через систему, они подвергаются интенсивному механическому и тепловому воздействию, вследствие чего практически все погибают [1], [2].

Вопросам создания *более эффективных систем охлаждения* уделяется большое внимание. В частности, в [3] указаны основные пути совершенствования таких систем. Решить данные проблемы в значительной степени позволяет применение замкнутых систем охлаждения [4], интерес к которым в настоящее время все более возрастает [5]. При этом отвод теплоты может осуществляться через судовую обшивку или различные элементы, расположенные снаружи на судовой обшивке [6]–[8]. Существенным недостатком таких систем является то, что через соответствующие устройства теплоотвода может быть отведен *ограниченный тепловой поток*. Это означает, что полностью замкнутыми системами охлаждения могут быть оборудованы суда с относительно небольшой энерговооруженностью.

Широко используемые в настоящее время *разомкнутые двухконтурные системы охлаждения* хорошо работают при эксплуатации судна на чистых глубоководных акваториях. Однако имеют место случаи, когда необходимо на некоторый сравнительно небольшой промежуток времени отказаться от приема забортной воды. Например, при нахождении судна на мелководье, что может привести к попаданию в систему грунта и ее забиванию. Достаточно актуальной эта проблема является для судов технического флота, когда выполняемые технологические операции приводят к загрязнению окружающей акватории. В данном случае необходим поиск технических решений, обеспечивающих ограниченный по времени переход, существующих двухконтурных разомкнутых

систем охлаждения на замкнутую схему охлаждения, что может быть реализовано за счет использования существующих на судне цистерн, заполненных забортной водой (например, балластных). Забортная вода забирается из этих цистерн, прокачивается через теплообменник, обеспечивающий охлаждение нагретой в СЭУ пресной воды, и затем сбрасывается опять в эту цистерну (рис. 1). Известны случаи, когда такие варианты предусмотрены на этапе проектирования судна, а также когда эксплуатационный персонал выполнял необходимые модернизации на существующих судах.

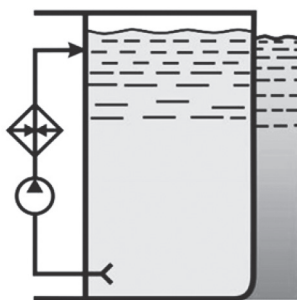


Рис. 1. Схема работы системы охлаждения при ее переключении на цистерну забортной воды

Ограниченное время работы системы охлаждения по данной схеме определяется объемом воды в цистерне, ее начальной температурой, площадью судовой обшивки в районе данной цистерны и величиной отводимого теплового потока, который зависит от мощности СЭУ. Обычно осуществляется прием воды из цистерны и ее сброс через присоединенные к ней трубопроводы. При этом не предпринимаются меры по организации движения воды в цистерне с внутренней стороны судовой обшивки, контактирующей с забортной водой. При обеспечении такого организованного движения можно достичь повышения теплоотдачи на внутренней стенке судовой обшивки, что приведет к росту теплоотвода в окружающую акваторию через судовую обшивку, и следовательно, увеличит время работы системы без приема забортной воды. Данную процедуру можно проводить за счет сброса в цистерну нагретой воды через систему трубопроводов с соплами, направленными в сторону внутренней поверхности судовой обшивки (рис. 2).

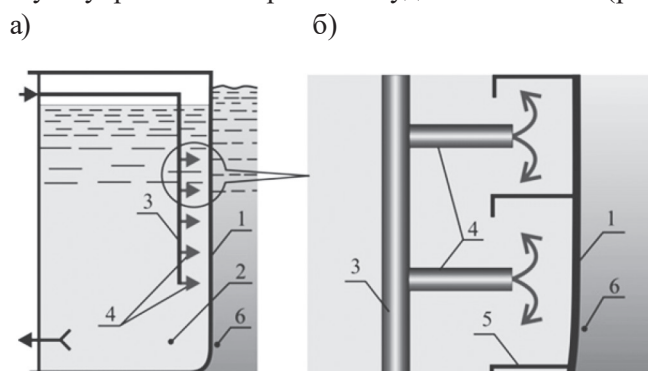


Рис. 2. Сопловой подвод жидкости к судовой обшивке:
а — подвод охлаждаемой воды в цистерну
б — сопла подачи воды на стенку судовой обшивки;
1 — судовая обшивка; 2 — цистерна забортной воды;
3 — трубопровод подвода охлаждаемой воды;
5 — элементы набора корпуса судна; 6 — забортная вода

На выходе из сопла формируется струя (рис. 3) [9], направленная на поверхность обшивки. Натекая на поверхность, она создает радиально растекающуюся *веерную струю* (рис. 4), что улучшает теплоотвод через судовую обшивку.



Рис. 3. Визуализация струи, вытекающей из сопла

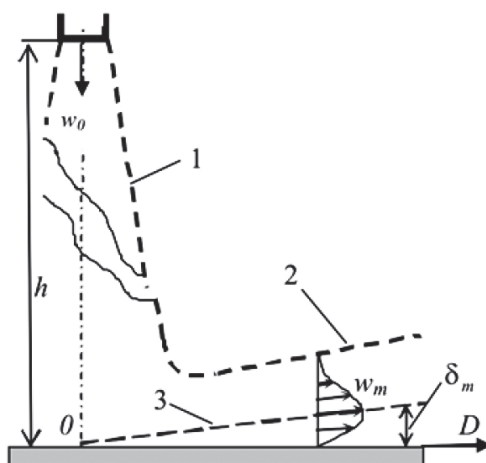


Рис. 4. Схема взаимодействия струи с поверхностью судовой обшивки:
1 — осесимметричная струя; 2 — пристенная веерная струя;
3 — пристенный пограничный слой

Для рассматриваемого случая выполнены соответствующие теплотехнические исследования происходящих процессов теплообмена и получены соответствующие обобщающие экспериментальные данные уравнения подобия [4]:

– при $Re_d = 5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$

$$Nu = 5,7 Re_d^{0,45} Pr^{0,33} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25}; \quad (1)$$

– при $Re_d = 2 \cdot 10^4 - 10^5$

$$Nu = 0,15 Re_d^{0,83} Pr^{0,33} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25}; \quad (2)$$

– при $Re_d = 10^5 - 4 \cdot 10^5$

$$Nu = 26 Re_d^{0,4} Pr^{0,33} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25}. \quad (3)$$

Зависимости (1)–(3) справедливы при следующих условиях: при $Pr = 2,54 - 4,87$, $Pr/Pr_s = 0,66 - 0,96$; $h/d = 0,13 - 0,67$; $R/d = 6,6 - 13,9$.

Применение струйного подвода воды однозначно обеспечивает улучшение теплоотвода [10], [11]. Однако детальное рассмотрение особенностей происходящих процессов показывает, что струя на выходе из сопла, а также пристенная веерная струя своей частью интенсивно взаимодействуют с окружающей водой, что снижает скорость струи и ее температуру ввиду разбавления водой окружающего пространства. Данное обстоятельство не способствует теплоотводу через судовую обшивку, что указывает на необходимость поиска путей снижения влияния указанных негативных факторов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Ограничение взаимодействия выходящей из сопла жидкости с окружающим пространством может быть достигнуто за счет приближения выходного отверстия патрубка к судовой обшивке и установки на его кромке специального экрана (рис. 5). Для проведения визуальных исследований пристенной веерной струи была изготовлена экспериментальная модель с прозрачной стенкой. Для визуализации процесса использовалась вода, в которую добавлялись серебрин, тушь и поверхностно активное вещество. Через моделирующую судовую обшивку — прозрачную стенку размером 200×200 мм — осуществлялась засветка, позволяющая наблюдать характер течения жидкости. Очевидно, что в случае использования экрана процесс теплоотдачи пристенной веерной струи будет проходить иначе, чем при использовании струйного подвода. С целью изучения этих процессов были проведены экспериментальные теплотехнические исследования на модели такого устройства, представляющего собой моделирующую судовую обшивку теплопередающей стенки площадью $0,25 \text{ м}^2$, измерения температуры внутренней поверхности которой осуществлялись с помощью термопар.

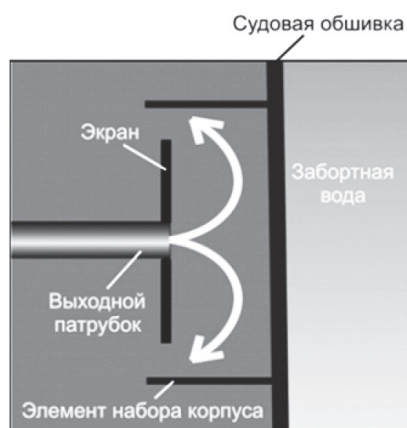


Рис. 5. Схема устройства с экранным подводом охлаждаемой воды

Теплопередающая стенка снаружи охлаждалась постоянно циркулирующей холодной водой. Изменялись расход (скорость) подаваемой охлаждаемой воды, а также ее температура. Подвод горячей охлаждаемой воды осуществлялся через патрубок, на конце которого был размещен экран. В результатедвигающаяся вдоль поверхности веерная струя была полностью изолирована от окружающей воды, тем самым обеспечивалось увеличение скорости движения охлаждаемой воды. Кроме того, за счет исключения перемешивания движущаяся охлаждаемая вода сохраняла максимальную температуру, что обеспечивало максимальный температурный напор между охлаждаемой и забортной водой, что должно было способствовать увеличению теплоотвода, а, следовательно, времени работы разомкнутой системы охлаждения по замкнутому контуру при ее переключении на цистерну забортной воды.

Результаты (Results)

На рис. 6 представлены результаты визуальных исследований. В центре находится отверстие, подводящее жидкость патрубком диаметром 12 мм. Видно, что вдоль стенки обеспечивается напоминающее веер радиальное растекание охлаждаемой жидкости от центра к периферии. Наибольшая турбулизация потока наблюдается в районе подводящего патрубка. В дальнейшем по ходу течения турбулизация снижается.

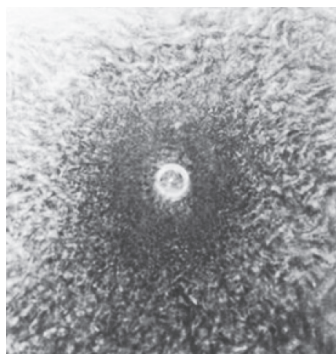


Рис. 6. Течение пристенной веерной струи
(диаметр сопла 12 мм, размер стенки 200×200 мм)

Следует отметить, что экспериментальные теплотехнические исследования позволили определить эффективность теплоотвода в случае использования экрана. На рис. 7 показана зависимость коэффициента теплоотдачи α от расхода W охлаждаемой воды в случае, когда подвод осуществляется через сопло, и в случае, когда применен экран.

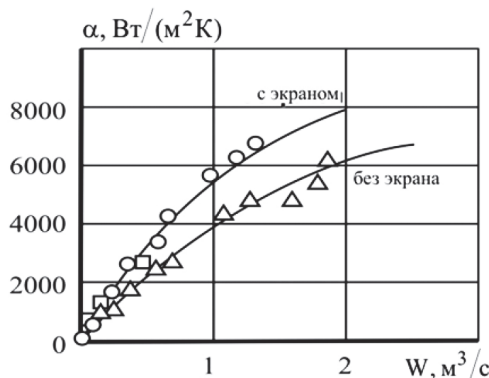


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплоотдачи α
от расхода W охлаждаемой воды
в случае использования сопла и экрана

Выполненные с учетом этого теплотехнические исследования позволили определить соответствующие различным режимам течения жидкости обобщающие уравнения подобия:

– при $Re_h = 630 \dots 2000$

$$\overline{Nu} = 3,14 Re_h^{0,44} \left(\frac{h}{r} \right)^{0,53-0,45 \lg \frac{r}{R}} \left(\frac{r}{R} \right)^{0,69} \cdot Pr^{0,4} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}; \quad (4)$$

– при $Re_h = 2000 \dots 10^4$

$$\overline{Nu} = 0,15 Re_h^{0,84} \left(\frac{h}{r} \right)^{0,53-0,42 \lg \frac{r}{R}} \left(\frac{r}{R} \right)^{0,082} \cdot Pr^{0,4} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}; \quad (5)$$

– при $Re_h = 10^4 \dots 2,5 \cdot 10^4$

$$\overline{Nu} = 6,14 Re_h^{0,44} \left(\frac{h}{r} \right)^{0,56-0,42 \lg \frac{r}{R}} \left(\frac{r}{R} \right)^{0,094} \cdot Pr^{0,4} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (6)$$

где $\overline{Nu}$, Re и Pr — соответственно числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля;

Pr_c — число Прандтля жидкости при температуре стенки;

r , R — соответственно радиус внутреннего отверстия выходного патрубка и вписанной окружности поверхности теплоотдачи;

h — расстояние между экраном и поверхностью.

Примечание. При доверительной вероятности 0,95 относительная среднеквадратичная погрешность составляет 6–11 %.

Обсуждение (Discussion)

Как видно из результатов визуальных исследований, пристенная веерная струя имеет достаточно высокую турбулизацию потока, что положительно отражается на эффективности теплоотдачи. Эффективность применения экрана по сравнению с сопловым подводом наглядно демонстрирует рис. 7. При одинаковом расходе охлаждаемой воды обеспечивается увеличение теплоотдачи на 25–30 %. Как отмечалось ранее, это достигается за счет исключения взаимодействия движущегося между экраном и поверхностью потока охлаждаемой жидкости с окружающей жидкостью, находящейся в цистерне.

Известно, что коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности судовой обшивки к забортной воде определяется в основном скоростью обтекания поверхности забортной водой (скоростью движения судна), размерами и формой поверхности, а также теплофизическими свойствами забортной воды. Поэтому в случае неизменности указанных параметров увеличение коэффициента теплоотдачи α неизбежно ведет к увеличению коэффициента теплопередачи K и в конечном счете теплоотвода через судовую обшивку. Теплоотвод Q , Вт, рассчитывается по зависимости

$$Q = K \Delta t F, \quad (7)$$

где K — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

F — площадь теплопередающей поверхности судовой обшивки, м²;

Δt — температурный напор, град.

Использование экрана дает положительный результат. Исключение перемешивания охлаждаемой горячей жидкости с более холодной окружающей жидкостью, находящейся в судовой цистерне, обеспечивает более высокий температурный напор Δt между охлаждаемой горячей и забортной водой, что также способствует увеличению теплоотвода Q . На рис. 8 показано устройство с экраным подводом охлаждающей жидкости, внедренное на самоходных плавкранах грузоподъемностью 350 т (рис. 9).

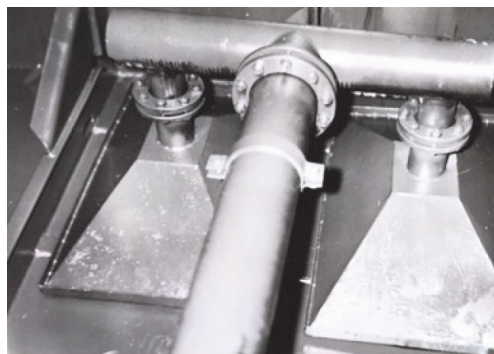


Рис. 8. Устройство теплоотвода с экраным подводом охлаждаемой жидкости

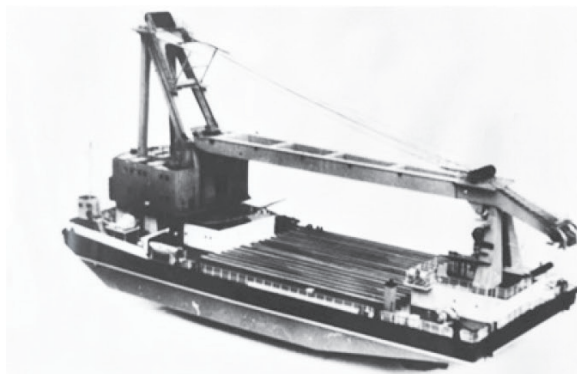


Рис. 9. Плавкран
грузоподъемностью 350 т

Известны случаи, например, на судах технического флота, когда технологическое оборудование работает циклично. После работы СЭУ на некоторой заданной мощности вода в цистерне нагревается. При существенном снижении нагрузки СЭУ можно охладить воду в цистерне за счет теплоотвода через судовую обшивку посредством указанных устройств. В результате появляется возможность повторной работы системы охлаждения на цистерны забортной воды.

Выводы (Summary)

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Применение экранного подвода охлаждаемой воды к судовой обшивке обеспечивает по сравнению со струйным подводом существенное увеличение теплоотвода и, как следствие, времени работы системы охлаждения по замкнутому контуру. Эффект оказывается еще более ощутимым по сравнению со случаем неорганизованного движения жидкости за счет ее простого сброса в цистерну через отверстие подводящего трубопровода.
2. Полученные результаты исследований, а также обобщающие расчетные зависимости в виде уравнений подобия позволяют рассчитать теплоотвод через судовую обшивку в случае применения экранов и разработать на этой основе соответствующую методику теплотехнического расчета.
3. Конструктивно указанные устройства достаточно просты и могут быть выполнены как на этапе постройки судна, так и в процессе его модернизации. Причем экраны могут быть не только плоскими, но и иметь другую форму, сохраняя при этом указанные принципы работы и полученные преимущества.
4. Для судов с цикличной работой энергетической установки указанные устройства могут обеспечить охлаждение воды в цистерне при снижении нагрузки охлаждаемого оборудования. Наличие возможности, даже ограниченной по времени работы системы охлаждения по замкнутому контуру, позволяет минимизировать негативное экологическое воздействие в случае кратковременного захода судна в район интенсивного рыболовства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. How power plants kill fish&damage our water ways [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://blogs.sierraclub.org/compass/2011/08/how-power-plants-kill-fish-damage-our-waterways-.html> (дата обращения 11.11.2020).
2. Федоровский К. Ю. Механизм отрицательного антропогенного воздействия систем охлаждения СЭУ / К. Ю. Федоровский, Н. К. Федоровская, В. В. Ениватов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 1068–1077. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1068-1077.
3. Жуков В. А. Пути совершенствования систем охлаждения судовых дизелей / В. А. Жуков, К. А. Воробей, А. А. Пуляев // Речной транспорт (XXI век). — 2018. — № 2 (86). — С. 50–53.

4. Федоровский К. Ю. Замкнутые системы охлаждения судовых энергетических установок / К. Ю. Федоровский, Н. К. Федоровская. — М.: ИНФРА-М, 2017. — 163 с.

5. Шурпьяк В. К. Учет особенностей систем охлаждения при оценке энергетической эффективности судов / В. К. Шурпьяк // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2014. — № 37. — С. 51–55.

6. Specifying a Trawler [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://bluewater-trawlers.blogspot.com/2008/11/hull-construction.html> (дата обращения 21.12.2021).

7. Fernstrum Gridcooler. Keel Coolers [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.fernstrum.com/products/gridcooler-keel-cooler/specialty-coolers/> (дата обращения 21.12.2021).

8. Федоровский К. Ю. Теплопередача через обшивку корпуса судна и особенности происходящих процессов / К. Ю. Федоровский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2018. — № 4–2 (330). — С. 168–172.

9. Исатаев М. С. Исследование вихревой картины течения свободной струи, ограниченной плоскими стенками / М. С. Исатаев, Ж. К. Сейдулла, А. Сактаган, Б. Рахатаева // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. — 2021. — № 4 (55). — С. 15–23. DOI: 10.51775/2790-0886_2021_55_4_15.

10. Терехов В. И. Конвективный теплообмен при натекании кольцевой струи на плоскую преграду / В. И. Терехов, С. В. Калинина, К. А. Шаров // Теплофизика высоких температур. — 2018. — Т. 56. — № 2. — С. 229–234. DOI: 10.7868/S0040364418020096.

11. Веретенников С. В. Влияние интенсивности закрутки на теплоотдачу комбинированной импульсной струи / С. В. Веретенников, О. А. Евдокимов // Семинар вузов по теплофизике и энергетике: материалы Всеросс. науч. конф. с международ. участием. — СПб.: СПб. политехн. ун-т Петра Великого, 2019. — С. 84–85.

REFERENCES

1. How power plants kill fish&damage our water ways. Web. 11 Nov. 2020 <<https://blogs.sierraclub.org/compass/2011/08/how-power-plants-kill-fish-damage-our-waterways-.html>>.

2. Fedorovskiy, Konstantin Yu., Nadezhda K. Fedorovskaya, and Valeriy V. Yenivatov. “Mechanism of negative anthropogenic influence of ship’s power plants cooling systems.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.6 (2020): 1068–1077. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1068-1077.

3. Zhukov, V. A., K. A. Vorobei, and A. A. Pulyaev. “Puti sovershenstvovaniya sistem okhlazhdeniya sudovykh dizelei.” *River transport (XXst century)* 2(86) (2018): 50–53.

4. Fedorovskii, K. Yu., and N. K. Fedorovskaya. *Zamknutyie sistemy okhlazhdeniya sudovykh energeticheskikh ustanovok*. M.: INFRA-M, 2017.

5. Shurpyak, V. K. “Uchet osobennostei sistem okhlazhdeniya pri otsenke energeticheskoi effektivnosti sudov.” *Nauchno-tehnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 37 (2014): 51–55.

6. Specifying a Trawler. Web. 21 Dec. 2021 <<http://bluewater-trawlers.blogspot.com/2008/11/hull-construction.html>>.

7. Fernstrum Gridcooler. Keel Coolers. Web. 21 Dec. 2021 <<http://www.fernstrum.com/products/gridcooler-keel-cooler/specialty-coolers/>>.

8. Fedorovskiy, K. Yu. “Heat transfer through ship’s shell plating and peculiarities of the processes.” *Fundamental’nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* 4–2(330) (2018): 168–172.

9. Isataev, M. S., Zh. K. Seydulla, A. Sagtagan, and B. Rakhataeva. “Investigation of the vortex picture of a free jet flow bounded by flat walls.” *AUPET Bulletin* 4(55) (2021): 15–23. DOI: 10.51775/2790-0886_2021_55_4_15.

10. Terekhov, V. I., S. V. Kalinina, and K. A. Sharov. “Convective heat transfer at an annular jet impingement on a flat blockage.” *High Temperature* 56.2 (2018): 217–222. DOI: 10.1134/S0018151X18010194.

11. Veretennikov, S. V., and O. A. Evdokimov. “Vliyanie intensivnosti zakrutki na teplootdachu kombinirovannoi impaktnoi strui.” *Seminar vuzov po teplofizike i energetike: Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem*. SPb.: Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2019. 84–85.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федоровский Константин Юрьевич —

доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»

299053, Российская Федерация, Севастополь,
ул. Университетская, 33

e-mail: fedkonst@rambler.ru

Гриненко Надежда Константиновна —

кандидат технических наук,
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»

299053, Российская Федерация, Севастополь,
ул. Университетская, 33

e-mail: n.fedorovskaya14@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedorovskiy, Konstantin Yu. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Sevastopol State University

33 Universitetskaya Str.,

Sevastopol, 299053,

Russian Federation

e-mail: fedkonst@rambler.ru

Grinenko, Nadezhda K. —

PhD

Sevastopol State University

33 Universitetskaya Str.,

Sevastopol, 299053,

Russian Federation

e-mail: n.fedorovskaya14@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23 декабря 2022 г.

Received: December 23, 2022.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-145-152

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE QUALITY AND EFFICIENCY OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS

K. P. Goloskokov, O. N. Gubernatorov, M. O. Gubernatorov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The aim of the study is to assess the effectiveness of automated systems related to organizational and technical systems based on the implementation of a systematic approach to information technology. To achieve the goal it is necessary to solve the following tasks: to determine the main parameters of the systems functioning quality and choose the corresponding indicators of effectiveness. Theoretical foundations of a description of the process of evaluating the effectiveness of automated control systems are considered. The most commonly used criterion (term) is profit referred to costs, i. e., costs are taken as a criterion of cost-effectiveness. The fallacy of this criterion (this fraction) can be seen from the graph of the typical dependence of the system efficiency indicator on the total cost for solving the problem using this system. A rationale for the method of evaluating the effectiveness of complex systems, which include automated control systems, is given in the paper. It is shown that the modern system of providing automated control systems must be effective without disturbing the existing mode of operation. Thus, the automated system that solves the problem with a given efficiency at the lowest total cost is selected. Despite the fairly widespread use of the efficiency indicator in the form of a fraction (profit/cost), it is not appropriate to apply it, because these estimates do not include a comparison of different ways to achieve the goal. If it is necessary to choose from a number of competing enterprises it is necessary to compare all variants at decision-making on total efficiency, and then to compare these variants on effect. That is, the system that solves the problem with a given efficiency at the lowest total cost for the development of the system, its construction and operation is chosen. Comparative economic-effective assessment of competing automated systems allows you to get the best (rational) solution (the best structure, parameters and functional characteristics of the system) designed to implement a given task in certain external conditions.

Keywords: automated system, control, efficiency, functioning, design, evaluation of indicators, quality, system property, multicriteria, problems.

For citation:

Goloskokov, Konstantin P., Oleg N. Gubernatorov, and Mihail N. Gubernatorov. "Comprehensive assessment of the quality and efficiency of automated control systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 145–152. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-145-152.

УДК 681,3.067

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА И ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

К. П. Голоскоков, О. Н. Губернаторов, М. О. Губернаторов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Целью исследования является оценка эффективности функционирования автоматизированных систем, относящихся к организационно-техническим системам на основе реализации системного подхода

к информационным технологиям. Отмечается, что для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: определить основные параметры качества функционирования систем и выбрать соответствующие им показатели эффективности. Рассмотрены теоретические основы описания процесса оценки эффективности функционирования автоматизированных систем управления. В работе дана характеристика наиболее часто используемого критерия (термина) «прибыль, отнесенная к затратам». Ошибочность этого критерия (этой дроби) подтверждена при помощи типовой зависимости показателя эффективности системы от суммарных затрат на решение задачи с помощью системы показателей прибыли и затрат. Дано обоснование способа оценки эффективности сложных систем, к которым относятся также автоматизированные системы управления. Показано, что современная система обеспечения автоматизированных систем управления должна быть эффективной и не нарушать существующего режима функционирования. Рассмотрена автоматизированная система, способная выполнять решение задачи с заданной эффективностью при наименьших суммарных затратах. Отмечается, что несмотря на достаточно широкое использование показателя эффективности в виде дроби (прибыль / затраты) применять его нецелесообразно, так как эти оценки не содержат сравнения различных способов достижения цели. Сделан вывод о том, что в случае необходимости выбора из ряда конкурирующих предприятий следует при принятии решения сравнивать все варианты по суммарной эффективности. Т. е. предлагается выбирать ту систему, которая решает задачу с заданной эффективностью при наименьших суммарных затратах на разработку, постройку и эксплуатацию системы. Подчеркивается, что выполнение сравнительной экономико-эффективной оценки конкурирующих автоматизированных систем позволяет получить оптимальное (рациональное) решение (наилучшая структура, параметры и функциональные характеристики системы), предназначенное для реализации определенной задачи при определенных внешних условиях.

Ключевые слова: автоматизированная система, управление, эффективность, функционирование, проектирование, оценка показателей, качество, свойство системы, многокритериальность, проблемы.

Для цитирования:

Голоскоков К. П. Комплексная оценка качества и эффективности автоматизированных систем управления / К. П. Голоскоков, О. Н. Губернаторов, М. О. Губернаторов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 145–152. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-145-152.

Введение (Introduction)

В процессе проектирования, создания, эксплуатации анализа или усовершенствования любой автоматизированной системы обычно возникают трудности, обусловленные необходимостью формулирования цели этой системы и ее описания с помощью набора показателей и их сопоставления для сравнения различных вариантов решения. Указанные задачи не решаются однозначно, так как обычно существует неопределенность целей, показателей и схем их сравнения. Поэтому чаще всего любую систему, в том числе автоматизированную систему управления, представляют в виде *исследовательской (имитационной) модели*, реализуемой с помощью технических средств или аналитически на основе *оценки показателей системы*. Эффективность, являющаяся комплексным свойством систем, представляет собой характеристику *системных свойств рассматриваемого объекта (системы)* [1]–[4]. Понятие *эффективности* не заложено в самой системе (независимо от ее физической природы и назначения) и может быть сформулировано только пользователем (лицом или организацией), в интересах которого функционирует система.

Эффективность — это степень приспособленности системы (объекта) к решению определенной задачи в определенных условиях, в зависимости от параметров системы [5]–[7]. При этом необходимо учитывать, что эффективность представляет собой характеристику системных свойств и не относится ни к одному из физических свойств системы, если эта система техническая или организационно-техническая.

Качество объекта (системы) — обобщенная характеристика его свойств, определяющая способность удовлетворять потребности в соответствии с назначением, или *мера полезности этого объекта (системы)*.

При оценке эффективности проектируемой (существующей) системы, после рассмотрения более одного варианта решения задачи, окончательное решение возможно при наличии количественной оценки качества каждого из конкурирующих вариантов.

Существуют не качества, а только вещи (объекты, системы), обладающие *бесконечно многими качествами*, которые могут быть как положительными, так и отрицательными, при этом они не сопоставимы друг с другом. В попытках преодоления этих методологических трудностей различными исследователями предлагается применение интегральных показателей качества в виде сумм, произведений, дробей и других сочетаний, однако все эти показатели некорректны.

Для целенаправленных (технических, организационно-технических) систем наиболее объективным и убедительным показателем достоинств и недостатков, т. е. общей характеристикой эффекта объекта (системы) должно служить *удаление от цели*. Качество объекта (системы) — это обобщенная характеристика его свойств, определяющая способность удовлетворять потребности в соответствии с назначением, или *мера полезности этого объекта (системы)*.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В прикладном плане оценка эффективности системы может быть дана (выполнена) через качество функционирования в соответствии с ее предназначением, или качеством целевого функционирования. При проектировании или эксплуатации систем часто применяют такое понятие, как *экономичность*, или *экономическая эффективность*, что не совсем правильно, поскольку под экономической эффективностью понимается эффективность вложения в систему ресурсов (материалы, труд, денежные средства) [8]–[10].

Эффект — это результат применения данной системы в определенных условиях. Эффекты, создаваемые системой, с точки зрения пользователя могут быть как положительными, так и отрицательными. Соответственно различают результаты R и затраты S или в виде множества (вектора):

$$E = \{R, S\}. \quad (1)$$

Как результаты, так и затраты зависят от свойств системы и ситуации и функционально связаны с ее выходами, т. е. могут быть *характеристиками качества системы*. Т. е. каждый из частных показателей R или затрат S могут быть выбраны в качестве оценочного функционала системы, аргументы экстремального значения которой (с учетом ограничений) могут быть приняты за искомые параметры системы.

Рассмотрим более подробно понятие *эффективности системы* применительно к различным областям их применения. В качестве результатов функционирования обычно используется *прибыль* R , а в качестве характеристики эффективности, создаваемой (существующей) системы — *экономичность результатов (рентабельность)*:

$$E = \frac{R}{S}, \quad (2)$$

или более удобная в практических расчетах обратная величина — *удельные затраты*:

$$E^{-1} = \frac{S}{R}, \quad (3)$$

часто называемая *эффективностью систем*.

Качество объекта (системы) — обобщенная характеристика его свойств, определяющая способность удовлетворять потребности в соответствии с назначением, или мера полезности этого объекта (системы).

Характеристики качества, основанные на удалении от цели, и производные от них применимы, если координаты цели в пространстве результатов функционирования системы известны. Если целевые результаты неизвестны, то оценка качества возможна лишь при сравнении всех вариантов с одним из них, который тем или иным способом выбран как *базисный* (оптимальный по заданному определению) [8].

«Управлять качеством» нельзя, так как *качество* — *абстрактное понятие*. Качество можно контролировать и отслеживать. Управлять следует предприятием, процессом производства,

и не ради абстрактного «качества», а ради получения продукции с определенными потребительскими свойствами, соответствующими их заданному уровню (стандарт, мировой уровень).

Задача управления качеством не решается автоматически только за счет усовершенствования *контроля на стадии производства* (функционирования системы), а значительно раньше с помощью технических решений, заложенных в проект создания системы (предприятия), т. е. на *стадии уровня изобретения и науки*. Поэтому приемка продукции на предприятии — это еще не система управления качеством.

Выбор критериев качества (критериев эффективности) — это и наука, и искусство. Учитывая, что система может иметь несколько *критериев оценки*, т. е. являться *многокритериальной*, и свести ее к одному показателю нельзя, так как он не будет иметь содержательного смысла, можно считать ошибкой формирование одного показателя в виде суммы с весовыми коэффициентами или в виде их отношения (произведения) [9]–[13].

Результаты (Results)

Прагматический подход для анализа многокритериальной системы может быть реализован следующим образом:

- определение важности каждого из критериев и расстановка их в ряд по уровню важности, т. е. *ранжирование критериев*;
- последовательная оптимизация системы сначала по самому важному (первому) критерию (остальные критерии при этом учитываются как ограничения), затем по второму критерию, затем по третьему и т. д. до последнего критерия.

Ранжирование критериев обычно осуществляется с помощью *экспертов*, т. е. является субъективной, так как иногда важнее сократить время достижения цели, а иногда затраты. Выполнив анализ до последнего критерия, получаем варианты *компромиссного решения*, при котором потери в величине главного критерия невелики, зато *дополнительные критерии* имеют приемлемую величину. Сформированная таким образом система будет наиболее эффективной при решении многокритериальной задачи.

Известно, что для целенаправленных систем общей характеристикой эффекта системы должно быть *удаление от цели*. Цель технической системы (например, максимальное достижение в данной ситуации результата функционирования) определяется идеальным набором ее параметров $P^*(Z)$, где Z — цель системы, $P^* = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ — идеальный набор параметров, при которых может быть достигнута цель системы.

Произвольному значению результата R_j соответствует другой набор параметров: $P_j(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$.

Расстояние между двумя наборами переменных, т. е. вариантами исполнения системы, может быть определено разными способами. Например, норма вектора разности результатов (Хемминга) имеет вид:

$$\delta(P_i, P_j) = \sum_k |R_k(P_i) - R_k(P_j)|, \quad (4)$$

где k — индекс компоненты результата функционирования системы, если он представляет собой вектор.

В частности, удаление произвольного варианта системы от цели:

$$\delta(P_i, P^*) = \sum_k |R_k(P_i) - R_k(P^*)|. \quad (5)$$

Минимизация удаления от цели, в принципе, позволяет найти значения параметров системы, оптимальное по всем компонентам результата. При этом практическое удобство представляет относительная оценка качества системы в виде

$$\omega(P_i, P^*) = 1 - \frac{\delta(P_i, P^*)}{\delta_m(P_i, P_j)}, \quad (6)$$

где $\delta_m = \max \delta(P_i, P^*)$.

Относительная величина $\omega(P_i, P^*)$ — одна из возможных характеристических функций, позволяющих оценивать эффективность системы.

Разность значений:

$$\Delta\omega = \omega_i - \omega_j = 1 - \frac{\delta(P_i, P^*) - \delta(P_j, P^*)}{\delta_m}, \quad (7)$$

называют *степенью целенаправленности системы i относительно системы j при заданной цели*.

В общем виде показатель рассогласования результата имеет вид:

$$Q = |R - Z|, \quad (8)$$

а качество результата

$$q = \frac{R}{Z}. \quad (9)$$

При конструировании показателей эффективности используют две постановки задачи:

- оценка качества функционирования системы;
- оценка эффективности вложения в нее средств (экономическая эффективность).

Если сравнение вариантов осуществляется по затратам, что характерно для проектирования объектов (систем) производства, то характеристическая функция представляет собой показатель потребительской эффективности:

$$\eta_N = 1 - \frac{N_v}{N_0}, \quad (10)$$

где N_v и N_0 — приведенные затраты альтернативного и базисного вариантов.

При сопоставлении систем по величине результата функционирования или его качеству показатель эффективности имеет форму:

$$\eta_R = \eta_q = 1 - \frac{R_v}{R_0} \quad (11)$$

а по согласованию результата —

$$\eta_Q = 1 - \frac{Q_v}{Q_0}. \quad (12)$$

Если на результат функционирования системы оказывают существенное влияние случайные факторы, то для оценки функционирования системы используют *вероятность достижения цели P* . При этом следует учесть, что вероятностная оценка представляет собой безразмерную величину, которая является показателем эффекта, а не эффективности системы. Относительная характеристическая функция эффективности решения задачи принимает форму

$$\eta_p = 1 - \frac{P_v}{P_0}, \quad (13)$$

где P_v и P_0 — вероятность достижения цели системой, соответственно, с альтернативным и базисным вариантами параметров.

Целевая функция должна отражать степень совершенства системы, степень достижения цели, т. е. быть *мерой эффективности системы*. В относительно простых случаях за целевую функцию может быть принято одно из свойств системы: мощность, объем, стоимость, точность и т. п.

Более общим решением служит использование в качестве целевой одной из характеристических функций. Целесообразность использования того или иного показателя эффективности не может быть определена априорно, вне зависимости от типа и назначения создаваемой (проектируемой) системы, ее связей с другими системами и внешних факторов, действующих на систему и влияющих на достижение ею поставленной цели.

Обсуждение (Discussion)

Цель функционирования системы формулируется обычно на вербальном уровне (словесно), целевая функция не может учесть всех факторов, определяющих поведение системы, так как при этом могут возникнуть вычислительные трудности (например, во время вычислений).

Теория и практика системного анализа, принятия решений и исследования операций позволяет сформулировать следующие требования к математическим свойствам целевой функции, а именно:

- целевая функция должна иметь количественную меру и допускать объективную оценку (объективность);
- изменение значения целевой функции должно оказывать влияние на достижение системой поставленных задач / целей (критичность);
- целевая функция должна наглядно отражать результаты функционирования системы (наглядность);
- функция должна быть вычислимой, т. е. аналитически доступной, и предоставлять возможность определения ее числовых значений.

Одновременное удовлетворение этим требованиям не всегда реализуемо, так как оно зависит от числа рассматриваемых параметров, входящих в целевую функцию. При этом неблагоприятное сочетание свойств целевых функций приводит к так называемому «проклятию размерности» Беллмана.

При определении или выборе целевой функции следует «отсеивать» наименее значимые факторы для получения приемлемых решений в течение короткого периода времени. Целевая функция всегда единственна и скалярна.

Выводы (Conclusions)

В работе выявлены основные параметры качества функционирования и показатели эффективности автоматизированных систем управления. Доказано, что общими для автоматизированных транспортных систем и систем управления являются две основные идеи, используемые при изучении качества функционирования сложных систем, а именно *приоритет целей и функций*, из которых следует структура системы — *функциональный подход*. При этом необходимо определить цену, которую нужно заплатить за достижение соответствующего результата. Общая идея системного подхода состоит в том, что решением проблем, связанных с качеством автоматизированных транспортных систем, является сопоставление *необходимого и достаточного эффекта и ресурсов*.

Показано, что современная система обеспечения автоматизированных систем должна быть не только эффективной, но и не нарушать необходимый режим функционирования. Характеристика, оценивающая эффект целевого функционирования, обладает *свойствами измеримости, полноты и достоверности*. Применительно к автоматизированным транспортным системам, это характеристики, которые в процессе управления обеспечивают достижение поставленных целей с необходимым качеством целевого функционирования в условиях противодействия среды. Для того чтобы система функционировала правильно, необходимо согласование комплекса целей и комплекса условий, т. е. *реализация комплексного подхода к функционированию системы в целом*. При этом следует согласовать все цели, которые ставятся перед системой, а также все условия, в которых она будет функционировать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильченко А. А. Автоматизированный подход к решению задачи определения района эксплуатации морского автономного надводного судна / А. А. Ильченко, Д. А. Акмайкин, А. В. Гамс // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 508–518. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-508-518.
2. Федоровская Н. К. Оценка эффективности систем охлаждения судовых энергетических установок с учетом экологического фактора / Н. К. Федоровская, К. Ю. Федоровский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 559–568. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-559-568.
3. Кузнецов А. Л. Технологическая трансформация универсальных причалов в малые контейнерные терминалы / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, С. С. Валькова, А. М. Сампиев // Транспортное дело России. — 2022. — № 2. — С. 243–249. DOI: 10.52375/20728689_2022_2_243.
4. Кузнецов А. Л. Расчет вместимости склада навалочных грузов морского порта с помощью имитационного моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, С. С. Валькова, А. М. Сампиев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2022. — № 3. — С. 82–89. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-3-82-89.
5. Галин А. В. Развитие сборных отправок грузов в ситуации роста стоимости контейнерных перевозок / А. В. Галин, А. Е. Слищан // Транспортное дело России. — 2022. — № 3. — С. 117–119.
6. Слищан А. Е. Особенности определения количества погруженного груза на судах типа река-море / А. Е. Слищан, А. В. Галин, Э. В. Виноградова // Транспортное дело России. — 2022. — № 4. — С. 124–126. DOI: 10.52375/20728689_2022_4_124.
7. Голоскоков К. П. Прогнозирование и оценка технического состояния сложных систем / К. П. Голоскоков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2008. — № 1 (53). — С. 164–168.
8. Брусакова И. А. Информационные технологии в научных исследованиях высшей школы / И. А. Брусакова, М. П. Власов, К. П. Голоскоков. — СПб., 2012. — 160 с.
9. Голоскоков К. П. Автоматизированная система испытаний в структуре системы управления качеством / К. П. Голоскоков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2008. — № 6 (69). — С. 116–120.
10. Кудинов Ю. И. Нечеткие модели и системы управления / Ю. И. Кудинов, А. Ю. Келина, И. Ю. Кудинов, А. Ф. Пашенко, Ф. Ф. Пашенко. — М.: Ленанд, 2017. — 328 с.
11. Нырков А. П. Обеспечение безопасности объектов информатизации транспортной отрасли / А. П. Нырков, А. А. Нырков, С. С. Соколов, А. А. Шнуренко; под ред. А. П. Ныркова. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. — 544 с.
12. Нырков А. П. Методика проектирования безопасных информационных систем на транспорте / А. П. Нырков, С. С. Соколов, А. В. Башмаков // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2010. — № 3. — С. 58–61.
13. Люльченко А. Н. Модель системы обеспечения информационной безопасности на транспорте / А. Н. Люльченко, А. П. Нырков, В. Г. Швед // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 184–193. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-184-193.

REFERENCES

1. Ilchenko, Anna A., Denis A. Akmaykin, and Anastasia V. Gams. “Automated approach for solving the problem of determining the maritime autonomous surface ship operation area.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 508–518. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-508-518.
2. Fedorovskaya, Nadezhda K., and Konstantin Yu. Fedorovskiy. “Estimating the efficiency of ship power plants cooling systems taking into account the environmental factor.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 559–568. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-559-568.

3. Kuznetsov, A., A. Galin, S. Valkova, and A. Sampiev. "Technological transformation of universal berths into small container terminals." *Transport business of Russia* 2 (2022): 243–249.
4. Kuznetsov, Alexander Lvovich, Alexander Valentinovich Galin, Svetlana Sergeevna Valkova, and Adam Mihaylovich Sampiev. "Analysis of seaport bulk cargo warehouse capacity by using simulation modeling." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 3 (2022): 82–89. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-3-82-89.
5. Galin, A., and A. Slican. "Development of LCL shipments in a situation of rising cost of container transportation." *Transport business of Russia* 3 (2022): 117–119. DOI: 10.52375/20728689_2022_3_117.
6. Slican, A., A. Galin, and E. Vinogradova. "Features of determining the amount of loaded cargo on river-sea vessels." *Transport business of Russia* 4 (2022): 124–126. DOI: 10.52375/20728689_2022_4_124.
7. Goloskokov, K.P. "Prognozirovanie i otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh system." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* 1(53) (2008): 164–168.
8. Brusakova, I. A., M. P. Vlasov, and K. P. Goloskokov. *Informatsionnye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh vysshei shkoly*. SPb., 2012.
9. Goloskokov, K. P. "Avtomatizirovannaya sistema ispytaniy v strukture sistemy upravleniya kachestvom." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* 6(69) (2008): 116–120.
10. Kudinov, Yu. I., A. Yu. Kelina, I. Yu. Kudinov, A. F. Pashchenko, and F. F. Pashchenko. *Nechetkie modeli i sistemy upravleniya*. M.: Lenand, 2017.
11. Nyrkov, A. P., A. A. Nyrkov, S. S. Sokolov, and A. A. Shnurenko. *Obespechenie bezopasnosti ob'ektov informatizatsii transportnoi otrasli*. Edited by A. P. Nyrkov. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2015.
12. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, and A. V. Bashmakov. "Technique of designing safe information systems on transport." *Information Security Problems. Computer Systems* 3 (2010): 58–61.
13. Lyulchenko, Andrei Nikolaevich, Anatoliy Pavlovich Nyrkov, and Viktor Grigorievich Shved. "Model of the system providing information security on transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 184–193.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Голоскоков Константин Петрович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: goloskokovkp@gumrf.ru
Губернаторов Олег Николаевич — аспирант
Научный руководитель:
Голоскоков Константин Петрович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_koib@gumrf.ru
Губернаторов Михаил Николаевич — аспирант
Научный руководитель:
Голоскоков Константин Петрович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_koib@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Goloskokov, Konstantin P. —
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: goloskokovkp@gumrf.ru
Gubernatorov, Oleg N. — Postgraduate
Supervisor:
Goloskokov, Konstantin P.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_koib@gumrf.ru
Gubernatorov, Mihail N. — Postgraduate
Supervisor:
Goloskokov, Konstantin P.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_koib@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 23 декабря 2022 г.

Received: December 23, 2022.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 15. № 1

2023 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 28.02.23. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 19,25. Тираж 500 экз. Заказ № 104/23

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7