ISSN 2223-7097

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

ЗАПРЕТ ТЯЖЕЛОГО СУДОВОГО ТОПЛИВА В АРКТИЧЕСКИХ ВОДАХ
ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ 11

НЕПОТОПЛЯЕМОСТЬ МАЛЫХ СУДОВ
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ 38

ЛЕДОВЫЕ НАГРУЗКИ НА ВИНТО-РУЛЕВУЮ КОЛОНКУ
СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА 50

№ 58/59
июль
2020

Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 58/59, 2020

Научно-технический и информационно-аналитический журнал, издается с 1916 года.
Учредитель-издатель
ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
Главный редактор
М.С. Бойко
E-mail: boyko.ms@rs-class.org
ISSN 2223-7097

Редакционная коллегия
В.И. Евенко – председатель, заместитель генерального директора, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
М.С. Бойко – к.т.н., заместитель председателя, главный редактор журнала, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
А.С. Большев – д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный политехнический университет им. Петра Великого
А.В. Григорьев – к.т.н., доц., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
А.А. Иванченко – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания и автоматики судовых энергетических установок, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

А.В. Ильин – д.т.н., доцент, заместитель генерального директора по научной работе, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ Прометей»
М.А. Кутейников – д.т.н., начальник отдела конструкции корпуса и судовых устройств, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»
А.В. Марченко – д.т.н., проф., Свальбардский международный университет (UNIS)
В.Н. Половинкин – д.т.н., проф., научный руководитель, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
А.А. Родионов – д.т.н., проф., заведующий кафедрой строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
К.В. Рождественский – д.т.н., проф., проректор в области международного сотрудничества и образования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
А.Е. Сазонов – д.т.н., проф., член-корр. РАН, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
О.Я. Тимофеев – д.т.н., проф., Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
В.Н. Тряскин – д.т.н., проф., заведующий кафедрой конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Подписка на журнал может быть оформлена по каталогу «Прессинформ». Подписной индекс 87730.
Электронная версия журнала доступна по адресу: www.rs-class.org.
Журнал включен в Российский индекс научного цитирования www.elibrary.ru, Реферативный журнал и фонд научно-технической литературы ВИНИТИ РАН, международную базу данных периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory.
Журнал зарегистрирован Министерством связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64086 от 25 декабря 2015 г.
Решением Президиума ВАК журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» включен в перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук http://perechen.vak2.ed.gov.ru/

Ответственность за содержание информационных материалов, а также за использование сведений, не подлежащих публикации в открытой печати, несут авторы.

Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, № 58/59, 2020

Scientific and technical periodical has been published since 1916.
The Founder and the Publisher
Russian Maritime Register of Shipping (RS)
Editor-in-Chief
Maxim Boyko
E-mail: boyko.ms@rs-class.org
ISSN 2223-7097

Editorial board
Vladimir Evenko – Deputy Director General, Chairman of Editorial Board, RS
Maxim Boyko – Candidate of Technical Science, Deputy Chairman of Editorial Board, Editor-in-Chief of Research Bulletin by RS
Alexander Bolshev – Doctor of Science, professor of St. Petersburg State Polytechnic University
Andrey Grigoriev – Candidate of Technical Science, Admiral
Alexander Ivanchenko – Doctor of Technical Science, professor, Head of Internal Combustion Engines and Automation of Marine Power Plants Department, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
Alexey Ilin – Doctor of Technical Science, associate professor, Deputy General Director and Head of Research and Production Complex, NRC "Kurchatov Institute", CRISM "Prometey"
Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
Mikhail Kuteynikov – Doctor of Technical Science, Head of Hull Department, RS
Aleksey Marchenko – Doctor of Technical Science, professor, University Centre in Svalbard, Norway
Valery Polovinkin – Doctor of Technical Science, professor, Research Manager, Krylov State Research Centre
Aleksander Rodionov – Doctor of Technical Science, professor of St. Petersburg State Marine Technical University

Kirill Rozhdestvenskiy – Doctor of Technical Science, professor of St. Petersburg State Marine Technical University

Anatoliy Sazonov – Doctor of Technical Science, professor of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, corresponding member of Russian Academy of Science
Oleg Timofeev – Doctor of Technical Science, St. Petersburg State Marine Technical University
Vladimir Tryaskin – Doctor of Technical Science, professor, St. Petersburg State Marine Technical University

Subscription index is 87730 in Pressinform catalog.
On-line version of the journal is available on website: www.rs-class.org.
The journal is included in Russian index of scientific citing www.elibrary.ru, VINITI RAS Scientific and Technical Literature Collection, Ulrich's Periodicals Directory international database.
The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media. Registration Certificate ПИ № ФС77-64086 of 25.12.2015.
The journal is included into the List of Supreme Attestation Commission of leading peer-reviewed scientific magazines and editions, in which basic scientific results of doctoral and post-doctoral theses (in application for the scientific degrees of Doctor and Candidate of Science) shall be published http://perechen.vak2.ed.gov.ru/

Authors are responsible for the contents of information and advertisement materials as well as for use of information not liable to publication in open press.

© Российский морской регистр судоходства, 2020

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

№ 58/59

RESEARCH BULLETIN

BY RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING

Журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» публикует результаты научных исследований по широкому спектру вопросов безопасности мореплавания судов и морских объектов, охраны человеческой жизни на море, сохранности грузов, экологической безопасности, обзорные материалы и информацию о существенных изменениях действующих правил и руководств Регистра.
Журнал предназначен для широкого круга специалистов, связанных с вопросами безопасности человеческой жизни на море, охраны окружающей среды, проектирования и строительства судов и средств освоения шельфа. Также журнал будет интересен студентам и курсантам профильных технических образовательных учреждений.
Регистр выражает признательность авторам статей и приглашает ученых и специалистов к публикациям научных работ в журнале.
Журнал распространяется на специализированных отраслевых мероприятиях, конференциях и выставках.
Журнал входит в Перечень ВАК по следующим научным специальностям:
05.08.01 – Теория корабля и строительная механика
05.08.03 – Проектирование и конструкция судов
05.08.05 – Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)
05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов
05.22.19 – Эксплуатация водного транспорта, судовождение

Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping is a periodical covering a wide range of questions in the areas of shipbuilding and shipping, offshore development facilities, up-to-date maritime technology, environmental protection and maritime safety. New research results and scientific developments in the area of shipbuilding, are introduced in our journal.
The journal is intended for specialists of shipbuilding and ship repair companies, design engineering bureaus, research institutes, professors and postgraduate students of marine universities.
Russian Maritime Register of Shipping expresses appreciation to the authors and invites scientists and specialists to submit articles for publication in the journal.
The journal is distributed at trade events, conferences and exhibitions.
The Research Bulletin publishes the articles on the specialties in accordance with the nomenclature of specialties of scientific workers:
05.08.01 – Theory of the ship and ship structural mechanics
05.08.03 - Design and construction of ships
05.08.05 – Ship energetics and its components (main and auxiliary)
05.16.01 – Metal science and thermal treatment of metals and alloys
05.22.19 – Operation of water transport, navigation

Санкт-Петербург
2020

СОДЕРЖАНИЕ

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

Гомзяков М.В. Обзор аварийности морских транспортных судов Дальневосточного региона 4

M.V. Gomzyakov Overview of maritime transport casualties in the Far East

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ
SEA TRANSPORT ECONOMICS AND MANAGEMENT

Ганеева С.В., Крупин М.И., Новрузов Б.Р. Оглы, Сафронов А.В. Экономическая оценка потерь от введения запрета на использование и перевозку тяжелого топлива как топлива для судов в арктических водах 11

S.V. Ganeeva, M.I. Krupin, B.R. Ogly Novruzov, A.V. Safronov Economical assessment of financial losses resulting from the ban on use and carriage of heavy fuel oil for ships in the Arctic

Агеев С.О. Результаты расчета параметров суточного регулирования стока в створе низконапорного гидроузла и оценка его эффективности 19

S.O. Ageev Results of calculation of daily flow regulation parameters in the range of a low-pressure hydraulic unit and its efficiency evaluation

Пичугин А.И., Мичудо Д.Г., Навценя Н.В., Яковенко К.Ю. О некоторых направлениях создания пожарных судов и оценки их эффективности 30

I.A. Pichugin, D.G. Michudo, N.V. Navtsenya, K.Yu. Yakovenko Some aspects of fire ships design and evaluation of their effectiveness

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ
SEAWORTHINESS

Назаров А.Г. Особенности обеспечения непотопляемости малых судов 38

A.G. Nazarov Specifics of providing unsinkability for small craft

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ
STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES

Бойко М.С., Кутейников М.А. Сопоставление методик расчета глобальной ледовой нагрузки на винторулевую колонку 50

M.S. Boyko, M.A. Kuteynikov Comparison between methodologies for calculating global ice load acting on podded propulsion unit

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА
MATERIALS AND WELDING

Дектярев А.В., Гришин П.Р., Пчелинцев А.В., Морозов В.Н. Конструктивно-технологический анализ ремонта системы вентиляции на примере крыльчатки охлаждения двигателя методами 3D-печати 64

A.V. Dektyarev, P.R. Grishin, A.V. Pchelintsev, V.N. Morozov Constructive and technological analysis of 3D-printing application for the ventilation system repair using the engine cooling impeller as an example

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ
MECHANICAL INSTALLATIONS AND PROPULSION

Кича Г.П., Семенюк Л.А., Тарасов М.И., Надежкин А.В. Эксплуатационная эффективность полнопоточной тонкой очистки моторного масла в судовых вспомогательных дизелях 71

G.P. Kicha, L.A. Semenuk, M.I. Tarasov, A.V. Nadezhkin Operational efficiency of full-flow fine cleaning of engine oil in marine auxiliary diesel engines

Подволоцкий Н.М. Регулирование подачи насосов объемного типа 80

N.M. Podvolotsky Capacity regulation of volume pumps

Максимова М.А., Петраков С.А. Альтернативный метод технического обслуживания котельных установок 88

M.A. Maksimova, S.A. Petrakov Alternative method of boiler plant maintenance

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
ELECTRICAL EQUIPMENT

Герасиди В.В. Анализ современных нормативных документов для контроля вибрации электрических машин 96

V.V. Gerasidi Analysis of modern regulations for vibration control of electric machines

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION TECHNOLOGY

Будниченко М.А., Кузьмин Д.В., Спиридонов А.Ю. Векторно-матричный способ описания положений в задачах аналитического моделирования процессов формирования корпуса корабля 107

M.A. Budnichenko, D.V. Kuzmin, A.Yu. Spiridonov Matrix method for describing positions in analytical tasks of ship hull modelling

НЕФТЕГАЗОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ
OIL AND GAS FACILITIES

Таровик В.И., Косьмин С.И., Димитров В.И., Синяков С.М., Утямишев П.А. Оценка эффективности спасательных шлюпок арктических морских нефтегазовых сооружений и возможные перспективные проектные решения 114

V.I. Tarovik, S.I. Kosmin, V.I. Dimitrov, S.M. Sinyakov, P.A. Utyamishev Effectiveness assessment for lifeboats of Arctic offshore oil and gas facilities and possible promising design solutions

Таровик В.И., Косьмин С.И., Димитров В.И., Синяков С.М., Утямишев П.А. Актуальные проблемы функциональной устойчивости и новое проектное решение для спусковых устройств спасательных шлюпок морских нефтегазовых сооружений. 123

V.I. Tarovik, S.I. Kosmin, V.I. Dimitrov, S.M. Sinyakov, P.A. Utyamishev Urgent issues of functional sustainability and new design solutions for launching devices of lifeboats on offshore oil and gas facilities

Правила предоставления статей 130

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 629.12.001.2

ОБЗОР АВАРИЙНОСТИ МОРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА

М.В. Гомзяков, канд. техн. наук, доцент, Дальневосточное управление государственного морского надзора Федеральной службы по надзору в сфере транспорта, Владивосток,
e-mail: Gomzyakov-mv@dvgosmornadzor.ru

В статье рассмотрены предпосылки аварийных случаев на морском транспорте, произошедших в морях Дальнего Востока за период 2011 – 2018 гг. Целью работы является определение условий, при которых эксплуатация объекта исследования – морского судна – завершается аварией. Произведен статистический анализ заключительных актов расследования аварийных случаев за указанный период. Определена величина влияния человеческого фактора на количественные показатели аварийности. Анализ показал, что в основе большинства аварий (89 %) лежит нарушение правил управления и эксплуатации судна и технических средств. Для снижения аварийности необходимо исследовать человеческий фактор с целью повышения его качества.

Ключевые слова: *безопасность мореплавания, человеческий фактор, аварийность, эксплуатация судна, судовые технические средства*

OVERVIEW OF MARITIME TRANSPORT CASUALTIES IN THE FAR EAST

M.V. Gomzyakov, PhD, assistant professor, Far Eastern Directorate for State Maritime Supervision of the Federal Service for Supervision in the Sphere of Transport, Vladivostok,
e-mail: Gomzyakov-mv@dvgosmornadzor.ru

The article contains an overview of marine casualties in maritime transport of the Far East in 2011 – 2018. The objective of the work is identifying the causes of marine casualties outcomes in transport ship management. This article provided a statistical analysis of final investigation reports of marine casualties for the above period. The degree of human factor impact on the accident rate has been determined. The analysis has shown that the basis of most marine casualties (89 %) is violation of the regulations for the ship management and operation of technical means. To reduce accidents, the investigation of the human factor is considered necessary in order to improve its quality.

Keywords: *safety of navigation, human factor, marine casualties, ship operation, ship technical means*

ВВЕДЕНИЕ

Россия, начиная с времен Петра I, имеет заслуженный статус морской державы. Количество морей и океанов, омывающих ее границы, создает благоприятные условия для эффективного морского судоходства и рыболовства. Под эффективной деятельностью, в первую очередь, подразумевается работа в море – вылов биоресурсов или перевозка грузов, – не создающая угрозы жизни и здоровью людей и окружающей морской среде и не сопровождаемая ущербом: повреждениями судна и его технических средств. Как показывает морская практика, уровень аварийности остается на недопустимо высоком уровне, как в мировом, так и в российском судоходстве.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Целью данной работы является исследование причин аварийных случаев на морских транспортных судах, осуществляющих торговое мореплавание в акватории дальневосточных морей. Каждое морское происшествие имеет предпосылкой какое-либо отклонение от норм и правил, установленных законодательно или диктуемых сложившейся хорошей практикой. Для выявления указанных предпосылок в рамках работы необходимо решить следующие задачи:

- произвести анализ заключительных актов о расследовании аварийных случаев на море в дальневосточном регионе;
- выделить происшествия с транспортными судами;
- определить основные группы причин;
- установить степень причастности к аварии человеческого фактора.

В настоящее время учет и расследование аварийных случаев (АС) на море в пределах территориальных вод Российской Федерации регламентируется Положением о расследовании аварий или инцидентов на море (ПРАИМ-2013), заменившим собой действующее до 2014 года Положение о порядке классификации, расследования и учета аварийных случаев с судами (ПРАС-90) [1, 2]. Здесь и далее термины «авария», «аварийный случай» означают (в отличие от ПРАИМ-2013) любое транспортное происшествие на морском судне, связанное с нарушением его целевых функций, за исключением тех, что вызваны противозаконным вмешательством человека в процесс эксплуатации, например, терактом.

В соответствии с указанными документами капитаны судов и судовладельцы обязаны извещать уполномоченные органы о транспортном происшествии, после чего последние начинают процедуру расследования АС. При расследовании устанавливаются все факты, позволяющие воссоздать картину самого происшествия и предшествующих ему обстоятельств. В ходе расследования устанавливаются причины АС, причастные лица и вырабатываются рекомендации судовладельцу для недопущения подобного происшествия в дальнейшем.

В качестве примера можно привести два фрагмента из заключений об АС без указания судна и судовладельца.

Фрагмент из заключения по расследованию АС, произошедшего в октябре 2015 года в Тихом океане восточнее Курильской гряды

«...Причины аварийного случая:

смещение палубного груза в результате его ненадежного крепления и недостаточной остойчивости судна;

неучет ограничений по гидрометеоусловиям, установленных РС;

несоблюдение вахтенным старшим помощником капитана общепринятых приемов и способов управления судном.

10.4. Выводы:

ООО «XXXXX»:

1. Не контролировало проведение грузовых операций, обеспечение безопасности т/х «XXXXX» перед выходом судна в рейс и в рейсе;

2. Не учло прогноз погоды с учетом ограничений, наложенных классом судна, при плавании в осенне-зимний период.

3. Не контролировало надлежащей численности экипажа судна.

Капитан т/х «XXXXX»:

1. Загрузка судна осуществлялась без контроля остойчивости. Фактическая остойчивость судна не соответствовала требованиям Информации об остойчивости.

2. Ненадежное крепление палубного груза, приведшее к его начальному смещению.

Старший помощник капитана т/х «XXXXX»:

1. Не учел влияния гидрометеорологических условий и состояния судна на его маневренные характеристики. Выполнение циркуляции влево после получения первоначального крена на правый борт привела судно в положение, когда левый борт оказался под ударами волн и крен на правый борт увеличился. В результате чего последующее смещение груза на правый борт привело к опрокидыванию т/х «XXXXX».

10.5. Рекомендации по предупреждению подобных аварийных случаев в будущем…».

Фрагмент из заключения по расследованию АС, произошедшего в январе 2017 года в Охотоморской экспедиции (ОМЭ):

«…произошел временный отказ дистанционного управления рулевого устройства. Экипаж перешел на аварийное управление с местного поста в румпельном отделении. После добавления масла и прокачки гидравлической системы дистанционного управления, дистанционная работа рулевой машины восстановилась. В 18:15 обнаружено возгорание в каюте № 37 – старшего механика, расположенной на главной палубе по ЛБ в районе шп. 52 – 54. Очаг пожара находился в районе настольной лампы стола и был потушен переносными огнетушителями силами экипажа. Под столом находился нештатный электронагревательный элемент.

9.3. Причины аварийных случаев:

к отказу рулевого устройства привело завоздушивание системы дистанционного привода гидравлической системы, что стало следствием нарушения старшим механиком инструкций по обслуживанию рулевой машины;

к возгоранию электропроводки в каюте старшего механика привел нештатный электронагревательный элемент (600 Вт) подключенный к розетке настольной лампы рассчитанной на потребление 40 Вт.

9.4. Выводы:

Повреждение судовых технических средств (сепаратора топлива, рулевой машины, возгорания проводки в каюте старшего механика) СРТМ-К «XXXX» явилось нарушением СУБ Общества в части укомплектования соответствующим образом квалифицированными, дипломированными, годными в медицинском отношении моряками в ООО «XXXXX». Программа технического обслуживания и ремонта судна экипажем в период эксплуатации не была возможна вследствие неукомплектования экипажа судна вторым помощником капитана, вторым, третьим механиками и мотористами должной квалификации, что лежит на ответственности судовладельца…».

По окончании расследования заключение о расследовании аварийного случая рассылается заинтересованным сторонам, включая судовладельца, и сохраняется в государственных информационных системах.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На официальном сайте Ространснадзора ежегодно выкладывается краткая статистика аварийности с разбивкой по причинам, видам транспорта, тяжести последствий [4]. При статистической обработке к причинам АС относят:

- недостатки в организации ходовой навигационной вахты и штурманской службы на судах;
- несоблюдение общепринятых приемов и способов управления судном;
- неучет гидрометеорологических особенностей района плавания и стоянки судов;
- несоблюдение Правил технической эксплуатации морских судов (ПТЭ);
- несоблюдение Правил технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций (ПТЭ СТСиК), Положения о технической эксплуатации судов рыбной промышленности и должностных инструкций (ПТЭ СРП);
- нарушение правил морской буксировки;
- несоблюдение правил техники безопасности (ТБ) при швартовых и рыбопромысловых операциях;
- несоблюдение правил техники безопасности при высадке (снятии) морских лоцманов на судно (с судна); нарушение Правил пожарной безопасности (ППБ).

Как следует из приведенных фрагментов, причинами АС в обоих случаях является человеческий фактор (ЧФ) в виде нарушения норм технической или пожарной безопасности. Статистические цифры Ространснадзора с причинами аварийности подтверждают данный вывод. Диаграмма на рис. 1 показывает в процентах по годам долю аварийных случаев, связанных с ЧФ. Всего за рассматриваемый период в государственных информационных системах по дальневосточному региону зарегистрировано 393 АС, включая транспортные и рыболовные суда.

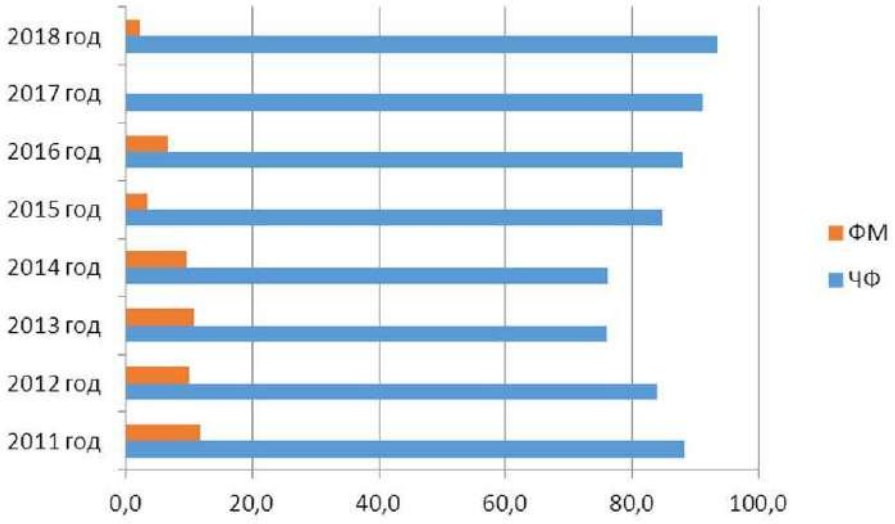


Рис. 1 Человеческий фактор в аварийности судов дальневосточного региона

ФМ – форс-мажор – в рамках работы является обозначением непредвиденного события, наступление которого было невозможно предвидеть или оно было предельно маловероятным. К примерам можно отнести скрытый дефект детали, приведший к поломке механизма, или выход из строя навигационных приборов вследствие солнечной бури.

В среднем, аварийность, связанная с ЧФ за указанный период, составляет 85,5 % с тенденцией к увеличению. В рамках статьи качество самого человеческого фактора не рассматривается, учитывается лишь его влияние на безаварийную эксплуатацию флота и судовых технических средств.

Снижение доли непредвиденных факторов может быть объяснено гидрометеорологической, навигационной и телекоммуникационной аппаратуры, повышением качества метеопрогнозов.

Данный аспект не акцентируется в достаточно подробных сведениях Ространснадзора об аварийности. Так, «показатели аварийности на море по видам» содержат 12 категорий, удобных для сравнения по годам, но не раскрывающих первопричину происшествия. К тому же, простое суммирование показателей по категориям может привести к ошибочным результатам. Например, повреждение главного двигателя (ГД) может сопровождаться взрывом или пожаром, навал или столкновение – повреждением корпуса или СТС. В заключениях по расследованиям АС, составленных территориальными органами Ространснадзора, указываются причастные к аварии лица, перманентный учет которых можно использовать в целях управления безопасностью мореплавания. Без воздействия на первичное звено в аварийной цепи обеспечение безопасности торгового мореплавания является трудноразрешимой задачей. Анализ таких звеньев следует производить в соответствии с направлением деятельности: перевозка грузов или добыча биоресурсов.

3. ТРАНСПОРТНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ АВАРИЙНОСТИ

На транспортные суда в общем количестве АС приходится от 40 до 60 % аварийности (рис. 2).

Отнесение аварийного судна к рыбакам или транспортникам в данной работе производится в соответствии с основным функционалом: если судно не занято ловом рыбы или добычи иных биоресурсов, то оно учитывается как транспортное. При этом судовладельцем такого судна может являться рыболовная компания. Компетентность экипажей рыболовного и транспортного судна различается, порой значительно. Это отражается на качестве управления судном и эксплуатации судовых технических средств.

Доля причастности человеческого фактора к авариям на транспортных судах колеблется в разные годы от 71 до 100 % и в среднем составляет 88,9 % (рис. 3). Так, все аварийные случаю за 2017 год имели своей первопричиной человеческий фактор. При этом в заключениях экспертной комиссии не фигурирует износ судна или технических средств, что могло бы свидетельствовать о возрастных причинах АС. Отсутствие связи аварийности со сроком службы судна подтверждается также рядом работ различных авторов [3, 5].

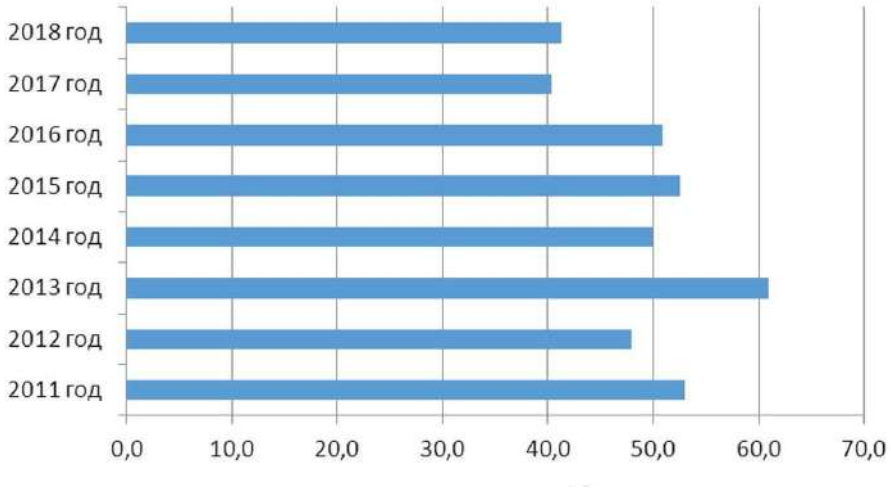


Рис. 2 Аварийность транспортных судов по годам, %%

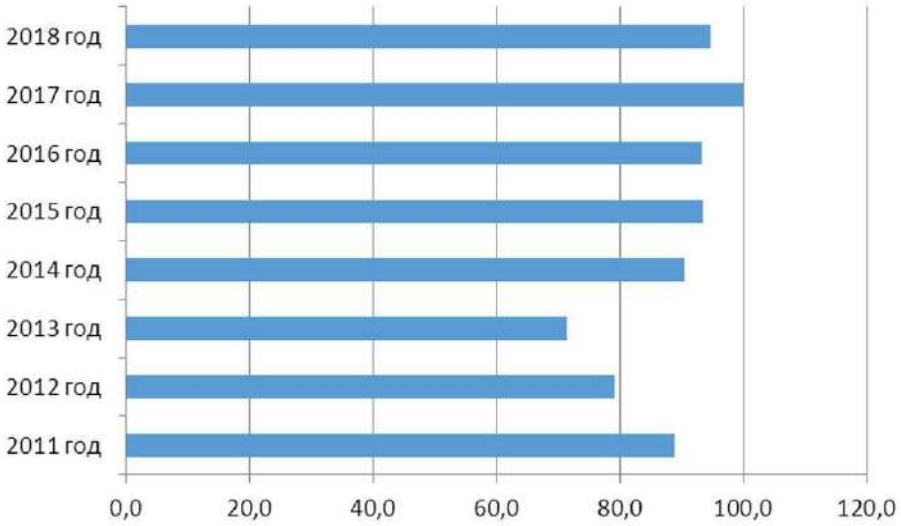


Рис. 3 Человеческий фактор в аварийности транспортных судов, %%

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УЩЕРБА

Начиная с 2015 года в заключение по расследованию аварии вносятся сведения о простое судна вследствие АС. Анализ исследуемых заключений показал, что средняя продолжительность простоя судна составляет 13 сут и практически одинакова для рыболовных и транспортных судов (рис. 4).

Для определения величины среднего простоя не использовались сведения из заключений АС, связанных с гибелью судна, продажей или последующим длительным выводом в отстой. При таких допущениях цифры простоя наиболее близки к реальным перерывам в эксплуатации судна.

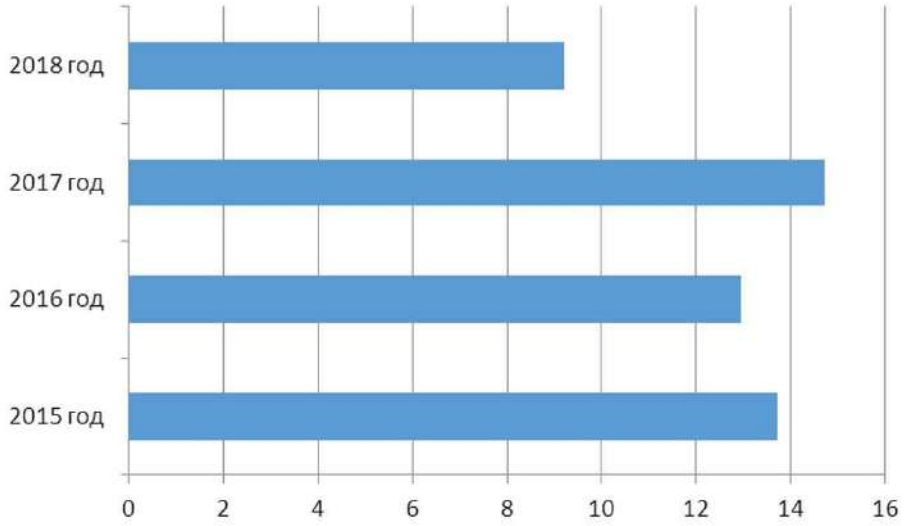


Рис. 4 Средний простой судна по причине АС за 2015 – 2018 гг

5. ГРУППЫ АВАРИЙНОСТИ

Учитывая, что ключевой характеристикой члена экипажа морского судна является компетентность, целесообразно аварийность по причинам, связанным с ЧФ, разбить на две основные группы в соответствии с функциями международной конвенции ПДНВ-78 с поправками. Группа «Навигация» соответствует функциям конвенции «судовождение», «крепление и обработка грузов», «управление операциями и забота о людях». Вторая группа объединяет «судовые механические установки», «электрооборудование судов», «техническая эксплуатация». Форс-мажор и нарушения техники безопасности для построения диаграммы не использовались. Показатели приведены в процентах от количества АС в каждом году.

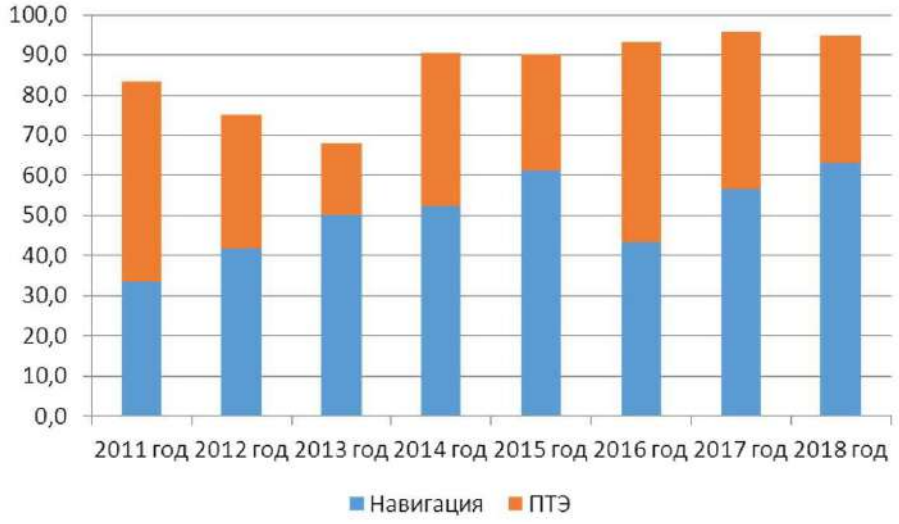


Рис. 5 Группы причин аварийности по годам, %

Доля «технических» причин колеблется от 18 до 50 %, в среднем 36 %. Данный показатель не противоречит исследованиям других авторов [3, 5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате анализа заключительных актов о расследовании аварийных случаев на море в дальневосточном регионе с транспортными судами определены основные группы причин, установлена величина человеческого фактора как первоисточника аварийности. Установлена транспортная доля аварийности в общем количестве АС дальневосточного региона в восьмилетней ретроспективе.

Большинство аварийных случаев произошло вследствие несоблюдения береговым персоналом и членами экипажей транспортных судов обязательных нормативных требований в части управления судном и эксплуатации судовых технических средств.

Показатели свидетельствуют о том, что применяемые в настоящее время меры по снижению аварийности не являются эффективными, и что для решения такой важной народнохозяйственной задачи как безопасность мореплавания требуется новые подходы, в том числе и к оценке человеческого фактора. Результаты обзора, изложенные в данной работе, могут послужить основой для дальнейших исследований в деле повышения безаварийной эксплуатации морского транспорта.

Представляется, что перспективными подходами могут являться:

- меры административного характера, применяемые к причастным к АС лицам;
- создание с помощью интеграции ведомственных информационных ресурсов постоянно действующей административной обратной связи между нарушителями нормативных требований и некачественной эксплуатацией судовых технических средств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Положение о порядке классификации, расследования и учета аварийных случаев с судами (ПРАС-90) (Утв. приказом Министра морского флота СССР от 29.12.89 N 118).
2. Положение о расследовании аварий или инцидентов на море (ПРАИМ-2013), – СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2014. – 48 с.
3. Шурпяк, В.К. Анализ аварийности на судах и технология технического наблюдения –Электронное издание PRoАтом № 16.06.2010 URL:http://www.proatom.-ru/modules.php?name=News&file=article&sid=2395 – (Режим доступа 01.05.2019).
4. Госморречнадзор Анализ и состояние аварийности/Сведения об аварийности с судами на море и внутренних водных путях: [Электронный ресурс]:URL: http://sea.rostransnadzor.ru/funktsii/rassledovanie-transportny-h-proisshes/analiz-i-sostoyanie-avarijnost (дата обращения: 01.05.2019).
5. Друзь И.Б. Безопасность функционирования судовых энергетических установок возрастных судов в зоне ответственности ДВУ Госморнадзора [текст]/И.Б. Друзь, И.П Турищев, М.В. Гомзяков, О.В. Москаленко//Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2018. № 4 (37) стр. 41 – 50.

REFERENCES

1. *Polozhenie o porjadke klassifikacii, rassledovanija i ucheta avarijnyh sluchaev s sudami (PRAS-90)* [Regulations on the procedure of classification, investigation and reporting of marine casualties with ships] (Utv. prikazom Ministra morskogo flota SSSR ot 29.12.89 N 118 [enacted by the Order of the Ministry for Maritime Fleet of the USSR dated 29.12.89 N 118]).
2. *Polozhenie o rassledovanii avariy ili incidentov na more (PRAIM-2013)* [Regulations on the investigation of casualties and incidents at sea] – SPb.: ZAO CNIIMF, 2014. – 48 p.
3. Shurpyak V.K. *Analiz avariynosti na sudakh i technologiya tekhnicheskogo nablyudeniya* [Analysis of accidents on ships and technology of technical supervision. Atomic year: events, forecasts, scandals] [website]. Proatom Agency 16.06.2010. URL:http://www.proatom.-ru/modules.php?name=News&file=article&sid=2395 – (accessed at 01.05.2019).
4. Gosmorrechnadzor *Analiz i sostojanie avarijnosti/Svedenija ob avarijnosti s sudami na more i vnutrennih vodnyh putjah* [Analysis and condition of accidents/Information about accidents with ships at sea and rivers]:[website]:URL: http://sea.rostransnadzor.ru/funktsii/rassledovanie-transportny-h-proisshes/analiz-i-sostoyanie-avarijnost (accessed: 01.05.2019)
5. Druz I.B. *Bezopasnost' funkcionirovaniya sudovykh energeticheskykh ustanovok vozrastnykh sudov v zone otvetstvennosti DVU Gosmornadzora* [Safe operation of main power plants of aging ships as a subject of control and supervision by the Far Eastern Directorate for State Maritime Supervision [text]/I.B. Druz, I.P. Turishhev, M.V. Gomzyakov, O.V. Moskalenko// Vestnik inzhenernoj shkoly DVFU. – 2018. № 4(37) pp. 41 – 50

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 338.054.23

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ОТ ВВЕДЕНИЯ ЗАПРЕТА НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ПЕРЕВОЗКУ ТЯЖЕЛОГО ТОПЛИВА КАК ТОПЛИВА ДЛЯ СУДОВ В АРКТИЧЕСКИХ ВОДАХ

С.В. Ганеева, АНО «Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации», Москва, e-mail: ganeeva@ac.gov.ru
М.И. Крупин, АНО «Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации», Москва, e-mail: m.krupin@ac.gov.ru
Б.Р. Оглы Новрузов, АНО «Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации», Москва, e-mail: b.novruzov@ac.gov.ru
А.В. Сафронов, канд. экон. наук, АНО «Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации», Москва, e-mail: a.safronov@ac.gov.ru

В статье приведена оценка экономических потерь, которые возникнут у судовладельцев, грузоотправителей, грузополучателей и третьих лиц в случае введения обсуждаемого в настоящее время Международной морской организацией запрета на использование и перевозку в качестве топлива тяжелого судового топлива в арктических водах. Показано, что хотя запрет не окажет критического влияния на арктическое судоходство, потери от его введения составят порядка 5 млрд рублей единовременно и 30 млрд рублей ежегодно (за счет удорожания топлива) и не будут скомпенсированы снижением рисков разливов ввиду того, что благодаря уже применяемым мерам безопасности разливы тяжелого топлива как минимум с 2006 года отсутствуют, а ежегодная доля гибели судов в акватории СМП не превышает 0,04 %, что меньше аналогичного показателя мирового флота примерно в 10 раз. Кроме того, запрет повлечет за собой ускорение специализации флота и превращение Арктики в более закрытый для неспециализированных судов регион.

Ключевые слова: *ИМО, Международная морская организация, тяжелое топливо, арктическое судоходство, запрет тяжелого топлива, северный завоз, экономика судоходства*

ECONOMICAL ASSESSMENT OF FINANCIAL LOSSES RESULTING FROM THE BAN ON USE AND CARRIAGE OF HEAVY FUEL OIL FOR SHIPS IN THE ARCTIC

S.V. Ganeeva, Analytical Center for the Government of the Russian Federation, Moscow, e-mail: ganeeva@ac.gov.ru
M.I. Krupin, Analytical Center for the Government of the Russian Federation, Moscow, e-mail: m.krupin@ac.gov.ru

B.R. Ogly Novruzov, Analytical Center for the Government of the Russian Federation, Moscow,
e-mail: b.novruzov@ac.gov.ru
A.V. Safronov, Ph.D. Analytical Center for the Government of the Russian Federation, Moscow,
e-mail: a.safronov@ac.gov.ru

The article provides an assessment of the economic losses potentially incurred to shipowners, shippers, consignees and third parties in the event that the International Maritime Organization introduces the currently discussed ban on use, and carriage of heavy fuel oil as fuel by ships in Arctic waters. It is demonstrated that although the ban will not have a critical impact on the Arctic navigation, the losses from its introduction will reach about 5 billion rubles one time and 30 billion rubles annually (due to the rise in fuel price) and will not be compensated by the reduction of heavy fuel oil spills risk. This is due to the fact that owing to the already applied safety measures there have been no heavy fuel oil spills since at least 2006, and the annual share of ship accidents through the Northern Sea Route does not exceed 0,04 %, which is about 10 times less than the similar world fleet index. Moreover, the ban will enforce the specialization of the fleet and the transformation of the Arctic into a region more restricted for non-specialized vessels.

Keywords: *IMO, International Maritime Organization, heavy fuel oil, Arctic navigation, the ban on heavy fuel oil, northern supply haul, shipping economic scheme*

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья содержит краткие выводы из научно-исследовательской работы, проведенной Аналитическим центром с привлечением экспертов ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адм. С.О.Макарова» по заказу Российского морского регистра судоходства.

В ходе 72-ой сессии Комитета Международной морской организации (ИМО) по защите морской среды (КЗМС) Подкомитету по предотвращению загрязнения и реагированию (PPR) было поручено разработать проект запрета использования тяжелого топлива и его перевозки (в качестве топлива) на судах, эксплуатирующихся в арктических водах [1].

Согласно спецификации Международной организации стандартов (ISO) – ISO 8217-2017 – судовое топливо разделено на дистиллятные и остаточные виды. К тяжелым сортам топлива относятся остаточные виды топлива, имеющие кинетическую вязкость при температуре 50 °C выше 180 мм^2/с. Примером тяжелого вида судового топлива являются марки IFO 180 и IFO 380, используемые наиболее часто. Наиболее массовым топливом среди дистиллятов является газойль (MGO).

Рабочее определение тяжелого топлива для целей анализа последствий запрета было дано в отчете Комитета по защите морской среды 9 июня 2019 года [2]. Пунктом 10.23 отчета установлено, что тяжелым топливом считается топливо, имеющее при температуре 15 °C плотность свыше 900 кг/м^3, либо при температуре 50 °C кинематическую вязкость свыше 180 мм^2/с. Под это определения подпадают все рассмотренные российские марки моторных топлив (ДТ и ДМ) и мазутов (Ф-5 и Ф-12) и не подпадают дистиллятные виды топлива.

Целью исследования является проведение анализа последствий запрета на использование тяжелого топлива и его перевозку (в качестве топлива) на судах, эксплуатирующихся в арктических водах, для судовладельцев и компаний, осуществляющих свою деятельность в арктических районах России, местного населения, а также в отношении изменения перспектив дальнейшего экономического развития данных регионов.

Границы арктических вод определены правилом 1.3 главы XIV СОЛАС, их российский сегмент примерно соответствует акватории Северного морского пути (СМП), как она определена Федеральным законом от 30.04.1999 № 81-ФЗ (ред. от 27.12.2018), акватории Баренцева и Берингова морей и приполярной области севернее указанных акваторий. Предполагается, что в настоящее время и в обозримом будущем судоходство будет развиваться именно в акватории СМП, Баренцева и Берингова морей, поэтому анализ последствий запрета тяжелого топлива выполнялся преимущественно для этих регионов.

1. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ РАСХОДЫ СУДОВЛАДЕЛЬЦЕВ

За пределами акватории СМП в акватории, на которую распространяются положения Международного кодекса для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярного кодекса), работает постоянно порядка 400 судов (в акватории Баренцева моря до 300 судов, в акватории Берингова моря до 100 судов, из которых около трети заходят в акваторию СМП).

В акватории СМП ежегодно работают около 600 судов (581 судно в 2018 году), принадлежащих порядка 200 судоходным компаниям, причем около 80 % флота работают в акватории СМП из года в год, а 20 % судов осуществляют разовые несистемные заходы. При этом 90 % грузооборота обеспечивается действиями всего 100 судов. Подавляющее большинство из них может работать как на тяжелом (мазут), так и на дистиллятном (дизельном) топливе без переоборудования двигательной установки (только на мазуте работает 3 судна из этой сотни).

Все суда были разделены на 3 группы в зависимости от объема требуемых для перехода на дистиллятное топливо работ.

За 2018 – 2019 гг. в акваторию СМП заходило 744 судна, из которых 235 при введении запрета на тяжелое топливо потребовалась бы замена топливной системы (Группа 3, совокупные издержки составят 4935 млн. руб), а еще 46 – промывка танков основного запаса, т.к. главные танки у них именно мазутные (Группа 2, совокупные издержки составят 46 млн руб). Это преимущественно суда, возраст которых составляет от 5 до 15 лет.

При отсрочке введения запрета использования тяжелого топлива на 3 – 5 лет возможно исключить избыточные затраты на промывку танков, поскольку мойка или отпаривание танков является обязательной процедурой для прохождения освидетельствования судна (1 раз в 5 лет).

Вместимость судов, требующих переоборудования, в среднем в 2,3 раза ниже, чем судов, которым оно не требуется, т.е. переоборудования требуют, как правило, маломерные суда.

Судам в количестве 463 единицы никакое переоборудование не потребовалось бы (Группа 1). В основном это речные суда и суда типа «река-море», работающие исключительно на дизельном топливе. Это преимущественно новые суда, с возрастом до 5 лет и суда с мощностью менее 3 МВт различного возраста (суда типа «река-море», вспомогательный флот, речные).

Промывка танков оценивается суммой для одного судна порядка 1 млн руб.; в случае, если за пределами зоны действия Полярного кодекса судно будет продолжать использовать тяжелое топливо, ее необходимо будет проводить каждый раз перед заходом в арктические воды.

Стоимость замены системы топливоподготовки варьируется в зависимости от мощности двигателя и типа двигательной установки и в среднем составляет 20 млн руб. плюс потери от простоя судна в течение 20 – 30 сут. Более точно стоимость замены возможно определить только при подготовке технического проекта. По экспертным оценкам для судов старше 10 лет стоимость переоборудования топливных систем увеличится на 25 %.

С учетом приведенных оценок, совокупные единовременные затраты судовладельцев при введении запрета на тяжелое топливо составят порядка 5 млрд руб. (см. табл. 1).

Кроме того, запрет ухудшит экономику работы судов, которые часть года работают в «теплых» водах (не арктическая зона), т.к. издержки на промывку танков им придется нести каждый раз перед новым заходом в арктическую зону.

Наиболее значительным является рост текущих затрат, связанный с удорожанием топлива.

По состоянию на 16 сентября 2019 года средняя стоимость судового топлива марки IFO 380 HS (тяжелое топливо) в портах Российской Федерации (Санкт-Петербург, Владивосток, Мурманск, Архангельск) составила 337 долларов США за тонну. Введение с 1 января 2020 года новых требований конвенции МАРПОЛ 73/78 по содержанию серы в любом жидком топливе, используемом на судах, некритично повлияет на изменение стоимости тяжелого судового топлива. Например, введение с 1 января 2012 года требования Конвенции по ограничению доли серы до 3,5 % по массе не привело к расхождениям по динамике стоимости низкосернистого и тяжелого судового топлива.

Средняя стоимость газойля марки MGO в портах Российской Федерации (Санкт-Петербург, Владивосток, Мурманск, Архангельск) на 16 сентября 2019 года составляла 566,8 долларов США за тонну. Таким образом, разница составляет 40 – 60 % или на 170 – 220 долларов США за тонну (цена топлива колеблется вместе с колебаниями цен на нефть).

С учетом указанного удорожания и исходя из оценок потребления судового топлива судами всех трех групп дополнительные годовые издержки судовладельцев составят 30,2 млрд руб. (см. табл. 1) [3].

Таким образом, запрет слабо повлияет на валовые объемы перевозок по СМП (90 % обеспечивается небольшим числом арктических танкеров и газовозов), но повлечет за собой ускорение специализации флота и превращение Арктики в более закрытый для неспециализированных судов регион.

Из порядка 600 судов, работающих в акватории СМП, 200 судов имеют ледовый класс **Arc4** и выше, причем доля судов высокого ледового класса (**Arc7**) растет. Эти суда экономически нецелесообразно эксплуатировать в «теплых» водах, поэтому те их них, которым требуется переоборудование для перехода на дистиллятное топливо, скорее всего, будут подвергнуты такому переоборудованию. Исключение составляют эпизодически заходящие в акваторию суда с ледовым классом **Arc4** и **Arc5**, для которых российская Арктика очевидно не является основным регионом хозяйственной деятельности (40 – 50 судов).

Таблица 1

Единовременные и ежегодные дополнительные затраты по группам судов на переход с тяжелого на дистиллятные виды топлива, млрд руб

Типы судов, входящих в группу, и их характеристики	Количество судов	Затраты на переход на дистиллятные виды топлива, млрд руб.		
		Технологическая подготовка	Замена системы топливоподготовки	Удорожание топлива
Группа 1				
СПГ-танкер YamalMax	13	Не требуется	Не требуется	10,06
Танкер 42K Arctic Shuttle Oil	6			2,29
Танкер типа «Михаил Ульянов»	5			1,91
Танкеры нефти (фрахт)	10			0,37
Танкеры СПГ (фрахт)	6			0,81
Продуктовые танкеры (химовозы)	9			0,00
Суда генеральный груз, балкеры	16			1,00
Ледоколы дизель-электрические	8			0,00
Суда, работающие на дизельном топливе (рыболовные, вспомогательные и научно-исследовательские)	390			0,00
Итого	463			16,44
Группа 2				
Суда Arctic Express	6	0,006	Не требуется	1,15
Танкеры **Arc4**, **Arc5**	10	0,010		0,53
Танкеры без ледового класса	10	0,010		0,53
Суда генеральный груз, балкеры	20	0,020		0,64
Итого	46	0,046		2,85
Группа 3				
Танкеры **Arc4**, **Arc5**	60	0,06	1,20	3,18
Танкеры без ледового класса	100	0,10	2,00	5,30
Суда генеральный груз, балкеры	75	0,075	1,50	2,40
Итого	235	0,235	4,70	10,88
ВСЕГО		**0,281**	4,70	30,17

Суда низкого ледового класса или суда, вообще не имеющие ледового класса, могут при ухудшении экономических условий работы уйти из полярных вод в районы, где ограничения на тяжелое топливо не действуют. Из порядка 400 судов с ледовым классом ниже **Arc4** переоборудование потребуется одной трети (130 судов).

Таким образом, около 170 судов могут отреагировать на запрет тяжелого топлива уходом из Арктики, если не удастся перенести возросшие издержки на грузовладельцев.

Выше учтен рост текущих затрат уже действующих в арктических водах судов. При этом уже приняты решения о строительства ряда судов вспомогательного и обслуживающего флота за государственный счет, эксплуатация которых также станет дороже.

Не считая атомных ледоколов, для работы в зоне действия Полярного кодекса в соответствии с Комплексным планом модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 года (КПМИ) планируется строительство одного ледокола мощностью 12 – 14 МВт. При суточном расходе

топлива 40 тонн и средней продолжительности работы портового ледокола от 140 до 160 дней, объем затрат на топливо возрастет с 138 – 158 млн рублей до 214 – 244 млн рублей, или на 86 млн руб. в год.

Также планируется построить 4 гидрографических судна ледового класса **Arc7** проекта HSV05.1, 5 гидрографических судов проекта Е35.Г класса **Ice3**, 4 лоцмейстерских судна ледового класса **Ice3** проекта BLV03. Период использования ограничен в среднем 100 днями в году. При суточном расходе 30 тонн для гидрографических и 18 тонн для лоцмейстерских судов объем топлива для их эксплуатации составит 23818 тонн. С учетом указанного удорожания рост затрат на топливо составит 359 млн руб.

Таким образом, в случае введения запрета на тяжелое топливо рост затрат на топливо для строящихся в рамках КПМИ судов составит 445 млн руб. ежегодно, а для всех судов – 30,6 млрд рублей ежегодно.

2. УДОРОЖАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ВИДОВ ПЕРЕВОЗИМОЙ ПРОДУКЦИИ

В настоящее время через территории, обозначенные в Полярном кодексе (в части Северного морского пути), морским транспортом осуществляется перевозка с месторождений ПАО «Газпром нефть» (месторождения Приразломное и Новопортовское), ПАО «НОВАТЭК» (проект «Ямал-СПГ») и ПАО «Норильский никель» (месторождения Северо-Сибирской никеленосной металлогенической провинции).

При росте стоимости топлива с 380 $ за тонну тяжелого топлива 380cSt HSFO до 612 $ за тонну легкого топлива MGO (при условии бункеровки в морском порту Мурманск по состоянию на 17 сентября 2019 года) при курсе доллара 65 рублей увеличение расходов составит 15080 рублей на одну тонну топлива.

СПГ-танкеры YamalMax для перевозки грузов ПАО «НОВАТЭК» имеют возможность работы как на традиционном топливе, так и на отпарном СПГ [4]. Во втором случае топливом для танкера является его груз. Сейчас танкера работают преимущественно на традиционном топливе, но в начале 2019 года представители ПАО «Новатэк» сообщили, что рассматривается возможность организации бункеровок сжиженным природным газом (СПГ) в порту Сабетта (Ямал) [5]. С высокой вероятностью при введении запрета на тяжелое топливо газовозы полностью перейдут на СПГ-топливо, а ПАО «Новатэк» предложит своему перевозчику ПАО «Совкомфлот» особые тарифы на СПГ как топливо для газовозов, спрогнозировать которые не представляется возможным, поэтому в данной работе разница в себестоимости перевозок сжиженного природного газа с проекта «Ямал-СПГ» после введения запрета не учитывается.

С учетом прогноза добычи сырой нефти в 2019 году с Новопортового месторождения в размере 7,5 млн тонн и с месторождения Приразломное в размере 3,241 млн тонн было определено требуемое число круговых судозаходов для ее вывоза имеющимся флотом и рассчитано, что 1 тонна топлива позволяет вывезти 55 тонн сырой нефти с Новопортового месторождения и 147 тонн сырой нефти с месторождения Приразломное. Тогда себестоимость топлива в одной тонне перевезенной сырой нефти с Новопортового месторождения возрастет на 235,6 руб. (с 444,6 руб. до 680 руб.), а в одной тонне перевезенной сырой нефти с месторождения Приразломное на 79,9 руб. (с 176,6 руб. до 257 руб.).

В целом себестоимость перевозок сырой нефти для ПАО «Газпром нефть» с обоих месторождений возрастет на 2,03 млрд руб. в год (с 3,33 млрд руб. до 5,1 млрд руб. с Новопортового месторождения и с 0,57 млрд руб. до 0,83 млрд руб. с месторождения Приразломное).

Еще одним крупнейшим перевозчиком минеральных ресурсов морским транспортом является ПАО «Норильский никель». Для него в абсолютном выражение рост затрат на топливо составит 475 млн руб. в год (15 080 рублей х 31500 тонн топлива, требуемых для вывоза годового объема груза).

В КПМИ включено строительство 4 терминалов («Утренний», «Чайка», терминал в бухте Север, угольный терминал в порту Диксон), для чего потребуется завоз 1,4 млн тонн строительных грузов, что потребует примерно 70 судозаходов (при доставке 180 – 200 тыс. тонн за судозаход) и 7560 тонн топлива. С учетом указанного удорожания топлива затраты на доставку грузов возрастут на 114 млн руб.

Удорожание грузов «северного завоза»

Важнейшую социальную функцию имеет «северный завоз» необходимых для жизнеобеспечения населения арктических территорий грузов. Суммарное количество населения территорий 25 субъектов Российской Федерации, в которые осуществляется «северный завоз», составляет около 3 млн человек (2863,9 тыс. человек). Речные суда не используют тяжелое топливо, поэтому на население, снабжаемое исключительно по рекам, запрет не повлияет.

Доставка грузов с использованием тяжелого топлива осуществляется в 11 субъектах Российской Федерации (численность зависимого населения 1222670 человек), из них территории 5 субъектов Российской Федерации, а именно Архангельская и Мурманская области, Красноярский край, Республика Саха (Якутия), Чукотский

автономный округ, частично входят в Арктическую зону Российской Федерации (численность зависимого населения составляет 381,8 тыс. человек). 100 тыс. из них относятся к коренным малочисленным народам.

Всего для обеспечения «северного завоза» задействовано 23 судна (5 танкеров, 12 судов для перевозки генеральных грузов и 6 судов для перевозки генеральных и контейнерных грузов). Из них 6 судов способны использовать только тяжелое топливо. Возраст судов достаточно высок: 14 судов со сроком эксплуатации свыше 20 лет, 7 судов со сроком эксплуатации около 20 лет, и 2 судна со сроком эксплуатации 7 лет.

Ввиду того, что в каждом регионе используются свои схемы завоза, оценка последствий была произведена на примере республики Саха (Якутия).

Количество населения в Республике Саха (Якутия), зависимого от «северного завоза» и проживающего в пределах территории Полярного кодекса (в Арктической зоне Российской Федерации) составляет 68327 человек (всего же от «северного завоза» в Республике Саха (Якутия) зависит 875574 человека или 91 % населения). В течение 2018 года в Республику Саха (Якутия) в рамках «северного завоза» было поставлено морским транспортом 133,5 тыс. тонн различных грузов. Таким образом, стоимость завезенных морем товаров на одного человека для населения, проживающего в пределах территории Полярного кодекса (в Арктической зоне Российской Федерации) Республики Саха (Якутия),составляет 54498 рублей.

Для перевозки 133,5 тыс. тонн потребуется 19 рейсов на судах с дедвейтом 7 тыс. тонн. Средний расход топлива в сутки на судно составит 30 тонн, и с учетом этого расход топлива за навигацию (то есть в год) составит 13318 тонн. Тогда себестоимость топлива в объеме доставляемых морем грузов составляет 328,9 млн руб., или 2464 руб. на тонну грузов «Северного завоза», или 4814 руб. на человека.

При переходе на легкое топливо, с учетом коэффициента энергоемкости в 4 %, требуемый объем топлива составит 12785 тонн. С учетом указанной разнице в цене топлива удорожание завозимых грузов составит 2629 руб. на человека в год.

Величина удорожания, полученная по данным республики Якутия, при распространении на другие регионы была скорректирована с учетом действующей в них величины МРОТ для учета региональных различий в уровне цен.

С учетом проведенной корректировки при численности населения, снабжаемого грузами «северного завоза» морским путем 1,2 млн человек, совокупное удорожание составит от 4,2 до 5,3 млрд руб. ежегодно.

Кроме того, с учетом возраста используемых для «северного завоза» судов владельцы 6 судов, которым потребуется переоборудование, могут отказаться от него, что может привести к временной нехватке флота для обеспечения полных объемов завоза за навигацию.

При этом из общей численности коренного населения добычей морских биоресурсов занимается всего 6 % (5906 человек), причем большинство делает это посредством участия в промышленном рыболовстве, т.е. традиционные промыслы морского зверя, на защиту которых от экологической опасности официально направлен обсуждаемый запрет, не смогут заменить перебои в снабжении привозными продуктами питания.

Таким образом, рост себестоимости перевозок нефти составит 2,03 млрд руб. в год, перевозок никелевых руд 475 млн руб. в год. Удорожание себестоимости завоза необходимых для реализации КПМИ строительных грузов составит совокупно за период строительства 114 млн. руб. Удорожание грузов «северного завоза» составит не менее 1 млрд в год. Поскольку трети судов, используемых для «северного завоза», потребуется переоборудование, на которое владельцы с учетом возраста судов могут не пойти, возможны перебои с поставками жизнеобеспечивающих грузов.

3. ПРОЧИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ЗАПРЕТА

Помимо непосредственных участников перевозки и грузополучателей, потери от запрета понесут также арктические подразделения аварийно-спасательных служб, которым придется списать за ненадобностью закупленное ранее специализированное оборудование, предназначенное для ликвидации разливов тяжелого топлива. За последние 5 лет для ликвидации разливов нефтепродуктов тяжелых сортов топлива при низких температурных режимах ФГБУ «Морспасслужба» закупила специализированные аварийно-спасательные средства на сумму 241 млн руб.[1]. При введении запрета эти расходы окажутся бросовыми и подлежат списанию.

[1]Письмо заместителя руководителя Росморречфлота А.И. Пошивая Руководителю Аналитического центра при Правительстве Российской Федерации В.В. Онищенко от 25.09.2019 № АП-19/11220

4. ОЦЕНКА ДОСТИЖИМОСТИ ЦЕЛЕЙ ЗАПРЕТА

Официально запрет предлагается с целью снижения рисков ущерба арктическим экосистемам от разливов тяжелого топлива. За период 2006 – 2019 гг. зафиксировано 36 аварийных случаев (с участием 52 судов, в том числе 5 судов под иностранными флагами), при этом аварий с участием танкеров было 9 (9 российских судов и 5 судов под иностранными флагами). Повреждений топливных танков не зафиксировано, балластный танк был поврежден в 1 случае, разливов содержимого топливных и балластных танков не зафиксировано. За период с 2013 года по 2019 год в акватории Арктической зоны зафиксировано 4 745 судов [6], за тот же период аварийных случаев было всего 18, с участием 23 судов (в том числе 5 судов под иностранными флагами). Практически 100 % аварий и серьезных инцидентов в акватории СМП произошли с участием судов, которые нарушили Правила плавания по СМП.

Страховые компании отмечают, что ежегодная доля гибели судов в акватории СМП не превышает 0,04 %, что меньше аналогичного показателя мирового флота примерно в десять раз [7].

Таким образом, действующих мер безопасности достаточно, предлагаемый запрет не улучшит положение дел, так как разливы тяжелого топлива отсутствуют уже в настоящее время.

5. ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ ЗА РЕАЛИЗАЦИЕЙ ЗАПРЕТА

Государственный портовый контроль в морских портах осуществляется в соответствии с приказом Минтранса России от 26.10.2017 № 463 «Об утверждении Общих правил плавания и стоянки судов в морских портах Российской Федерации и на подходах к ним» (далее – Общие правила). Общими правилами регламентирован порядок осмотра судов, в целом позволяющий проводить контроль используемого и перевозимого топлива.

Основную проблему составляет контроль соблюдения запрета на использование и перевозку тяжелого топлива на судах, следующих транзитом через зоны запрета, без захода в морские порты. Проведение каких-либо досмотровых действий на транзитных судах может быть расценено как нарушение свободы судоходства и нормативно-правовыми актами в настоящее время не предусмотрено.

Альтернативой запрету могло бы стать установление рекомендуемых маршрутов движения, проходящих в удалении от особо охраняемых природных территорий, которое легко контролировать по данным о расположении судна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый запрет приведет к существенному удорожанию морских перевозок в Арктике. Единовременные затраты судовладельцев на переоборудование действующих в Арктике судов составят порядка 5 млрд руб. Совокупные разовые дополнительные затраты составят 5,2 млрд руб., причем затраты на промывку танков (порядка 1 млн руб. на судно) надо будет нести каждый раз при заходе в зону действия Полярного кодекса, из-за чего эпизодически работающие в ней суда могут предпочесть покинуть ее. Всего из Арктики могут уйти около 170 судов из порядка 600 судов, работающих в акватории СМП ежегодно. При этом запрет не приведет к существенному изменению объемов перевозок, т.к. 90 % грузов перевозится 100 судами, большинству из которых переоборудование не требуется. Общий рост расходов на топливо составит 30,6 млрд рублей ежегодно (20,5 млрд. руб. без учета газовозов YamalMax) (см. табл. 2). Это вызовет удорожание перевозки тонны нефти на 80 – 226 рублей (в зависимости от месторождения), тонны продукции ПАО «Норникель» на 346,5 руб., тонны строительных грузов на 80 – 83 рубля, тонны грузов «Северного завоза» на 1346 руб., или на 2629 руб. на человека в год.

Запрет может привести к временным перебоям в доставке грузов «северного завоза», т.к. переоборудование потребуется трети используемых для этого судов, большинство из которых имеют возраст свыше 20 лет. При этом только 6 % коренного населения практикует морское рыболовство, на защиту которого направлен запрет, причем в большинстве своем речь идет о промышленном вылове рыбы, а не о традиционной охоте. Действующие требования безопасности судоходства эффективно предотвращают разливы тяжелого топлива, которых не происходило в течение как минимум последних 15 лет, а правовые основания контроля за исполнением предлагаемого запрета транзитными судами отсутствуют.

Таблица 2

Общие экономические потери от запрета тяжелого топлива

Статьи затрат	Разовые дополнительные затраты (млрд руб)	Ежегодные дополнительные затраты (млрд руб)
Удорожание затрат на топливо, в т.ч.:		30,616
действующего флота		30,17
строящегося служебно-вспомогательного флота		0,446
Удорожание затрат на топливо без учета газовозов YamalMax		20,556
Затраты на переоборудование судов	4,7	
Затраты на промывку танков	0,281	
Бросовые затраты на специализированную аварийно-спасательную инфраструктуру	0,241	
ИТОГО	**5,222**	**30,616 (20,556)***
Справочно:		
Рост себестоимости перевозок минеральных ресурсов и строительных грузов		2,694
Рост себестоимости завоза грузов «северного завоза»		от 4,2 до 5,3
[1]В скобках цифра без учета газовозов YamalMax.		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Report to the Marine Environment Protection Committee PPR 6/20.
2. Report of the Marine Environment Protection Committee on its seventy-fourth session MEPC 74/18.
3. Анализ статистических данных и ведомственной информации, а также оценка затрат на аварийно-спасательную готовность на случай разлива тяжелого топлива [текст]: отчет о НИР (заключительный): 32-33 / ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»; рук. А.Л Тезиков.; исполн.: В.А. Жуков [и др.]. – СпБ., 2019. – 243 с. – Рег.№ АААА-А19-119082790002-3.
4. Воробьев А., Старинская Г. «Ямал СПГ» до 2020 года получит еще 14 уникальных газовозов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.vedomosti.ru/business/articles/2017/03/31/683492-yamal-spg-gazovozov (дата обращения 29.09.2019).
5. «НОВАТЭК» рассматривает возможность организации бункеровок СПГ в порту Сабетта – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://portnews.ru/news/272658/ (дата обращения 29.09.2019).
6. Данные ФГБУ «Администрация Северного морского пути» – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nsra.ru/ (дата обращения 11.09.2019).
7. Ластовцев А. Ю., Королев В. И. Северный морской путь как перспективная трасса международного транзита – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rostransport.com/science_transport/pdf/2/27-29.pdf (дата обращения 29.09.2019).

REFERENCES

1. Report to the Marine Environment Protection Committee PPR 6/20.
2. Report of the Marine Environment Protection Committee on its seventy-fourth session MEPC 74/18.
3. *Analiz statisticheskikh dannykh i vedomstvennoy informatsii, a takzhe otsenka zatrat na avariyno-spasatelnuyu gotovnost na sluchay razliva tyazhelogo topliva* [Analysis of statistical data and departmental information, as well as an assessment of the costs of emergency and rescue readiness in case of a heavy fuel oil spill] [text]: Research Dissertation report (final): 32-33 / FSBEI of Higher Education "Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping"; mentor A.L. Tezikov; executed by: V.A. Zhukov [et al.]. – St. Petersburg, 2019.– 243 p. – Reg.№ AAAA-A19-119082790002-3.
4. Vorobyov A., Starinskaya G. *Yamal SPG do 2020 goda poluchit esche 14 unikalnykh gazovozov* ["Yamal LNG" by 2020 will receive another 14 unique gas carriers] [Electronic resource]. – Access mode: https://www.vedomosti.ru/business/articles/2017/03/31/683492-yamal-spg-gazovozov (access date September 29, 2019).
5. *NOVATEK rassmatrivaet vozmozhnost organizatsii bunkerovok SPG v portu Sabetta* [NOVATEK is considering the possibility of organizing LNG bunkering in the port of Sabetta] – [Electronic resource]. – Access mode: http://portnews.ru/news/272658/ (access date September 29, 2019);
6. *Dannye FGBU "Administratsiya Severnogo morskogo puti" "The Northern Sea Route Administration" FSBI data* – [Electronic resource]. – Access mode: http://www.nsra.ru/ (access date 11.09.2019);
7. Lastovtsev A.Y., Korolev V.I. *Severny morskoy put kak perspektivnaya trassa mezhdunarodnogo tranzita* [The Northern Sea Route as a promising international transit route] – [Electronic resource]. – Access mode: http://rostransport.com/science_transport/pdf/2/27-29.pdf (access date September 29, 2019).

УДК 627.15

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СУТОЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА В СТВОРЕ НИЗКОНАПОРНОГО ГИДРОУЗЛА И ОЦЕНКА ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ

С.О. Агеев, ФБУ «Администрация Волжского бассейна внутренних водных путей», Нижний Новгород, e-mail: gg6258@yandex.ru

Для улучшения условий судоходства на р. Волге (участок Городец – Нижний Новгород) в части обеспечения габаритных глубин рассматривается возможность строительства Нижегородского низконапорного гидроузла (ННГУ). С целью определения возможных проблем для пропуска судов на этапе эксплуатации ННГУ, были поставлены задачи в определении изменений гидрологического режима, как верхнего бьефа (ВБ), так и нижнего бьефа (НБ) ННГУ, а также по разработке рекомендаций по улучшению водного режима участка реки ниже створа ННГУ. Основываясь на результатах анализа изменений навигационных расходов через Нижегородскую ГЭС (ННГЭС), проведенных расчетах и прогнозах водного режима в створе создаваемого ННГУ, предлагается введение регулирования стока на водосливе ННГУ, возможность которого обосновывается в предшествующих работах. В статье представлены результаты расчетов при суточном регулировании стока водохранилищем, создаваемым ННГУ. Показаны графики, иллюстрирующие возможности обеспечения судоходных глубин при разных граничных условиях. В качестве примера рассматриваются расходы различной обеспеченности, проходящие через створ ННГЭС, за каждый месяц навигации 2017 года.

Ключевые слова: *расходы воды, транспортный попуск, низконапорный гидроузел, суточное регулирование стока, интегральная кривая стока*

RESULTS OF CALCULATION OF DAILY FLOW REGULATION PARAMETERS IN THE RANGE OF A LOW-PRESSURE HYDRAULIC UNIT AND ITS EFFICIENCY EVALUATION

S.O. Ageev, Administration of the Volga basin of inland waterways, Nizhny Novgorod, e-mail: gg6258@yandex.ru

The article considers the possibility of building a Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric facility to improve navigation conditions on the Volga river (Gorodets – Nizhny Novgorod section) in terms of providing overall depths. In order to determine possible problems for passing vessels at the stage of its operation, tasks have been set to determine changes in the hydrological regime, both upstream and downstream of the low-pressure hydroelectric unit, as well as to develop recommendations for improving the water regime of the river section below its target. Based on the results of the analysis of changes in navigation costs through the Nizhny Novgorod hydroelectric station, calculations and predictions of the water regime in the range of the created hydroelectric facility, it is proposed to introduce flow control on its spillway, the possibility of which is justified in previous works. The article presents the results of calculations for daily flow control by a reservoir created by a low-pressure hydroelectric unit. Graphs illustrating the possibilities of providing navigable depths under different boundary conditions are also shown. As an example, we consider the flow discharges of different probability passing through the target site of the Nizhny Novgorod hydroelectric station for each month in 2017.

Keywords: *water flow discharge, transport pass, low-pressure hydroelectric unit, daily flow regulation, integrated flow curve*

ВВЕДЕНИЕ

Реализация проекта строительства Нижегородского низконапорного гидроузла (ННГУ) на участке средней Волги направлена на устранение инфраструктурного ограничения на лимитирующем отрезке Единой глубоководной системы и увеличение пропускной способности внутренних водных путей. В результате на Волге появятся два объекта: сам гидроузел и создаваемое им водохранилище, которое будет иметь небольшие размеры. Вода в нем будет накапливаться до 68-й отметки, что обеспечит судоходные габариты по глубине, при этом водохозяйственным расчетом [1, 2] был установлен транспортный попуск (ТП) в размере 1140 м^3/с. Излишки воды будут проходить транзитом в нижний бьеф (НБ) ННГУ.

Поставленная задача по обеспечению судоходных глубин решается, но только на участке протяженностью 40,5 км Нижегородская ГЭС (ННГЭС) – Нижегородский низконапорный гидроузел. В нижнем бьефе ННГУ судоходные глубины будут выдерживаться не весь навигационный период, т.к. расход в НБ ННГУ не отвечает требованиям обеспечения транспортного попуска [2]. Кроме того, неравномерность

сбрасываемых расходов с ННГЭС скажется на гидрологическом режиме НБ ННГУ и на переформировании русла этого участка реки.

Избежать получения лимитирующих глубин, сгладить неравномерность попусков с целью снижения скоростных характеристик потока и тем самым уменьшить негативную нагрузку на НБ ННГУ можно за счет введения в технологический процесс суточного регулирования воды на проектируемом гидроузле в навигационный период. Это возможно и, более того, необходимо сделать, поскольку проектируемый гидроузел «не завязан» на энергетике и воды можно сбрасывать столько, сколько этого требуют задачи судопропуска, причем вне зависимости от водности года [3].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Проведенные исследования [2 – 4] подтвердили необходимость регулирования расходов воды через водослив Нижегородского низконапорного гидроузла с целью пропуска возможно более равномерного расхода в нижний бьеф. Эти мероприятия решат задачи обеспечения глубин для судопропуска и снизят негативное воздействие на руслоформирование в НБ ННГУ. При этом оптимизация расходов воды на выходе достигается путем рационального усреднения входного гидрографа. Оценка регулирующих возможностей водохранилища с отметкой НПУ, равной 68,0 м БС, соответствующая транспортному попуску (ТП), величина которого определена в размере 1140 м^3/с, показала нехватку воды для обеспечения судоходных глубин в НБ ННГУ в течение каждых суток навигационного периода. Поэтому был предложен путь создания резерва воды в водохранилище, обеспечивающего судоходные габариты в НБ ННГУ.

Для определения диапазона расходов, в котором можно проводить суточное регулирование в створе ННГУ, выполнен водно-балансовый расчет создаваемого водохранилища при расходах, изменяющихся от величины транспортного попуска при отметке уровня воды в 68,0 м БС до величины расхода, проходящего при повышенной отметке 68,5 м БС (отметка принята для примера), которая в процессе моделирования ситуаций в водохранилище и в его нижнем бьефе, будет обосновываться.

Расчет суточного регулирования стока проводится графически при помощи построения интегральной кривой стока (ИКС) [5]. ИКС строится для расходов, поступающих с ННГЭС в течение суток для каждого месяца навигационного периода на примере 2017 года. Для расчета берутся расходы воды (по часам) различной обеспеченности, рассчитанные и представленные графиками в работе [3]. Проводится ось расходов (справа), на которую наносится шкала часовых расходов с шагом 100 м^3/с. На шкале слева им соответствуют часовые объемы стока.

На рис. 1 – 3 показаны выбранные для иллюстрации графики, соответствующие расходам мая (90 % обеспеченности), августа (75 %), октября (99,9 %). Проводятся следующие построения:

ИКС (синим цветом) строится по координатам «Время суток» и «Объем нарастающим итогом» (см. табл. 1 – 3). Начало и конец ИКС соединяются пунктирной прямой, соответствующей среднесуточному расходу $Q_{ср}$, равному

$$Q_{ср} = V_{сут}/T_{сут},\ м^3/с,$$

где $V_{сут}$ – объем воды за сутки, м^3;
$T_{сут}$ – количество секунд в сутках;

наносится лучевой график (красным цветом), соответствующий транспортному попуску 1140 м^3/с;

лучевой график, выделенный зеленым цветом, характеризует расход Q = 1407,82 м^3/с, увеличенный за счет резерва водохранилища V = 23,4 млн. м^3 при повышении отметки водохранилища выше 68-й на 0,45 ÷ 0,5 м.

Анализируя представленные графики, можно сказать следующее.

1. Расход, проходящий через ГЭС в мае с 90-процентной вероятностью превышения, (рис. 1) обеспечивает транспортный попуск (ТП) в НБ ННГУ, равно как и расход в 1407,82 м^3/с, поскольку ИКС выше и красного, и зеленого лучевых графиков. Регулирование может заключаться лишь в том, чтобы срезать пики, уменьшая амплитуду колебаний УВ в НБ ННГУ, при этом излишки воды можно использовать для заполнения резервной емкости водохранилища, все лишние расходы транзитом спускать в НБ.

Стоит отметить, что регулирование в данном случае можно осуществлять только в условиях непревышения условной (резервной) емкости в 23,5 млн м^3, то есть непревышения принятой отметки 68,5 м БС.

2. Графики рис. 2 иллюстрируют следующее: расход, проходящий в августе с 75-процентной вероятностью превышения с нуля часов до 11,5 (точка пересечения ИКС с графиком ТП) не дает нужного объема воды, чтобы обеспечить габариты по глубине для судопропуска – наблюдается дефицит воды (провал графика). В остальное

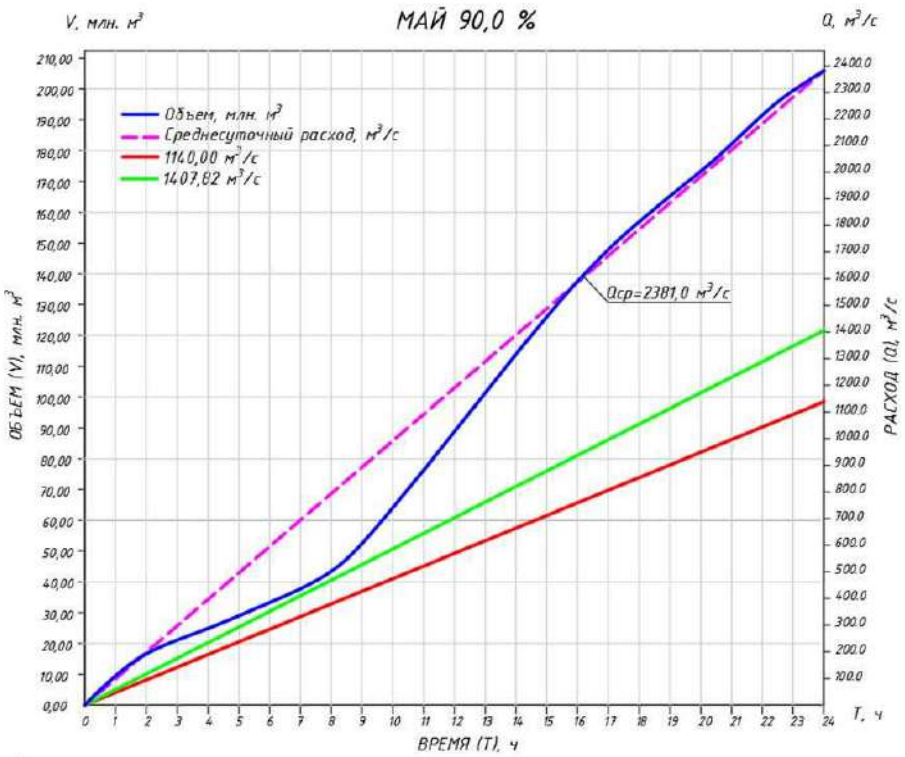


Рис. 1 Графический расчет суточного регулирования стока в мае 90 % обеспеченности расхода

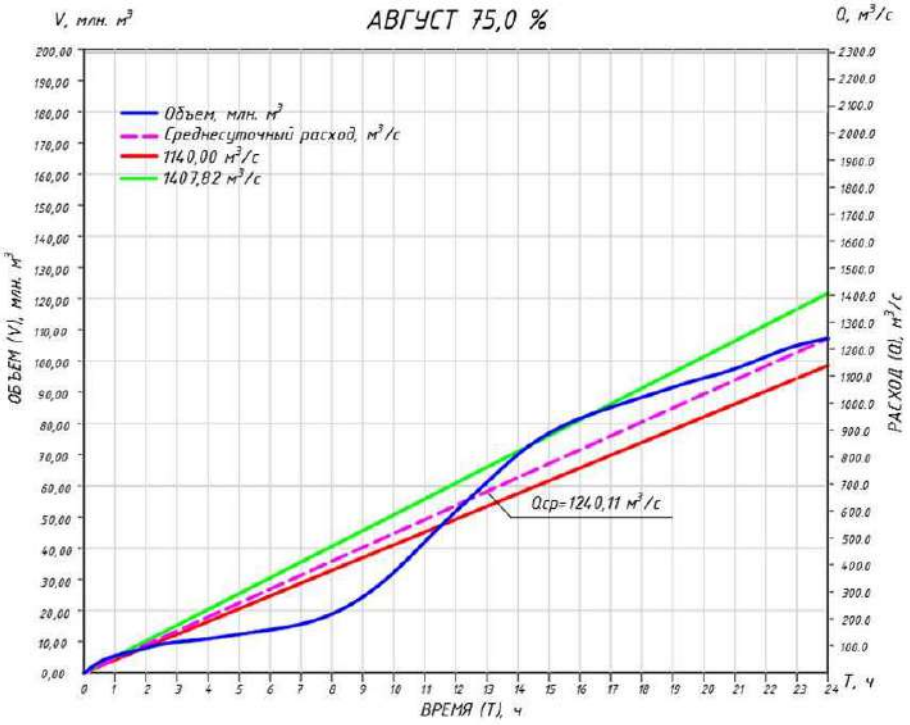


Рис. 2 Графический расчет суточного регулирования стока в августе 75 % обеспеченности расхода

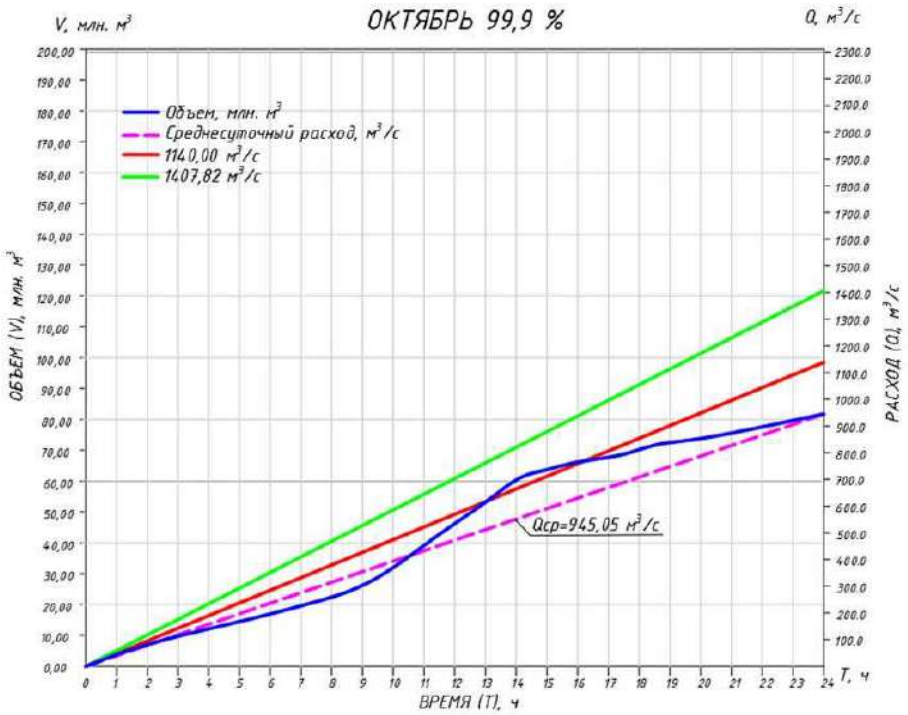


Рис. 3 Графический расчет суточного регулирования стока в октябре 99,9 % обеспеченности расхода

Таблица 1

Расчет ИКС для принятых месяцев и обеспеченности расхода

Время суток	Май, 90 % обеспеченность расхода			
	Расход, м³/с	Объем, млн м³/ч	Объем нарастающим итогом, млн м³	Среднечасовые значения объема за месяц нарастающим итогом, млн м³
1	2	3	4	5
0	2356,17	8,482	8,482	8,571
1	1640,20	5,904	14,386	17,143
2	1260,01	4,536	18,922	25,714
3	1140,45	4,105	23,028	34,286
4	1108,56	3,990	27,019	42,858
5	1108,06	3,989	31,008	51,429
6	1221,95	4,399	35,407	60,001
7	1380,31	4,969	40,376	68,572
8	1957,80	7,048	47,424	77,144
9	2901,13	10,444	57,868	85,716
10	3319,21	11,949	69,817	94,287
11	3572,74	12,861	82,679	102,859
12	3553,98	12,794	95,474	111,431
13	3352,85	12,070	107,544	120,002
14	3476,20	12,514	120,058	128,574
15	3430,06	12,348	132,406	137,145
16	2903,60	10,452	142,859	145,717
17	2749,80	9,899	152,758	154,289
18	2380,59	8,570	161,329	162,860
19	2355,54	8,479	169,809	171,432
20	2218,03	7,984	177,793	180,003
21	2424,85	8,729	186,523	188,575
22	2704,16	9,734	196,258	197,147
23	2627,89	9,460	205,718	205,718
Всего за сутки	–	**205,718**	**205,718**	**205,718**
В среднем за час	**2381,00**	**8,571**	**8,571**	**8,571**

Таблица 2

Расчет ИКС для принятых месяцев и обеспеченности расхода

Время суток	Август, 75 %обеспеченность расхода			
	Расход, м^3/с	Объем, млн м^3/ч	Объем нарастающим итогом, млн м^3	Среднечасовые значения объема за месяц нарастающим итогом, млн м^3
1	6	7	8	9
0	983,52	3,540	3,540	4,464
1	877,04	3,157	6,698	8,928
2	670,78	2,414	9,112	13,393
3	358,07	1,289	10,401	17,857
4	375,39	1,351	11,753	22,322
5	373,58	1,344	13,098	26,786
6	429,69	1,546	14,645	31,250
7	663,02	2,386	17,031	35,715
8	1098,69	3,955	20,987	40,179
9	1885,87	6,789	27,776	44,644
10	2588,46	9,318	37,094	49,108
11	2644,37	9,519	46,614	53,573
12	2646,68	9,528	56,142	58,037
13	2614,78	9,413	65,555	62,501
14	2330,83	8,391	73,946	66,966
15	1578,94	5,684	79,630	71,430
16	1087,83	3,916	83,547	75,895
17	1037,11	3,733	87,280	80,359
18	808,19	2,909	90,190	84,823
19	799,00	2,876	93,066	89,288
20	849,49	3,058	96,124	93,752
21	1011,66	3,641	99,766	98,217
22	1066,05	3,837	103,604	102,681
23	983,74	3,541	107,146	107,146
Всего за сутки	**–**	**107,146**	**107,146**	**107,146**
В среднем за час	**1240,12**	**4,464**	**4,464**	**4,464**

время суток наблюдаются «излишки» воды: ИКС проходит выше красного лучевого графика. Причем площадь над графиком ИКС до красной линии (лучевого графика ТП) меньше площади под графиком ИКС после точки пересечения (с 11,5 часов до 24), что говорит о том, что «излишки» покрывают «недостатки», и вода еще остается. Это дает право при перераспределении стока накапливать воду для следующих суток, чтобы можно было не только обеспечить ТП, но и достичь постоянных расходов свыше 1140 м^3/с в течение суток, либо максимально приблизить или увеличить интервал времени, обеспечивающий судоходные габариты.

Кроме того, поскольку площадь превышения ИКС над линией ТП меньше площади, ограниченной линией расхода Q = 1407,82 м^3/с и ТП, можно сделать вывод о возможности накопления необходимого объема воды для введения регулирования.

3. В октябре расход, проходящий с 99,9-процентной вероятностью превышения, (см. рис. 3) транспортный попуск обеспечивает только 3 часа в сутки с 13.00 до 16.00. Все остальное время суток испытывается дефицит воды.

Для этого месяца (см. рис. 3) площадь превышения ИКС над линией ТП значительно меньше площади, ограниченной линией расхода Q = 1407,82 м^3/с и ТП, что позволяет сделать вывод о возможности накопления необходимого объема воды для введения регулирования, но только в пределах резервной емкости.

После составления большого числа таких графиков, три из которых представлены выше, появляется возможность для каждого месяца показать обеспеченность расходов воды различного процента вероятности превышения в течение суток. Такие расчеты были проведены, результаты на примере мая, августа и октября представлены ниже на рис. 4 – 6.

Таблица 3

Расчет ИКС для принятых месяцев и обеспеченности расхода

Время суток	Октябрь, 99,9 % обеспеченность расхода				Часовой объем при постоянном расходе, равном транспортному попуску (1140 м^3/с) нарастающим итогом	Часовой объем при постоянном расходе 1407,82 м^3/с нарастающим итогом
	Расход, м^3/с	Объем, млн м^3/ч	Объем нарастающим итогом, млн м^3	Среднечасовые значения объема за месяц нарастающим итогом, млн м^3		
1	10	11	12	13	14	15
0	702,73	2,529	2,529	3,402	4,104	5,068
1	855,13	3,078	5,608	6,804	8,208	10,136
2	779,02	2,804	8,412	10,206	12,312	15,204
3	722,67	2,601	11,014	13,608	16,416	20,272
4	691,17	2,488	13,502	17,011	20,520	25,340
5	668,85	2,407	15,910	20,413	24,624	30,408
6	713,73	2,569	18,479	23,815	28,728	35,477
7	777,79	2,800	21,279	27,217	32,832	40,545
8	850,73	3,062	24,342	30,619	36,936	45,613
9	1301,77	4,686	29,028	34,021	41,040	50,681
10	1826,05	6,573	35,602	37,424	45,144	55,749
11	1958,34	7,050	42,652	40,826	49,248	60,817
12	1963,34	7,068	49,720	44,228	53,352	65,885
13	1918,80	6,907	56,628	47,630	57,456	70,954
14	1716,10	6,177	62,806	51,032	61,560	76,022
15	707,83	2,548	65,354	54,435	65,664	81,090
16	459,77	1,655	67,009	57,837	69,768	86,158
17	554,02	1,994	69,004	61,239	73,872	91,226
18	753,31	2,711	71,716	64,641	77,976	96,294
19	452,74	1,629	73,345	68,043	82,080	101,363
20	408,89	1,472	74,817	71,445	86,184	106,431
21	603,85	2,173	76,991	74,848	90,288	111,499
22	562,67	2,025	79,017	78,250	94,392	116,567
23	731,97	2,635	81,652	81,652	98,496	121,635
Всего за сутки	**–**	**81,652**	**81,652**	**81,652**	**98,496**	**121,635**
В среднем за час	**945,05**	**3,402**	**3,402**	**3,402**	**4,104**	**5,068**

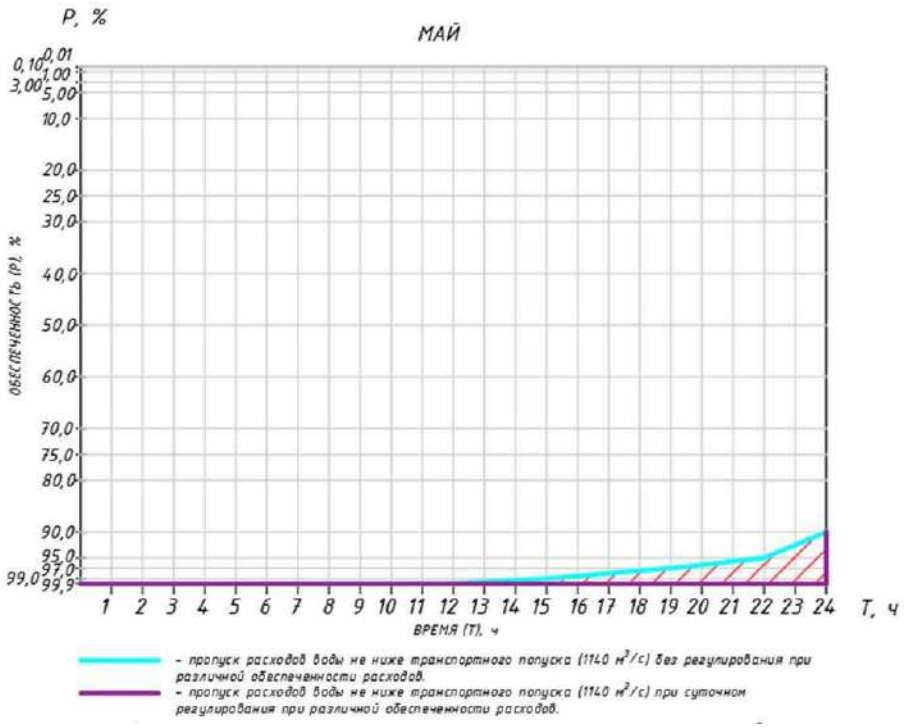


Рис. 4 Обеспечение расходов воды не ниже транспортного попуска (1140 м^3/с) в мае

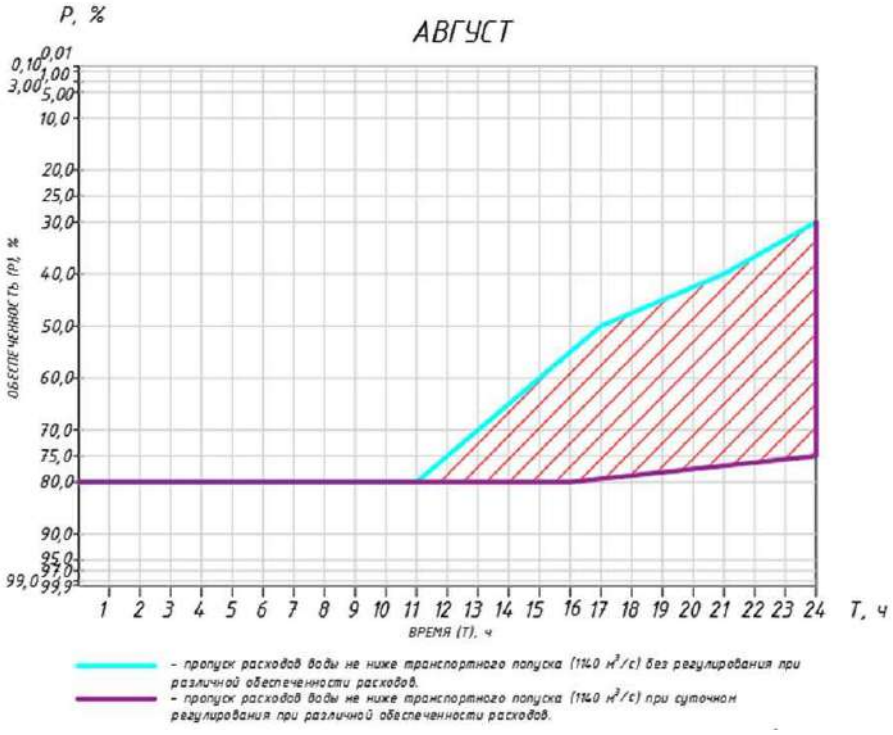


Рис. 5 Обеспечение расходов воды не ниже транспортного попуска (1140 м^3/с) в августе

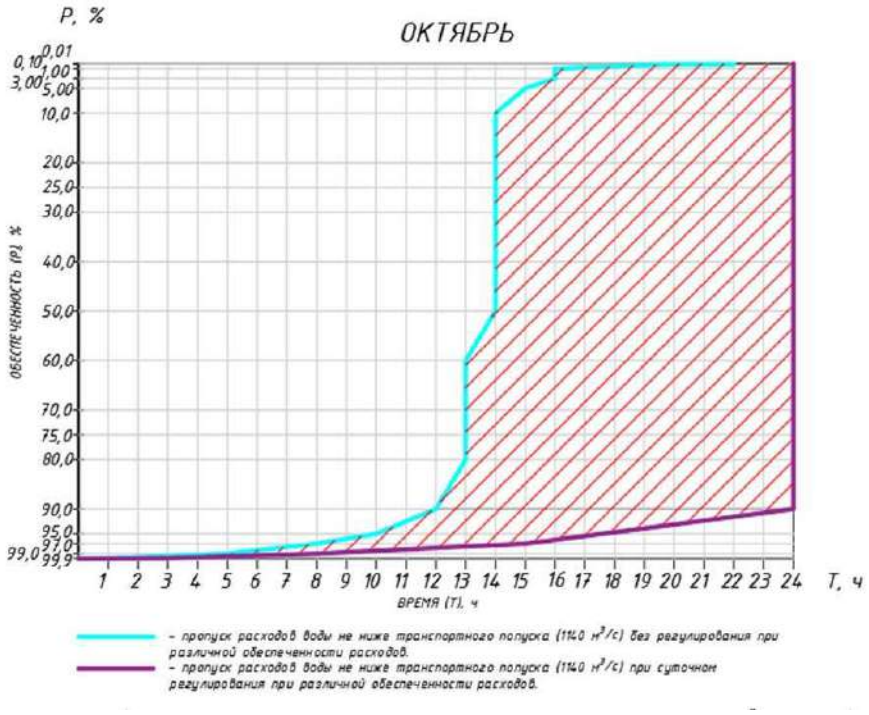


Рис. 6 Обеспечение расходов воды не ниже транспортного попуска (1140 м3/с) в октябре

На рис. 4 – 6 обозначено: голубая линия показывает, сколько часов можно создавать ТП при разной обеспеченности расходов, не вводя регулирование; красная линия – то же, вводя регулирование. Заштрихованная площадь показывает полученный эффект.

Так, на примере мая, видим:

- при расходах с вероятностью превышения (в процентах) 0,01 ÷ 90 – можно обеспечить расходы не ниже ТП в течение всех 24 ч (на рисунке: от нуля до синей линии) не вводя регулирования. Это объясняется высокими уровнями воды в период половодья;
- при расходах с вероятностью превышения от 90 до 99,9 – расходы не ниже ТП можно обеспечить, не вводя регулирование, не все сутки. Например, при 95 % ТП можно держать 22 ч, для 97 % – 18 ч. Если же ввести регулирование (от нуля до красной линии), то можно добиться положительного эффекта: гарантировать прохождение расходов 99,9 % обеспеченности, отвечающих величине транспортного попуска в течение всех 24 ч.

На примере августа видно уменьшение продолжительности обеспечения расходов не ниже ТП в течение суток:

- при расходах с вероятностью превышения 0,01 ÷ 30 – обеспечение расходов не ниже ТП возможно в течение всех 24 ч (на рисунке: от нуля до синей линии);
- при расходах с вероятностью превышения от 30 до 80 – расходы не ниже ТП можно обеспечить, не вводя регулирования, не все сутки. Например, при 50 % ТП можно держать 17 ч, для 60 % – 15 ч. При расходах с более чем 80-процентной вероятностью транспортный попуск не обеспечивается в течение всех суток. Если же ввести регулирование (от нуля до красной линии), то можно добиться положительного эффекта: гарантировать прохождение расходов от 30 до 75 % обеспеченности, отвечающих величине транспортного попуска в течение всех 24 ч, а при 80 % обеспеченности – 16 ч, а не 11 ч, как в случае отсутствия регулирования.

На примере октября видно, что ситуация еще более ухудшается: расходы не ниже ТП практически всех вероятностей превышения можно обеспечить, не вводя регулирование, половину суток. Например, при 1,0 % – ТП можно держать 16 ч, при 50 % – 14 ч, при 90 % – 12 ч. Если же будет введено регулирование (от нуля до красной линии), то можно добиться значительного положительного эффекта: гарантировать прохождение расходов от 0,01 до 90,0 % обеспеченности, отвечающих величине транспортного попуска, в течение всех 24 ч, а при 95 %, 97 % обеспеченности – 15 ч и 13 ч соответственно, а не 10 ч и 7 ч (без регулирования).

Эффективность предлагаемых мероприятий по суточному регулированию можно проиллюстрировать на схожих графиках, если задачу рассматривать с позиции подаваемых расходов в сравнении с величиной транспортного попуска, то есть с точки зрения подачи ТП и других характерных расходов (1100 м^3/с, 1300 м^3/с) максимально возможное количество часов в сутки.

Для иллюстрации приводятся графики обеспечение расходов воды за май, август, октябрь, как и в предыдущем примере. На рис. 7 – 9 площадь, заключенная в синем, красном, зеленом графиках, показывает какое время с какой обеспеченностью расходы 1100 м^3/с, 1140 м^3/с, 1300 м^3/с соответственно могут подаваться без изменений. Например, в августе 1100 м^3/с могут подаваться в течение 24 ч при обеспеченности 81 %, а при 90 % – только 4 ч, далее в виду нехватки воды расход будет подаваться меньший. При 70 % могут подаваться расходы равные 1100 м^3/с 16,5 ч, в остальное время воды слишком много. Аналогично, 1300 м^3/с могут подаваться все 24 ч только при обеспеченности 62 %, а при 90 % – воды не хватает, при 40 % воды слишком много. Транспортный попуск обеспечивается все 24 часа при 75 % вероятности. Аналогично по данным графикам можно анализировать ситуацию для каждого процента обеспеченности любого навигационного месяца.

Таким образом, анализируя полученные графики, можно сделать следующие выводы:

- в мае расходы 1100 м^3/с, 1140 м^3/с, 1300 м^3/с могут быть обеспечены только при поступающих расходах высокой вероятности превышения. При расходах обеспеченностью ниже 97 % емкости водохранилища будет недостаточно, расходы будут больше, и они транзитом пройдут через ННГУ в нижний бьеф;
- в августе на примере расхода 60 % обеспеченности можно увидеть, что расход 1100 м^3/с, будет выдерживаться 14 ч, 1140 м^3/с – 14,6 ч, 1300 м^3/с – 18,5 ч. Остальное время расход будет подаваться больше. Аналогично для расхода 80 % обеспеченности – расход 1100 м^3/с, будет выдержан 17 ч, в остальное время – больше; расход 1140 м^3/с – 20 ч, в остальное время меньше; расход 1300 м^3/с – 2 ч, в остальное время меньше;
- в октябре на примере расхода 30 % обеспеченности видно, что расход 1100 м^3/с, будет выдержан 12,8 ч, 1140 м^3/с – 13,7 ч, 1300 м^3/с – 18,2 ч. Остальное время расход будет подаваться больше. Аналогично для расхода 90 % обеспеченности: расход, равный 1100 м^3/с, будет обеспечен 16,7 ч, в остальное время – больше; расход 1140 м^3/с – 19,5 ч, в остальное время меньше; расход 1300 м^3/с – 4 ч.

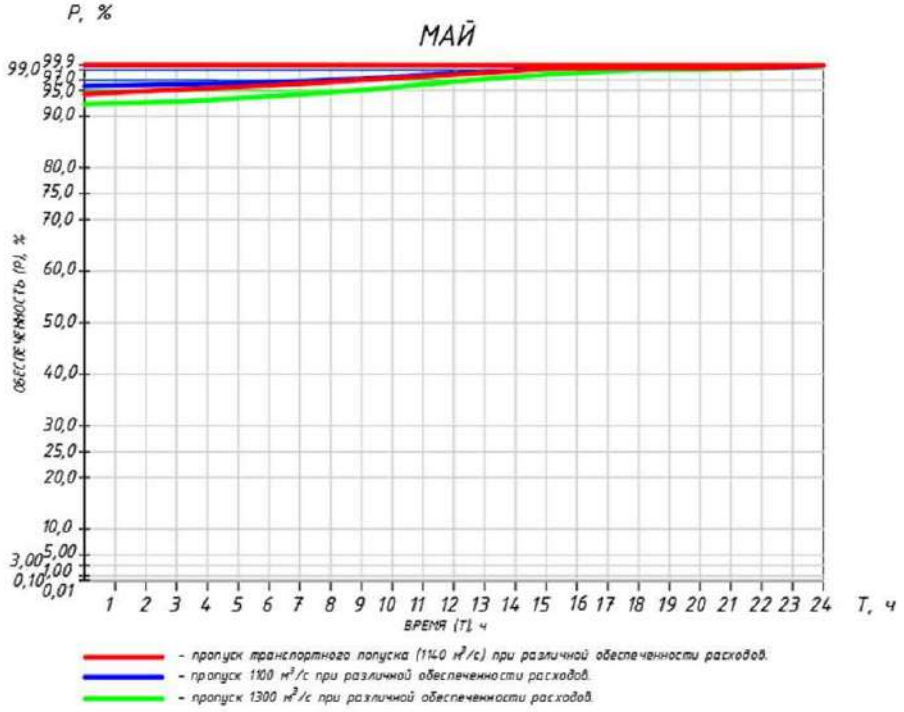


Рис. 7 Обеспечение расходов воды 1100 м^3/с, 1140 м^3/с и 1300 м^3/с при суточном регулировании в мае

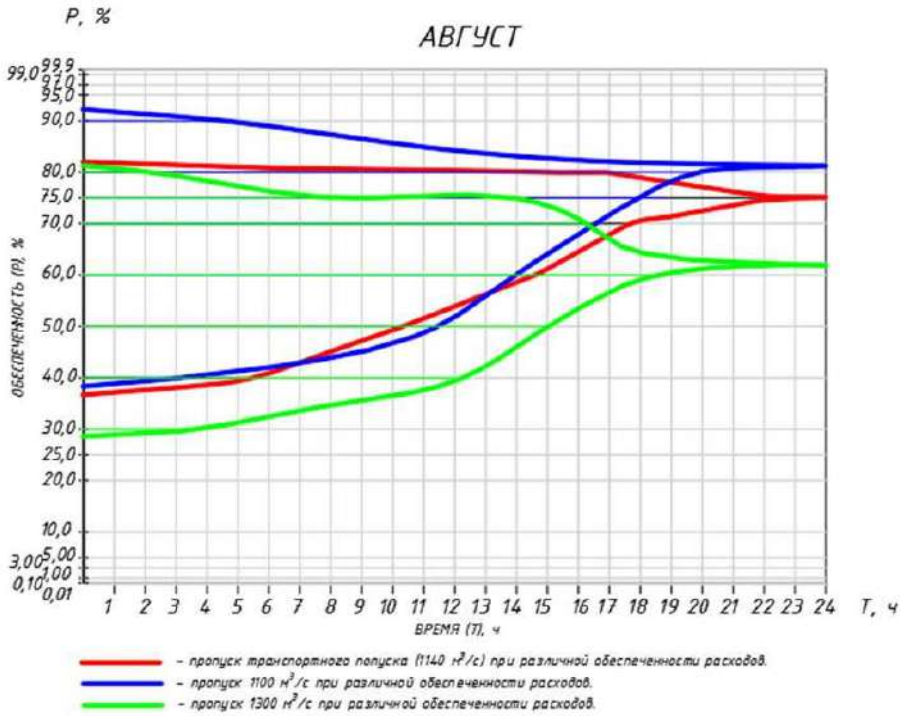


Рис. 8 Обеспечение расходов воды 1100 м^3/с, 1140 м^3/с и 1300 м^3/с при суточном регулировании в августе

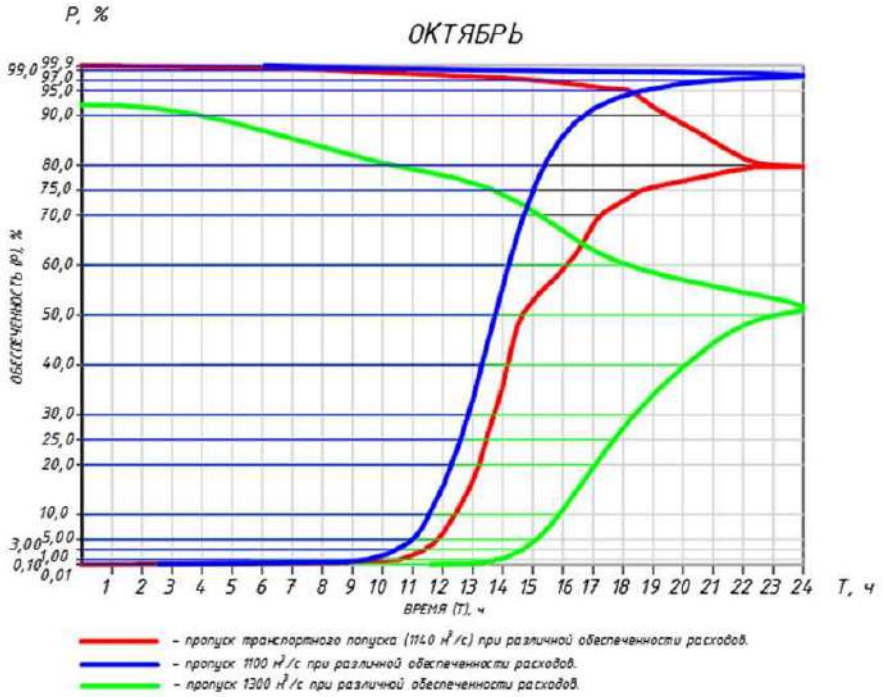


Рис. 9 Обеспечение расходов воды 1100 м^3/с, 1140 м^3/с и 1300 м^3/с при суточном регулировании в октябре

ВЫВОД

Представленные выше результаты расчетов показывают принципиальную возможность улучшения судоходных условий в НБ ННГУ, для чего требуется разработка математической модели регулирования сбросов и алгоритма решения задачи с учетом ограничений, накладываемых гидрологическим режимом верхнего и нижнего бьефов и другими условиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ситнов А.Н. Обоснование параметров обеспеченности водохозяйственных балансов и режима работы водохранилища Нижегородского низконапорного гидроузла/А.Н. Ситнов, Н.В. Кочкурова, Д.А. Мильцын//Вестник ВГАВТ. Вып. 50. – Н. Новгород: Изд–во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2017. – с. 23-31.
2. Агеев С.О. Анализ проблемных вопросов безопасности судоходства на участке Городец – Нижний Новгород до и после строительства Нижегородского низконапорного гидроузла / С.О. Агеев, М.А. Матюгин // Труды конгресса «Великие реки-2017». Вып. 6. – Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2017. – с. 1 – 4.
3. Агеев С.О. Анализ изменений навигационных расходов через Нижегородскую ГЭС в навигацию 2017 года и рекомендации по улучшению водного режима участка р. Волги ниже створа Нижегородского низконапорного гидроузла (ННГУ)/С.О. Агеев//Труды конгресса «Великие реки-2018». Вып. 7. – Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2018. – с. 1 – 7.
4. Агеев С.О. Регулирование сброса воды на неразмываемой модели в состоянии подпора/С.О. Агеев, А.Н. Ситнов//Труды конгресса «Великие реки-2019». Вып. 8. – Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2019. – с. 1 – 5.
5. Гидроэлектрические станции: Учебник для вузов / Н.Н. Аршеневский, М.Ф. Губин, В.Я. Карелин и др.; Под ред. В.Я. Карелина, Г.И. Кривченко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.

REFERENCES

1. Sitnov A.N. *Obosnovaniye parametrov obespechennosti vodohozyaistvennykh balansov i rezhima raboty vodohranilischa Nizhegorodskogo nizkonapornogo gidrouzla* [Substantiation of parameters of water management balance security and operation mode of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric reservoir]/A.N. Sitnov, N.V. Kochkurova, D.A. Miltsyn//Vestnik VGAVT. Vol. 50. – N. Novgorod: Publishing house FGBOU VO "of WHUUT", 2017. – pp. 23 – 31.

2. Ageev S.O. *Analiz problemnyh voprosov bezopasnosti sudohodstva na uchastke Gorodets – Nizhny Novgorod do i posle stroitelstva Nizhegorodskogo nizkonapornogo gidrouzla* [Analysis of problematic issues of navigation safety on the Gorodets – Nizhny Novgorod section before and after the construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric facility]/ S.O. Ageev, M.A. Matyugin //Proceedings of the Congress "Great rivers-2017". Vol. 6. – N. Novgorod: Publishing house FGBOU VO "of WHUUT", 2017. – pp. 1 – 4.
3. Ageev S.O. *Analyz izmeneniy navigatsionnykh raskhodov cherez Nizhegorodskuyu GES v navigatsiyu 2017 goda I rekomendatsii po uluchsheniyu vodnogo rezhima uchastka r. Volga nizhe stvora Nizhegorodskogo nizkonapornogo gidrouzla (NNGU)* [Analysis of changes in navigation costs through the Nizhny Novgorod hydroelectric power station in the navigation of 2017 and recommendations for improving the water regime of the Volga river section below the target of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric facility (NNSU)] / S.O. Ageev // Proceedings of the Congress "Great rivers - 2018". Vol. 7. – N. Novgorod: Publishing house FGBOU VO "of WHUUT", 2018. – pp. 1 – 7.
4. Ageev S.O. *Regulirovanie sbrosa vody na nerazmyvaemoy modeli v sostoyanii podpora* [Regulation of water discharge on an indelible model in the state of backwater] / S.O. Ageev, A.N. Sitnov //Proceedings of the Congress "Great rivers-2019". Vol. 8. – N. Novgorod: Publishing house FGBOU VO "of WHUUT", 2019. – pp. 1 – 5.
5. *Gidroelektricheskie stantsii: Uchebnik dlya vuzov* [Hydroelectric stations: Textbook for universities]/N.N. Arshenevsky, M.F. Gubin, V.A. Karelin, etc.; edited by V.Ya. Karelin, G.I. Krivchenko. – 3rd ed., Rev. and extra – M.: Energoatomizdat, 1987. – 464 p.

УДК 614.846.9: 629.561.4

НЕКОТОРЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЯ ПОЖАРНЫХ СУДОВ И ОЦЕНКИ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

А.И. Пичугин, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС Российской Федерации» (ФГБУ ВНИИПО МЧС России), Балашиха, e-mail: avto-vniipo@yandex.ru
Д.Г. Мичудо, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, e-mail: dgm21@mail.ru
Н.В. Навценя, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха
К.Ю. Яковенко, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, e-mail: kirill1971@rambler.ru

В статье рассмотрены показатели и их значения по основным характеристикам пожарных судов (ПС), изготовленных с 1970-х годов по настоящее время. Приведены данные о состоянии пожарной безопасности на водном транспорте, а также отмечается роль ПС как одного из типов мобильного средства пожаротушения. Представлены данные основного гидравлического оборудования ПС: насосов, лафетных стволов, а также запаса пенообразователя. Кроме того, в работе предложена оценка эффективности ПС по показателям – относительная эффективность пожаротушения и относительная эффективность пожаротушения с учетом оперативности прибытия к месту проведения пожарно-спасательных работ и представлены значения этих показателей для различных проектов ПС, с указанием рейтинга этих проектов. В заключении сформулированы основные выводы по направлению создания ПС высокой эффективности.

Ключевые слова: *пожарное судно, пожарный насос, лафетный ствол, водоизмещение, эффективность*

SOME ASPECTS OF FIRE SHIPS DESIGN AND EVALUATION OF THEIR EFFECTIVENESS

A.I. Pichugin, All-Russia Research Institute for Fire Protection of the Ministry of Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (FSBI VNIIPO of EMERCOM of Russia), Balashikha, e-mail: avto-vniipo@yandex.ru
D.G. Michudo, FSBI VNIIPO of EMERCOM of Russia, Balashikha, e-mail: dgm21@mail.ru
N.V. Navtsenya, FSBI VNIIPO EMERCOM of Russia, Balashikha
K.Yu. Yakovenko, FSBI VNIIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, e-mail: kirill1971@rambler.ru

The article discusses indicators and their values for the main characteristics of fire ships (FS), which have been delivered from the 1970s to the present. The data on the state of fire safety in water transport is provided, while noting the role of FS as one of mobile fire extinguishing means. The article also presents data on the basic hydraulic equipment of the FS pumps, fire monitors, as well as a stock of foaming agent and proposes the criteria to assess the FS effectiveness in terms of the relative efficiency of fire extinguishing and relative efficiency of fire extinguishing taking into account the speed of arrival to the place of fire-rescue operations, presenting the values of these criteria for various FS projects and providing the rating of such projects. In conclusion, the main directions for creating a high-efficiency FS are outlined.

Keywords: *fire ship, fire pump, fire turntable monitor, displacement, efficiency*

К середине 90-х годов в современной России в целом завершено создание нормативной базы системы пожарной безопасности судов [1], включая национальные правила Морского и Речного регистров. Эти документы направлены на обеспечение безопасности человека и сохранности груза на водном транспорте и в разной степени учитывают вклад основных составляющих пожарной безопасности: систему предотвращения пожара, противопожарную защиту и организационно-технические мероприятия.

О важности борьбы с пожарами на водном транспорте свидетельствует и статистика.

Так, в работе [2] приводятся данные по статистике ежегодной гибели морских судов, в том числе и от пожаров за десятилетний период конца прошлого века. Они свидетельствуют о том, что если по всей совокупности причин гибло около 100 судов, то от пожаров эта величина составляла около 20 судов. В работе [1] отмечается, что около 30 % ежегодных потерь мирового флота вызывается пожарами. В ней же авторы утверждают, что стабилизация показателей аварийности флота в 1980-е годы при постоянном совершенствовании международных требований к безопасности судов и наблюдаемый рост потерь флота с начала 1990-х годов свидетельствует об исчерпании потенциальных возможностей дальнейшего снижения аварийности с помощью принятой системы противопожарной безопасности.

Важной составляющей, обеспечивающей выполнение возложенных на нее функций в условиях пожара, является пожарная техника, а для водного транспорта – пожарные суда [3].

В работе [4] дается термин и определение пожарного судна (ПС): корабль, катер, моторная лодка для выполнения задач, решаемых специализированными пожарными службами. В работе [5] предлагается более конкретное определение задач этих служб – пожарно-спасательные работы. Авторы статьи «Пожарное судно» определяют и круг решаемых задач при пожарно-спасательных работах: доставка боевого расчета, пожарно-технического вооружения (ПТВ), запаса огнетушащих веществ (ОВ) – пенообразователя; подача воды (раствора пенообразователя) при тушении пожаров с использованием лафетных стволов и по рукавным линиям к различным стволам (ручным, переносным лафетным, пеногенераторам). ПС оснащаются системами связи и навигации.

При спасательных работах с помощью ПС буксируют горящие суда в безопасное место, откачивают воду из затонувших судов, а также спасают тонущих людей. ПС разделяют, в зависимости от района плавания, на морские и речные. Все они имеют типовое конструктивное решение (состав), которое включает: корпус с надстройкой, силовую судовую установку и установку для привода пожарных насосов, водопенные коммуникации, систему активной тепловой защиты – оросительную установку и т.п.

Первое отечественное ПС – пароход «Князь Юрий» – было построено в 1895 году. В начале прошлого века наибольшее распространение ПС (катеров) наблюдалось в США. В 1970-е годы к производству специализированных (по отдельным проектам) ПС приступили и в СССР.

Описание довоенных конструкций пожарных судов представлено в работе [6].

В конце 1970-х годов в СССР разработан проект быстроходного пожарного судна для оказания экстренной помощи судам, плавсредствам и береговым объектам на пожаре для района их эксплуатации «река-озеро».

Пожарное судно типа «Вьюн» проекта 16640 (см. рис. 1) создано в 1979 г. АСО «Вымпел» (г. Рыбинск) с началом серийного производства с 1981 года по проекту ЦКБ ФЦ КБ «Редан» (1978 г.). Скорость полного хода судна составляла 20,5 узлов (36 км/час), дальность плавания – 140 миль; экипаж включал 8 чел. (6 пожарных).

Рис. 1 Пожарное судно проекта 16640 «Вьюн»
(источник фото: https://fire-truck.ru/encyclopedia/sudno-pozharnoe-vyun.html)

Пожарное оборудование состояло из: четырех пожарных насосов НЦ-60Б с подачей 60 л/с и напоре 100 м в. ст.; трех лафетных стволов ЛС-60С с расходом 60 л/с; двух переносных стволов с рукавными линиями – ПЛС-С20. Запас пенообразователя составлял 2200 л. По бортам катер оборудован системой водяной завесы. Район плавания: реки, озера, водохранилища, прибрежная зона.

По данным в статье в журнале [7] в г. Москве точкой базирования пожарных судов этого типа – «Надежда» и проекта 04017 «Полковник Чернышев» – является дебаркадер у Павелецкой набережной.

В качестве примера зарубежного ПС авторами приводятся основные параметры по техническому оснащению пожарным оборудованием судна класса «река-море» для плавания в Балтийском море и реке Варнов, построенного в этот период (1983 год) на верфи г. Берлина (ГДР). Пожарное судно имело водоизмещение 239 т, экипаж 5 чел., скорость – 18 уз., запас пенообразователя – 16,1 м^3 и было оснащено двумя насосами с подачей 110 л/с при давлении 1,1 МПа, мотопомпой высокого давления с расходом 4,25 л/с при давлении 3,5 МПа, тремя лафетными стволами с расходом 60 л/с и дальностью подачи воды 80 м, двумя пенными насосами для подачи пенообразователя с расходом 9,6 л/с при давлении 1,1 МПа и одним насосом с подачей 2,6 л/с при давлении 1,6 МПА.

Кроме того, судно имело пожарную мотопомпу с расходом 15 л/с при давлении 0,7 МПа.

Из представленного перечня пожарной техники, входящей в состав оснащения этого пожарного судна, и большого запаса пенообразователя, а также скорости плавания, можно сделать вывод, что оно обладало высокой эффективностью для обеспечения тушения пожаров в заданном районе эксплуатации.

Типичным примером малого пожарного морского судна (катера) является судно проекта 14613 «Марс» (см. рис. 2), созданного ОАСО «Вымпел» (г. Рыбинск) в 1993 году по проекту ЦКБ «Нептун». Его экипаж состоял из 13 человек (6 человек входят в боевой расчет). Судно оборудовано двумя насосами ДПЖН-14 с общей подачей 410 л/с. Привод каждого из насосов осуществлялся от дизеля М827 мощностью 500 кВт (680 л. с.).

Рис. 2 Пожарное судно проекта 16613 «Марс»
(источник фото: https://fire-truck.ru/)

Судно оснащено четырьмя стационарными лафетными стволами с расходами (2 × 138 л/с) и (2 × 61 л/с) с дальностью подачи воды 70 м. ПС позволяло подачу воды или пенообразователя на расстояние до 200 м от раздаточных колонок и имело запас пенообразователя 23 т в трех емкостях (2 × 9,4 м^3 и 1 × 5,3 м^3), огнетушащего порошка – 450 кг, который подавался из сосуда по шлангу на расстояние до 150 м. Подача пенообразователя (до 11,1 л/с) осуществлялась с использованием насоса НЦВ с электроприводом.

Скорость хода судна при полном водоизмещении (385 т) и волнении моря до 2-х баллов составляла 11,5 уз. При этом обеспечивалась дальность плавания полным ходом (11,5 уз.) на расстояние не менее 250 миль и тушение в течение 10 часов; дальность плавания (переход) составляла до 500 миль.

С учетом своего основного назначения судно должно было выполнять кратковременные выходы в море от места дислокации к месту проведения пожарно-спасательных работ продолжительностью до 24 часов.

Конструкция судна могла обеспечивать его управляемость для удержания у горящего объекта при одновременной работе трех лафетных стволов на один борт при ветре до 2 баллов за счет движительно-рулевого комплекса, состоящего из двух винтов регулируемого шага в раздельно поворотных насадках и носового подруливающего устройства.

Созданием многоцелевых мелкосидящих водометных катеров типа «КС» с начала 1960-х годов в СССР занимался Костромской судостроительный завод» (в настоящее время ОАО «Костромской судомеханических завод»). За 20-летний период работы в составе СССР с 1970-х годов предприятие изготовило около 50 лесопожарных катеров с переносным пожарным вооружением.

С середины 1990-х годов предприятие приступило к созданию и производству специальных пожарных катеров на базе модели катера КС-102 (КС-102-09). Он был оборудован уже стационарным пожарным вооружением: СПЛК-40, включая: пожарный насос ПН-40 УА и лафетный ствол производства АООТ «Ливенский машиностроительный завод». Насос обеспечил подачу 40 л/с при напоре 100 м в. ст.; ствол имел расход 40 л/с при давлении 0,8 МПа и дальность водяной струи до 70 м; вместимость пенобака составляла 400 л, запас рукавов – 400 м.

С начала 2000-х годов предприятие приступило к производству серии различных катеров нового поколения КС-110 (см. рис. 3). На базе этого катера в 2003 году при участии специалистов ВНИИПО МЧС России создан пожарно-спасательный катер КС-110-39 с водометным движителем. Благодаря современному техническому оснащению и комплектации пожарно-спасательным оборудованием, малой осадке (0,45 м), высокой маневренности данное судно может эффективно использоваться для пожарно-спасательных работ объектов на плаву, включая мелководную прибрежную зону и на берегу.

Этот катер имеет скорость 22 км/час, дальность плавания до 450 км, экипаж 6 чел. и оснащен пожарным насосом с номинальной подачей до 100 л/с при напоре 100 м в. ст.

Рис. 3 Пожарный катер КС-110-39
(источник фото: https://kater-ks.ru)

Количество пенобаков – 2 при вместимости каждого 1000 л. Лафетный ствол с расходом 100 л/с имеет длину сплошной струи не менее 80 м.

На АО «Средне-Невский судостроительный завод» в 2008 году по проекту 04017 построен пожарно-спасательный корабль с названием «Атаман», который в 2010 году был переименован в целях увековечивания героического поступка полковника внутренней службы Е.Н. Чернышева с присвоением имени «Полковник Чернышев» (см. рис. 4).

Максимальная скорость хода корабля – 30 км/ч, дальность плавания 1400 км, автономность – 3 суток, экипаж – 8 чел.

Система пожаротушения корабля включает: 4 насоса с автоматизированным управлением с подачей 80 л/с каждый; 2 лафетных стационарных ствола с дистанционным управлением с расходом 60 л/с (типа "PYTHON" фирмы Циглер (Германия); 1 лафетный ствол с расходом 90 л/с; 4 пеногенератора «Пурга»; передвижной пеногенератор «Пурга»; 2 переносных лафетных ствола с расходом 20 л/с; запас пенообразователя составлял 4,0 м^3.

По бортам корабль оборудован системой водяной завесы. Корабль оснащен 4-местной рабочей шлюпкой с подвесным мотором, гидравлическим краном-манипулятором грузоподъемностью 500 кг, оборудованием для поставки 100 м легких боковых заграждений для нефтесбора и проведения дегазации и дезактивации, работы троих легких водолазов, компрессором для заправки баллонов. Конструкции корабля позволяет ему находиться в эксплуатации круглый год.

Рис. 4 Пожарно-спасательное судно проекта 04017 «Полковник Чернышов»
(источник фото: https://01-voskresensk.nethouse.ru)

По проекту 1496МП «Морж» ОАО «Судостроительный завод «Вымпел» создано пожарное судно (катер) (см. рис. 5). Первое судно этого проекта имело название «Игорь Прокопчик». Судно ледокольного типа с областью использования «река-море» имеет водоизмещение 162 т, скорость хода 10,7 узлов с запасом хода 1180 миль, экипаж состоял из 9 чел. (3 пожарных).

Рис. 5 Пожарное судно (катер) проекта 1496 МП «Морж»
(источник фото: https://vympel-rybinsk.ru)

Судно оснащено двумя насосами EN 125-500 и двумя установками комбинированного тушения «Пурга 40.60.100»; запас пенообразователя размещался в двух емкостях по 2,7 м^3.

В 2013 году группой компаний «Оптимист» совместно с ОАО «Соломбийским машиностроительным заводом» была изготовлена самоходная пожарная баржа с условным названием КСП ПНС (комбинированная самоходная плавучая пожарная насосная станция на понтонном комплексе с малой осадкой), предназначенная для проведения пожарно-спасательных работ на судах и береговых сооружениях из акватории дислокации, а также обеспечения береговых подразделений достаточным количеством воды при тушении пожаров (см. рис. 6).

Рис. 6 КСП ПНС «Баржа»
(источник фото: https://firerobots.ru)

Данная плавучая станция строилась по заказу ГУ МЧС Ленинградской области для порта Усть-Луга.

КСП ПНС выполняет функции высокопроизводительной насосной станции с подачей (применение штатных рукавов) до 200 л/с воды (раствора пенообразователя) на расстояние до 150 м по одной рукавной линии; 600 л/с на расстояние 50 м по трем рукавным линиям. При условии применения рукавных линий большого диаметра (до 300 мм), дополнительно прокладываемых другими подразделениями, подача осуществляется на расстояние до 7500 м.

Водоизмещение КСП ПНС составляет 80 т, скорость передвижения с помощью 2-х подвесных моторов – не менее 5 уз., запас хода – 35 км.

КСП ПНС может быть установлена стационарно на побережье и функционировать в качестве насосной станции для подачи воды на большие расстояния.

Станция оснащена 4 мотор-насосными агрегатами (МНА) (один резервный) с подачей одного – 200 л/с при номинальной высоте всасывания 1 м и рабочем давлении на выходе из насоса 1,6 МПа. Штатный запас пенообразователя составляет 14 т, систем его дозирования – 2 ед.

На КСП ПНС предусмотрено:

6 лафетных стволов с расходом 65 л/с при дальности водяной струи 85 м, пенной – 70 м;

3 лафетных ствола с расходом 200 л/с при дальности водяной струи 130 м, пенной – 110 м.

ЗАО «ЭФЭР» разработало и поставило для КСП ПНС лафетные стволы моделей ЛСДС200Уш и ЛСД-С60/100 с соответствующими расходами. При этом, с учетом возможностей подачи насосов 600 л/с, одновременно могут быть задействованы 3 лафетных ствола с расходом 200 л/с или 6 стволов с расходом 100 л/с.

Оперативно-тактические возможности пожарных судов определяются их заказчиками и пользователями и зависят от области назначения и района эксплуатации (плавания).

Авторами статьи предложен один из способов оценки эффективности пожарных судов с использованием формул (1) и (2) с учетом основных показателей: запаса пенообразователя, подачи пожарного насоса, водоизмещения и скорости.

Номенклатура показателей с учетом их весомости (значимости), влияющих на эффективность тушения, может назначаться специалистами с учетом опыта работы по созданию пожарно-спасательной техники и ее эксплуатации.

Оценка пожарных судов по относительным показателям их эффективности предложена впервые и может совершенствоваться.

Для сравнения в таблице приведено значение показателей относительной эффективности пожарных судов, изготовленных в разные периоды (конца XX – начала XXI века). Возможно, что для более детальной проработки значимости и оценки предлагаемого проекта пожарного судна необходимо рассмотреть и ряд других показателей, которые определяют его оперативно-тактические возможности; при этом могут быть учтены и такие показатели как дальность плавания, стоимость проекта и изготовления и другие.

Сравнительный анализ показал, что из рассмотренных шести отечественных изделий наибольший рейтинг имеет КСП ПНС «Баржа»; далее идут ПС «Марс» (проект 14613) и пожарно-спасательный катер КС-110-39. Замыкает эту группу судов – ПС проекта «Морж». Необходимо отметить высокие показатели эффективности немецкого пожарного судна, изготовленного на верфи г. Берлина в 1983 году.

Показатели относительной эффективности пожарных судов определяются по формулам (1) и (2):

$$Э_т = \frac{W \cdot Q_н}{M}; \quad (1)$$

$$Э_о = \frac{W \cdot Q_н V}{M} = Э_т \cdot V, \quad (2)$$

где $Э_т$ – относительная эффективность при тушении;
W – запас пенообразователя, т (м^3);
$Q_н$ – суммарная подача насосов, л/с;
M – водоизмещение судна, т;
V – скорость плавания, км/ч;
$Э_о$ – относительная эффективность тушения с учетом оперативности прибытия.

Таблица

Сравнительные показатели пожарных судов

	Водоизмещение, т, M	Скорость, км/ч, V	Запас пенообразователя, т, W	Подача насосов, л/с, $Q_н$	Расход стволов, л/с, $Q_{ст}$	Дальность плавания, км, D	Относительная эффективность, $Э_т/Э_о$	Рейтинг по $Э_т/Э_о$
Пожарное судно, построенное на верфи г. Берлина, ГДР, 1983 год	239	33,29	16,1	2 × 110; 1 × 110	3 × 60	–	22,2/739	3/2
Пожарно-спасательный катер КС-110-39	15	22	2 × 1	100	100	450	13,3/292,6	4/5
Пожарное судно проекта 04017 «Полковник Чернышев»	125	30	4	4 × 86	2 × 60; 90; 2 × 20	1400	11,0/330	5/4
Пожарное судно проекта 14613 «Марс»	385	21,27	23	2 × 205	2 × 138; 2 × 61	925	24,4/518,98	2/3
Пожарное судно проекта 16640 «Вьюн»	67,4	36	2,2	4 × 60	3 × 60; 2 × 20	259	7,83/281,9	6/6
Пожарное судно проекта «Морж»	162	19,8	2 × 2,7	2 × 89	«Пурга» 40.60.100 2 шт.	2183	5,93/117	7/7
КСП ПНС «Баржа»	80	9,4	14	3 × 200 + 1 рез.	3 × 200; 6 × 100	35	105/987	1/1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Пожарные суда являются эффективным мобильным средством пожаротушения за счет адаптивности к условиям эксплуатации и возможного использования неограниченного запаса воды при тушении пожара.

2. ПС оснащаются гидравлическим оборудованием с высокими функциональными возможностями по обеспечению подачи и напора воды с использованием насосов и расходов ОВ, подаваемыми лафетными стволами.

3. Создание новых моделей ПС должно проводиться по направлению повышения относительных показателей эффективности, скоростных параметров и возможности эксплуатации в сложных погодных условиях и районах плавания с учетом соответствия требованиям Морского или Речного регистров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махин В.С., Голиков А.Д. Пожарная безопасность транспортного комплекса. – В кн.: Юбилейный сборник трудов Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны. – М.: ВНИИПО МВД России, 1997. – с. 284 – 294.
2. Любимов Е.В. и др. Факторы террористических угроз и их учет в моделях обеспечения безопасности на морских технических средствах//журнал-каталог «Транспортная безопасность и технологии» № 2 (22) август 2010. с. 106 – 108.
3. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». – М.: ФГУ ВНИИПО, 2008. – 156 с.
4. ГОСТ 12.2.047-86. ССБТ. Пожарная техника. Термины и определения.
5. Пожарная безопасность. Энциклопедия. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2007. – 416 с.: ил.
6. Волков И.С. Машины и аппараты пожаротушения. Изд. Наркомхоза РСФСР, Л-М: 1941, 572 с.
7. Смирнов Н. «Капитан «Надежды»/журнал «Пожарное дело» 1/2015. с. 42 – 45.

REFERENCES

1. Makhin V.S., Golikov A.D. *Pozharnaya besopasnost transportnogo kompleksa* [Fire safety of transport complex] – In the book.: Anniversary collection of works of the all-Russian research Institute of fire protection. – M.: VNIIPO MIA of Russia, 1997. – pp. 284 – 294.
2. Lyubimov E.V. et al. *Factory terroristicheskikh ugroz i ikh uchet v modelyakh obespecheniya bezopasnosti na morskikh tekhnicheskikh sredstvakh* [Factors of terrorist threats and their account in models of safety on marine technical means// A catalogue "Transport safety and technologies" № 2 (22) August 2010.– pp. 106 – 108.
3. Federal law *Tekhnichesky reglament o trebovaniyakh pozharnoy bezopasnosti* ["Technical regulations on fire safety requirements"]. – M.: FGU VNIIPO, 2008. – 156 p.
4. GOST 12.2.047-86. Ssls. Fire engineering. Terms and definitions.
5. *Pozharnaya bezopasnost* [Fire safety]. Encyclopedia. – M.: FGU VNIIPO EMERCOM of Russia, 2007. – 416 p.
6. Volkov I.S. *Mashiny i apparaty pozharotusheniya* [Fire-fighting Machines and Apparatus]. Ed. People's Commissariat of the RSFSR, L-M: 1941, 572 p.
7. Smirnov N. *Kapitan nadezhdy* ["Captain of "Hope"] / Magazine "Fire" 1/2015. pp. 42 – 45.

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 629.5.015.152

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ МАЛЫХ СУДОВ

А.Г. Назаров, канд. техн. наук, FRINA, CEng, MSNAME, LLC "Albatross Marine Design" (AMD), Банг-Ламунг, Паттайя, e-mail: an@amdesign.co.th

Непотопляемость является одним из основных мореходных качеств, обеспечивающих безопасность. Однако применительно к малым судам не существует единого подхода к ее обеспечению. В статье рассматриваются особенности обеспечения непотопляемости малых судов, приведен анализ применимых методов и требований нормативных документов. Рассмотрены сценарии затопления, характерные для малых судов. Приведены примеры из опыта работы AMD по обеспечению непотопляемости судов различных типов. На основе опыта проектирования и эксплуатации малых судов, а также с учетом их специфики, предложена система требований к непотопляемости, учитывающая тип судна и его пассажировместимость. Подчеркивается, что перенос требований крупного судостроения на суда малых размеров не только не обеспечивает безопасность последних, но и существенно ограничивает функциональные качества малых судов.

Ключевые слова: *непотопляемость, аварийная остойчивость, малые суда*

SPECIFICS OF PROVIDING UNSINKABILITY FOR SMALL CRAFT

A.G. Nazarov, PhD, FRINA, CEng, MSNAME, LLC "Albatross Marine Design" (AMD), Banglamung, Pattaya, e-mail: an@amdesign.co.th

Unsinkability is one of major seakeeping properties of a ship, but for small craft there is still no universal approach on how to provide it. The paper covers specifics of providing unsinkability for small craft, while providing analysis of applicable methods and requirements and reviewing The specifics of flooding scenarios of small craft. Examples from AMD practice covering approaches to unsinkability for different types of craft are given. Based on experience of design and operation, and considering specifics of small craft, the article offers the system of requirements taking into account type and passenger capacity of the craft. It is stressed that transfer of requirements from large ships to small size craft is not only unable to ensure the safety of the latter, but also significantly limits their functionality.

Keywords: *unsinkability, damage stability, small craft*

Малые суда широко используются для целей перевозки пассажиров, туризма и прогулок (см. рис. 1), промысла морепродуктов, а также в качестве служебных судов. Согласно международным определениям IMO, малое судно – это судно длиной корпуса $L_{\text{H}} \leqslant 24$ м. В РФ термин «маломерное судно» – это судно наибольшей длиной $L_{\max} \leqslant 20$ м, вместимостью не более 12 человек. Эти суда являются «неконвенционными» и соответственно требования международных конвенций к ним применимы лишь выборочно. На практике эти суда находятся в «серой зоне» международного регулирования, и к ним морскими администрациями и классификационными обществами (КО) могут быть предъявлены практически любые технические требования: от практически полного их отсутствия до практически невыполнимых. Это существенно затрудняет работу проектировщиков и производителей таких судов; одним из наиболее

неурегулированных являются вопросы непотопляемости – способности судна оставаться на плаву в случае повреждений корпуса или заливания судна.

Рис. 1 Катамаран проекта H48 в Сиднее, Австралия. Изначально спроектирован для сертификации по европейским нормам CE/ISO, но по непотопляемости соответствует австралийским требованиям NSCV к коммерческим судам для перевозок до 45 пассажиров (фото автора статьи)

В настоящей статье, рассмотрены подходы и даны практические рекомендации по обеспечению непотопляемости малых судов, с учетом опыта и на примере проектов КБ AMD. Анализ правил и стандартов, позволяет выделить общие подходы к нормированию непотопляемости малых судов:

- частичная непотопляемость при затоплении только некоторых отсеков, как правило, наиболее вероятных с точки зрения повреждения при столкновении, посадки на мель и т.д.: например, форпика и машинного отделения: *c*), *d*), *e*) на рис. 2;
- одноотсечная, двухотсечная и т.д. – непотопляемость при затоплении любого одного отсека, или любой группы из двух и более отсеков – *f*) на рис. 2;
- непотопляемость при полном затоплении/заливании судна, обеспечивается блоками плавучести или надувными элементами – *a*) и *b*) на рис. 2.

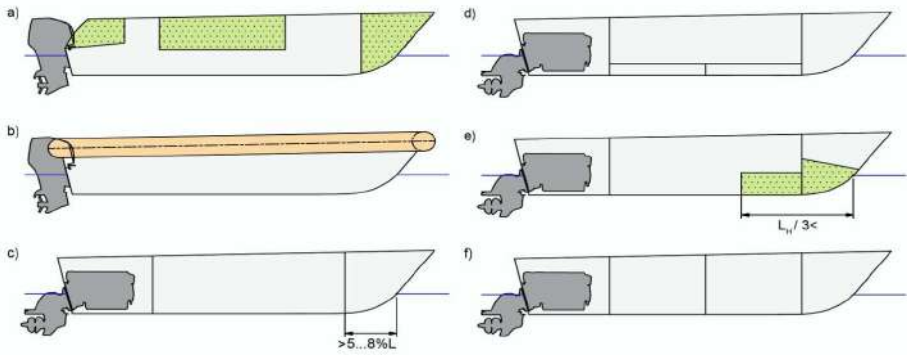


Рис. 2 Методы обеспечения непотопляемости малых судов:
a) – блоки плавучести; *b*) – надувная труба RIB; *c*) – таранная переборка и переборка машинного отделения; *d*) – переборки и двойное дно; *e*) – таранный блок из пенопласта; *f*) – водонепроницаемые переборки (фото автора статьи)

1. ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ

Как известно, непотопляемость «крупных» судов обеспечивается за счет разделения корпуса переборками на водонепроницаемые отсеки. Подобный подход малопригоден для судов малого размера: разделенное переборками, такое судно, особенно при длине $L < 15$ м полностью утрачивает функциональность внутренних помещений. Обеспечение же непотопляемости судна с обитаемыми помещениями за счет блоков плавучести связано с существенной потерей полезного пространства.

Кроме того, размеры повреждений, предписываемые правилами для «крупных» судов, плохо согласуются с размером реальных повреждений, получаемых малыми судами при столкновениях или посадках на мель. Например, в большинстве таких правил требуемая расчетная длина повреждения составляет 0,10 – 0,15L, в то время как наблюдаемые в реальности повреждения от столкновения малых скоростных судов длиной до 10 – 15 м составляют 0,4L и более [1].

Следует отметить, что на малых судах очень актуальна проблема поддержания элементов плавучести и закрытий в рабочем состоянии. Экипаж зачастую вырезает шкафчики в блоках плавучести, не закрывает люки двойного дна и водонепроницаемые двери – проконтролировать подобную деятельность невозможно. В этих условиях принципы оценки непотопляемости малых судов, равно как и сама возможность и необходимость ее обеспечения, должны быть пересмотрены в сторону разумности и выполнимости.

Рис. 3 Последствия столкновения малого пассажирского судна пр.АТ1000 длиной 10,1 м со скоростным катером
(Несмотря на разрушение носовой части, никто из пассажиров и членов экипажа не пострадал, а судно осталось на плаву.
Таранная переборка на этом судне установлена на расстоянии 0,12$L_{Н}$ от носовой оконечности,
помимо нее судно имеет еще по 2 водонепроницаемые переборки в каждом корпусе)
(фото автора статьи)

2. СЦЕНАРИИ ЗАТОПЛЕНИЯ МАЛЫХ СУДОВ

Любое нормирование непотопляемости малого судна должно быть основано на анализе практически возможных сценариев повреждения. Применительно к малому судну возможны следующие сценарии:

- заливание/затопление (swamping) – полное заполнение судна водой, когда оно поддерживается на плаву только элементами аварийной плавучести. Такой вид затопления характерен прежде всего для открытых судов с длиной корпуса $L_{Н} < 6$ м, а также возможен для «запалубленных» судов высоких категорий плавания;
- местное затопление – вызванное потерей водонепроницаемости донно-забортной арматуры систем или пропульсивно-рулевого комплекса. Этот вид затопления предотвращается за счет средств сигнализации, средств осушения и конструктивной блокировки возможных мест течи;

- посадка на мель – особенно актуальна для малых судов, осадка которых превышает 1,0 – 1,5 м. Австралийские NSCV [2] рассматривают этот вид повреждения только для судов с габаритной осадкой более 4 м. В действительности возможность повреждений при посадке на мель зависит от наличия защитных конструкций (брусковые кили, скеги) и предполагаемого района эксплуатации судна (см. рис. 7);
- столкновение носом (см. рис. 3) – этот вид повреждения актуален для судов длиной более 10…15 м (как правило, для судов меньшей длины повреждение невозможно локализовать только носовой оконечностью);
- столкновение бортом (или кормой) – в [2] рассматривается для судов, перевозящих более 36 пассажиров;
- продольное повреждение – «распарывающее» повреждение днища либо надувного баллона. Этот вид повреждений в HSC Code [3] затрагивает 55 % длины судна. В NSCV [2], это повреждение относится только к разрезанию надувного баллона RIB;
- общее нарушение целостности – когда разрушена значительная часть водонепроницаемого контура судна. Этот сценарий характерен для столкновений скоростных судов $L_H < 10$ – 15 м. Говорить об обеспечении непотопляемости в этом случае не приходится, речь может идти только о спасении людей из воды.

Рис. 4 Прогулочный катер проекта A510, длиной 5,1 м
(Этот катер соответствует требованиям к непотопляемости ISO 12217-3 за счет блоков плавучести из пенопласта. Судно должно быть протестировано с наибольшим разрешенным двигателем)
(фото автора статьи)

Рис. 5 Катамаран проекта F180EC – алюминиевое судно для Бангкока на 120 пассажиров.
(Судно имеет «одноотсечную» непотопляемость, а также в случае затопления обоих форпиковых отсеков. Используемые критерии – HSC Code для многокорпусных судов)
(фото автора статьи)

3. ОБЗОР ПРИМЕНЯЕМЫХ ТРЕБОВАНИЙ

Стандарты ISO 12217 [4]

Для прогулочных и для профессионального использования судов (рабочих, служебных) – в международной практике применяются стандарты ISO 12217-1 – ISO 12217-3, в России они переизданы в качестве ГОСТ-ISO12217. В странах ЕС, указанные стандарты являются основой для CE-сертификации прогулочных судов. Настоящие стандарты основаны на «матричном подходе», когда проектировщиком судна выбирается вариант комплекса требований одновременно к остойчивости, надводному борту и непотопляемости. Такой подход позволяет учесть различия в архитектуре и типах малых судов. Стандарты ISO предъявляют требования к непотопляемости только для некоторых типов судов, например для открытых судов $L_H < 6$ м; для большинства «запалубленных» судов прогулочного назначения какие-либо требования к непотопляемости отсутствуют. В стандартах ISO рассматривается:

- «базовая» плавучесть – нормируется только способность затопленного судна держаться на воде, остойчивость и посадка судна не рассматриваются;
- «уровневая» плавучесть – нормируется способность сохранять положительную плавучесть, остойчивость и посадку (главным образом из условий подъема в затопленное судно и возможности откачки воды);

- плавучесть при опрокидывании – применяется для некоторых многокорпусных судов, включают требования к плавучести/посадке в перевернутом состоянии, и доступности эвакуационных люков;
- требования к элементам плавучести/непроницаемости воздушных ящиков, надувных емкостей и блоков плавучести;
- требования к «Руководству пользователя»;
- плавучесть лодок с надувным бортом (RIB) при частичном сдувании баллона – нормируется отдельным стандартом ISO 6185;
- остойчивость при затоплении палубных рецессов – является частью оценки остойчивости для судов категорий A и B.

Основной особенностью оценки непотопляемости по ISO 12217 является то, что стандарт не признает общепринятые водонепроницаемые переборки и не требует их наличия. Учитываются только отсеки (воздушные ящики, надувные емкости), которые выдерживают предписанное стандартом давление, а также блоки плавучести из пенопласта.

В целом, структура стандарта ISO достаточно хорошо продумана в отношении комплекса требований к безопасности, и работоспособна без ущерба для функциональности и обитаемости малых судов. Проблема возникает, когда построенные и сертифицированные по CE/ISO прогулочные суда попадают в другую юрисдикцию. Например, Вьетнамский Регистр позаимствовал правила для прогулочных судов у Российского морского регистра судоходства [5], которые, в свою очередь, основаны на аналогичных правилах Регистра судоходства Украины [6]. И если в России и на Украине эти правила практически не влияют на отрасль (для прогулочных судов используются ТР ТС 026 [7] и сертификация CE/ISO соответственно), то в морской отрасли Вьетнама указанное заимствование вызвало «нормативный коллапс» – ни одна импортная моторная яхта с сертификатом CE не может пройти классификацию, в том числе из-за требований к «отсечной» непотопляемости.

Стандарт DNVGL 0342 [8]

Стандарт предназначен для непрогулочных малых судов и предписывает установку водонепроницаемых переборок (см. табл. 1). Для открытых судов с блоками плавучести нормируется аварийная плавучесть и остойчивость: требования имитируют нагрузку от плавающих рядом с судном людей и подъем на борт человека для откачивания воды. В целом, обязательных требований обеспечивать «отсечную» непотопляемость стандарт не предъявляет.

HSC Code [3]

Изначально кодекс предназначен для высокоскоростных судов, совершающих международные рейсы. Однако критерии остойчивости и непотопляемости, используемые в этом документе, частично или полностью используются ведущими КО для других типов судов, в частности малых судов. В документе подробно описаны повреждения, для которых необходимо выполнять расчет непотопляемости; однако для судов малого размера этот объем повреждений является избыточным и обычно приводится к одно- или двухотсечной схемам. В практике нашего КБ критерии непотопляемости из HSC Code применяются к пассажирским судам, а также патрульным и рабочим катерам.

MCA MGN280 [9]

Документ разработан британским агентством береговой охраны и распространяется на малые непассажирские суда в коммерческой эксплуатации, в том числе на прогулочные, а также рабочие и лоцманские суда. Непотопляемость требуется обеспечить исключительно для судов высших районов плавания, либо если на борту находится более 16 чел. Общий смысл требований: «одноотсечная» непотопляемость либо блоки плавучести, необходимо выполнение критериев остойчивости (см. табл. 1). Непотопляемость RIB нормируется в случае вспарывания баллона по одному борту и симметричного повреждения баллона в носовой части.

NSCV [2]

Национальный стандарт для коммерческих судов Австралии является, пожалуй, самым удачным и тщательно проработанным документом в области непотопляемости. В документе реализована разумная градация требований: от простейших, для небольших судов прибрежных категорий малой пассажировместимости, до полного выполнения международных конвенций на судах высших категорий. Оценка непотопляемости основана на сценариях затопления, зависящих от типа и параметров судна, и на рисках затопления, зависящих от назначения и категории плавания судна.

ТР ТС 026 [7] и ГОСТ19105-79 [10]

Требования этих документов предъявляются к маломерным судам в РФ. В целом можно заметить, что ГОСТ разрабатывался в 1970-х годах, когда прогулочные суда были ограничены моторными и гребными лодками небольших размеров, стандарт ориентирован в основном на открытые суда $L \leqslant 5{,}5$ м. На практике

стандарт неприменим из-за завышенных требований к «отсечной» непотопляемости. С другой стороны, для открытых судов требования к остойчивости сильно занижены по сравнению с требованиями стандарта ISO. Требования ГОСТ перенесены в новоизданный технический регламент ТР 026 [7], что не может быть признано адекватным в современных условиях. Положительным моментом ТР 026 является то, что он в качестве альтернативы допускает применение стандартов ISO12217 [4], чем и пользуются производители судов.

Правила GL [11]

Правила для яхт и судов длиной менее 24 м. Последняя редакция правил вышла в 2002 году, но они используются и в настоящее время. Правила требуют таранную переборку и переборку машинного отделения для судов $L > 17$ м.

Правила LR SSC [12]

Эти правила требуют наличие таранной переборки и переборки МО на судах $L > 15$ м. При этом таранная переборка должна быть расположена на (0,05 – 0,08)L.

4. ПРАКТИКА РАСЧЕТОВ НЕПОТОПЛЯЕМОСТИ

В практике нашего КБ расчеты остойчивости и непотопляемости выполняются в среде программы HST, с необходимыми сопроводительными расчетами в виде чек-листов ISO 12217. Моделирование блоков плавучести производится как цистерн, принимаемых неповрежденными и порожними (см. рис. 4). Для моделирования заполнения рецессов водой они моделируются как высокие цистерны. Такой подход реалистичен и дает запас в безопасную сторону, т.к. жидкость имеет свободную поверхность в практическом диапазоне углов накренения.

Стандартные коэффициенты проницаемости при затоплении отсеков, задаваемые, например, в HSC Code [3], относятся к металлическим судам. Наш опыт детальных расчетов коэффициентов проницаемости показывает, что у композитных судов за счет объема обшивки и набора они на 3 – 10 % ниже, чем стандартные.

Если таковые предусмотрены конструкцией судна, оценка общего объема блоков плавучести V_B, м^3, выполняется из условия:

$$930 \geqslant (m_{TEST} + m_R + m_A) / (\sum \frac{m_{Ui}}{\rho_i} + V_B),$$

где m_{TEST} – масса судна в состоянии теста на заливание, кг;
m_R – требуемый запас плавучести, зависящий от категории и количества людей на борту (см. табл.1);
m_A – проектный допуск на массу судна при постройке;
m_{Ui} – массы элементов корпуса и оборудования судна под линией погружения, кг;
ρ_i – плотность i-го элемента, определяемая по ISO12217-3 (Annex E) [4].

Таблица 1

Критерии непотопляемости и остойчивости в состоянии затопления

Требования	HSC Code [3] однокорпусные	HSC Code [3] многокорпусные	MCA [9]	ISO12217-1 и -3 [4]	DNVGL 0342 [8]	ГОСТ19105-79 [10]
Переборки	таранная переборка в носовой повреждаемой зоне; остальные переборки исходя из расчета непотопляемости при заданных повреждениях		нет требований к размещению переборок	нет требований, переборки не рассматриваются в качестве меры обеспечения непотопляемости	L = 6 – 15 м 2 переборки; L > 15 м 3 переборки, из них таранная (0,05 – 0,10)L	одноотсечная непотопляемость для судов, имеющих деление на отсеки
Остаточный надводный борт/ высота заливания	положительный, в пассажирских помещениях и путях эвакуации		⩾0,075 м	⩾2/3 планширя над водой	–	⩾0,075 м для судов, имеющих деление на отсеки
Диаграмма статической остойчивости (ДСО) после затопления отсеков						
Угол крена после затопления	⩽10° (⩽ 15°)	⩽10° (⩽ 15°)	⩽ 7°			
Угол заката или заливания	–	–	⩽ 15°			
Положительный диапазон ДСО, от угла равновесия	⩽15° (⩽10°)	–				
Максимальное плечо остойчивости	–	–	⩾ 0,1 м			
Остаточное плечо остойчивости после приложения кренящего момента НМ	⩾ max{HM/Δ+ 0,04; 0,1 м}	–				
Площадь под ДСО	⩾ 0,015 м·рад до заливания или 27°	⩾ 0,028 м·рад после приложения кренящего момента	⩾ 0,015 м·рад			
Полностью затопленное судно						
Запас плавучести				категория D: 50 + 10CL, кг категория C: 60 + 15CL, кг категория B: (См. примечание)	P = 27,5n, кг, но не менее max{$P_{\min}$ = 55 + 55(L-2,5); $P_{\min}$ = 82,5 кг}	положительная плавучесть и остойчивость судна в полном водоизмещении плюс 0,280 кН на каждого человека
Кренящий момент				max{6CL,15 кг} на планшире	11+5,5n, но не менее 27,5 кг.	вес 5 % грузоподъемности на планшире
Угол крена при приложении кренящего момента				⩽ 45°	⩽ 50°	нет требований

Примечание. Для категории B, запас плавучести должен составлять
$0{,}33m_{LC} + 100CL + m_{MISC} + 0{,}33m_{TANKS}$,
где m_{LC} – масса судна порожнем, кг;
L – количество людей на борту;
m_{MICS} – масса запасов и оборудования, включенных в полное водоизмещение, кг;
m_{TANKS} – масса переносных топливных танков, кг;
n – количество людей на борту;
Δ – весовое водоизмещение судна.

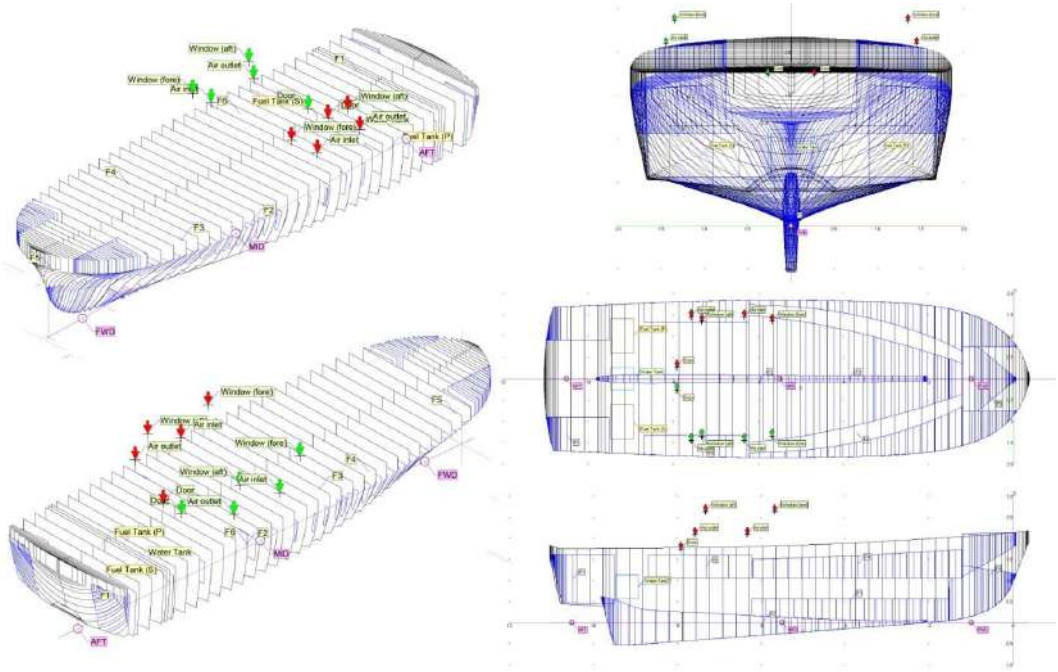


Рис. 6 Пример моделирования блоков плавучести для пр.МОВ11 длиной 11 м.
Объем блоков плавучести серьезно влияет на обитаемость

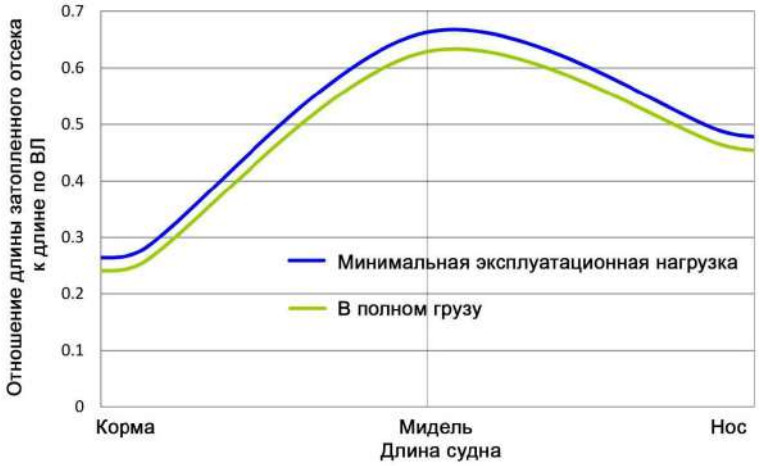


Рис. 7 Максимальная длина затопленного отсека из условия удовлетворения требований HSC Code к непотопляемости, для патрульного катера пр. МОВ14 длиной 14 м

Расположение таранной переборки должно учитывать посадку судна при движении и его скорость, величины 0,05 – 0,10L может быть недостаточно при наезде на плавающее препятствие. Так, расчетная ходовая ватерлиния глиссирующего судна в носу находится в сечении 0,3L; в этом районе рекомендуется устанавливать таранный блок (см. рис. 2). В то же время, из рис. 7 можно сделать вывод о том, что форпик может быть достаточно длинным, если это позволяет компоновка судна.

5. НЕПОТОПЛЯЕМОСТЬ СУДОВ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ

Малые патрульные катера, как правило, имеют архитектуру, показанную на рис. 8. Для таких судов, машинное отделение (МО) является наиболее длинным отсеком. Случай затопления МО является определяющим по критерию остаточного плеча остойчивости после приложения кренящего момента (критерии HSC Code [3]).

Рис. 8 Катера-перехватчики пр. SM16, *L*=16,3 м из композитных материалов, находятся на вооружении Индии, Мальдивов и Омана. Согласно спецификации заказчика, обеспечена непотопляемость при затоплении любого одного отсека (фото автора статьи)

В нашей практике для подобных судов применяется установка блоков плавучести в МО, как правило, представляющих собой блоки пенопласта, или создание дополнительных водонепроницаемых объемов в кормовой части, например, за счет кормовой платформы.

Пассажирские катамараны (см. рис. 5), как правило, имеют пассажирский салон на главной палубе, и необитаемое подпалубное пространство. Непотопляемость таких судов обеспечивается поперечным делением подпалубного пространства корпусов на отсеки. Живучесть судов этого типа при повреждениях неоднократно доказана опытом аварий. С точки зрения живучести, этот тип судов является, пожалуй, наиболее безопасным и рекомендуется для использования. Следует отметить, что для катамаранов используются критерии остойчивости в поврежденном состоянии из HS Code (Annex 7) [3], даже если катамаран формально не является «высокоскоростным».

Прогулочный катамаран – конвертация в пассажирское судно. Изначально, серийное судно пр. H48 спроектировано для сертификации в ЕС на категорию А как прогулочное, что подразумевает соответствие стандарту ISO12217-1, согласно которому обеспечивать непотопляемость подобных судов не требуется. Для коммерческой эксплуатации в Австралии с количеством пассажиров на борту до 45 чел. (см. рис. 1), судно было приведено к требованиям австралийского стандарта для коммерческих судов NSCV [2]. Правый и левый корпуса судна разделены по длине водонепроницаемыми переборками на форпик, жилой отсек и машинное отделение. Жилые отсеки катамарана в правом и левом корпусах имеют большую длину, но разделить их переборками с водонепроницаемыми дверями не представляется возможным, из соображений функциональности интерьера. Для обеспечения непотопляемости при затоплении жилого отсека был уменьшен коэффициент проницаемости с помощью:

- заполнения неиспользуемых полостей отсека, в том числе пространства трюма, пенопластом малой плотности;
- сэндвичевая обшивка судна в жилом отсеке была выполнена утолщенной.

Суда с блоками плавучести. Примером такого судна может быть рабочий катер пр. MOB11, разработанный для ВМС Индии (см. рис. 9). Согласно спецификации заказчика, судно перевозит до 35 чел. спецперсонала или до 50 чел. в режиме спасательных работ. При этом судно должно сохранять плавучесть даже в случае полного затопления. Аварийная плавучесть обеспечена за счет блоков плавучести из пенопласта, а также использования утолщенной сэндвичевой конструкции корпуса (см. рис. 6).

Рис. 9 Бортовой рабочий катер пр. MOB11:
a) судно с имитирующим нагрузку балластом готовится к проверке непотопляемости;
b) готовое судно после спуска
(фото автора статьи)

Рис. 10 Малое пассажирское скоростное судно пр. AT47:
на ходу и после аварии
(фото автора статьи)

Малое пассажирское судно открытого типа пр. AT47 предназначено для перевозки пассажиров в количестве 54 чел. в прибрежных акваториях; суда этого типа эксплуатируются в Таиланде, на Мальдивах и в Камбодже. Судно имеет открытый самоотливной кокпит, защищенный тентом. Непотопляемость судна обеспечена за счет деления пространства между днищем и дном пассажирского кокпита на 6 водонепроницаемых отсеков (схема *d*) на рис. 2). Одно из судов этого проекта получило аварийное повреждение днища при маневрировании вблизи рифов, однако продолжило плавание, пока не были замечены признаки начавшегося затопления судна; после чего спасателями с судна были эвакуированы все пассажиры и экипаж. Тем не менее, судно оставалось на плаву до следующего дня, пока не было отбуксировано в порт. Осмотр судна на берегу показал, что на судне было затоплено два смежных днищевых отсека.

6. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В табл. 2 приведены подходы, «по умолчанию» используемые в практике КБ AMD и основанные на опыте проектирования, сертификации и эксплуатации малых судов разных типов. В целом, предлагаемые схемы хорошо зарекомендовали себя, в том числе в условиях аварийных происшествий. Учитывая постоянное совершенствование нормативной базы малого судостроения, табл. 2 может быть рекомендована для использования при разработке работоспособных нормативных документов.

Таблица 2

Рекомендации по обеспечению непотопляемости малых судов

Тип судна	Содержание требований
Прогулочные суда Используемые критерии: ISO 12217-1 – ISO 12217-3 [4] или ГОСТ 19105-79 [10]	
длиной до 6 м	соответствие ISO12217-3 [4] (или ГОСТ19105-79 [10])
длиной более 6 м	соответствие ISO12217-1 или ISO12217-2 [4]
используемые для коммерческой деятельности*	соответствие стандартам ISO 12217-1 или ISO 12217-3 [4], дополнительно минимум 2 водонепроницаемые переборки, одна из них таранная на расстоянии (0,05 – 0.15)L, либо блоки плавучести в соответствии со стандартами ISO 12217-1 и ISO 12217-3
RIB	Соответствие стандарту ISO 6185
Суда для профессионального использования (служебные, патрульные, рабочие) Используемые критерии – HSC Code [3] либо ISO 12217-1 или ISO 12217-3 [4]	
длиной до 6 м	Блоки плавучести для открытых судов и судов более высоких категорий
длиной до 15 м	Рекомендуется таранная переборка либо таранный блок, либо блоки плавучести
длиной более 15 м	Минимум 2 водонепроницаемые переборки, одна из них таранная на расстоянии (0,05 – 0,15)*L*, либо таранный блок на 0,3*L*. В соответствии с спецификацией заказчика, может требоваться непотопляемость при затоплении одного любого отсека
Пассажирские суда и суда для перевозки персонала Используемые критерии – HSC Code [3]	
до 12 пассажиров	Минимум 2 водонепроницаемые переборки, одна из них таранная на расстоянии (0,05 – 0,15)*L*, либо блоки плавучести.
до 36 (50) пассажиров	Непотопляемость при затоплении одного любого отсека, либо двух форпиковых отсеков для катамаранов.
Пассажирские суда более 36 (50) пассажиров	Непотопляемость при затоплении любых 2 смежных отсеков, либо двух форпиковых отсеков для катамаранов
*Имееются в виду прогулочные суда с сертификатами CE, используемых для проката, чартера, перевозки туристов и прибрежных прогулок.	

Подходы крупного судостроения зачастую дают отрицательные результаты при их применении к малым судам. К сожалению, очень часто «отсечная» непотопляемость становится своеобразным «фетишем» КО, без учета размеров, назначения, района эксплуатации и конструктивных особенностей судна.

Например, если для непассажирского судна время эвакуации с судна на коллективные спасательные средства мало, то необходимость в обеспечении непотопляемости в ее классическом понимании весьма сомнительна. Для патрульных и подобных служебных судов требования к непотопляемости судна должен определять в первую очередь оператор судна, исходя из особенностей и задач эксплуатации, а также возможного компромисса с функциональностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nazarov A. Small craft freeboard and stability: approaches to assessment and perspective improvements// Transactions of RINA, Vol 159, Part B1, Intl Journal of Small Craft Technology, Jan-Jun 2017.
2. Australian Transport Council – National Standard for Commercial Vessels. PART C – Design and Construction, SECTION 6B – Buoyancy and Stability After Flooding. Edition 1-2, August 2011.
3. International Code of Safety for High Speed Craft (2000 HSC Code) – IMO, 2008 Edition.
4. ISO-12217. Small Craft Stability and Buoyancy Assessment and Categorization.
5. Правила классификации и постройки прогулочных судов. Российский морской регистр судоходства, 2012.
6. Правила классификации и постройки малых судов. Регистр судоходства Украины, 2004.
7. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности маломерных судов» (ТР ТС 026/2012).
8. DNVGL Standard 0342 – 2016.

9. Small Vessels in Commercial Use for Sport or Pleasure, Workboats and Pilot Boats – Alternative Construction Standards. MSN 280 – SCV Code – Maritime Coastguard Agency, UK.
10. ГОСТ 19105-79 – Суда прогулочные гребные и моторные. Типы, основные параметры и технические требования.
11. Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft. Lloyd's Register, 2019.
12. Rules for Classification and Construction of Yachts and Boats up to 24 m, German Lloyd, 2002.

REFERENCES

1. Nazarov A. Small craft freeboard and stability: approaches to assessment and perspective improvements// Transactions of RINA, Vol 159, Part B1, Intl Journal of Small Craft Technology, Jan-Jun 2017
2. Australian Transport Council – National Standard for Commercial Vessels. PART C – Design and Construction, SECTION 6B – Buoyancy and Stability After Flooding. Edition 1-2, August 2011.
3. International Code of Safety for High Speed Craft (2000 HSC Code) – IMO, 2008 Edition.
4 ISO-12217 – Small Craft Stability and Buoyancy Assessment and Categorization.
5. *Pravila klassifikatsii i postroyki progulochnykh sudov*. [Rules for the Classification and Construction of Pleasure Craft]. Russian Maritime Register of Shipping, 2012. (In Russian)
6. *Pravila klassifikatsii i postroyki malykh sudov* (in Russian). [Rules for the Classification and Construction of Small Craft]. Register of Shipping of Ukraine, 2004. (In Rissian).
7. *Tekhnicheskiy reglament Tamozhennogo soyuza "O bezopasnosti malomernykh sudov"* (TR TS 026/2012). [Technical standard of Customs Union on safety of small craft]. (In Russian).
8. DNVGL Standard 0342 – 2016.
9. Small Vessels in Commercial Use for Sport or Pleasure, Workboats and Pilot Boats – Alternative Construction Standards. MSN 280 – SCV Code - Maritime Coastguard Agency, UK.
10 GOST 19105-79. *Suda progulochnye grebnye i motornye. Tipy, osnovnye parametry i tekhnicheskie trebovaniya.* [State standard 19105-79 Recreational craft paddle and power. Types, main parameters and technical requirements]. (In Russian).
11. Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft. Lloyd's Register, 2019.
12. Rules for Classification and Construction of Yachts and Boats up to 24 m, German Lloyd, 2002.

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.129.791

СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА ГЛОБАЛЬНОЙ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА ВИНТОРУЛЕВУЮ КОЛОНКУ

М.С. Бойко, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: boyko.ms@rs-class.org
М.А. Кутейников, д-р техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

В статье рассмотрен вопрос определения максимальной глобальной ледовой нагрузки на винторулевую колонку (ВРК), установленную на судне ледового плавания. Показано, что в настоящий момент отсутствует унифицированная методика расчета такой нагрузки, однако опубликовано несколько различных расчетных методик. Проведен краткий анализ основных особенностей существующих методик, а также обзор опубликованных данных о замерах ледовых нагрузок на ВРК на судах в эксплуатации. Сопоставление расчетной величины глобальной ледовой нагрузки выполнено на основе ряда ВРК, геометрические размеры которых соответствуют современным ВРК, применяемых на судах ледового плавания. Показано, что применение существующих методик может приводить к результатам, не полностью согласующихся между собой. Обозначено несколько возможных направлений дальнейших исследований в области гармонизации существующих методик.

Ключевые слова: *винторулевые колонки, ледовая нагрузка*

COMPARISON BETWEEN METHODOLOGIES FOR CALCULATING GLOBAL ICE LOAD ACTING ON PODDED PROPULSION UNIT

M.S. Boyko, PhD, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: boyko.ms@rs-class.org
M.A. Kuteynikov, DSc, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

The paper covers the calculation of the maximum global ice load acting on a podded propulsion unit (PPU) installed on the ice-going ship. It is demonstrated that the unified methodology to calculate such loads is not currently available, however, there have been different methodologies published. The article provides a short analysis with respect to the main features relevant to each of the methodologies, giving the review of published papers dedicated to the PPU ice loads measurements for ships in service. The comparison of design ice loads is made based on a number of PPUs with geometrical parameters representing contemporary PPUs installed on ice-going ships. The comparison shows that the application of existing methodologies provides the results that are not completely in agreement with each other. A number of possible ways for continuation of research and harmonization of methodologies are outlined.

Keywords: *podded propulsion unit, ice load*

ВВЕДЕНИЕ

В рамках настоящей статьи рассматриваются как винторулевые колонки с погружным поворотным электродвигателем, так и с механической передачей мощности на гребной винт (далее – ВРК). Для судов с классом Российского морского регистра судоходства (далее – РС) требования к элементам ВРК приведены в части VII «Механические установки» Правил классификации и постройки морских судов [18]. Выбор типа и конструкции ВРК при проектировании судна должен производиться с учетом назначения и района плавания судна, а также особенностей его эксплуатации. Прочность деталей механизма поворота ВРК, элементов крепления к корпусу должна быть рассчитана таким образом, чтобы конструкция могла выдержать без повреждения гидродинамические и ледовые нагрузки, воздействующие на гребной винт, насадку и корпус ВРК. Допускается определение гидродинамических и ледовых нагрузок на элементы ВРК по результатам гидродинамических испытаний и испытаний самоходных моделей в ледовом опытовом бассейне по методикам, согласованным с РС.

На основании вышеизложенного следует отметить актуальность разработки методики расчета ледовых нагрузок на элементы ВРК для судов ледового класса. Такая методика должна быть научно обоснованной, удобной для применения как на этапе проектирования судна и ВРК, так и при рассмотрении технической документации в классификационном обществе, а результаты расчетов должны в достаточной степени согласовываться с существующей практикой проектирования и эксплуатации судов с ВРК.

Учитывая, что в настоящий момент в открытых публикациях и отраслевых нормативных документах представлено несколько различных методик расчета ледовых нагрузок на элементы ВРК, в настоящей статье рассмотрены вопросы сопоставления существующих методик. В первую очередь представляет интерес сопоставление состава расчетных случаев и расчетной величины глобальной ледовой нагрузки применительно к современным ВРК различных производителей, с различными геометрическими параметрами. При этом важно, чтобы представленные результаты расчетов были воспроизводимы, что может быть в использовано для сопоставительных расчетов в дальнейшем.

Кроме того, представляет интерес обзор зарубежных и отечественных научных публикаций по тематике, включая обзор опубликованных результатов натурных измерений указанных нагрузок.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Под глобальной ледовой нагрузкой понимается сосредоточенная сила, которая действует на корпус ВРК и обусловлена взаимодействием корпуса ВРК с ледовыми образованиями (см. рис. 1).

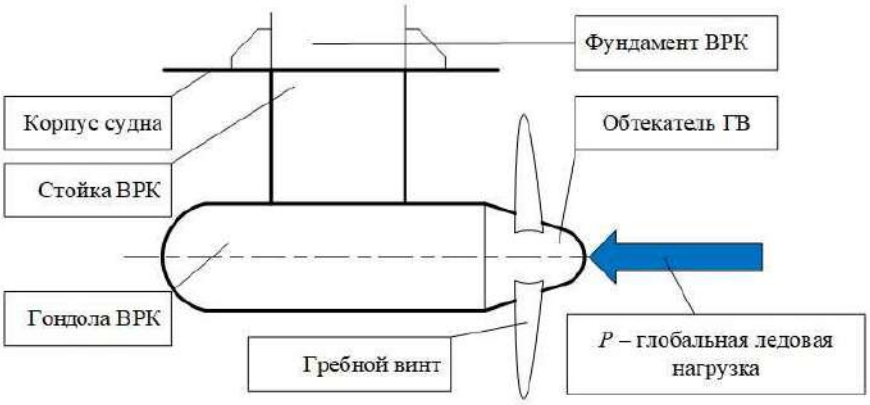


Рис. 1 Элементы ВРК и глобальная ледовая нагрузка на ВРК

Величина такой нагрузки может использоваться, в частности, для расчета прочности элементов крепления ВРК к корпусу судна, а также для расчетов прочности фундаментов ВРК. Другие виды нагрузок (например, гидродинамическая нагрузка на ВРК, локальная ледовая нагрузка на обшивку корпуса ВРК, сила, обусловленная взаимодействием гребного винта со льдом и т.п.) в настоящей статье не рассматриваются.

В соответствии с рядом публикаций, в том числе отраслевыми нормативными документами (например, [5], [6]), глобальная ледовая нагрузка может возникать вследствие ударного взаимодействия корпуса ВРК с обломком льдины или вследствие навала корпуса ВРК на киль ледяного тороса. При этом ряд публикаций (например, [14]) указывают на необходимость разделять задачу определения глобальных нагрузок на задачу определения экстремальных (максимальных) и усталостных нагрузок, которые характеризуются как величиной, так и повторяемостью.

В рамках настоящего исследования рассматриваются только экстремальные значения нагрузок, а особенности расчета усталостной долговечности являются предметом отдельного исследования.

Международной ассоциацией классификационных обществ (МАКО) выполнен значительный объем работ по унификации требований к элементам пропульсивной установки судна. Требования к судам с полярным классом приведены в унифицированных требованиях (УТ) МАКО под группой "I": I1 [12], I2 [13], I3 [11]. В УТ МАКО I3 содержатся требования к определению расчетных нагрузок на элементы механической установки судов с полярным классом: на лопасти гребного винта, гребной вал и т.п.

При этом ледовые нагрузки на корпус ВРК в рамках УТ МАКО I3 не рассматриваются. Указано, что при проектировании ВРК «особому рассмотрению» (special consideration) подлежат случаи ледовой нагрузки на ВРК, а выбор расчетных случаев нагрузки должен отражать эксплуатационные возможности судна. Указано, что корпус ВРК должен быть «достаточно прочным» для того, чтобы выдерживать нагрузки от взаимодействия со льда аналогично тому, как это требуется для других выступающих частей корпуса согласно УТ МАКО I2. Однако в этом УТ не приводится формул для расчета ледовых нагрузок на выступающие части корпуса; а вместо этого указано, что данный аспект должен рассматриваться и согласовываться с классификационным обществом в каждом отдельном случае.

Таким образом, несмотря на наличие унифицированной классификации судов ледового плавания в МАКО, унифицированные требования для ледовых нагрузок на корпус ВРК судов полярных классов отсутствуют. В связи с этим ряд классификационных обществ, таких как DNV GL, ABS, BV, и Морских администраций разработал и внедрил в собственные нормативные документы методики расчета глобальных ледовых нагрузок на корпус ВРК судов полярных классов.

Кроме этого, инженерные методы определения расчетной величины глобальной ледовой нагрузки представлены в научно-исследовательских работах и публикациях, выполненных отраслевыми научными институтами, производителями ВРК, Морскими администрациями (Финско-шведская Морская администрация) Ограниченное количество публикаций, связанных с разработкой и тестированием опубликованных методик, на сегодняшний день не позволяет сделать вывод о том, что данные методики гармонизированы между собой. Это определяет актуальность результатов представленного в настоящей статье исследования.

2. ОБЗОР НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ И НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

2.1 Инженерные методы расчета величины глобальной ледовой нагрузки

В качестве репрезентативной рассмотрим методику DNV GL, которая приведена в [6]. В разделе 7 этого документа приведен состав расчетных случаев нагрузки (load cases) на корпус ВРК, а также приведена формула для определения величины нагрузки P:

$$P = p_0^{0,8} \cdot (A \cdot C^{0,3})^{(exp)} C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4, \quad (1)$$

где p_0 – стандартное (табличное) значение ледового давления, которое является фиксированной величиной для каждого полярного класса;

A – расчетная площадь контакта элемента корпуса ВРК со льдом (проекция площади элемента в направлении действия нагрузки), не должна превышать значения $2H_{ice}^2$;

H_{ice} – стандартное (табличное) значение толщины льда, которое применяется для расчетов элементов механической установки и приведено для каждого полярного класса;

$C =$ A/($2H_{ice}^2$);

$exp =$ 0,3, если $A \geqslant 1$ м^2, $exp = 0,85$, если $A < 1$ м^2;

C_1 – коэффициент, принимающий значения 1,0, 1,5 и 2,2 в зависимости от комбинации типа винта («тянущий» или «толкающий») и выбранного случая нагрузки;

C_2 – коэффициент, который позволяет на 1/3 снизить величину нагрузки для глубоко погруженных ВРК;
C_3 – коэффициент, который на 25 % повышает нагрузку для ледоколов и судов, осуществляющих управление ледовой обстановкой (ice management);
$C_4 =$ 1,2 – статистический коэффициент, учитывающий срок службы судна в 20 лет.

При этом как для определения нагрузки от ударного взаимодействия с обломком льда, так и для навала корпуса ВРК на киль ледяного тороса применяется одна и та же формула. К сожалению, детальное техническое обоснование значений коэффициентов, используемых в формуле, в открытых источниках отсутствует.

Существенный объем исследований проведен при совершенствовании Финско-шведских требований к судам ледового плавания (FSICR, Finnish-Swedish Ice Class Rules). В частности, в статье авторов A. Kinnunen, M. Tikanmäki, J. Heinonen и P. Koskinen [10] обосновано применение так называемой модели «динамического взаимодействия», при котором ударное взаимодействие льда и корпуса ВРК рассчитывается с учетом упругости последнего. Модель верифицирована с помощью модельного эксперимента и предлагается авторами как перспективная. Предполагается, что контактное ледовое давление является функцией площади взаимодействующего со льдом элемента. Серия параметрических расчетов, подробности которых изложены в работе авторов A. Kinnunen, I. Perälä, M. Tikanmäki [9], позволила подобрать вид выражения, наиболее точно согласующегося с массивом результатов, полученных методом прямого расчета с применением модели «динамического взаимодействия». Полученная формула включена в п. 6.6.5 вступившей в силу новой редакции FSICR [5]. Глобальная нагрузка P при взаимодействии обломка льда с корпусом ВРК в FSICR определяется как

$$P = C_{DMI} \cdot 34{,}5 \cdot R_C^{0,5} \cdot (m_{ice} \cdot v_s^2)^{0,333}, \quad (2)$$

где R_C – радиус кривизны поверхности элемента, взаимодействующего с обломком льда, но не более половины расчетной толщины обломка льда;
m_{ice} – стандартное (табличное) значение массы обломка льда;
v_s – стандартное (табличное) значение скорости судна в момент удара, приведенное для различных случаев нагрузки и ледовых классов;
C_{DMI} – значение коэффициента динамичности нагрузки, рекомендуемое значение которого приведено для различных ледовых классов.

Более подробная информация о выполненных исследованиях приведена в отчетах VTT Technical Research Centre of Finland (например, в [8] авторами A. Kinnunen, J. Kurkela, P. Juuti). В частности, в указанном отчете приведена формула для определения глобальной нагрузки при взаимодействии корпуса ВРК с килем ледяного тороса (ridge penetration load case). Для ее получения использовалось математическое моделирование с применением метода конечных элементов в нелинейной постановке (программный комплекс ABAQUS). Данная формула также включена в новую редакцию FSICR:

$$P = 32 v_s^{0,66} \cdot H_r^{0,9} \cdot A^{0,74}, \quad (3)$$

где H_r – стандартное (табличное) значение расчетной толщины ледяного тороса.

При этом при расчете площади A учитывается только та часть корпуса ВРК, которая перекрывается толщиной тороса H_r.

В работе [9] также выполнено достаточно упрощенное сопоставление величины глобальной ледовой нагрузки между полученной с применением формулы (2), методики DNV GL и методики ABS. Однако сопоставление выполнено только для случая продольного удара о торец гондолы ВРК (со стороны, противоположной гребному винту). В работе [9] сделан вывод о том, что расчетные ледовые нагрузки в соответствии с методикой DNV GL характеризуются «достаточным запасом для использования при проектировании конструкций ВРК».

Следует отметить, что среди рассмотренных в настоящей статье методик только в методике FSICR приведена информация о величине допускаемых напряжений, соответствующих рассматриваемому уровню расчетных нагрузок. Номинальные эквивалентные напряжения (по Мизесу) не должны превышать величину 1,3 от предела текучести материала. В зонах концентрации напряжений допускаемые напряжения равны пределу текучести материала.

В отечественной практике существенный объем исследований по вопросу определения глобальных ледовых нагрузок на корпус ВРК проведен специалистами Крыловского государственного научного центра (KSRC), в том

числе в рамках выполнения научно-исследовательских работ по заказу РС. В статьях Е.М. Апполонова, А.Б. Нестерова, К.Е. Сазонова ([2], [14], [15]) рассмотрены инженерные методики назначения величины экстремальных и усталостных нагрузок на корпус ВРК традиционных судов ледового плавания и «судов двойного действия». При выполнении исследований авторами применяется т.н. «модифицированная гидродинамическая модель» удара твердого тела о лед. Проведенные авторами исследования позволили получить формулу для определения величины экстремальной глобальной ледовой нагрузки, действующей на ВРК судов ледового плавания:

$$P = 1{,}21 \times 10^4 \cdot M^{0{,}318} \cdot R_C^{0{,}35} \cdot h^{2{,}06} \cdot v_0^{0{,}83}, \quad (4)$$

где M – масса обломка льдины, взаимодействующего с ВРК;
h – расчетная толщина льда;
v_0 – скорость относительного движения льдины и ВРК в момент первого контакта.

При выводе формулы авторы использовали параметрический анализ: для P подбиралось выражение, наиболее близко описывающее значения, полученные в результате математического моделирования взаимодействия обломка льда с криволинейным элементом ВРК.

Следует отметить схожесть общей структуры формул (4) и (2), полученных разными авторами в независимых исследованиях.

В указанных выше статьях KSRC обозначены сложности, связанные с выбором корректных значений расчетной толщины и скорости относительного движения, приведены соответствующие рекомендации авторов.

Для расчета глобальной ледовой нагрузки при взаимодействии ВРК с ледяным торосом в [15] для угла поворота ВРК 0º градусов предлагается следующая формула:

$$P = P_{ax} + P_{nor}, \quad (5)$$

где P_{ax} – осевая составляющая нагрузки, обусловленная взаимодействием гребного винта с торосом;
P_{nor} – осевая составляющая нагрузки, обусловленная взаимодействием участков стойки ВРК с торосом.

Соответствующие составляющие нагрузки рекомендуется определять по следующим формулам:

$$P_{ax} = \sigma_{av} \cdot \frac{\pi d_{prop}^2}{4} \cdot k_p; \quad (6)$$

$$P_{nor} = \sigma_{av} \cdot A, \quad (7)$$

где $\sigma_{av} \approx 0{,}366$ МПа – средние напряжения на сжатие, разрушающие киль тороса;
d_{prop} – диаметр гребного винта;
$k_p = 0{,}5$ – коэффициент, учитывающий неоднородность площади диска винта и сложный характер взаимодействия диска винта с торосом.

В статье указано, что приведенные формулы и значения расчетных параметров являются приближенными и подлежат уточнению по мере накопления опыта проектирования и эксплуатации ВРК. Также следует отметить, что в указанных выше исследованиях KSRC основное внимание уделено ВРК типа "AZIPOD", наиболее широко представленному на рынке типу ВРК на момент выполнения опубликованных в статьях исследований. Кроме того, в рассмотренных публикациях KSRC, к сожалению, отсутствуют рекомендации авторов по выбору расчетных случаев загрузки ВРК.

Среди отечественных исследований следует отметить также работы А.В. Андрюшина, посвященные вопросам взаимодействия элементов ВРК со льдом. В частности, в статье авторов А.В. Андрюшина, S. Hänninen, T. Heideman [1] приведено описание решения комплексной задачи по обеспечению безопасности и эффективности эксплуатации ВРК типа AZIPOD на нефтеналивном судне класса **Arc7**, которое эксплуатируется в режиме «судна двойного действия». При этом рассмотрены не только вопросы прочности ВРК под воздействием глобальных ледовых нагрузок, но и вопросы проектирования гребного винта, обеспечения работоспособности электродвигателя, надежности системы поворота ВРК в ледовых условиях. Приведена предлагаемая авторами математическая формулировка задачи определения ледовой нагрузки на элементы ВРК. Для ударного взаимодействия в поперечном направлении авторами предлагается рассматривать отдельно вариант удара об обломок льда с заостренными границами и с закругленными границами. В статье [16] коллективом авторов В.И. Евенко, А.А. Сергеевым, А.В. Андрюшиным, Г.В. Тарицей, И.В. Щербаковым и В.А Беляшовым рассмотрено решение задачи определения ледовых нагрузок на корпус ВРК и гребной винт применительно к

арктическому ледоколу, выполнен обзор методов проведения ледовых испытаний в ледовом опытовом бассейне для отработки пропульсивных комплексов современных судов ледового плавания. Приведены предложения авторов о выборе расчетных случаев нагрузки на корпус ВРК, в целом согласующийся с методикой DNV GL.

Следует отметить, что во всех рассмотренных выше методиках не приводятся рекомендации по выбору конкретной точки приложения глобальной ледовой нагрузки.

В отечественной практике также существует опыт применения специализированного программного обеспечения, предназначенного для численного решения нелинейных динамических задач, с целью качественной оценки характера взаимодействия элементов ВРК с ледовыми образованиями. В частности, В.А. Лобановым [17] приведен пример решения данной задачи с применением программного комплекса LS-DYNA. Продемонстрированы возможности использования такого программного обеспечения для определения характера обтекания ВРК льдами с целью отработки формы корпуса судна.

2.2 Натурные измерения величины глобальной ледовой нагрузки

Натурные измерения величины глобальной ледовой нагрузки являются важнейшим фактором, который позволит верифицировать результаты расчетов с применением инженерных методик. Однако следует отметить существующий на настоящий момент дефицит публикаций, посвященных замерам ледовых нагрузок на ВРК, а также их долговременному распределению, необходимому для оценки экстремальных значений

Широко известна работа авторов T. Heideman, P. Salmi, A. Uukallio, G. Wilkman [4], одна из первых публикаций, посвященных натурным испытаниям судов с ВРК и подтверждению их работоспособности в ледовых условиях. Проведенные на т/х т/х "Uikku" и "Lunni" испытания во многом определили судьбу применения ВРК на судах ледового класса.

В работе авторов S. Hänninen, M. Ojanen, A. Uuskallio и J. Vuorio [3] приведена информация о том, что система замеров ледовой нагрузки на ВРК была установлена также на т/х т/х "Botnica", "Fesco Sakhalin", «Норильский Никель». Приводится более подробное описание результатов измерений нагрузок на т/х «Норильский Никель», проведенных в 2006 году в Карском море. Указано, что замеренные нагрузки существенно ниже проектных, а наибольших значений ледовые нагрузки на ВРК достигают при движении судна в ледяных торосах.

В работе авторов A. Iyerusalimskiy, J. Choi, G. Park, Y. Kim, H.Yu, J.S. John [7] приведено описание системы мониторинга ледовых нагрузок, установленной на т/х «Тимофей Гуженко» и предназначенной для замера нагрузок, действующих как на корпус судна, так и на ВРК. Измерения проводились в период с апреля 2009 по май 2010 года. В работе приведено описание единичного удара ВРК о лед и зафиксированной при этом ледовой нагрузки в 1475 кН. Однако представленные в статьи данные ограниченны и не позволяют сделать вывод о том, как эта нагрузка соотносится с расчетной.

3. СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ ВЕЛИЧИНЫ ГЛОБАЛЬНОЙ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ

3.1 Тестовые ВРК и основные допущения

Рассмотрим ряд ВРК, геометрические размеры которых близки к современным колонкам, применяемым на судах ледового плавания (в табл. 1 приведены геометрические размеры тестовых ВРК, расшифровка обозначений приведена на рис. 2). Сопоставительный расчеты будем проводить с применением формул (1) – (7). Требуемые для расчета параметры, если они не приведены в тексте настоящей статьи, принимаются в соответствии с рекомендациями, приведенными в оригинальном источнике.

Таблица 1

Геометрические размеры тестовых ВРК

№ ВРК	l_{st}, м	b_{st}, м	l_p, м	b_p, м	h_{st}, м	d_{hub}, м	d_{prop}, м
1	0,92	0,47	1,28	1,05	0,87	0,53	1,3
2	1,04	0,80	1,97	1,16	1,30	0,58	1,4
3	1,57	0,92	3,10	1,83	1,54	0,92	2,2
4	2,16	0,89	3,68	1,58	1,70	0,90	2,7
5	2,50	1,65	4,10	2,24	1,78	1,50	4,5
6	4,70	0,85	6,40	2,10	1,75	1,36	4,1
7	5,20	1,58	6,95	2,10	2,16	1,02	3,0
8	6,30	1,41	9,37	2,80	3,50	1,64	4,9

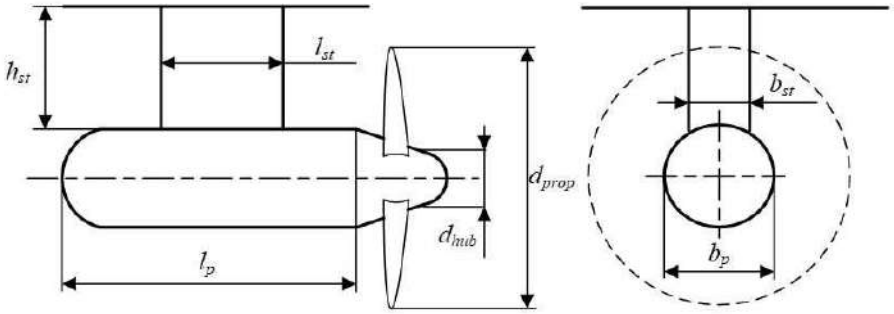


Рис. 2 Обозначения геометрических размеров тестовых ВРК

Расчеты выполняются при следующих основных допущениях:

- геометрические параметры ВРК, входящие в состав формул для определения величины нагрузки (например, расчетная площадь, радиус кривизны контура и т.п.) вычисляются приближенно на основе данных табл. 1, что позволяет говорить о полученных результатах расчета исключительно как о приближенных;
- рассматриваемые ВРК установлены на традиционных судах ледового плавания (не рассматриваются ледоколы и «суда двойного действия»);
- нагрузки возникают при движении судна задним ходом во льдах, суда не имеют эффективной защиты ВРК при движении задним ходом;
- в случае, если методика предполагает разные значения нагрузки для ВРК, установленной в ДП судна и смещенной от ДП, выбирается вариант, соответствующий наибольшему значению нагрузки;
- полученные экстремальные значения нагрузки по разным методикам соответствуют одинаковому критерию прочности конструкции.

Уточнение результатов сопоставительных расчетов, учитывающее отступление от допущений, является предметом отдельного исследования.

3.2 Сопоставительные расчеты

На начальном этапе рассмотрим соответствие расчетных случаев нагрузки между различными методиками. В табл. 2 для каждого расчетного случая, указанного в методике DNV GL, приведен в соответствие аналогичный расчетный случай методики FSICR. При этом в таблицах не приведены предусмотренные в методике FSICR случаи несимметричного продольного удара, при котором величина расчетной нагрузки уменьшается на 50 % по сравнению с осесимметричным ударом.

В табл. 3 приведены значения расчетных параметров, которые используются при расчетах в соответствии с методиками DNV GL и FSICR. Выбор расчетных параметров для применения методики KSRC является сложным дискуссионным вопросом. Статьи, в которых приведено описание методики, не содержат конкретных значений рекомендуемых расчетных параметров, но приводят только рекомендации по их назначению. В рамках настоящей статьи не рассматривается вопрос корректности назначения расчетных параметров; в целях научного исследования в табл. 4 приведены приближенные значения параметров, которые используются для сопоставительных расчетов.

На рис. 3 – 7 приведены результаты сопоставительных расчетов для расчетных случаев удара ВРК об обломок льда. На рис. 8 приведены результаты сопоставительных расчетов для расчетных случаев навала ВРК на киль ледяного тороса. Результаты расчетов сгруппированы в соответствии с ледовой категорией исключительно в целях наглядности и не используются для определения эквивалентности ледовых классов.

В табл. 5 представлена информация о случаях нагрузки, характеризующихся максимальным значением глобальной ледовой нагрузки.

Таблица 2

Сопоставление расчетных случаев нагрузки

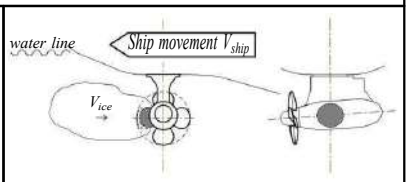
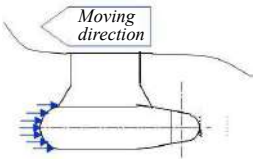
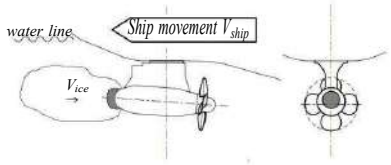
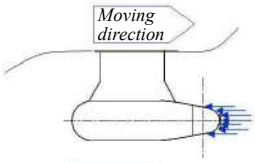
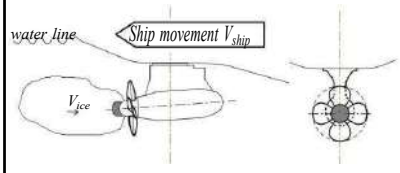
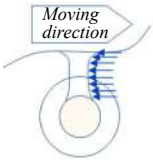
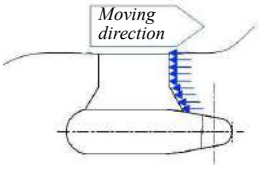
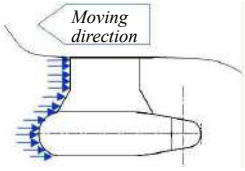
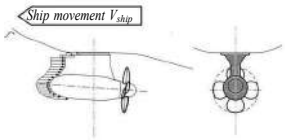
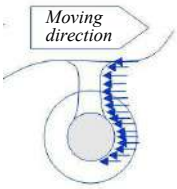
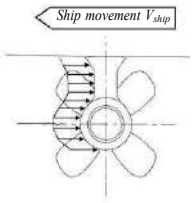
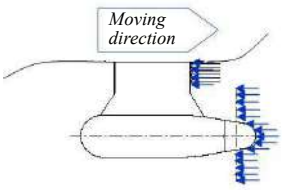
№ случая	Словесное описание	Графическое отображение	
		DNV GL	FSICR
Удар об обломок льдины			
1	Удар о гондолу в поперечном направлении		
2	Удар о гондолу в продольном направлении со стороны торца гондолы («толкающий» винт)		
3	Удар о гондолу в продольном направлении со стороны обтекателя гребного винта («тянущий» винт)		
4	Удар о стойку гондолы в поперечном направлении		—
5	Удар о стойку гондолы в продольном направлении со стороны винта («тянущий» гребной винт)		—
Навал на киль тороса			
6	Навал на киль тороса в продольном направлении со стороны торца гондолы («толкающий» винт)		
7	Навал на киль тороса в поперечном направлении		
8	Навал на киль тороса в продольном направлении со стороны винта («тянущий» винт)		—

Таблица 3

Расчетные параметры для методики DNV GL и FSICR

№ расчетного случая	DNV GL				FSICR	
	C_1	C_2	C_3	C_4	v_s, м/с	
					IA Super	IA
1	1,0	1,0	1,0	1,2	4	3
2	1,5	1,0	1,0	1,2	6	5
3	2,2	1,0	1,0	1,2	6	5
4	1,0	1,0	1,0	1,2	–	–
5	1,5	1,0	1,0	1,2	–	–
6	1,5	1,0	1,0	1,2	4	2
7	1,0	1,0	1,0	1,2	2	1
8	2,2	1,0	1,0	1,2	–	–

Таблица 4

Расчетные параметры для методики KSRC

Расчетный параметр	KSRC (Arc4)	KSRC (Arc5)	KSRC (Arc6)	KSRC (Arc7)
v_0, м/с	2,30	2,60	2,60	2,80
h, м	1,00	1,20	1,50	2,00

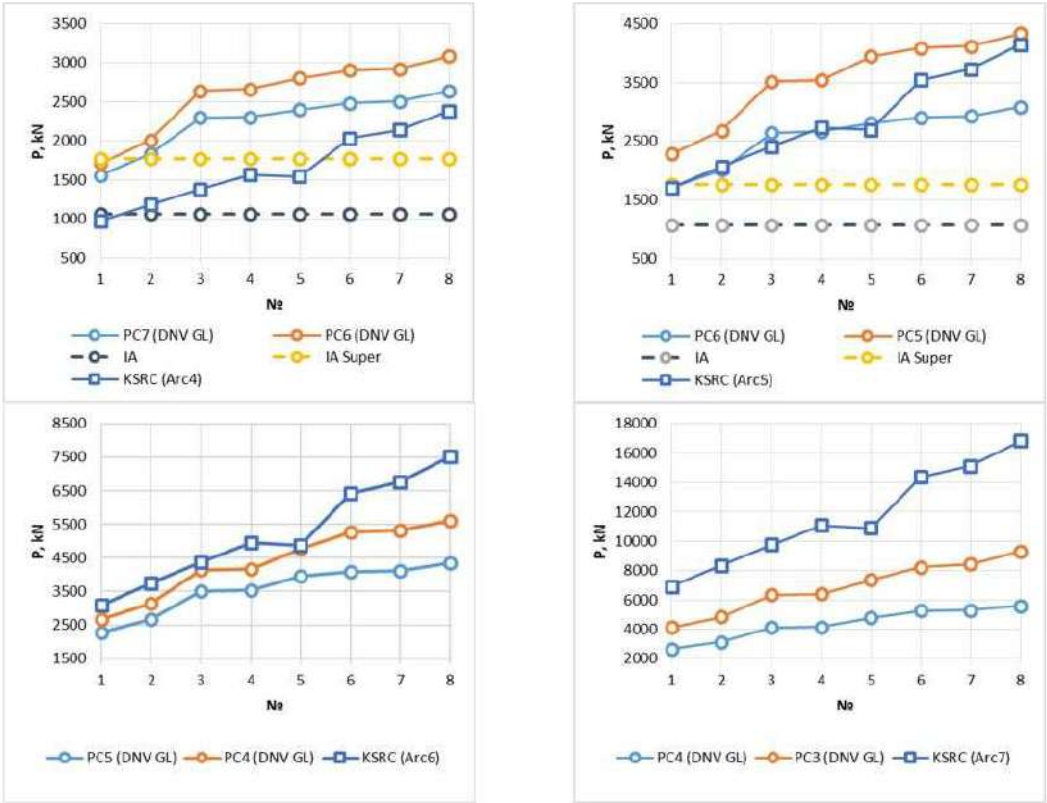


Рис. 3 Сопоставление нагрузки для расчетного случая 1

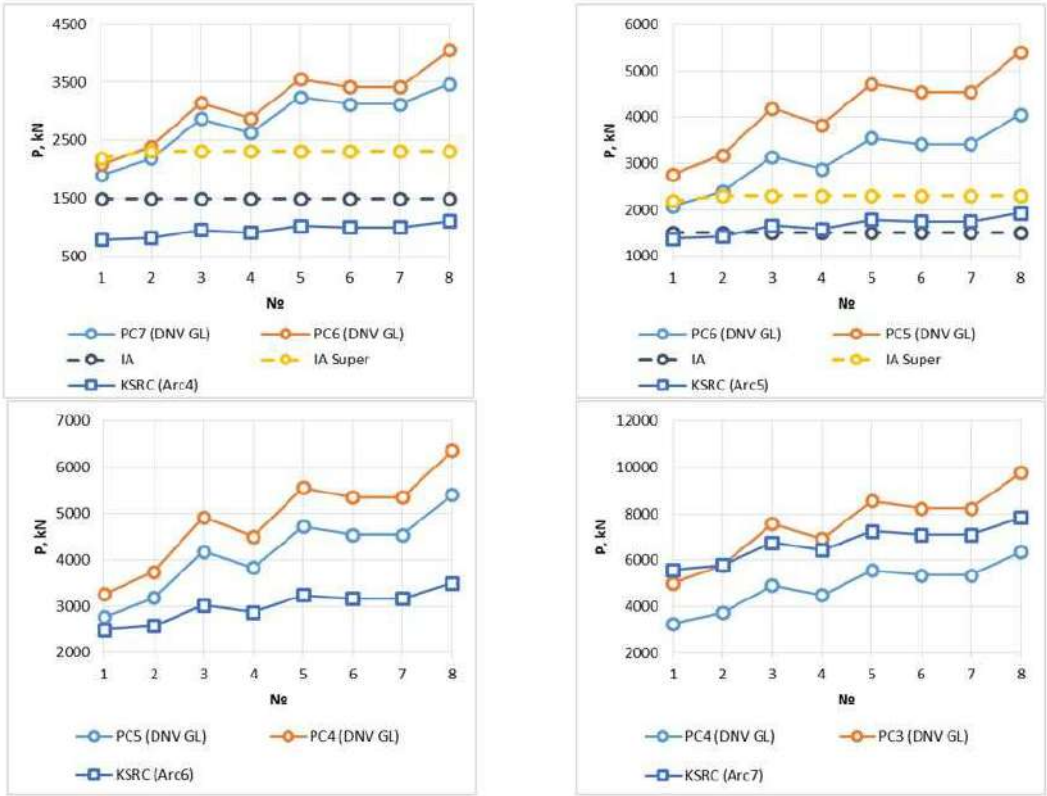


Рис. 4 Сопоставление нагрузки для расчетного случая 2

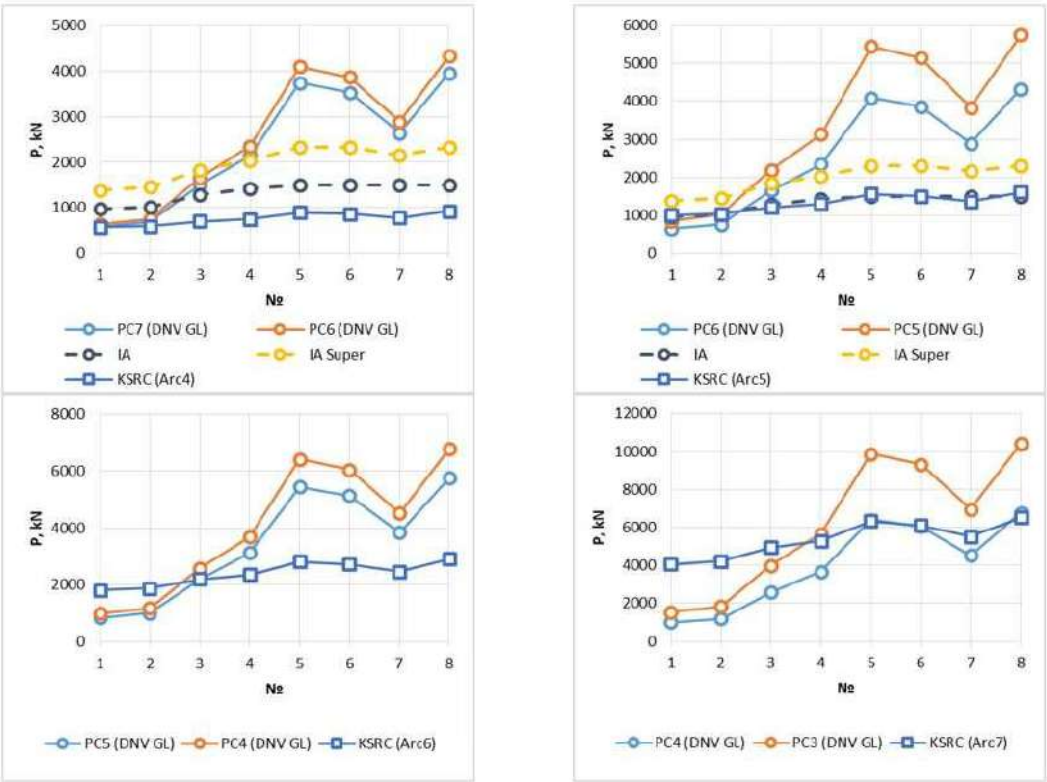


Рис. 5 Сопоставление нагрузки для расчетного случая 3

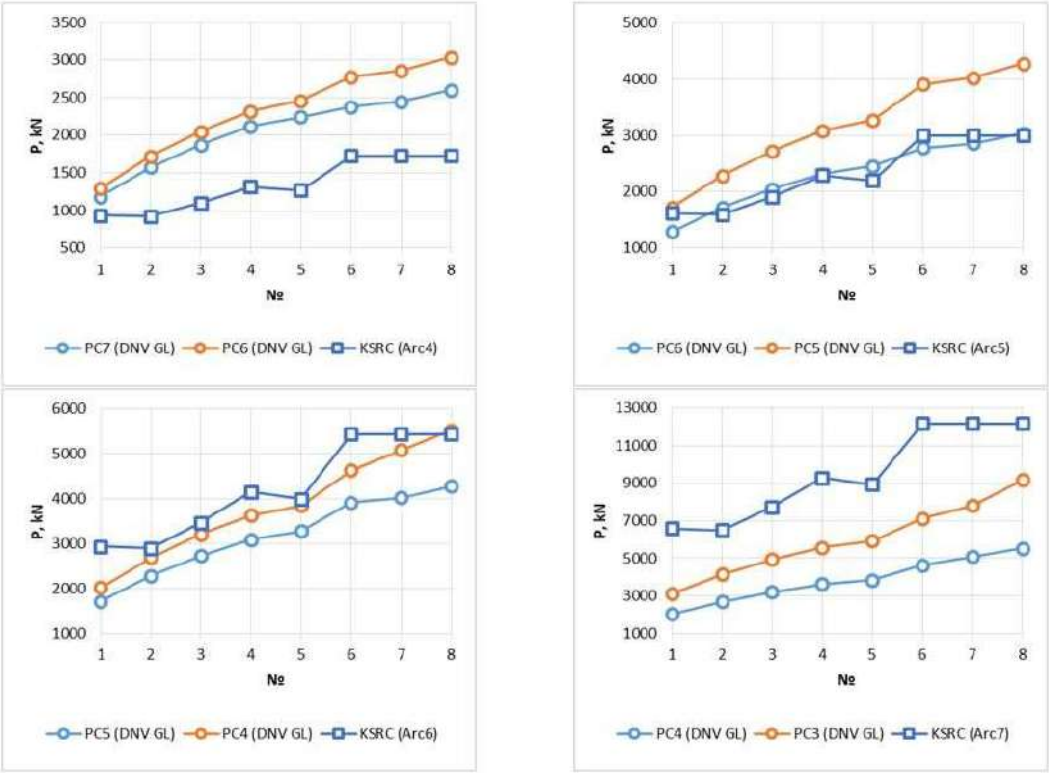


Рис. 6 Сопоставление нагрузки для расчетного случая 4

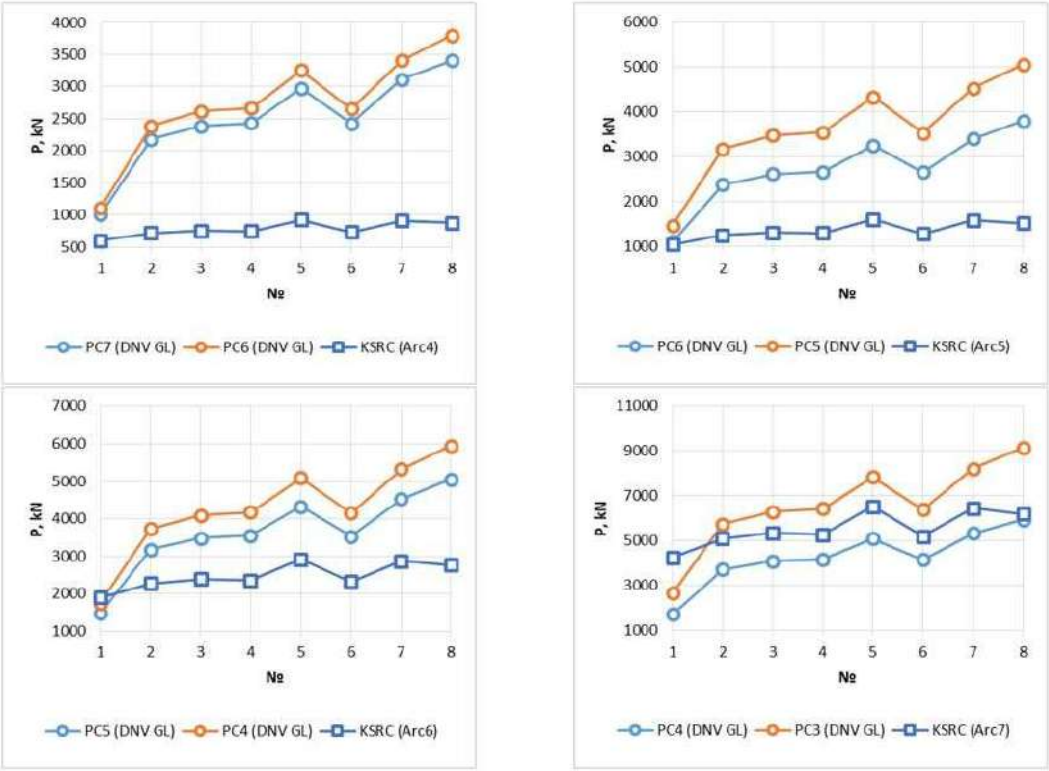
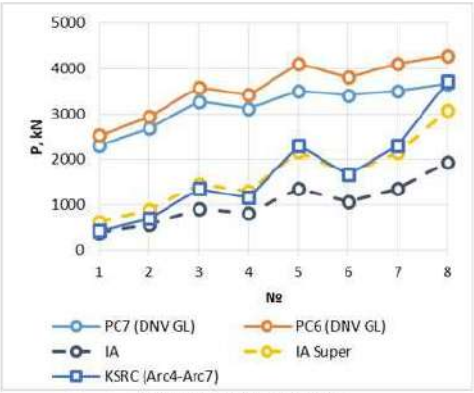
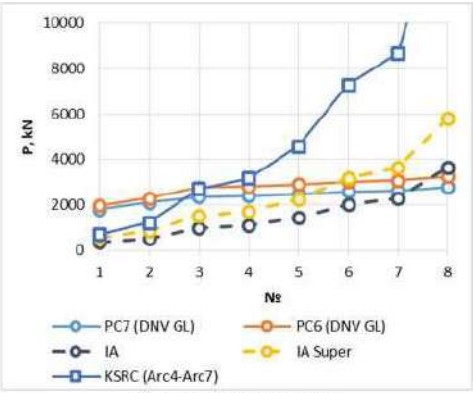


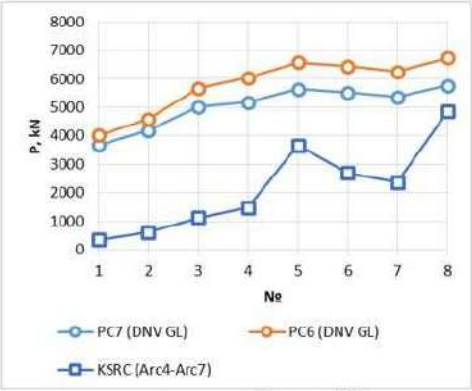
Рис. 7 Сопоставление нагрузки для расчетного случая 5



расчетный случай 6



расчетный случай 7



расчетный случай 8

Рис. 8 Сопоставление нагрузки для случаев навала на киль ледяного тороса

Таблица 5

Расчетные случаи с наибольшим значением нагрузки

	Номер случая нагрузки																							
Направление нагрузки и тип винта	Поперечная								Продольная															
									«тянущий»								«толкающий»							
№ ВРК	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
PC7 (DNVGL)	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	6	6	6
PC6 (DNVGL)	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	6	6	6
PC5 (DNVGL)	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	6	6	6
PC4 (DNVGL)	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	6	6	6
PC3 (DNVGL)	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	6	6	6
IA	1	1	1	7	7	7	7	7	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	6
IA Super	1	1	1	1	7	7	7	7	3	3	3	3	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	6
KSRC (**Arc4**)	1	7	7	7	7	7	7	7	5	5	8	8	8	8	8	8	2	2	6	6	6	6	6	6
KSRC (**Arc5**)	1	1	7	7	7	7	7	7	5	5	5	8	8	8	8	8	2	2	2	2	6	2	6	6
KSRC (**Arc6**)	1	1	1	1	1	7	7	7	5	5	5	3	8	3	5	8	2	2	2	2	2	2	2	6
KSRC (**Arc7**)	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	3	5	3	5	3	2	2	2	2	2	2	2	2

3.3 Анализ полученных результатов

Представленные результаты могут использоваться для качественной оценки степени согласованности значений глобальных ледовых нагрузок между рассмотренными методиками. В задачи настоящей статьи не входит детальное обоснование причин различий между результатами расчета, однако отметим лишь некоторые основные особенности полученных результатов:

- значения нагрузок при ударном взаимодействии корпуса ВРК с обломком льдины и при навале корпуса ВРК на киль ледяного тороса являются величинами одного порядка в соответствии со всеми рассмотренным в статье методикам;
- между методиками DNV GL и FSICR состав расчетных случаев согласуется только частично как для продольных и поперечных нагрузок, так и при учете несимметричных ударов;
- существует частичное рассогласование значений нагрузок между методиками DNV GL и FSICR для близких ледовых категорий, при этом степень рассогласования варьируется в зависимости от геометрических размеров ВРК; причины требуют дальнейшего изучения, что осложняется отсутствием опубликованных обоснований для значений коэффициентов C_1, C_2, C_3 и C_4, а также может являться следствием применения в методике DNV GL единой формулы для всех случаев нагрузки и/или ограничениями по расчетной толщине льда и ледяного тороса;
- степень рассогласованности между методиками DNV GL и KSRC различна для разных ледовых классов и в целом имеет тенденцию к уменьшению с ростом ледового класса; в наибольшей степени рассогласованность отмечается для случая продольной нагрузки и является предметом отдельного исследования; в первом приближении можно отметить, что причинами рассогласования могут быть, в частности, выбранные приближенные значения расчетных параметров для методики KSRC и/или корректность назначения коэффициентов C_1, C_2, C_3 и C_4 в методике DNV GL; для случая навала на киль тороса следует отметить отсутствие ограничений по площади взаимодействия со льдом в методике KSRC;
- наибольшие значения глобальной нагрузки по методике DNV GL отмечаются для навала на киль ледяного тороса для всех рассмотренных ВРК; для методик FSICR и KSRC отмечается более гибкая зависимость наиболее критического случая нагрузки от геометрических размеров ВРК, при которой значимость случаев навала на киль тороса растет с ростом геометрических размеров ВРК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты исследования, посвященного современным методикам определения величины экстремальных значений глобальной ледовой нагрузки на корпус ВРК. Результаты проведенного исследования показывают, что на настоящий момент нельзя сделать вывод о том, что существующие методики расчета гармонизированы между собой. Различия между методиками подтверждаются не только основными предпосылками и допущениями, использованными при получении инженерных формул для определения величины нагрузок, но и различием в составе расчетных случаев нагрузки и непосредственно величиной нагрузки. Детальное рассмотрение основных аспектов, которые определяют различия между методиками, может являться предметом дальнейших исследований. При этом необходимо, чтобы сопоставительные расчеты проводились с учетом ВРК различных геометрических размеров и производителей.

Отмечен дефицит опубликованных данных о замерах глобальной ледовой нагрузки на судах в эксплуатации, а также долговременному распределению этих нагрузок, необходимому для оценки экстремальных значений.

Проведенное исследование демонстрирует необходимость дальнейшего изучения вопроса определения глобальной ледовой нагрузки на ВРК и гармонизации существующих методик, в том числе в области состава расчетных случаев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andryushin A.V. Hänninen S., Heideman T. "Azipod" Azimuth Thruster for large capacity arctic transport ship with high ice category Arc7. Ensuring of operability and operating strength under severe ice conditions. Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2013.
2. Appolonov E.M. Nesterov A.B., Sazonov K.E. Regulation of extreme ice loads acting on hulls of azimuth propulsion systems for ice ships. Ships and Offshore Structures, Vol. 6, No. 3, 2011, pp. 239 – 247.

3. Hänninen S. Ojanen M., Uuskallio A., Vuorio J. Recent Development of Podded Propulsion in Arctic Region. Proceedings of the 7th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2007, pp. 469 – 481.
4. Heideman T. Salmi P., Uuskallio A., Wilkman G. Full-scale ice trials in ridges with Azipod (Azimuthing Podded Drive) Tanker Lunni in the Bay of Bothnia in 1996. Proceedings of POLARTECH'96, 1996.
5. Ice Class Regulations and the Application thereof. Finnish Transport Safety Agency. TRAFI/494131/03.04.01.00/2016, 2017, 65 p.
6. Ice Strengthening of propulsion machinery. Class Guideline. DNVGL-CG-0041, DNV GL, 2016, 86 p.
7. Iyerusalimskiy A. Choi J., Park G., Kim Y., Yu H., John J.S. The interim results of the long-term ice loads monitoring on the large Arctic tanker. Proceedings of the 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2011.
8. Kinnunen A. Kurkela J., Juuti P. Azimuthing thruster ice load calculation and simplified ice contact load formulation. VTT, VTT-R-00258-15, 2015, 56 p.
9. Kinnunen A. Perälä I., Tikanmäki M. Simplified ice impact load estimate for azimuthing thrusters. Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2019.
10. Kinnunen A. Tikanmäki M., Heinonen J., Koskinen P. Dynamic ice contact load model for azimuthing thrusters. Ships and Offshore Structures, 2019, DOI: 10.1080/17445302.2019.1578098.
11. Machinery Requirements for Polar Class Ships. IACS Unified Requirement I3, 2007, 16 p.
12. Polar Class Description and Application. IACS Unified Requirement I1, 2016, 2 p.
13. Structural Requirements for Polar Class Ships. IACS Unified Requirement I2, 2016, 22 p.
14. Апполонов Е.М. Нестеров А.Б., Сазонов К.Е. Регламентация экстремальных ледовых нагрузок на корпуса азимутальных пропульсивных систем судов ледового плавания. Труды ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова, вып. 39 (323), 2008, с. 45 – 68.
15. Апполонов Е.М. Нестеров А.Б., Сазонов К.Е. Регламентация ледовых нагрузок на корпуса азимутальных пропульсивных систем судов двойного действия. Труды ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова, вып. 28(312), 2006, с. 60 – 86.
16. Евенко В.И. Сергеев А.А., Андрюшин А.В., Тарица Г.В., Щербаков И.В., Беляшов В.А. Современные методы отработки пропульсивных комплексов судов ледового плавания. Ледовые нагрузки. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, вып. 32, 2009, с. 182 – 204.
17. Лобанов В.А. Пропульсивные качества винторулевой колонки во льдах Вестник ВГАВТ, вып. 46, 2016, стр. 171 – 182.
18. Правила классификации и постройки морских судов. Российский морской регистр судоходства, 2020. Интернет-ресурс www.rs-class.org (проверено 14.02.2020).

REFERENCES

1. Andryushin A.V. Hänninen S., Heideman T. "Azipod" Azimuth Thruster for large capacity arctic transport ship with high ice category Arc7. Ensuring of operability and operating strength under severe ice conditions. Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2013.
2. Appolonov E.M. Nesterov A.B., Sazonov K.E. Regulation of extreme ice loads acting on hulls of azimuth propulsion systems for ice ships. Ships and Offshore Structures, Vol. 6, No. 3, 2011, pp. 239 – 247.
3. Hänninen S. Ojanen M., Uuskallio A., Vuorio J. Recent Development of Podded Propulsion in Arctic Region. Proceedings of the 7th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2007, pp. 469 – 481.
4. Heideman T. Salmi P., Uuskallio A., Wilkman G. Full-scale ice trials in ridges with Azipod (Azimuthing Podded Drive) Tanker Lunni in the Bay of Bothnia in 1996. Proceedings of POLARTECH'96, 1996.
5. Ice Class Regulations and the Application Thereof. Finnish Transport Safety Agency. TRAFI/494131/03.04.01.00/2016, 2017, 65 p.
6. Ice Strengthening of propulsion machinery. Class Guideline. DNVGL-CG-0041, DNV GL, 2016, 86 p.
7. Iyerusalimskiy A. Choi J., Park G., Kim Y., Yu H., John J.S. The interim results of the long-term ice loads monitoring on the large Arctic tanker. Proceedings of the 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2011.
8. Kinnunen A. Kurkela J., Juuti P. Azimuthing thruster ice load calculation and simplified ice contact load formulation. VTT, VTT-R-00258-15, 2015, 56 p.
9. Kinnunen A. Perälä I., Tikanmäki M. Simplified ice impact load estimate for azimuthing thrusters. Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 2019.
10. Kinnunen A. Tikanmäki M., Heinonen J., Koskinen P. Dynamic ice contact load model for azimuthing thrusters. Ships and Offshore Structures, 2019, DOI: 10.1080/17445302.2019.1578098.
11. Machinery Requirements for Polar Class Ships. IACS Unified Requirement I3, 2007, 16 p.
12. Polar Class Description and Application. IACS Unified Requirement I1, 2016, 2 p.
13. Structural Requirements for Polar Class Ships. IACS Unified Requirement I2, 2016, 22 p.
14. Appolonov E.M., Nesterov A.B., Sazonov K.E. *Reglamentaciya ekstremalnih ledovih nagruzok na korpusa azimutalnikh populsivnikh sistem sudov ledovogo plavania.* [Regulation of extreme ice loads on the hulls of azimuthing propulsion systems of ice going ships]. Proceedings of Krylov Shipbuilding Research Center, Issue 39 (323), 2008, pp. 45 – 68 (in Russian).
15. Appolonov E.M., Nesterov A.B., Sazonov K.E. *Reglamentacia ledovikh nagruzok na korpusa azimutalnikh propulsivnikh sistem sudov dvoinogo deistviya* [Regulation of ice loads on the hulls of azimuthing propulsion systems of double-acting ships]. Proceedings of Krylov Shipbuilding Research Center, Issue 28(312), 2006, pp. 60 – 86 (in Russian).
16. Evenko V.I., Sergeev A.A., Andryushin A.V., Taritsa G.V., Scherbakov I.V., Belyashev V.A. *Sovremenniye metody otrabotki propul'sivnih kompleksov sudov ledovogo plavania. Ledovie nagruzki.* [Up-to-date Methods of Propulsion Complex Handling in Ice Ships. Ice Loads]. RS Research Bulletin, Issue 32, 2009, pp. 182 – 204 (in Russian).
17. Lobanov V.A. Propulsivnie kachestva vintorulevoi kolonki vo ldah. [Propulsion qualities of podded propulsion unit in ice]. Vestnik VGAVT, Issue 46, 2016, pp. 171 – 182 (in Russian).
18. Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Russian Maritime Register of Shipping, 2020. Web-link www.rs-class.org (checked 14.02.2020).

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 629.5.01

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕМОНТА СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ НА ПРИМЕРЕ КРЫЛЬЧАТКИ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДАМИ 3D-ПЕЧАТИ

А.В. Дектярев, Калининградский государственный технический университет (КГТУ), АО «ПСЗ «Янтарь», Калининград, e-mail: nwasanches@mail.ru
П.Р. Гришин, КГТУ, Калининград, e-mail: pchel2000@gmail.com
А.В. Пчелинцев, АО «ПСЗ «Янтарь», Калининград, e-mail: alex_pch_89@mail.ru
В.Н. Морозов, канд. техн. наук, доцент, КГТУ, Калининград, e-mail: mvn3613@gmail.com

В представленной статье приводится методика ремонта судовой системы вентиляции на примере крыльчатки для мотора охлаждения двигателя на строящемся на АО «ПСЗ «Янтарь» судне при помощи аддитивных технологий. Для этого в работе предоставляются данные о ремонтируемом объекте, особенностях его работы, методах изготовления, конструктивном исполнении, эксплуатационных режимах и сведения о наиболее частых поломках. На основе анализа эксплуатационных режимов и разрушающих факторов, обосновывается выбор материала для печати с его прочностными характеристиками и технология изготовления с указанием температурных режимов работы 3D-принтера. В ходе конструктивно-технологического анализа изделия, проведена его оптимизация под 3D-печать: рассмотрены четыре варианта технологии печати, и на основании технико-экономического анализа с отражением стоимости и времени печати, а также варианта конечной конструкции, выбран оптимальный.

Ключевые слова: *3D-печать, аддитивные технологии, 3D-принтеры, судостроение, судоремонт, судовое машиностроение, судовые системы, крыльчатка, термопласты, система вентиляции*

CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL ANALYSIS OF 3D-PRINTING APPLICATION FOR THE VENTILATION SYSTEM REPAIR USING THE ENGINE COOLING IMPELLER AS AN EXAMPLE

A.V. Dektyarev, Kaliningrad State Technical University (KSTU), Yantar Baltic Shipbuilding Plant, Kaliningrad, e-mail: nwasanches@mail.ru
P.R. Grishin, KSTU, Kaliningrad, e-mail: pchel2000@gmail.com
A.V. Pchelintsev, Yantar Baltic Shipbuilding Plant, Kaliningrad, e-mail: alex_pch_89@mail.ru
V.N. Morozov, PhD, associate professor, KSTU, Kaliningrad, e-mail: mvn3613@gmail.com

This article presents a procedure for repairing a ship's ventilation system on the example of an engine cooling motor impeller on the ship under construction at Yantar Baltic shipbuilding plant using additive technologies. Theretofore the data is provided on the repaired object, the features of its operation, manufacturing procedures, design, operation modes and information on the most frequent failures. Based on the analysis of operation modes and destructive factors, the article justifies the choice of material for printing with its strength characteristics and manufacturing technology indicating the temperature modes of 3D-printer operations. During the constructive and technological analysis of the product, the study for its optimization for 3D-printing has been conducted. The impeller has been considered in four versions of printing technology, and on the basis of feasibility study taking into account printing costs and time, and also the final design option, the optimal printing technology has been selected.

Keywords: *3D-printing, additive manufacturing, 3D-printers, shipbuilding, ship repairing, ship engineering, ship systems, impeller, thermoplastics, ventilation system*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время день сфера применения аддитивных технологий расширяется с каждым днем, находя свою нишу в строительстве, машиностроении, судостроении и прочих отраслях тяжелой промышленности. Тенденцию роста 3D-печати отмечают и в АО «ОСК», где одной из задач проекта по внедрению аддитивных технологий в производство является определение номенклатуры изделий судового машиностроения, подходящих под 3D-печатное изготовление.

Вопросам повышения качества поверхности крыльчаток и исследованию причин их разрушения посвящены работы [1 – 3]. В зарубежной литературе выделяются данные [4, 5]. Относительно применения 3D-технологий к изготовлению крыльчаток можно отметить работы [6, 7], где указан технологический цикл изготовления крыльчаток для машиностроения средствами 3D-печати. Однако настоящая работа приводит сведения относительно специфики работы представленного изделия в судостроении и важна при проведении работ, как по дефектакции ремонтируемого объекта, так и непосредственно при судоремонте.

Также данная работа является продолжением цикла исследований о применяемости аддитивных технологий к судостроению [8], где ранее по подобной технологии был осуществлен ремонт системы судовой пожарной автоматики [9], а также изготовлена модель маломерного судна [10] для последующих испытаний ее гидродинамических качеств в опытовом бассейне [11].

Целью работы является проведение и анализ ремонта изделий судового машиностроения на примере крыльчатки с его конструктивно-технологической оптимизацией под 3D-печать.

1. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КРЫЛЬЧАТОК В СУДОВЫХ СИСТЕМАХ И МЕТОДЫ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Обычно крыльчатка прекращает функционировать в самый неподходящий момент. Поэтому на борту всегда должны находиться запасные крыльчатки охлаждения, которые являются одними из наиболее значимых в системе охлаждения судовой системы вентиляции.

Крыльчатка состоит из защитного кожуха, ступицы и лопаток (см. рис. 1). Демонтированная крыльчатка показана на рис. 2.

Для подобных сложнопрофильных изделий практически все заготовки получают литьем по выплавляемым моделям. После данного метода изготовления детали имеют геометрические погрешности, поры, раковины. Также шероховатость каналов может составлять R_a = 20 – 6,3 мкм, что требует дополнительной механической обработки [1].

Разрушения крыльчаток происходят зачастую из-за циклических нагрузок различного вида. Также поломкам деталей способствуют наличие шероховатости поверхности и микроповреждений в зоне повышенных напряжений [2]. Наиболее опасным с точки зрения прочности являются инерционные нагрузки от вращения вентилятора, которые могут вызвать концентрацию напряжений в зоне стыка лопаток и ступицы в районе передних и задних кромок [3].

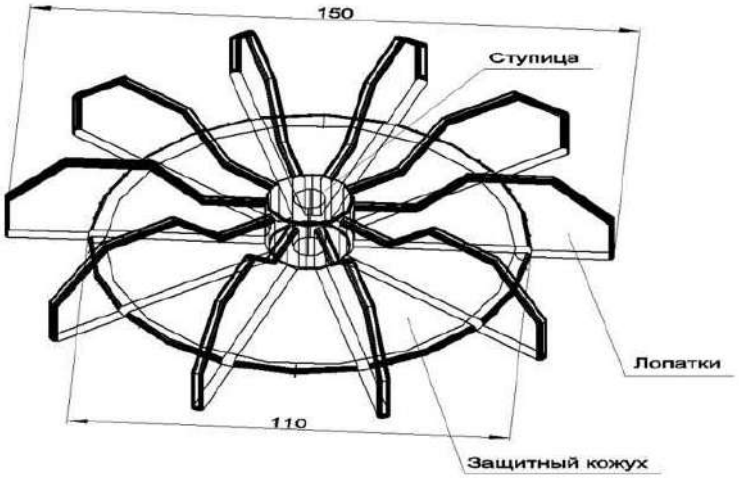


Рис. 1 Составные части крыльчатки

Рис. 2 Демонтированная крыльчатка
(фото авторов статьи)

2. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МАТЕРИАЛА ДЛЯ ПЕЧАТИ КРЫЛЬЧАТКИ

На срок эксплуатации крыльчатки влияют множество факторов, главные из которых – условия эксплуатации и качество установки. Отсюда следует, что к разрушающим факторам можно отнести пульсации аэродинамических сил, вибрационные силы из-за несбалансированности крыльчатки по весу, собственные частоты колебаний, усталостные напряжения, длительную работу при повышенных температурах, неправильное хранение [12] и т.д.

Учитывая особенности эксплуатации крыльчаток подобного типа, а также исследования физико-механических характеристик наиболее распространенных материалов углеводородной химии 3D-печатного производства [13], материалом для печати был выбран PETG-пластик. Его физико-механические характеристики наиболее полно отражены в [14, 15], где указано, что данный пластик обладает прочностью на разрыв – 50 – 56 МПа, прочностью на изгиб – 50 – 83 МПа, удлинением при растяжении без разрыва – 3 – 5 %.

3D-модель крыльчатки показана на рис. 3. Печать осуществлялась на 3D-принтере Creality Ender 3.

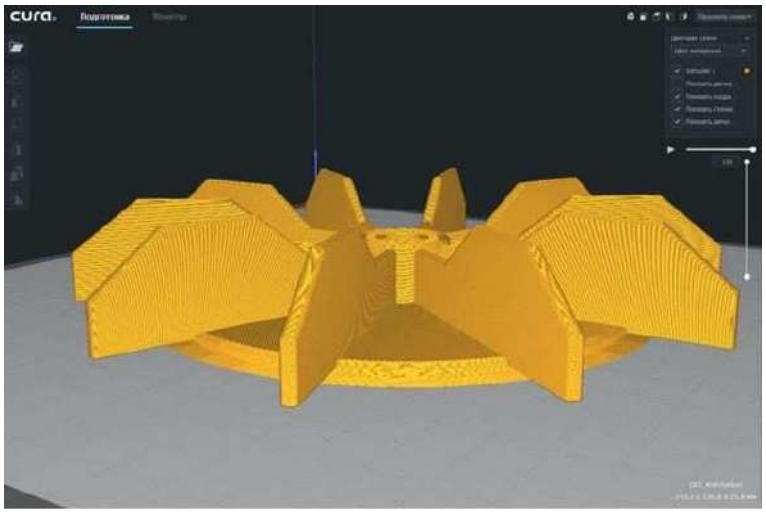


Рис. 3 3D-модель крыльчатки

3. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КРЫЛЬЧАТКИ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ВАРИАНТА ПЕЧАТИ

Защитный кожух крыльчатки имеет скругление по краям (пруток), следовательно, основная плоскость не будет опираться на рабочую платформу 3D-принтера, что затрудняет ее печать. Также, исходя из специфики работы крыльчаток, при печати требуется 100 % заполнение структуры материала. Исходя из этого было разработано четыре варианта печати.

Вариант 1

Напечатать раздельно защитный кожух крыльчатки и ступицу с лопатками, склеив конструкцию после печати. В данном случае на печать уйдет 60 грамм пластика и 3,5 часа, не считая времени на склеивание и засыхание клеевой композиции.

Вариант 2

Печать единой конструкции на поддерживающих структурах, где в качестве базовой плоскости будет кожух крыльчатки. В данном случае от рабочей платформы до поверхности кожуха будут располагаться поддержки в виде полос, подлежащие удалению после печати (см. рис. 4). При этом может пострадать ровность поверхности и потребуется постобработка. В данном случае на печать уйдет 3,8 часа и 70 грамм пластика.

Вариант 3

Печать единой конструкции на поддерживающих структурах, где в качестве базовой плоскости будут лопатки крыльчатки (см. рис. 5). В данном случае поддержки будет легче убрать по сравнению с предыдущим вариантом. На печать уйдет 6,0 часов и 100 грамм пластика.

Вариант 4

Принятый вариант изготовления. По согласию с Заказчиком, толщину кожуха увеличили на толщину прутка, делая конструкцию единой толщины. В данном случае в качестве базового полотнища выступал утолщенный кожух. Печать заняла 4,0 часа, материала ушло 80 грамм. Напечатанная крыльчатка показана на рис. 6.

Среднерыночная стоимость крыльчаток, исходя из конструкции, материала, назначения, колеблется и составляет от 800 руб. до 10 тыс. руб. Подобные конструкции с защитными кожухами стоят, как правило, около 1 тыс. руб.

При среднерыночной стоимости килограммовой катушки PETG пластика в 1600 руб., материальная себестоимость печати (без учета стоимости работы 3D-принтера, амортизационных расходов и пр.) можно оценить как: вариант 1 – 96 руб., вариант 2 – 112 руб., вариант 3 – 160 руб., вариант 4 – 128 руб.

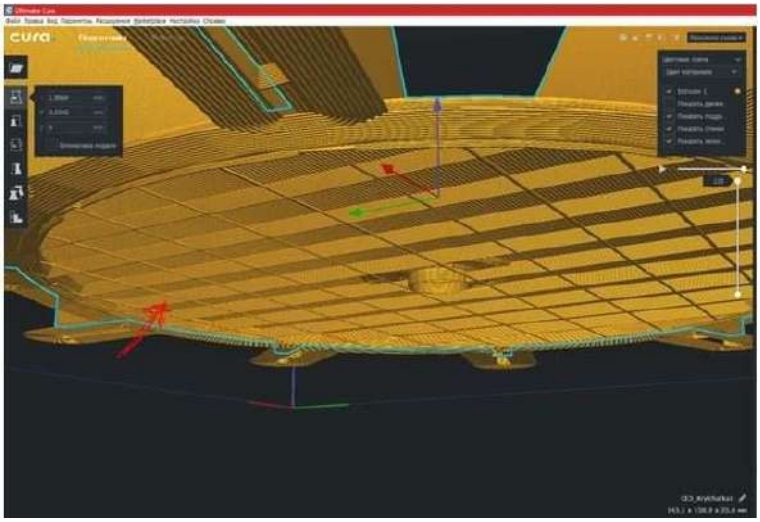


Рис. 4 Поддерживающие конструкции в виде полос на кожухе крыльчатки

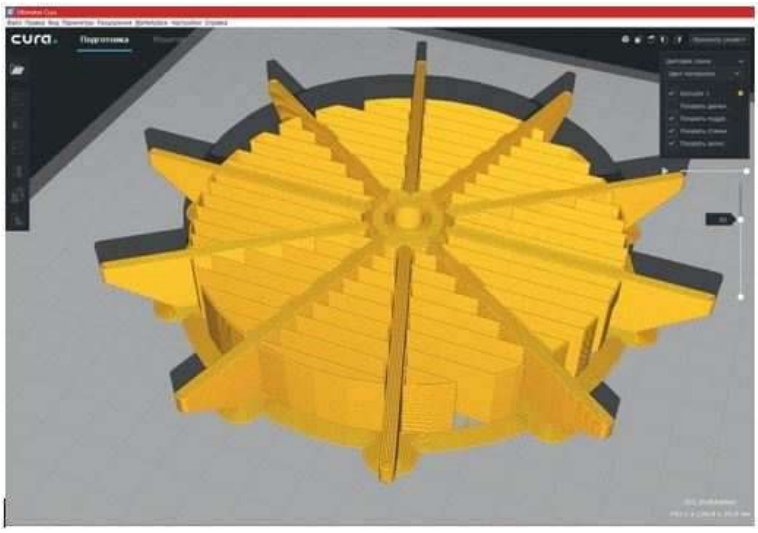


Рис. 5 Печать крыльчатки на лопастях

С учетом среднерыночной стоимости одного часа работы 3D-принтера (100 рублей), стоимость будет следующая: вариант 1 – 446 руб., вариант 2 – 492 руб., вариант 3 – 760 руб., вариант 4 – 528 руб. В конечную стоимость не включены расходы на постобработку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из опыта ремонта подобных изделий судового машиностроения, можно утверждать, что номенклатура изделий объектов морской техники, пригодных к аддитивному производству, продолжает динамично расти.

В представленной работе был продемонстрирован полный цикл ремонта крыльчатки для судовой системы вентиляции, а также показаны трудности, с которыми может столкнуться любой оператор 3D-печати на промышленном судостроительном или судоремонтном предприятии. Однако, в настоящей статье не было сказано о наиболее существенной проблеме современной промышленной 3D-печати – сертификации изделий. Для крыльчаток, как и для термопластов, обязательная сертификация не требуется [16, 17].

Рис. 6 Напечатанная крыльчатка
(фото авторов статьи)

Из технико-экономического анализа следует, что применение 3D-печати позволило существенно, практически на 50 %, снизить затраты производства на ремонт и замену крыльчаток, а также оптимизировать конструкторско-технологический цикл изготовления сложнопрофильных изделий подобного рода при помощи аддитивных технологий. При среднерыночной стоимости 3D-принтера «Creality Ender 3» в 13 тыс. руб. и средней стоимости печати крыльчатки, исходя из 4-х вариантов ее возможного исполнения, в 556 руб., 3D-принтер окупит себя после 30-й напечатанной крыльчатки.

Применение FDM-технологий на сегодняшний день в судостроении возможно, но только для небольших по размеру комплектующих, для которых не предусмотрены обязательные процедуры сертификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теряев Н.С., Сысоева Л.П., Сысоев А.С. Повышение качества поверхности лопаток в крыльчатках ТНА // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Т.1. 2016. с. 39 – 41.
2. Морозова Л.В., Григоренко В.Б. Исследование причин разрушения крыльчатки и колеса вентилятора из сплава АК4-1//Труды ВИАМ. №6 (66). 2018. с. 119 – 127.
3. Куркин Е.И., Лукьянов О.Е., Хоробрых М.А. Модернизация крыльчатки вентилятора с целью повышения его эффективности// Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т.17. №2. 2015. с. 204 – 210.
4. Budzik G. Properties of made by different methods of RP impeller foundry patterns. Archives of Foundry Engineering. Vol. 7. Is. 2. 2007. pp. 83 – 86.
5. Kim J.H., Chon J.H., Kim K.Y. Surrogate Modeling for Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller. International Journal of Fluid Machinery and Systems. Vol. 3. No. 1. 2010. pp. 29 – 38.
6. Митраков Г.Н., Евдокимов С.Н., Лаврик Е.Г., Сазонов В.С. Использование аддитивных технологий при литье по выживаемым моделям // Омский научный вестник, №2 (140). 2015. с. 80 – 84.
7. Peng S., Li T., Wang X., Dong M., Liu Z., Shi J., Zhang H. Toward a sustainable impeller production: environmental impact comparison of different impeller manufacturing methods. Journal of Industrial Ecology. Vol. 21 (S1). 2017. pp. 216 – 229.
8. Дектярев А.В., Морозов В.Н. Анализ применяемости элементов объектов морской техники к аддитивному производству и их дальнейшие перспективы развития // Материалы VI Международного Балтийского морского форума. Т.2. – Калининград: Издательство БГАРФ, 2018. с.117 – 126.
9. Дектярев А.В., Гришин П.Р., Пчелинцев А.В., Морозов В.Н. Опыт применения 3D-печати в судовом машиностроении на примере ремонта системы судовой пожарной автоматики // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, 2019. №54/55. с. 87 – 95.
10. Зобов П.Г., Дектярев А.В., Морозов В.Н. Современные методы 3D-сканирования при размерном анализе судовых моделей с учетом их аддитивного изготовления // Известия КГТУ, 2019. №53. с. 151 – 161.
11. Дектярев А.В., Зобов П.Г., Николаев И.И., Гришин П.Р., Романюта Д.А., Морозов В.Н. Опыт применения 3D-печати в судомоделизме при исследовании буксировочного сопротивления маломерного судна в условиях опытового бассейна // Известия КГТУ, 2019. №54. с. 166 – 177.
12. Ушаков К.А., Брусиловский И.В., Бушель А.Р. Аэродинамика осевых вентиляторов и элементы их конструкций. – М. Госгортехиздат, 1960. – 424 с.

13. Гришин П.Р., Дектярев А.В., Морозов В.Н., Романюта Д.А. Исследование физико-механических характеристик элементов судовых корпусных конструкций на примере судовых пластин в условиях аддитивного промышленного производства // Автоматизация в промышленности, 2019. №7. с. 16 – 18.
14. Szykiedans K., Credo W., Osiński D. Selected mechanical properties of PETG 3D-prints. Procedia Engineering, Vol. 177, 2017. pp. 455 – 461.
15. Szykiedans K., Credo W. Mechanical properties of FDM and SLA low-cost 3-D prints. Procedia Engineering. Vol. 136, 2016. pp. 257 – 262.
16. Постановление Правительства РФ от 01.12.2009 № 982 (ред. от 21.02.2018) «Об утверждении единого перечня продукции, подлежащей обязательной сертификации, и единого перечня продукции, подтверждение соответствия которой осуществляется в форме принятия декларации о соответствии» (с изм. и доп., вступ. в силу с 27.12.2018). 4861 «Вентиляторы общего назначения» (исключен – Постановление Правительства РФ от 20.10.2010 № 848).
17. Постановление Правительства РФ от 01.12.2009 № 982 (ред. от 21.02.2018) «Об утверждении единого перечня продукции, подлежащей обязательной сертификации, и единого перечня продукции, подтверждение соответствия которой осуществляется в форме принятия декларации о соответствии» (с изм. и доп., вступ. в силу с 27.12.2018). 2291 «Изделия из термопластов» (исключен – Постановление Правительства РФ от 04.05.2012 № 435).

REFERENCES

1. Teryaev N.S., Sysoeva L.P., Sysoev A.S. *Povyshenie kachestva poverkhnosti lopatok v krylchatkakh TNA* [Improving the surface quality of the blades in the impellers of turbopump units]. Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavtiki [Urgent problems of aviation and cosmonautics], 2016, Vol.1, pp. 39 – 41. (In Russian).
2. Morozova L.V., Grigorenko V.B. *Issledovanie prichin razrusheniya krylchatki i kolesa ventilyatora iz splava AK4-1* [Research of reasons for the destruction of the impeller and the wheel of the alloy AK4-1 fan]. Trudy VIAM [Proceedings of the All-Russian Research Institute of Aviation Materials], 2018, no.6 (66), pp. 119 – 127. (In Russian).
3. Kurkin E.I., Lukyanov O.E., Khorobrykh M.A. *Modernizatsiya krylchatki ventilyatora s tselyu povysheniya ego effektivnosti* [Modernization of the fan impeller in order to increase its effiency]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, Vol.17, no. 2, pp. 204 – 210. (In Russian).
4. Budzik G. Properties of made by different methods of RP impeller foundry patterns. Archives of Foundry Engineering, 2007, Vol. 7, Is. 2, pp. 83 – 86.
5. Kim J.H., Chon J.H., Kim K.Y. Surrogate Modeling for Optimization of a Centrifugal Compressor Impeller. International Journal of Fluid Machinery and Systems, 2010, Vol. 3, no. 1, pp. 29 – 38.
6. Mitrakov G.N., Evdokimov S.N., Lavrik E.G., Sazonov V.S. *Ispolzovanie additivnykh tekhnology pri litye po vyzhigaemym modelyam* [The use of additive technologies for casting on burnable models]. *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Herald], 2015, no.2 (140), pp. 80 – 84. (In Russian).
7. Peng S., Li T., Wang X., Dong M., Liu Z., Shi J., Zhang H. Toward a sustainable impeller production: environmental impact comparison of different impeller manufacturing methods. Journal of Industrial Ecology, 2017, Vol. 21 (S1), pp. 216 – 229.
8. Dektyarev A.V., Morozov V.N. *Analiz primenyaemosti elementov obyektov morskoj tekhniki k additivnomy proizvodstvu i ikh dalnejshie perspektivy razvitiya* [An analysis of the applicability of elements of marine engineering objects to additive production and their further development prospects]. *Materialy VI Mezhdunarodnogo Baltijskogo morskogo foruma. T.2.* [Materials of the VI International Baltic Marime Forum. Vol.2], Kaliningrad, 2018. pp. 117 – 126. (In Russian).
9. Dektyarev A.V., Grishin P.R., Pchelintsev A.V., Morozov V.N. *Opyt primeneniya 3D-pechati v sudovom mashinostroenii na primere remonta sistemy sudovoj pozharnoj avtomatiki* [Application of 3D printing in marine engineering as exemplified by ship fire automatics system repair]. Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudokhodstva [Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping], 2019, Nos. 54/55. pp. 87 – 95. (In Russian).
10. Zobov P.G., Dektyarev A.V., Morozov V.N. *Sovremennye metody 3D-skanirovaniya pri razmernom analize sudovykh modeley s uchetom ikh additivnogo izgotovleniya* [Modern 3D-scanning methods for dimensional analysis of ship models taking into account their additive manufacturing]. Izvestiya KGTU [KSTU News], 2019, No. 53, pp. 151 – 161. (In Russian).
11. Dektyarev A.V., Zobov P.G., Nikolaev I.I., Grishin P.R., Romanyuta D.A., Morozov V.N. *Opyt primeneniya 3D-pechati v sudomodelizme pri issledovanii buksirovochnogo soprotivleniya malomernogo sudna v usloviyakh opytovogo bassejna* [Experience of using 3D-printing in ship modeling while investigating towing resistance of a small-sized vessel in an experimental tank]. Izvestiya KGTU [KSTU News], 2019, No. 54. pp. 166 – 177. (In Russian).
12. Ushakov K.A., Brusilovskij I.V., Bushel A.R. *Aerodinamika osevykh ventilyatorov i elementy ikh konstruktsij* [Aerodynamics of axial fans and their structural elements]. Moscow. Gosgortekhizdat, 1960. 424 p.
13. Grishin P.R., Dektyarev A.V., Morozov V.N., Romanyuta D.A. *Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh kharasteristik elementov sudovykh korpusnykh konstruktsiy na primere sudovykh plastin v usloviyakh additivnogo promyshlennogo proizvodstva* [Study of physical and mechanical characteristics of the elements of ship hull structures on the example of ship plates in conditions of additive industrial production]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in the industry], 2019, No. 7, pp. 16 – 18. (In Russian).
14. Szykiedans K., Credo W., Osiński D. Selected mechanical properties of PETG 3D-prints. Procedia Engineering, 2017, Vol. 177, pp. 455 – 461.
15. Szykiedans K., Credo W. Mechanical properties of FDM and SLA low-cost 3-D prints. Procedia Engineering, 2016, Vol. 136, pp. 257 – 262.
16. *Postanovlenie Pravitelstva RF ot 01.12.2009 №982 (red. ot 21.02.2018) "Ob utverzhdenii edinogo perechnya produktsii, podlezhashchej obyazatelnoy sertifikatsii, i edinogo perechnya produktsii, podtverzhdenie sootvetstviya kotoroy osushchestvlyaetsya v forme prinyatiya deklaratsii o sootvetstvii"* [Decree of the Government of the Russian Federation No. 982 dated 01.12.2009 "On introducing the unified list of products subject to mandatory certification and the unified list of products whose compliance endorsement is performed by declaration of conformity" (s izm. i dop., vstup. v silu s 27.12.2018). 4861 "General purpose fan" (del. – Decree of the Government of the Russian Federation No. 848 dated 20.10.2010).
17. *Postanovlenie Pravitelstva RF ot 01.12.2009 №982 (red. ot 21.02.2018) "Ob utverzhdenii edinogo perechnya produktsii, podlezhashchej obyazatelnoy sertifikatsii, i edinogo perechnya produktsii, podtverzhdenie sootvetstviya kotoroy osushchestvlyaetsya v forme prinyatiya deklaratsii o sootvetstvii"* [Decree of the Government of the Russian Federation No. 982 dated 01.12.2009 "On introducing the unified list of products subject to mandatory certification and the unified list of products whose compliance endorsement is performed by declaration of conformity" (s izm. i dop., vstup. v silu s 27.12.2018). 2291 "Thermoplastic products" (del. – Decree of the Government of the Russian Federation No. 435 dated 04.05.2012).

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 621.43.013 – 629.3

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОЛНОПОТОЧНОЙ ТОНКОЙ ОЧИСТКИ МОТОРНОГО МАСЛА В СУДОВЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ДИЗЕЛЯХ

Г.П. Кича, д-р техн. наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток, e-mail: kicha@msun.ru
Л.А. Семенюк, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток
М.И. Тарасов, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток
А.В. Надежкин, д-р техн. наук, профессор, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток

В статье приводятся результаты эксплуатационных испытаний штатных и опытных маслоочистителей для двигателей внутреннего сгорания. Дано описание комплектациям, сформированным на базе новых фильтрующих элементов с высоким качеством очистки и длительным сроком службы. Оценка эффективности очистителей проводилась по состоянию отработанного моторного масла и судового дизеля. Отмечено влияние концентрации нерастворимых загрязнений на качество и продолжительность процесса очистки масла. По результатам эксперимента осуществлено сопоставление эффективности штатных и переоборудованных маслоочистителей при включении их в системы смазки судовых вспомогательных дизелей. Сделаны выводы о необходимости модернизации существующих систем очистки моторного масла, за счет использования фильтрующих элементов поверхностного типа из целлюлозных материалов. Показано, что применение в системах смазки судовых дизелей полнопоточных фильтров тонкой очистки моторного масла способствует надежной защите трибосопряжений двигателей от абразивных частиц, обеспечивает его глубокую очистку от мелкодисперсных нерастворимых примесей, что дает возможность сократить работы по техническому обслуживанию и увеличить ресурсные показатели двигателя.

Ключевые слова: *очистка моторного масла, система смазки, судовой дизель, износ двигателя, нерастворимые примеси*

OPERATIONAL EFFICIENCY OF FULL-FLOW FINE CLEANING OF ENGINE OIL IN MARINE AUXILIARY DIESEL ENGINES

G.P. Kicha, DSc, professor, Maritime state university named after admiral G.I. Nevelskoy (Admiral Nevelskoy Maritime State University), Vladivostok, e-mail: kicha@msun.ru
L.A. Semenuk, Admiral Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok
M.I. Tarasov, Admiral Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok
A.V. Nadezhkin, DSc, professor, Admiral Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok

The article presents the results of operational tests of standard and experimental oil cleaners for internal combustion engines, giving the description of the complete sets formed on the basis of new filter elements with high quality cleaning and long service life. Evaluation of the effectiveness of the cleaners has been carried out according to the condition of used engine oil and marine diesel engine. The effect of the concentration of insoluble contaminants on the quality and duration of the oil refining process has been noted. Based on the results of the experiment, a comparison of the effectiveness of regular and refitted oil cleaners included in the lubrication systems of marine auxiliary diesel engines has been made. Conclusions have been drawn as to the need to modernize existing systems for cleaning engine oil through the use of filtering elements of the surface type from cellulosic materials. Furthermore, it has been shown that the

use of full-flow fine filters of engine oil in marine diesel engine lubrication systems contributes to reliable protection of engine tribological conjugations from abrasive particles, ensures its deep cleaning from fine insoluble impurities, which makes it possible to reduce maintenance work and increase engine resource life.

Keywords: *engine oil cleaning, lubrication system, marine diesel, engine wear, insoluble impurities*

ВВЕДЕНИЕ

Ресурсные показатели двигателей в значительной мере зависят от эффективности очистки и моторных свойств применяемых моторных масел. Система очистки масла – одна из важнейших систем, обеспечивающих при высоком сроке его службы надежную и долговечную работу дизеля. В повышении качества фильтрования используемых в дизеле нефтепродуктов заложены большие возможности для снижения скорости изнашивания основных деталей двигателей внутреннего сгорания (ДВС), уменьшения отложений в картере и нагаролакообразований в ЦПГ.

Системы смазки многих эксплуатируемых на морских судах вспомогательных двигателей, особенно зарубежного производства, оснащены только фильтрами грубой очистки (ФГО). Расчет на использование в таких дизелях для периодической тонкой очистки масла сепаратора не оправдался, т.к. емкость его барабана и подключающих трубопроводов в большинстве случаев сопоставима с объемами масла, циркулирующего в системах смазки.

В последние годы в России и за рубежом большое распространение получили полнопоточные фильтры тонкой очистки масла (ФТОМП) [1 – 4]. Особенно эффективно применение их сейчас, когда в эксплуатации появились масла с хорошими детергентами. ФТОМП надежно защищают пары трения дизеля от попадания сравнительно крупных абразивных частиц. Они имеют достаточно высокую продолжительность работы до технического обслуживания, малую трудоемкость смены элементов.

МАТЕРИАЛЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью проводимых на Дальневосточном бассейне эксплуатационных испытаний была проверка эффективности ФТОМП в судовых условиях. Испытания велась на двигателях зарубежного производства. В табл. 1 приведены их основные характеристики.

Таблица 1

Показатель	Типы дизелей			
	6NVD36A.1	8ВАН22	625МТВН40	5А25
Обозначение по ГОСТ 4393-74	6ЧН24/36	8ЧН22/32	6ЧН25/40	5ЧН25/30
Завод (фирма)-изготовитель (страна)				
Номинальная мощность, кВт	294	353	390	434
Частота вращения, мин$^{-1}$	500	500	500	750
Диаметр цилиндра, мм	240	220	250	250
Ход поршня, мм	360	320	400	300
Число цилиндров	6	8	6	5
Среднее эффективное давление, МПа	0,75	0,84	0,78	0,88
Удельный расход топлива, кг/(кВт ч)	0,218	0,231	0,234	0,224
Удельный расход масла, г/(кВт ч)	2,7	4,8	3,4	3,9
Количество масла в системе смазки, кг	280	500	550	750
Подача масляного насоса, $Q_{м.н.}$, м^3/ч	1,70 × 3600	3,67 × 3600	2,66 × 3600	6,25 × 3600
Тип штатного маслооочистителя (ФГО)	Сетчатый, дисковый	Сетчатый, тарельчатый	Пластинчато-щелевой	Сетчатый, цилиндрический
Размер ячеи фильтровальной сетки (щели) маслоочистителя, мкм	63	63	100	50

В системах смазки указанных дизелей использовалось масло М-10-$В_2$(с) (ГОСТ 12934–84). Они работали на дизельном топливе Л-0,5 (ГОСТ 305–99). Часть двигателей модернизировали, установив вместо ФГО новые маслоочистители: в двигателях 6NVD36A.1 – двухэлементные фильтры ФМП2 (ТУ 24.06;2040 – 89), в остальных – четырехэлементные ФМП4 (ТУ 24.06.2038 – 89).

Контрольная группа дизелей эксплуатировалась со штатными маслоочистителями. В двигателях с переоборудованной системой очистки масла использовались элементы ЭФМ 145/55.363-3, ЭФМ 145/55.363-4 и ЭФМ 145/55.363-5 (ТУ 3689-01-33644988-95) соответственно из нетканого материал НКФМ-3 (ТУ 17-5017 – 81), бумаг ДРКБ (ТУ 81-04-178–72) и БФМ (ГОСТ 20806–75). Основные характеристики элементов и фильтровальных материалов к ним приведены в работе [2]. Группы были скомплектованы так, что в каждую из них входили дизели одинакового технического состояния. При этом обязательно на любом из наблюдаемых судов одновременно эксплуатировались одного и того же типа контрольный дизель и двигатель с опытным маслоочистителем.

Эффективность опытных и штатных маслоочистителей оценивалась по влиянию на состояния масла и дизеля, по трудоемкости обслуживания системы очистки. В основу исследования главных направлений процесса старения моторного масла взят комплекс методов, разработанный ЦНИДИ [5]. Нагаролакообразование в дизелях и отложение шлама в картере определялись по ОСТ 24.060.89. По рекомендациям этого же стандарта измерялись скорости изнашивания основных деталей двигателей: методом искусственных баз (приборы УПОИ-6 и УГОИВ-2), микрометражом и взвешиванием на аналитических весах. Продолжительность эксплуатационных испытаний составляла 7 – 10 тыс. ч. Средние скорости изнашивания деталей и нагаролакообразования оценивались при одинаковой наработке дизелей одного типа контрольной и опытной групп.

В период испытаний масло заменялось по браковочным показателям, действующим на морском флоте. Штатные ФГО чистились согласно установленному регламенту. Фильтрующие элементы типа ЭФМ 145/55.363 менялись по мере достижения перепада давления 0,15 – 0,18 МПа, при котором открывались перепускные клапаны полнопоточных фильтров. Допускалось использование ФТОМП в частично-поточном режиме в течение времени, составляющего 5 – 10 % от продолжительности обработки полного потока.

На рис. 1 показано накопление нерастворимых примесей в циркуляционном масле дизеля 8ВАН22 со штатной и опытной системами очистки в функции от продолжительности его работы. К концу контрольного этапа максимальная концентрация нерастворимых в бензине (НРБ) продуктов, определяемых центрифугированном, при использовании ФГО повышается до 2 %. Стабилизации данного показателя за период работы 2500 ч не наблюдается.

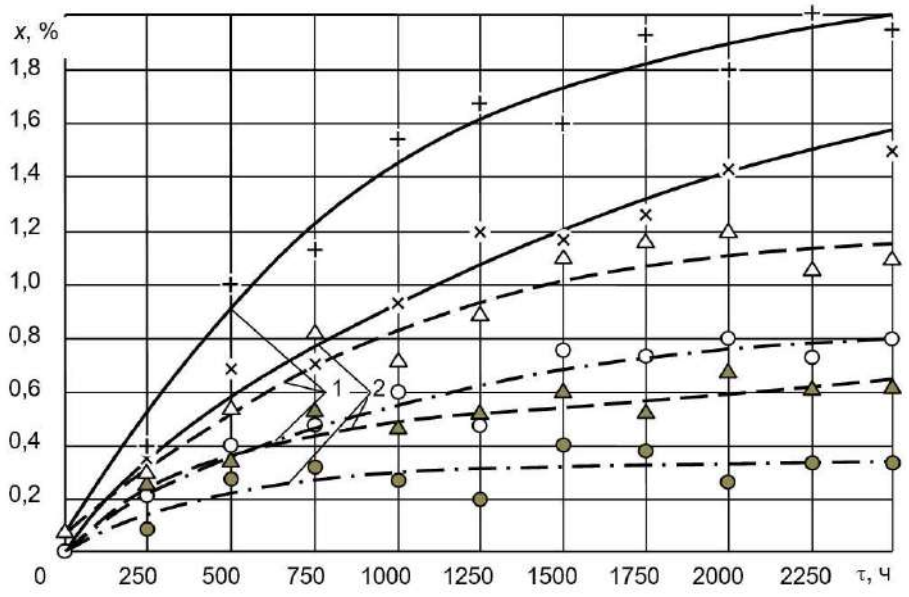


Рис. 1 Динамика накопления в масле М-10-В2(с)
общих (*1*) и грубодисперсных (*2*) примесей
при использовании в системе смазки дизеля 8ВАН22 разных очистителей:
——— –штатный ФГО; - - - и -·-·-·– ФТОМП с элементами ЭФМ 145/55.363-4 и ЭФМ 145/55.363-5

Включение в систему смазки ФТОМП с элементами ЭФМ 145/55.363-4 и ЭФМ 145/55.363-5 существенно замедляет накопление нерастворимых продуктов в масле: процесс стабилизируется при концентрации НРБ на уровне 1,2 % и 0,8 %. Максимальное содержание этих продуктов становится в 1,7 и 2,5 раза ниже.

Еще более значительна разница в содержании в масле грубодисперсной фазы нерастворимых загрязнений (этот показатель определялся по ГОСТ 13477-68 с использованием мембранных нитроцеллюлозных фильтров № 4 со средним диаметром пор 09 – 1 мкм) при очистке его штатным и опытным фильтрами. Концентрация загрязнений при использовании ФГО к концу этапа составляла 1,48 %. При эффективной очистке масла от этих продуктов ФТОМП содержание их не превышало при использовании элементов ЭФМ 145/55.363-5 – 0,4, а элементов ЭФМ 145/55.363-4 – 0,66 %. Концентрация в масле грубодисперсных примесей к концу этапа при использовании ФТОМП была почти в 2,5 – 4,4 раза ниже, чем при использовании ФГО.

Установка опытных фильтров влияет также на срабатывание присадки и процесс окисления. На рис. 2 показана кинетика кислотно-основных свойств (ГОСТ 11362-76) масла в анализируемом двигателе. Изменение щелочности *B*, кислотности *K* и показателя pH в зависимости от τ приведено только для двух случаев: ФГО и ФТОМП с элементами ЭФМ 145/55.363-5.

Рассматриваемые зависимости при использовании полнопоточных элементов из БФМ и ДРКБ практически одинаковы. К концу этапа кислотность масла в системе смазки со штатным маслоочистителем повышается до 2,04, а с опытным – до 1,44 мг КОН/г. Уменьшение кислотности связано с эффективным удалением ФТОМП из масла некоторых продуктов его окисления и срабатывания присадки.

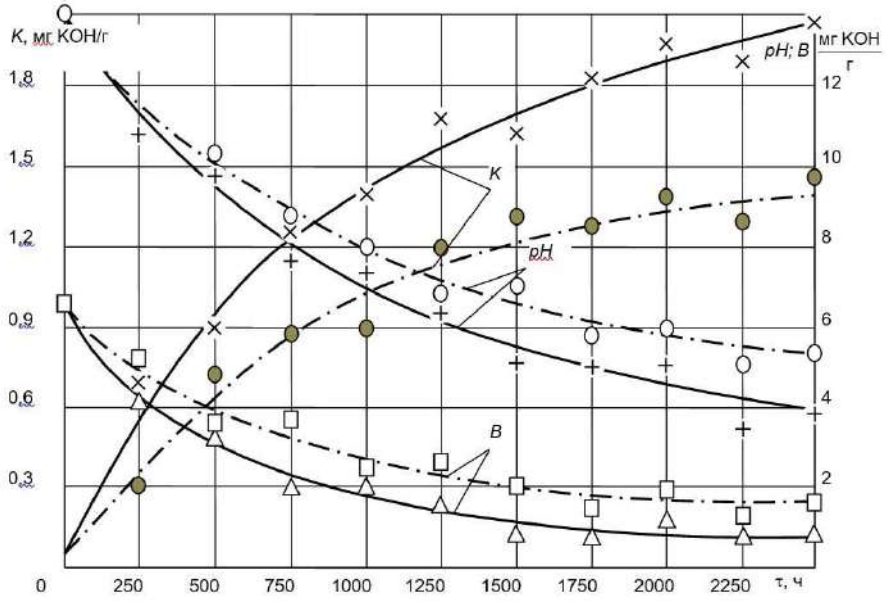


Рис. 2 Зависимость кислотно-основных свойств масла М-10-В2(с) от срока его службы в дизеле 8ВАН22 при использовании разных очистителей:
——— – штатный ФГО; -·-·-·– ФТОМП с элементами ЭФМ 145/55.363-4

Концентрация активной части присадок в масле М-10-В2(с), к моменту отработки им 1500 – 2500 ч, определенная методом диализа, примерно одинакова при использовании как ФГО, так и ФТОМП. Таким образом, незначительная начальная адсорбция несработавшихся присадок на фильтрующей шторе при существующих в дизелях маслообменах и интенсивности разложения полезных компонентов, адсорбционной активности и поверхности фильтроматериалов практически не оказывает влияния на их концентрацию в масле.

В табл. 2 приведены обобщенные данные по эффективности ФГО и ФТОМП. Результаты испытаний обработаны с привлечением методов математической статистики. Рассчитаны средние значения и с вероятностью 90 % доверительные интервалы рассматриваемых показателей.

Концентрация в масле нерастворимых продуктов к 2000 ч его работы при использовании ФГО была в два – семь раз выше, чем при включении в систему смазки ФТОМп. Верхний предел указанного

соотношения относится к грубодисперсным примесям. Наибольший эффект от применения ФТОМП зафиксирован на дизеле 5А25, интенсивность очистки масла которого от общих и зольных нерастворимых в бензине продуктов ФТОМП в 47 и 51 раз выше, чем штатным фильтром. У других дизелей интенсивность очистки масла опытным фильтром по сравнению с ФГО в среднем выше в 23 – 40 раз.

Таблица 2

Показатель	**Типы дизелей и фильтров**							
	6NVD36.A		8ВАН22		625МТВН40		5А25	
	ФГО	ФТОМП	ФГО	ФТОМП	ФГО	ФТОМП	ФГО	ФТОМП
Концентрация в масле НРБ продуктов, % общих зольных	 1,12 ± 0,35 0,26 ± 0,09	 0,53 ± 0,16 0,12 ± 0,04	 2,10 ± 0,41 0,36 ± 0,15	 0,92 ± 0,34 0,17 ± 0,06	 1,34 ± 0,41 0,27 ± 0,08	 0,63 ± 0,22 0,12 ± 0,04	 1,63 ± 0,52 0,31 ± 0,10	 0,42 ± 0,06 0,06 ± 0,02
Концентрация в масле грубодисперсной фазы нерастворимых примесей, %	0,93 ± 0,26	0,21 ± 0,07	1,53 ± 0,42	0,40 ± 0,13	0,95 ± 0,27	0,29 ± 0,06	1,28 ± 0,37	0,18 ± 0,03
Интенсивность очистки масла от НРБ продуктов, кг/ч общих зольных	 0,001 ± 0,0003 0,003 ± 0,001	 0,04 ± 0,01 0,07 ± 0,01	 0,002 ± 0,003 0,003 ± 0,001	 0,05 ± 0,02 0,12 ± 0,03	 – –	 0,09 ± 0,02 0,18 ± 0,03	 0,07 ± 0,02 0,16 ± 0,03	 3,31 ± 0,48 8,24 ± 1,61
Скорость накопления отложений на элементах фильтров, г/ч	0,05 ± 0,01	1,2 ± 0,3	0,012 ± 0,05	2,3 ± 0,7	–	2,9 ± 0,8	1,7 ± 0,3	25,4 ± 6,1
Скорость удаления из масла НРБ продуктов, г/ч общих зольных	 0,01 ± 0,003 –	 0,16 ± 0,04 0,07 ± 0,02	 0,03 ± 0,01 0,006 ± 0,001	 0,32 ± 0,07 0,14 ± 0,03	 – –	 0,41 ± 0,07 0,15 ± 0,04	 0,80 ± 0,22 0,43 ± 0,11	 10,13 ± 2,50 4,92 ± 0,84
Коэффициент очистки по НРБ продуктам, % общим зольным	 1,2 ± 0,3 2,1 ± 0,5	 25,4 ± 3,6 39,2 ± 5,3	 0,6 ± 0,2 0,9 ± 0,3	 13,8 ± 3,6 29,6 ± 5,2	 – –	 21,4 ± 5,3 33,1 ± 7,2	 21,2 ± 4,6 34,4 ± 6,3	 89,1 ± 4,4 94,7 ± 3,2
Грязеемкость фильтрующих элементов, кг	–	0,35 ± 0,14	–	0,41 ± 0,13	–	0,68 ± 0,21	–	2,7 ± 0,8
Трудоемкость обслуживания системы очистки, чел. ч/1000 ч	8 ± 16	0,4 ± 0,5	12 ± 20	0,8 ± 1,0	2,3	0,6–0,8	10,6–16	1,5–2,0
Срок службы фильтрующих элементов, ч	78 ± 26	569 ± 106	126 ± 32	726 ± 107	500	945 ± 172	110 ± 37	417 ± 116

Высокая скорость накопления отложений на элементах штатных и новых фильтров в дизеле 5А25 указывает на то, что масло М-10-В2(с), в условиях характерной для этого двигателя форсировки быстро теряет моюще-диспергирующие свойства. Низкая стабильность нерастворимой фазы загрязнений, способность к урегулированию приводит к тому, что наиболее вероятная скорость накопления отложений на элементах в этом двигателе в пересчете на один элемент равна 4,8 – 7,9 г/ч, что не характерно для полнопоточного режима фильтрования. Для него более приемлемо значение 0,4 – 0,9 г/ч.

Если сопоставлять эффективность штатных и опытных маслоочистителей по скорости удаления из масла общих и зольных нерастворимых в бензине продуктов, то этот параметр у ФТОМП в среднем в 11 – 23 раза выше. Приведенные в табл. 2 к моменту отработки маслом М 10-В2(с), 2000 ч значения коэффициента очистки для большинства ФГО равны 0,8 –2,6 %. Для ФТОМП они соответствуют 10,2 – 44,5 %. Этот показатель у дизеля 5А25 как со штатными, так и опытными маслоочистителями значительно выше.

Грязеемкость полнопоточных фильтрующих элементов типа ЭФМ 145/55.363 из материала БФМ для полнопоточного режима очистки составляет 0,35 – 0,68 кг. Нижнее значение грязеемкости соответствует скорости фильтрации 0,3 – 0,5, верхнее – 0,8 – 1 м/ч. В дизеле 5А25 из-за агрегатирования нерастворимых загрязнений и значительной продолжительности работы фильтра в частично-поточном режиме (доля его составляла 0,2 – 0,3) на каждом из элементов за период его использования накапливается значительно больше отложений – 1,9 – 3,3 кг.

Средний срок службы элементов ЭФМ 145/55.363-5 у рассматриваемых вспомогательных дизелей был неодинаков: изменялся в пределах от 417 до 945 ч. Как показал эксперимент, срок службы элементов в значительной мере зависит от состояния коллоидной системы нерастворимых примесей. Наиболее стабильна и хорошо диспергирована нерастворимая фаза загрязнений в масле дизеля 625МТВН40. Наихудшие условия для работы фильтров были в двигателе 5А25, чему способствовало, как уже отмечалось, образование мицелл и фильтрация масла с рабочими скоростями 1,3 – 1,8 м/ч. Поэтому у первого из них срок службы элементов максимален, а у второго минимален.

Трудоемкость обслуживания систем очистки масла с ФТОМП в 7 – 32 раза ниже, чем со штатными фильтрами. При использовании элементов улучшается культура обслуживания маслоочистителей и системы смазки в целом. Отпадает необходимость в проведении трудоемких и грязных моечно-очистных операций по удалению с элементов загрязнений. Штатные ФГО имеют за исключением самоочищающегося пластинчато-щелевого фильтра (см. табл. 1) низкую периодичность обслуживания. В среднем чистка элементов ФГО при использовании масла М-10-В2(с) производится через 78 – 126 ч работы маслоочистителя.

Периодичность обслуживания системы очистки с ФТОМП зависит от характеристики применяемого фильтроматериала. На рис. 3 приведена гистограмма относительной частоты попадания элементов в определенный интервал по сроку службы. Ступенчатая зависимость получена при анализе результатов испытаний по всем типам вспомогательных судовых двигателей, включая отечественный дизель 6ЧН25/34. Как видно, экспериментальная зависимость удовлетворительно аппроксимируется нормальной функцией распределения.

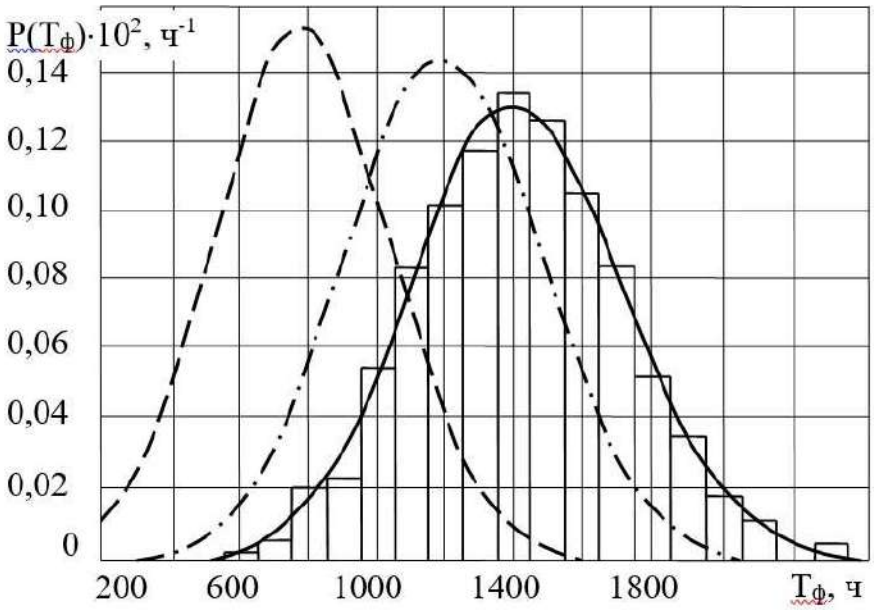


Рис. 3 Гистограмма и статистические функции распределения параметра $T_ф$:
- - - – элементы ЭФМ 145/55.363-5; -·-·-·– элементы ЭФМ 145/55.363-3;
——— – элементы ЭФМ 145/55.363-4

Как следует из проведенных зависимостей, срок службы элементов из фильтровальных материалов НКФМ-3 и ДРКБ соответственно в 1,54 и 1,82 раза выше, чем из БФМ. В судовых вспомогательных дизелях с вероятностью 90 % доверительный интервал срока службы элементов ЭФМ 145/55.363-5 равен 346 – 1206 ч, ЭФМ 145/55.363-3 – 718 – 1662 ч и ЭФМ 145/55.363-4 – 905 – 1915 ч.

В табл. 3 оценивается влияние средств очистки масла на состояние дизелей. Скорость изнашивания основных деталей двигателей при очистке масла ФТОМП в 1,43 – 2,46 раза ниже, чем при использовании ФГО. Данные табл. 3 соответствуют условиям применения элементов ЭФМ 145/55.363-5.

Снижение скоростей изнашивания при использовании ФТОМП вызвано не только низким содержанием нерастворимых продуктов в масле, но и высокой эффективностью защиты пар трения дизеля от попадания абразивных частиц. На рис. 4 показана вероятность защиты пар трения дизелей от размера частиц при использовании разных маслоочистителей для начальных условий работы фильтрующих элементов, когда они

Таблица 3

Показатель	**Тип дизеля**							
	6NVD36A.1		8ВАН22		625МТВН40		5А25	
	ФГО	ФТОМП	ФГО	ФТОМП	ФГО	ФТОМП	ФГО	ФТОМП
Скорость изнашивания колец (комплект одного цилиндра), мг/1000 ч								
поршневых	5740±720	2955±325	5231±817	3361±428	3832±426	2316±292	7742±950	4805±629
маслосъемных	1280±218	700±133	2120±364	1152±213	1121±219	644±122	3730±507	2048±304
Скорость изнашивания, мг/1000 ч								
Цилиндровых втулок	19,5±3,2	11,5±2,4	7,9±3,1	5,3±1,2	13,4±1,8	8,6±1,1	14,6±3,5	10,2±2,6
Вкладышей мотылевых подшипников	21,8±3,7	11,9±2,6	14,7±3,9	7,8±1,6	30,2±6,3	12,9±3,1	34,6±5,2	23,2±3,9
Шеек коленчатого вала	13,5±2,2	9,0±1,7	8,3±2,6	4,0±1,3	13,8±2,4	5,6±1,5	12,4±2,0	8,6±1,3
Скорость изнашивания деталей, %								
ЦПГ	100	58	100	62	100	60	100	61
КШМ	100	56	100	49	100	42	100	65
Нагарообразование на поршнях (общая оценка), балл	7,0±0,8	2,9±2,4	11,9±2,1	6,1±1,2	10,2±2,1	6,9±1,2	12,7±2,1	7,2±1,3
Подвижность поршневых колец (одного цилиндра), балл	2,1±0,3	0	1,3±0,2	0	2,0±0,4	0	2,5±0,5	0,4±0,1
Отложения в картере, балл	1 – 6	1 – 2	4 – 6	0	4 – 6	0	7 – 10	

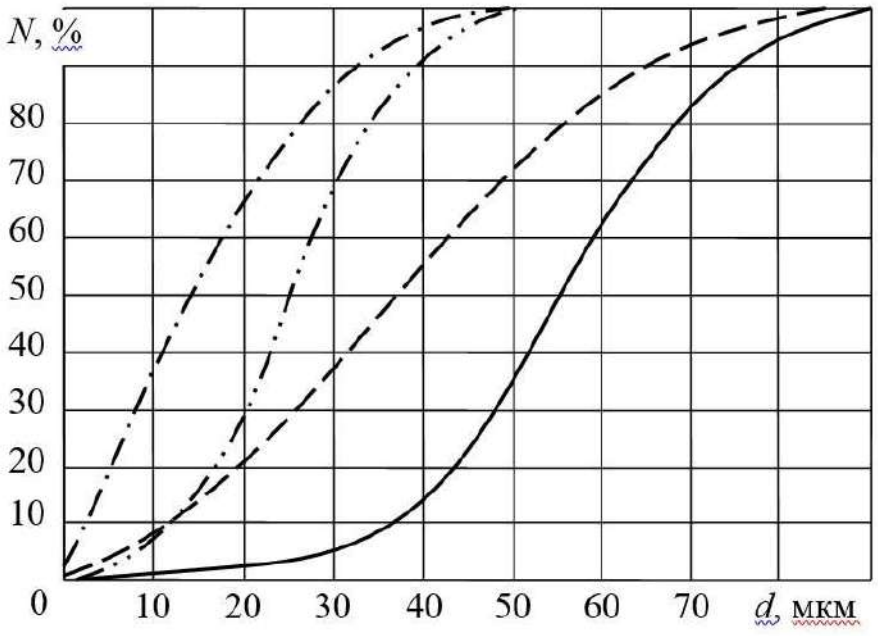


Рис. 4 Вероятность защиты пар трения судовых дизелей от попадания частиц загрязнения при очистке масла ФГО и ФТОМП:
- - - – элементы ЭФМ 145/55.363-5;
-·-·-·– элементы ЭФМ 145/55.363-3;
——— – элементы ЭФМ 145/55.363-4;
——— элементы тарельчатого типа из фильтровальной сетки 063 (ГОСТ 3584-73)

еще не загрязнены. Получены они моделированием систем очистки в лаборатории для режимов, при которых определяется их номинальная пропускная способность [1, 2]. Определение фракционных коэффициентов отсева осуществлялось по ГОСТ 14146 – 69 с использованием в качестве загрязнений кварцевой пыли с удельной поверхностью 0,45 – 1,05 $м^2/г$ (ГОСТ 8002 – 74). Высокая достоверность результатов обусловлена применением автоматического счета поступающих к фильтру и пропускаемых им частиц загрязнителя на микровидеомате фирмы «Оптон», рассмотрением коэффициентов отсева для широкого диапазона размерных групп с последующей линейной их аппроксимацией методом наименьших квадратов в функциональных шкалах [6].

Из рис. 4 наглядно видны преимущества ФТОМП особенно с элементами из бумаги БФМ. Элементы из нетканого материала НКФМ-3 занимают промежуточное положение. Наихудшие результаты по вероятности защиты пар трения дизеля получаются при использовании бумаги ДРКБ, имеющей самое малое значение тонкости отсева. Низкие фильтровальные свойства элементов компенсируется очень высокими гидравлическими характеристиками.

Применение материала ДРКБ способствует тому, что в дизелях особенно при пусках и работе на холодном масле, продолжительность полнопоточного режима очистки, когда перепускной клапан закрыт, выше. Дополнительно к изложенному можно отметить, что эта длинноволокнистая равнопрочная крупнопористая бумага по сравнению с остальными фильтровальными материалами имеет более высокие механические свойства и пористость. Это способствует, как уже отмечалось, высокому сроку службы изготовленных из нее элементов.

Износные испытания показали хорошую эффективность элементов, особенно в условиях низких диспергирующих свойств масла и при расположении органов, регулирующих давление в системе смазки, за фильтром – в конце масляной распределительной магистрали. Так, скорость изнашивания основных деталей дизелей 5А25 при использовании элементов была примерно такой же, как и при работе на элементах ЭФМ 145/55.363-5 и ЭФМ 145/55.363-3. Износные характеристики остальных двигателей при использовании элементов из ДРКБ в 1,1 – 1,4 раза хуже.

Для большинства вспомогательных судовых двигателей самый приемлемый материал НКФМ-3. При использовании элементов ЭФМ 145/55.363-3 скорость изнашивания основных деталей дизелей находится в тех же пределах, что и при применении элементов ЭФМ 145/55.363-5. Однако срок службы элементов из нетканого материала значительно выше.

Приближенность элементов ЭФМ 145/55.363-3 к элементам ЭФМ 145/55.363-5 по влиянию на состояние двигателя и к элементам ЭФМ 145/55.363-4 по сроку службы объясняется более регулярной поровой структурой материала НКФМ-3 и крутой зависимостью коэффициента отсева от диаметра частиц загрязнителя в диапазоне размерных групп 15 – 25 мкм.

Нагаролакообразование протекало менее интенсивно в дизелях, оборудованных опытной системой очистки. Общая оценка нагаров на поршнях у дизелей с ФГО к моменту отработки 5-6 тыс. ч с доверительной вероятностью 90 % составляла 14,9 балла. В то же время при использовании ФТОМП этот показатель равнялся 2,5 – 8,5 балла. Повышенное нагаролакообразование оказало влияние на подвижность поршневых, особенно компрессионных, колец. Этот показатель в дизелях со штатной системой очистки масла равнялся 1,3 – 2,5 балла. При использовании же фильтров тонкой очистки полного закоксовывания колец не наблюдалось.

Обобщение результатов эксплуатационных испытании ФТОМП на судах показало возможность увеличения межремонтного периода работы для всех дизелей с модернизированной системой очистки масла. При этом значительно возросла долговечность и химмотологическая надежность двигателей, уменьшение износа основных деталей увеличивает срок их службы. Поэтому при качественной очистке масла замена ответственных и дорогостоящих узлов производится гораздо реже, что позволяет сократить эксплуатационные затраты на дизель и расходы на его ремонт.

По результатам испытаний в Дальневосточном бассейне часть дизелей зарубежного производства переведена на новую систему очистки. Комплекс модернизационных мероприятий позволил снизить трудоемкость обслуживания и в целом повысить технико-экономические показатели ДВС.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные в судовых вспомогательных дизелях иностранного производства эксплуатационные испытания ФТОМП с применением элементов типа ЭФМ 145/55.363-6 показали их высокую эффективность.

При использовании ФТОМП скорость изнашивания основных деталей двигателей по сравнению с применением ФГО уменьшается в 1,4 – 2,5 раза, нагаролакообразование – на 32 – 59 %, Это дает возможность сократить работы по техническому обслуживанию двигателей и создает благоприятные условия для увеличения более чем на 20 % ресурса дизелей между переборками и до капитального ремонта.

2. Применение ФТОМП позволяет надежно защитить узлы трения от крупных абразивных частиц, а детали двигателя и картер от углеродистых отложений, уменьшить в среднем на 30 % расход моторного масла как за счет увеличения срока его службы, так и за счет менее интенсивного возрастания угара в процессе работы дизеля.

3. Интенсивность очистки масла ФТОМП от общих и зольных нерастворимых в бензине загрязнений в десятки раз выше, чем ФГО. Этот показатель для одного элемента находится в пределах 0,013 – 0,045. кг/ч. При потере маслом диспергирующих свойств и работе фильтра в частично-поточном режиме его значение повышается до 0,83 – 2,06 кг/ч. Интенсивность очистки масла у элементов ЭФМ 145/55.363-3 в 1,2 – 2 раза выше, чем у элементов ЭФМ 145/55.363-4.

4. Установка ФТОМП значительно упрощает обслуживание системы смазки дизеля. Отпадает надобность в моечно-очистных работах, которые обязательны при применении ФГО. Трудоемкость обслуживания ФТОМП ниже, чем штатных маслоочистителей, в 7 – 32 раза и составляет 0,4 – 2 чел.-ч на 1000 ч работы дизеля. Отработанные элементы типа ЭФМ 145/55.363 легко утилизируются в судовых условиях в специальных печах для сжигания мусора.

5. При использовании в судовых дизелях масла М-10-В2(с) средний срок службы элементов ЭФМ 145/55.363-5 равен 776, элементов ЭФМ 145/55.363-3 – 1190 и элементов ЭФМ 145/55.363-4 – 1410 ч. Значение этого показателя зависит от моюще-диспергирующих свойств применяемого масла. условий его старения, типа фильтрующего материала, скорости фильтрации, конструкции, режимов работы и технического состояния двигателя.

6. Оптимизация параметров фильтровального материала применительно к полнопоточной тонкой очистке показала, что для серийных судовых вспомогательных дизелей средней форсировки наиболее приемлем фильтровальный материал НКФМ-3 с тонкостью отсева 30 – 40 мкм. Элементы из фильтрующего материала ДРКБ предпочтительнее использовать в форсированных дизелях, имеющий удельную скорость загрязнения, превышающую 0,015 г/(кВт·ч), а также в случае использования масел с низкими диспергирующими свойствами и при интенсивном разложении присадок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кича Г.П., Надежкин А.В., Глушков С.В Комплексное системное решение проблемы ресурсосберегающего маслоиспользования в судовых дизелях//Морские интеллектуальные технологии. 2016. №, 3(33), Т. 1, с. 118 – 126.
2. Кича Г.П., Надежкин А.В. Оптимизация режимов центробежного сепарирования циркуляционного масла дизелей//Исследование и методы повышения эффективности технической эксплуатации судовых энергетических установок. Новосибирск, 1984. с. 36 – 40.
3. Кича Г.П., Перминов Б.Н., Надежкин А.В. Ресурсосберегающее маслоиспользование в судовых дизелях: монография. Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2011. 372 с.
4. Кича Г.П., Перминов Б.Н. Рациональное использование и экономия топливно-энергетических ресурсов на транспорте//Актуальные проблемы создания и эксплуатации комбинированных двигателей внутреннего сгорания: Тр. ХГТУ, Хабаровск: ХГТУ, 2002. с. 175–184.
5. Кича Г.П., Таращан Н.Н. Оптимизация рабочих параметров комбинированного фильтра при чистке моторного масла в судовых дизелях // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 3. с. 143–149.
6. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, М.Ф. Мищенко. М.: Наука, 1976. 392 с.
7. Kicha G.P., Lipin G.M., Polorotov S.P. Tribotechnical charec teristics of insoluble motor oil contanmination products and their influence on engine // Soviet journal of Friction and Wear (English translation of Trenie i iznos). 1986. Vol. 7. № 6. pp. 1068 – 1078.
8. Kicha G.P. Oil cleaning in internal combustion engine // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 1985. № 2. pp. 28 – 30.

REFERENCES

1. Kicha G.P., Nadezhkin A.V., Glushkov S.V *Kompleksnoe sistemnoe reshenie problemy resursosberegayushchego masloispolzovaniya v sudovykh dizelyakh* [Complex systemic solution of the problem of resource-saving oil application in marine diesel engines]// Marine intellectual technologies, 2016. No. 3(33), vol. 1. pp. 118 – 126. (in Russian)
2. Kicha G.P., Nadezhkin A.V. *Optimizaciya rezhimov centrobezhnogo separirovaniya cirkulyacionnogo masla dizeley* [Optimization of the modes of centrifugal separation of diesel engine circulating oil]//Research and methods of enhancing the effectiveness of shipboard power plants in service. Novosibirsk, 1984. pp. 36 – 40. (in Russian)
3. Kicha G.P., Perminov B.N., Nadezhkin A.V. *Resursosberegayushchee masloispolovanie v sudovyh dizelyah: monografiya* [Resource-saving oil usage in marin diesel engines. A monography] Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2011. – 372 p. (in Russian)
4. Kicha G.P., Perminov B.N. Racionalnoe ispolzovanie i ehkonomiya toplivno-ehnergeticheskikh resursov na transporte [Rational usage and saving of fuel and power resources on transport] //Urgent issues of manufacture and exploitation of combined internal combustion engines: Tr. HGTU, Habarovsk: HGTU, 2002. pp. 175–184. (in Russian)
5. Kicha G.P., Tarashchan N.N. *Optimizaciya rabochih parametrov kombinirovannogo filtra pri chistke motornogo masla v sudovyh dizelyakh* [Optimization of working parameters of combined filtre while cleaning engine oil in marine diesel engines// Scientific problems of transport in Siberia and the Far East, 2015. No. 3, pp. 143 – 149. (in Russian)
6. *Matematicheskaya teoriya optimalnykh processov* [Mathematical theory of optimal processes] //L.S. Pontryagin, V.G. Boltyanskij, R.V. Gamkrelidze, M.F. Mishchenko. M.: Nauka, 1976. 392 s. (in Russian)
7. Kicha G.P., Lipin G.M., Polorotov S.P. *Tribotechnical charecteristics of insoluble motor oil contanmination products and their influence on engine* // Soviet journal of Friction and Wear (English translation of Trenie i iznos). 1986. Vol. 7. No. 6, pp. 1068–1078.
8. Kicha G.P. Oil cleaning in internal combustion engine // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 1985. No. 2, pp. 28 – 30.

УДК 621.25

РЕГУЛИРОВАНИЕ ПОДАЧИ НАСОСОВ ОБЪЕМНОГО ТИПА

Н.М. Подволоцкий, д-р техн. наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота (ГУМРФ) им. адм. С.О. Макарова, Санкт-Петербург, e-mail: kaf_tckvu@gumrf.ru

В соответствии с требованиями Международной Конвенции по контролю и управлению балластом и осадками 2004 года (далее Конвенция), необходимо производить полное осушение балластных емкостей при каждой дебалластировке с целью уменьшения биологического загрязнения моря. В связи с необходимостью соответствовать этому требованию возрос интерес к эффективности зачистки емкостей судовыми насосами. Зачистка емкостей, как правило, выполняется насосами объемного типа, обладающими самовсасыванием. Согласно конвенции качество зачистки должно обеспечиваться также моделированием перетока балласта через днищевой набор емкостей. На основании изложенного выполнено математическое описание процесса регулирования подачи насосов объемного типа для обеспечения моделирования зачистки судовых емкостей. При описании процесса регулирования подачи насосов использовано понятие рабочей точки системы, позволяющей определять параметры насоса и системы в реальном масштабе времени.

Ключевые слова: *насосы объемного типа, регулирование подачи, изменение частоты вращения, перепуск жидкости, кольцевой перепускной трубопровод, перепуск в осушаемую емкость, энергетические затраты, эффективность*

CAPACITY REGULATION OF VOLUME PUMPS

N.M. Podvolotsky, DSc, professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, Saint Petersburg, e-mail: kaf_tckvu@gumrf.ru

In accordance with the requirements of the International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments of 2004 (hereinafter the Convention), it is necessary to perform a complete drainage of ballast tanks with each deballasting in order to reduce biological pollution of the sea. Due to the necessity to comply with this requirement, interest in the efficiency of stripping tanks using ship pumps has increased. Normally cleaning of tanks is carried out by pumps of volumetric type with self-priming. According to the convention, the quality of stripping must also be ensured by modelling ballast overflow through the bottom set of tanks. Based on the above, a mathematical description of the process of regulating the delivery of volumetric-type pumps to ensure the simulation of stripping of vessel tanks has been made. In describing the process of regulating the flow of pumps, the concept of the operating point of the system is used, which allows determining the parameters of the pump and system in real time.

Keywords: *pumps of volume types, capacity regulation, change of velocity, change of flow direction, change of flow by ring-pipe, change of flow in to drying tank, energy consumption, efficiency*

В соответствии с требованиями Международной Конвенции по контролю и управлению балластом и осадками 2004 года [1] после каждой разгрузки балласта необходимо выполнять полное осушение балластных емкостей для минимизации уровня инвазии. Это требование может быть реализовано на судах на основе моделирования процессов зачистки судовых емкостей при проектировании. Поэтому математическое описание процессов зачистки судовых емкостей насосами объемного типа является актуальной задачей.

Из базовых способов регулирования подачи лопастных насосов перепуском, изменением частоты вращения, статической составляющей потерь напора и дросселированием; для объемных насосов не применяются два последних из перечисленных.

Из-за жесткой характеристики *H-Q* насосов объемного типа даже незначительное повышение давления в системе, вызванное дросселированием, может послужить причиной внезапного повышения давления в системе или гидравлического удара и привести к разрушению контрольно-измерительных приборов, поломке деталей насоса или разрушению клапанов и трубопровода. Вследствие отмеченных недостатков метод регулирования подачи дросселированием для насосов объемного типа не применяется.

Регулирование подачи изменением статической составляющей потерь напора малоэффективно из-за жесткой напорной характеристики насосов объемного типа. Рабочая точка системы перемещается по напорной характеристике насоса мало изменяя подачу при уменьшении либо увеличении статической составляющей потерь напора. Поэтому данный метод регулирования подачи объемных насосов также не нашел практического применения.

Таким образом, для регулирования подачи насосов объемного типа на практике используются регулирование изменением частоты вращения и перепуском.

а) Регулирование подачи насосов объемного типа изменением частоты вращения.

Процесс регулирования подачи насоса объемного типа изменением частоты вращения (об/мин, а для насосов поршневого и диафрагменного типа изменением числа двойных ходов в минуту) в координатах напор – подача представлен на рис. 1. Исходной рабочей точкой является точка 1, соответствующая номинальной частоте вращения $n_{ном}$. Точки 1' и 1" получены при сниженных частотах вращения. Из рис. 1 следует, что при уменьшении частоты вращения насоса и неизменной характеристике системы, создаваемые насосом подача и напор снижаются по мере уменьшения частоты вращения.

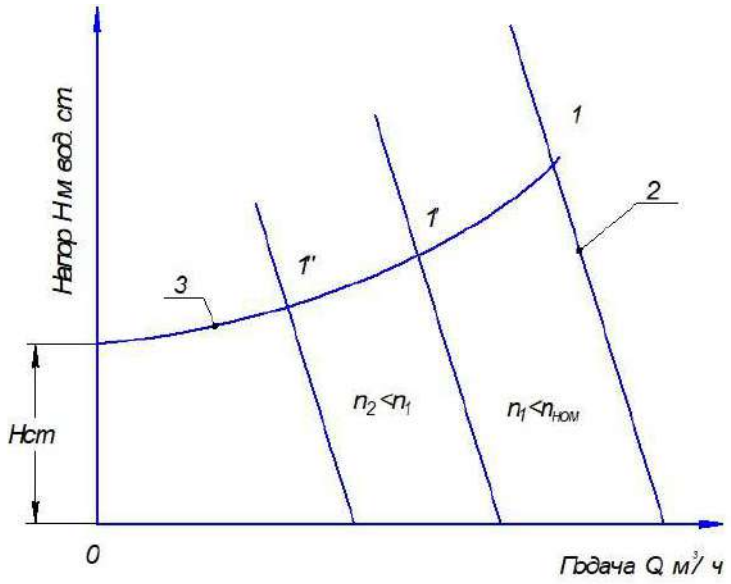


Рис. 1 Процесс регулирования подачи насоса объемного типа:
1, *1'*, *1"* – рабочие точки системы при различных частотах вращения;
$n_{ном}$, n_1, n_2, $H_{ст}$ – статическая составляющая потерь напора;
2 – характеристика насоса «напор – подача»;
3 – характеристика системы

Рассматриваемый метод регулирования подачи обеспечивает необходимые диапазоны и плавность регулирования, но требует применения сложного привода, изменяющего частоту вращения насоса.

К известным величинам при аналитическом решении задачи относятся подача и напор насоса на различных режимах работы, которые можно определить из совместного решения уравнений, описывающих характеристики насоса и системы.

Характеристика напор – подача насоса объемного типа в аналитическом виде представляет собой уравнение прямой на рис. 2:

$$H_н = (Q_0 - Q)ki, \quad (1)$$

где Q_0 – максимальное значение подачи насоса при нулевом напоре;
Q – значение подачи на заданном режиме работы насоса;
$k = \frac{H_н}{Q_0 - Q_н}$ – коэффициент наклона характеристики напор-подача насоса;
$H_н$, $Q_н$ – значение напора и подачи насоса на номинальном режиме работы;
$i = \frac{n}{n_{ном}}$ – отношение частоты вращения насоса на заданном режиме работы n к номинальному значению частоты вращения $n_{ном}$.

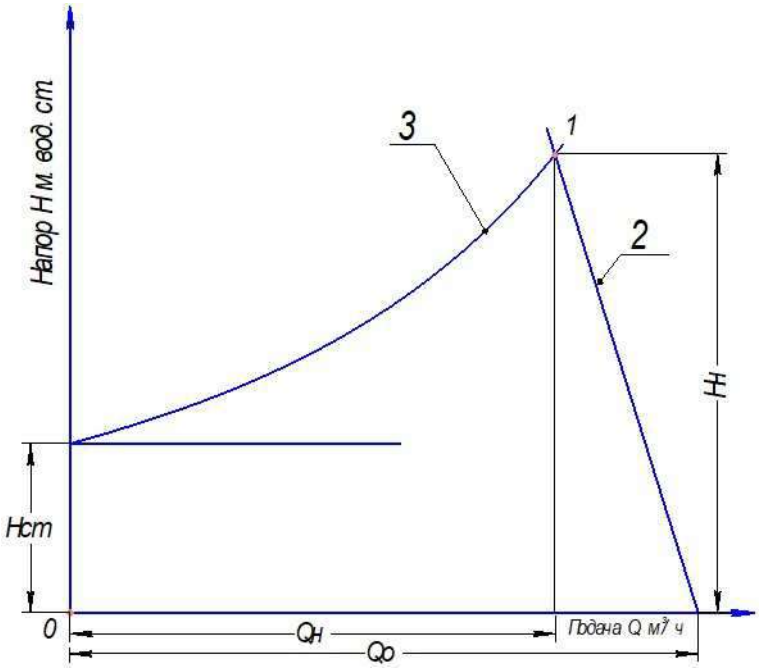


Рис. 2 Параметры для аналитического описания характеристики напор-подача насоса объемного типа:
1 – рабочая точка система с параметрами $Q_н$ и $H_н$; *2* – характеристика насоса (напор – подача);
3 – характеристика трубопровода

Для поршневых и диафрагменных насосов:

$$i = \frac{n_{дв.х}}{n_{дв.х.ном}},$$

где $n_{дв.х}$, $n_{дв.х.ном}$ – значения числа двойных ходов в минуту на заданном режиме работы и номинальном соответственно.

Характеристика трубопроводной системы в аналитическом виде:

$$H_c = H_{ст} + H_{дин},$$

где $H_{ст}$, $H_{дин}$ – статическая и динамическая составляющие характеристики системы, см. рис. 3;

$$H_{ст} = z_2 - z_1 + \frac{P_б - P_i}{\gamma},$$

где z_1, z_2 – текущее значение уровней жидкости в осушаемой и заполняемой емкостях соответственно, отсчитываемые от одной плоскости сравнения;

p_i, $p_б$ – давление над свободной поверхностью жидкости в осушаемой и заполняемой емкостях соответственно;

γ – удельный вес перекачиваемой жидкости.

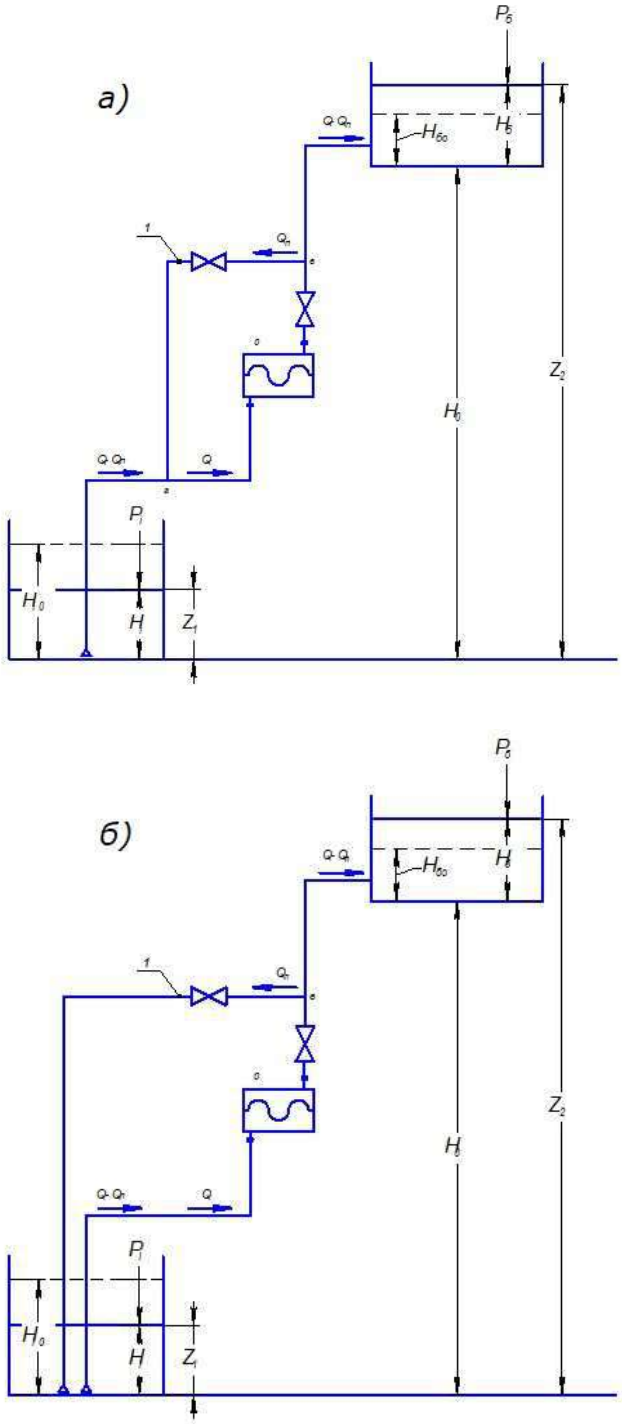


Рис. 3 Принципиальная схема регулирования подачи винтового насоса перепуском:
а – из нагнетательного трубопровода во всасывающий; *б* – из нагнетательного трубопровода в осушительную емкость;
1 – перепускной трубопровод с регулирующим клапаном;
Q – полная подача насоса; $Q_п$ – величина перепуска

Динамическая составляющая потерь напора представляет гидравлическое сопротивление, трубопроводной системы, в формуле которого скорость движения жидкости в трубопроводе выражена через расход. В результате формула гидравлического сопротивления преобразуется к виду [2]

$$H_{дин} = RQ^2,$$

где R – обобщенное гидравлическое сопротивление трубопроводной системы.

В окончательном виде характеристика системы имеет вид

$$H_c = H_{ст} + RQ^2. \quad (2)$$

Из условия равенства напора развиваемого насосом и потребляемого системой записывается равенство для правых частей уравнений (1) и (2). В результате получим уравнение, в котором неизвестным параметром является Q подача насоса на текущем режиме работы:

$$RQ^2 + kiQ + H_{ст} - kiQ_0 = 0. \quad (3)$$

Решением этого уравнения является

$$Q_{1,2} = \frac{-ki \pm \sqrt{(ki^2) - 4R(H_{ст} - kiQ_0)}}{2R}.$$

Принимаем значение подачи, соответствующим физическому смыслу задачи и равным Q_1.

Задавая различные значения величины i, получим значения подач на заданных режимах работы насоса, соответствующие рабочим точкам насоса 1' и 1", см. рис. 1.

Производя подстановку величины подачи Q_1 в уравнение системы (2) получим значение напора насоса на заданных режимах работы.

Недостающие параметры z_1 и z_2 (уровни жидкости в осушаемой и заполняемой емкостях) необходимые для вычисления статической составляющей потерь напора, находим из уравнений материального баланса системы.

Уравнение материального баланса для осушаемой емкости

$$(H_{i0} - H_i)F_i \overline{Qt}, \quad (4)$$

где H_{i0}, H_i – начальный и текущий уровни в осушаемой емкости;
Fi – площадь свободной поверхности жидкости в осушаемой емкости;
$\overline{Q}$ – средняя подача насоса на заданном отрезке времени;
t – текущее время.

Из (4) получим текущее значение уровня жидкости в осушаемой емкости

$$H_i = H_{i0} - \frac{\overline{Q}}{F_i} t. \quad (5)$$

Уравнение материального баланса для заполняемой емкости

$$(H_\delta - H_{\delta 0})F_\delta = \overline{Qt}, \quad (6)$$

где $H_{\delta 0}$, H_δ – начальный и текущий уровни в заполняемой емкости;
F_δ – площадь свободной поверхности жидкости в заполняемой емкости.

Из (6) находим текущее значение уровня жидкости в заполняемой емкости

$$H_\delta = H_{\delta 0} - \frac{\overline{Q}}{F_\delta} t. \quad (7)$$

Для определения статической составляющей потерь напора введем новый параметр – завышение заполняемой емкости по отношению к осушаемой H_0, отмеряемый от общей базы от счета, см. рис. 3.

Текущее значение статической составляющей потерь напора

$$H_{ст} = z_2 - z_1 + \frac{P_\delta - P_i}{\gamma} = H_\delta + H_0 - H_i + \frac{P_\delta - P_i}{\gamma}\gamma. \quad (8)$$

К положительным сторонам метода регулирования подачи насосов объемного типа изменением частоты вращения относятся:

- плавность изменения параметров насоса;
- относительно высокая эффективность по сравнению с перепуском, т.к. отсутствуют потери, обусловленные перепуском.

К недостаткам метода следует отнести:

- необходимость наличия сложного привода для изменения частоты вращения;
- понижение напора насоса при уменьшении подачи.

б) регулирование подачи насосов объемного типа перепуском

Процесс регулирования подачи насосов объемного типа перепуском выполняется по двум принципиальным схемам, см. рис. 3.

В схеме *а*) перепуск жидкости с нагнетания на всасывание осуществляется по кольцевому трубопроводу с перепускным клапаном. Эта схема имеет достоинство, заключающееся в том, что в период зачистки емкости прохват воздуха в приемный трубопровод не приводит к срыву работы насоса за счет циркуляции жидкости по замкнутому контуру. Схема *б*) реализует перепуск в осушаемую емкость по индивидуальному трубопроводу с перепускным клапаном.

Недостатком схемы является возврат части перепускаемой жидкости в зачищаемую емкость. Схема б) применяется лишь для регулирования подачи насоса.

Перепускной клапан в обоих схемах регулируемого сечения для обеспечения требуемых режимов подачи.

Распределение расходов перекачиваемой среды по участкам трубопровода приведено на схемах, см. рис. 3.

Процесс регулирования подачи насосов объемного типа перепуском в координатах напор-подача представлен на рис. 4. В общем виде графическое изображение процесса регулирования справедливо для схем *а*) и *б*), см. рис. 4.

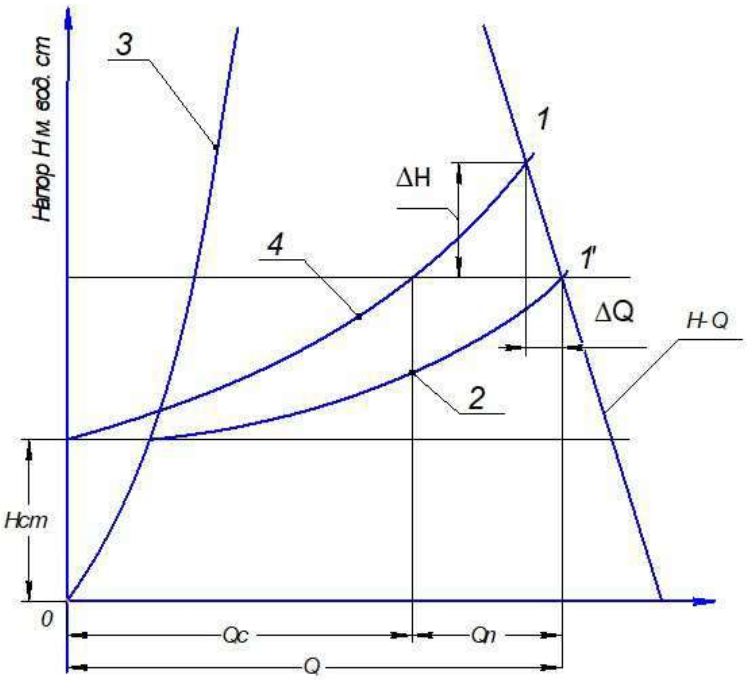


Рис. 4 Процесс регулирования подачи объемного насоса перепуском:
1, *1'* - рабочие точки системы до и после включения перепускного трубопровода;
характеристики системы:
2 – со включенным перепускным трубопроводом; *3* – перепускного трубопровода;
4 – исходная

Исходное состояние соответствует рабочей точке 1 (точка пересечения напорно-расходной характеристики насоса и исходной системы), см. рис. 4. При открытии перепускного клапана характеристика исходной системы перемещается в положение 2, что соответствует рабочей точке 1'. Новую характеристику системы 2 получают путем сложения характеристик исходной системы 2 и перепускного трубопровода 3. Переход характеристики системы в новое положение сопровождается увеличением подачи насоса на величину ΔQ и снижением напора на величину ΔH.

Для получения производительности перепуска $Q_п$ и подачи в систему $Q_с$ проводим вспомогательную линию через рабочую точку 1' параллельно оси подач. Точка пересечения вспомогательной линии с характеристикой системы делит подачу насоса на составляющие $Q_с$ и $Q_п$.

Характерной особенностью процесса регулирования подачи объемных насосов перепуском является незначительное увеличение подачи насоса, равное $\Delta Q'$, при котором маловероятна перегрузка привода. Этим объемные насосы отличаются от лопастных, у которых за счет «мягкой» характеристики H-Q привода приращение $\Delta Q'$ значительно, что может вызвать перегрузку привода по мощности.

Пределы регулирования подачи объемного насоса перепуском зависят от гидравлического сопротивления перепускного трубопровода, чем оно меньше, тем больше пределы регулирования. При изменении положения перепускного клапана (при его прикрытии) можем получить частичные суммарные характеристики системы, рабочие точки которых будут лежать между точками 1 и 1', см. рис. 4. Причем, по мере увеличения сопротивления перепускного клапана процесс будет перемещаться от рабочей точки 1' к 1.

Неизвестными в задаче о регулировании подачи объемного насоса перепуском, см. рис. 4, является: полная подача насоса Q и соответствующий ей напор в режиме с включенным перепускным трубопроводом, а также количество жидкости, идущее на перепуск $Q_п$.

Уравнение насоса (1) остается без изменений.

Характеристика системы для схем согласно рис. 3 равна:

- схема *а*):

$$H_c = H_{ст} + (R_{ca} + R_{вd})(Q - Q_п)^2 + RQ^2; \quad (9)$$

- схема *б*):

$$H'_c = H'_{ст} + (R_{ao} + R_{ов})Q^2 + R_{вd}(Q - Q_п)^2, \quad (10)$$

где R_{cd}, $R_{вd}$, $R_{aов}$, R_{ao}, $R_{ов}$ – обобщенные гидравлические сопротивления участков всасывающего и нагнетательного трубопроводов по рис. 3.

Для схемы *а*), рис. 3, напоры в точках «в» и «а» одинаковы. Точка «в» принадлежит одновременно основному и перепускному трубопроводу. Точка «а» для схемы *б*) находится в осушаемой емкости на уровне входа жидкости в приемной трубопровод. В эту же точку выведен срез перепускного трубопровода, их напоры соответствуют значению переменного уровня в емкости и равны. По аналогии, из равенства напоров в точках «а» и «б» схемы *б*), см. рис. 3, рассматриваемых трубопроводов, следует равенство гидравлических сопротивлений, что позволяет для схемы *а*) и для схемы *б*) записать дополнительное условие для определения величины перепуска:

$$R_{аов}Q^2 = R_п Q_п^2, \quad (11)$$

где $R_п$ – обобщенное гидравлическое сопротивление перепускного трубопровода.

Из соотношения (11) находим величину перепуска:

$$Q_п = Q\sqrt{R_{aов}/R_п} \quad (12)$$

Производим подстановку величины перепуска в исходное выражение системы получим уравнение системы с включенным перепускным трубопроводом

$$H_с = H_{ст} + R_п Q^2; \quad (13)$$

для схемы а):

$$R_{п} = [(R_{са} + R_{вd})(1 - \sqrt{R_{аов}/R_{п}})^2 + R_{аов}]; \quad (14)$$

Для схемы б):

$$R'_{п} = [(R_{аов} + R_{вd})(1 - \sqrt{R_{аов}/R_{п}})^2. \quad (15)$$

Решая совместно уравнения насоса (1) и систем (13) получим подачу насоса при работающем перепускном трубопроводе

$$Q_{1,2} = \frac{-ki + \sqrt{(ki)^2 - 4R_{п}(H_{ст} - kiQ_0)}}{2R_{п}}. \quad (16)$$

Принимаем значение корня величине, которая соответствует его физическому смыслу.

Подстановка величины подачи насоса в (13) дает значение напора, потребляемого системой при перепуске.

Производим подстановку величины подачи в уравнении (12) и получим величину перепуска.

Количество жидкости, поступающей по назначению, согласно рис. 4, равно $Q_c = Q - Q_{п}$.

Значения уровней жидкости в осушаемой и заполняемой емкостях, необходимые для определения текущего значения статической составляющей потерь напора, находим из уравнений материального баланса (4) – (7).

К положительным сторонам метода регулирования подачи объемных насосов перепуском относятся:

- упрощенная конструкция привода насоса с постоянной частотой вращения;
- простота практической реализации принципа регулирования;
- плавность регулирования подачи за счет наличия перепускного клапана переменного сечения;
- исключение возможности перегрузки привода, т.к. подача насоса незначительно возрастет при падении напора.

К недостаткам метода следует отнести снижение эффективности работы насоса, т.к. только часть перекачиваемой жидкости поступает по назначению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены математические зависимости, описывающие процессы регулирования подачи насосов объемного типа, включающие привязку к системе и параметрам осушаемых емкостей.

Предложенные зависимости рекомендуются для целей моделирования процесса регулирования подачи объемного насоса с целью более полного осушения емкостей, что соответствует современным конвенционным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная Конвенция по контролю и управлению балластом и осадками 2004 года, Издание ИМО, 2004.
2. Подволоцкий Н.М. Определение рабочей точки для судовых трубопроводных систем аналитическим способом. Транспорт Российской Федерации. № 1(44) 2013, с. 68 – 70.
3. Подволоцкий Н.М. Аналитическое описание универсальных характеристик судовых насосов. Эксплуатация морского транспорта. 2013. № 1 (71), с. 51 – 57.

REFERENCES

1. *Mezhdunarodnaya Konventsiya po kontrolyu i upravleniyu ballastom i osadkami 2004 goda,* [The International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments]. IMO, 2004.
2. Podvolotskiy N.M. *Opredelenie rabochey tochki dlya sudovykh truboprovodnykh sistem analiticheskim sposobom.* [Analytical determination of a working point for ship pipelines] Transport of Russian Federation. No. 1(44) 2013, pp. 68 – 70.
3. Podvolotskiy N.M. *Analiticheskoe opisanie universalnykh kharakteristik sudovykh nasosov.* [Analytical description of universal characteristics of ship pumps] Management of marine transport. 2013. № 1 (71), pp.51 – 57.

УДК 681.518.5

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

М.А. Максимова, канд. тех. наук, доцент, Санкт Петербургский государственный морской технический университет, Санкт Петербург, e-mail: MaximovaMA@yandex.ru
С.А. Петраков, ООО Фарадей Инжиниринг, Санкт Петербург, e-mail: psa@eng-faradey.ru

Котельная установка – это комплекс связанных тепловых устройств и механизмов, оснащенных средствами автоматического контроля, регулирования и сигнализации. Фактором, влияющим в значительной степени на надежность работы котельной установки, является техническое обслуживание. Качество проведения технического обслуживания связано в первую очередь с диагностикой предотказного состояния, а также с возможностью существующих систем предсказывать ход развития такой ситуации. В этой связи являются целесообразными разработка системы технического обслуживания по фактическому состоянию и его алгоритм. В статье рассматривается алгоритм обработки временных рядов контролируемых параметров котельной установки, позволяющий прогнозировать время выполнения технического обслуживания котельного оборудования по фактическому состоянию. Также в статье приведен пример обработки временного ряда контролируемого параметра котельной установки с использованием программы «ТОиР», разработанной на основе данного алгоритма.

Ключевые слова: *котельные установки, техническое состояние, надежность, система технического диагностирования, мониторинг, алгоритм, прогнозирование работоспособности*

ALTERNATIVE METHOD OF BOILER PLANT MAINTENANCE

M.A. Maksimova, PhD, associate professor, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: MaximovaMA@yandex.ru
S.A. Petrakov, Faraday Engineering LLC, St. Petersburg, e-mail: psa@eng-faradey.ru

A boiler plant is a complex of related thermal devices and mechanisms. These mechanisms are composed of automatic control, regulation and alarm systems. Maintenance affects the reliability of the boiler plant. The quality of maintenance depends on the diagnostics of the boiler plant condition. The quality of maintenance depends on the ability to predict the course of events. For this reason, it is important to develop a maintenance system based on the actual technical state is important. The article discusses the algorithm of the time-series data processing of the controlled parameters of the boiler plant. This algorithm enables organizing the maintenance run-time prediction procedure of the boiler equipment on the actual technical state. The article discusses an example of the time-series data processing of the controlled parameters of the boiler plant installation using the "TO&R" program.

Keywords: *boiler plant, technical state, reliability, technical diagnostics system, monitoring, algorithm, functionality prediction*

Котельная установка как объект технического обслуживания, представляет собой комплекс связанных тепловых устройств и механизмов, оснащенных средствами автоматического контроля регулирования и сигнализации, на основе котла или котлоагрегата с целью получения горячей воды или пара заданных параметров. Котельная установка (КУ) используется как для централизованного, так и децентрализованного теплоснабжения объектов промышленного и гражданского назначения.

Фактором, влияющим в значительной степени на надежность работы КУ, является техническое обслуживание. В подавляющем большинстве случаев техническое обслуживание КУ ведется по календарному сроку, без учета фактического технического состояния отдельных узлов, что приводит к неоправданным технико-экономическим затратам. Для примера, в настоящее время, при эксплуатации котельных установок средней мощности (например, Viessmann, Buberus производства Германии и российских фирм, таких как Турботерм, Зиосаб) выполнение любого технического обслуживания проводится специалистами сервисного центра, например, сервис-службами производителей Oilon, Weishauot, Riello. Одним из важнейших элементов котла, влияющего на надежность его работы, является горелка. При этом следует обратить внимание на то, что в горелке и приборах автоматики нельзя менять установленные производителем регулировки, т.к. подобные вмешательства могут привести к серьезным негативным последствиям в части технико-эксплуатационных показателей КУ в целом.

В настоящее время при возникновении аварийной ситуации происходит автоматическое выключение котла с выдачей сигнализации на пульт оператора о возможных серьезных неисправностях. Если же постоянно отслеживать определяющие техническое состояние параметры в процессе эксплуатации, то повышается эффективность проведения превентивных ремонтов, и как следствие, уменьшается вероятность отказов. В этой связи разработка системы технического обслуживания по фактическому состоянию и соответствующего алгоритма является целесообразными.

Как и любое сложное техническое оборудование, котел нуждается в техническом обслуживании, призванном выявить: соответствие режимов работы заводским нормативам; наличие неполадок и нарушения в работе котла; устранить неполадки, произвести настройку и регулировку котла. Однако данное обслуживание должно быть объективно обоснованным с учетом текущего технического состояния.

К комплектующим средствам аппаратной части системы контроля и технического обслуживания относятся: контроллеры, устройства сопряжения контроллеров с датчиками и исполнительными механизмами, модули цифрового интерфейса, операторские станции и серверы системы, сети и автоматизированная система дистанционного контроля и управления для передачи в диспетчерскую службу технологических параметров.

Специалисты удаленного сервисного центра должны быть своевременно оповещены о предстоящей работе. Для этой цели можно использовать глобальную информационную сеть Интернет, по которой на компьютер автоматизированного рабочего места (АРМ) сервисного центра с компьютера АРМ котельной будут в автоматическом режиме передаваться сообщения о прогнозируемой дате выполнения технического обслуживания и последние коды контроллера параметров технологического процесса. Данные коды позволят выявить возможные причины нарушения технологического процесса. Например, для контроллеров Siemens одним из вариантов кодирования является передача информации об аварии побитово: 16 бит – 16 сигналов (код 1000 – код аварии «минимальное давление котлового контура»; 1110 – код аварии «максимальная температура котлового контура» и др.).

В качестве первичных контролируемых параметров, позволяющих осуществить прогнозирование времени выполнения технического обслуживания, можно использовать данные датчика давления топлива (Р) на входе в котел и данные датчика температуры (Т) отходящих газов. Эти параметры позволяют оценить текущее техническое состояние котельной, т.к. отклонение от средней нормальной температуры отходящих газов и среднего давления топлива позволяют оперативно выявлять отклонения от норм в работе котла и горелки.

Изменение значений параметров давления и температуры в функции времени в общем виде можно проиллюстрировать рис. 1.

Реальные функции $P(t)$ и $T(t)$ представляют собой некоторые флуктуационные процессы, имеющие начальные значения $P_{нач}$ и $T_{нач}$, а также допустимые значения $P_{доп}$ и $T_{доп}$, которые можно на интервале времени $[t_0, t_k]$ описать математическими моделями $\tilde{P}(t)$ и $T(t)$, являющимися аппроксимирующими функциями, что видно из рис. 1. Для определения конкретного вида аппроксимирующих функций предлагается использовать методику вычисления сглаженных характеристик [1].

Суть предлагаемой методики заключается в следующем. Неравномерный временной ряд некоторого параметра $x(t)$, где $x \in (T;p)$, выравнивается с помощью оператора сглаживания, например, интегрирования I, на временных подинтервалах $[t_0, t_1[$; $[t_0, t_2[$,..., $[t_0, t_k[$. Поскольку моментам времени t_0, t_1 и т.д., соответствуют

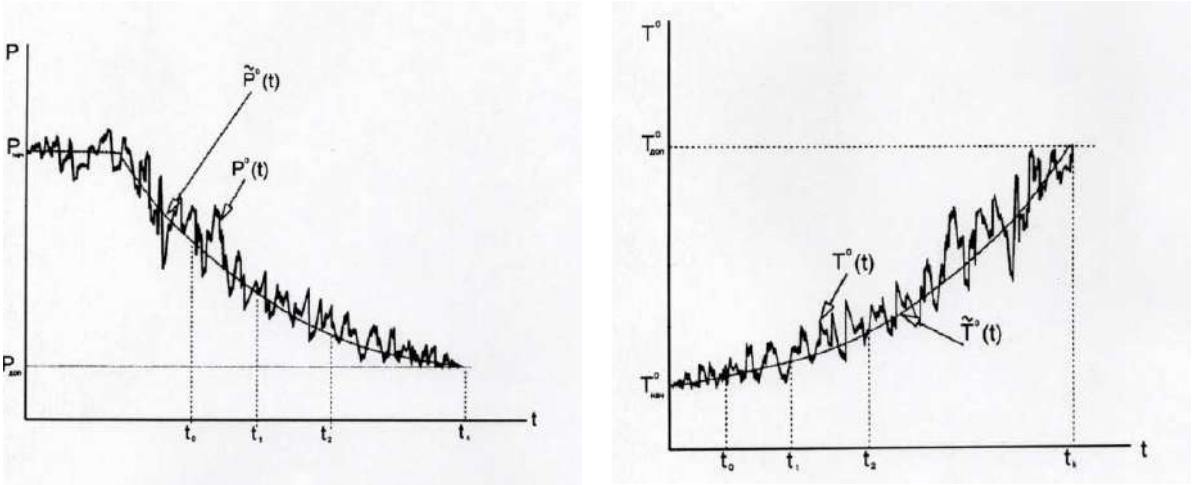


Рис. 1 Изменение значений параметров давления и температуры в функции времени

конкретные значения параметра $x(t_0)$, $x(t_1)$ и т.д., где $x \in$р^T то будут получены соответствующие значения интегралов, отнесенные к моментам времени $x_I(t_1)$, $x_I(t_2)$, ...

Далее пары значений $[x(t_1), x_I(t_1)]$; $[x(t_2), x_I(t_2)]$; ... , наносятся на фазовую плоскость (x, x_I), как показано на рис. 2.

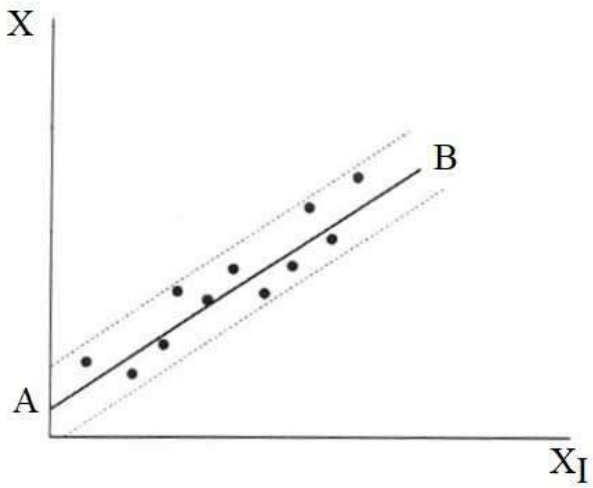


Рис. 2 Пример фазовой плоскости (x, x_I)

Расположение точек в фазовой плоскости (x, x_I) может быть достаточно точно представлено уравнением прямой АВ:

$$x(t) = a_0 + a_1 x_I(t) = a_0 + a_1 x(t)dt, \quad (1)$$

где a_0 и a_1 — коэффициенты, определяющие положение прямой АВ в фазовой плоскости.

Уравнение (1) является интегральным. Дифференцируя его по t получим дифференциальное уравнение первого порядка

$$dx(t) = a_1 d\int x(t)dt = a_1 x(t)dt$$

или

$$\frac{dx(t)}{dt} = a_1 x(t). \quad (2)$$

Общее решение дифференциального уравнения (2) есть выражение

$$x(t) = Ce^{a_1 t}, \quad (3)$$

где C – произвольная постоянная, и в данном случае правомочно считать $C = a_0$.

Как видно, выражение (3) в зависимости от значений коэффициентов a_0 и a_1 отражает тенденцию изменения во времени тренда $x(t_i)$, i = 1,2,3 .... , а следовательно может быть использовано в качестве аппроксимирующей функции $\tilde{x}(t)$, у которой параметр a_0 характеризует начальные условия наблюдаемого процесса, а параметр a_1 характеризует динамику изменения процесса (параметр тренда).

По методике, рассмотренной в [1], численные значения коэффициентов a_0 и a_1 определяются для произвольного начала наблюдений во времени по методу наименьших квадратов с использованием значений x и x_I фазовой плоскости:

$$a_0 = \frac{\Sigma_i x_{I_i}^2 \cdot \Sigma_i x_i - \Sigma_i x_{I_i} \cdot \Sigma_i (x_{I_i} \cdot x_i)}{n \cdot \Sigma_i x_{I_i}^2 - (\Sigma_i x_{I_i})^2};$$

$$a_1 = \frac{n\Sigma_i (x_{I_i} \cdot x_i) - \Sigma_i x_{I_i} \cdot S_i x_i}{n \cdot \Sigma_i x_{I_i}^2 - (\Sigma_i x_{I_i})^2},$$

где i = 1,2,3, ... ,n – количество данных измерений x фазовой и соответственно значений x_I.

Исходя из вышеизложенного запишем выражение аппроксимирующей функции (3) в виде

$$\tilde{x}(t) = a_0 e^{a_1 t}.$$

Анализ выражения (4) показывает, что оно позволяет осуществить прогноз времени выхода контролируемого параметра на допустимое значение. Для этого достаточно вместо $\tilde{x}(t)$ подставить значения $P_{доп}$ или $T_{доп}$ и найти соответствующее прогнозное время t.

Возможно применение и других операторов сглаживания, например, L-оператора. В этом случае аппроксимирующая функция имеет вид:

$$\tilde{x}(t) = a_0/(1 - a_1 t)^2. \quad (5)$$

Согласно работе [2] для нахождения аппроксимирующей функции $\tilde{x}(t)$ временного ряда $x(t_i)$, $i = 1,\overline{n}$, достаточно иметь в распоряжении n = 10...15 значений.

Применительно к КУ предлагается следующий алгоритм процедуры прогнозирования времени выполнения ТО. Допустимое значение параметра определяется как $Y_{доп} = \varepsilon \cdot Y_{пред}$, где $Y_{пред}$ – это значение параметра, установленное заводом изготовителем, ε – класс надежности функционально самостоятельного элемента (ФСЭ) [4]. Дополнительные два порога – это $\varepsilon Y_{доп}$. Например, для 4 класса надежности ФСЭ ε > 10 %. В связи с этим устанавливаются два дополнительных пороговых уровня: $0{,}85 \cdot P_{доп}$ и $0{,}85 \cdot T_{доп}$ [4]. По достижении равенства контролируемых текущих значений $P(t)$ и $T(t)$ пороговых уровней, на АРМ котельной автоматически запускается подпрограмма ввода последних 12 ретроспективных средних значений давления $P_{ср}$ и температуры $T_{ср}$.

Средние значения давления газа на входе в котел $P_{ср}$ и температуры дымовых газов $T_{ср}$ (за сутки определяется по три значения каждого параметра) соответствуют интервалу времени $\Delta t = 8$ ч, что в целом соответствует ретроспективному анализу этих параметров за 4 суток от момента наступления события достижения $P(t) = 0{,}85 \cdot P_{доп}$ и $T(t) = 0{,}85 \cdot T_{доп}$.

Использование временных рядов $P_{ср}(t_i)$ и $T_{ср}(t_i)$, $i = (\overline{1,12})$, как исходных данных позволит найти соответствующие аппроксимирующие функции $\tilde{P}(t)$ и $\tilde{T}(t)$ и выполнить прогноз наступления события, при котором $\tilde{P}(t) = P_{доп}$ или $\tilde{T}(t) = T_{доп}$.

Рассмотрим пример.

В табл. 1 представлен смоделированный временной ряд $T_{ср}(n)$, где n – порядковый номер осреднения. Нижеприведенные значения получены с использованием программы генерации псевдослучайных чисел в интервале (200 – 230) ºС, т.к. $0{,}85 \cdot T_{доп} \approx 230$ °С.

Таблица 1

Временной ряд $T_{ср}(n)$

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t, ч	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88
$T_{ср}$	205	216	204	207	221	219	215	224	220	226	228	225

Обработка данных ряда $T_{ср}(n)$ с использованием программы «ТОиР», разработанной на кафедре судовой автоматики и измерений М.А. Максимовой, показала, что в качестве аппроксимирующей функции следует использовать выражение $\tilde{T} = 207/(1 - 0{,}004 \cdot n)^2$ (см. рис. 3).

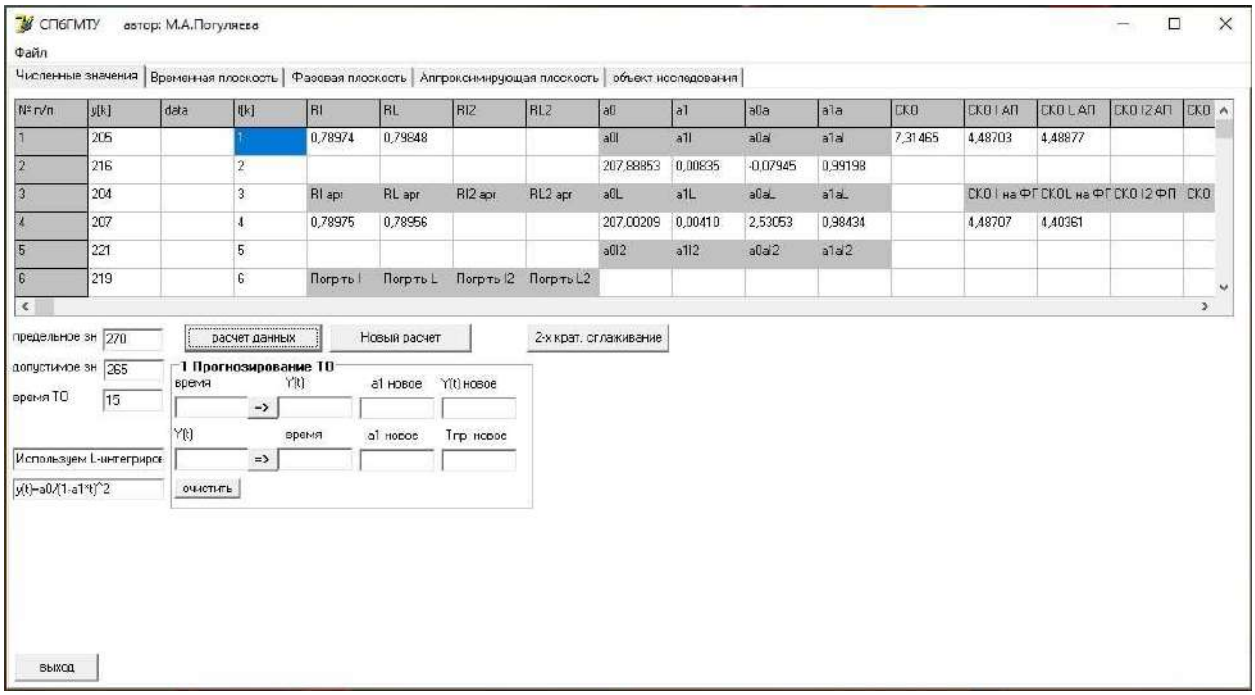


Рис. 3 Фрагмент программы ТОиР

Учитывая, что допустимое значение температуры дымовых газов составляет $T_{доп}$ = 270 °С, то приравняв $\tilde{T}(n) = T_{доп}$ получаем, что такая ситуация может наступить на n = 30 (см. рис. 4), т.е. после n = 12 спустя 18 измерений. Иначе – в перерасчете на дни – через 6 дней.

При определении аппроксимирующей функции $\tilde{T}(n)$, программа «ТОиР» выдала сообщение, что коэффициент корреляции (лат. correlation – соотношение) между исходным рядом $T_{ср}(n)$ и аппроксимирующей функцией $\tilde{T}(n)$ равен ρ = 0,7985, что указывает на существенную линейную связь между $T(n)$ и $\tilde{T}(n)$.

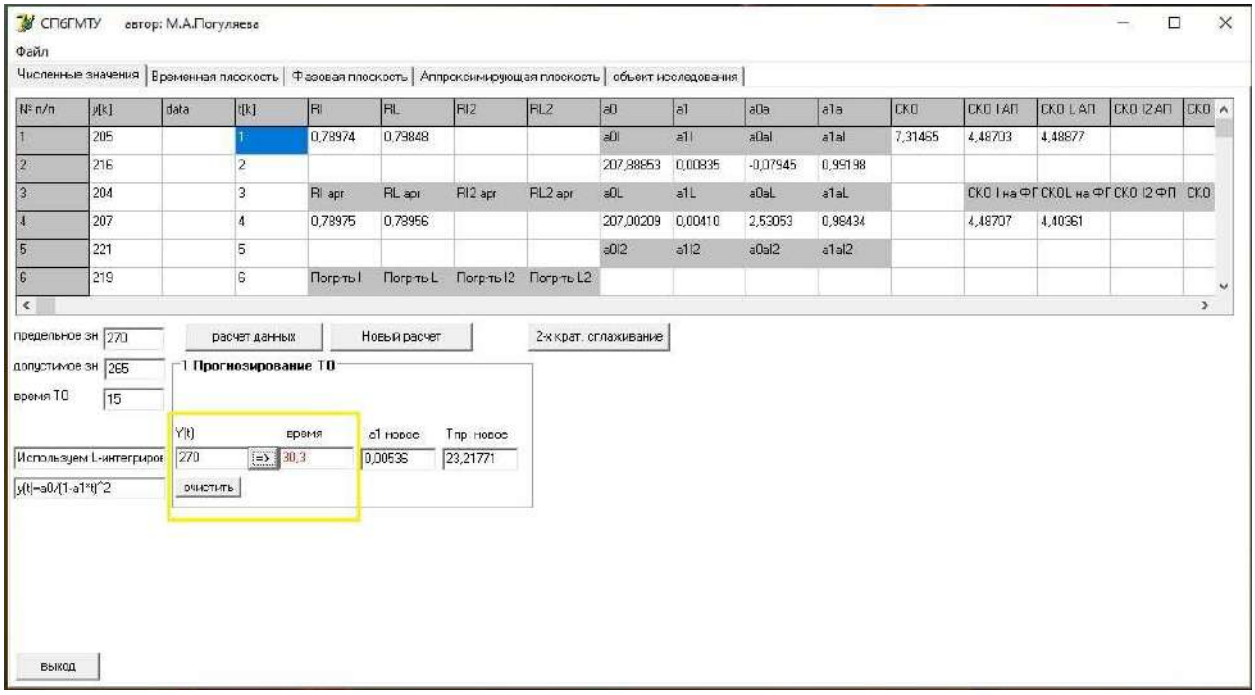


Рис. 4 Фрагмент программы ТОиР. Расчет прогнозируемого времени

Коэффициент корреляции позволяет определить доверительную (иначе энтропийную) оценку прогноза [3]:

$$\gamma \cong 0{,}5 \cdot \sqrt{1-\rho^2} \cong 0{,}5 \cdot \sqrt{1-0{,}7985^2} \cong 0{,}301,$$

т.е. получается, что ТО необходимо выполнить примерно через $6 \pm 1{,}2$ дней. Следовательно, сообщение о целесообразности проведения ТО на АРМ сервисного центра должно быть отправлено в день наступления события, когда $T(n)=T_{доп}$ с указанием ДД.ММ.ГГ. выполнения ТО с учетом доверительной оценки прогноза. В сообщении также имеются дополнительные сведения по кодам контроллера, что позволит сервисной службе определить наиболее вероятную причину (причины) ухудшения технологического процесса КУ и следовательно, заблаговременно составить план работ, обосновать комплектацию сменных частей и необходимого инструмента.

В целом алгоритм прогноза времени выполнения ТО можно представить следующей блок-схемой (см. рис. 5).

На оставшемся по прогнозу интервале времени до предполагаемого времени выполнения ТО, целесообразно более точно установить динамику тренда параметра, например, в течение суток и тем самым подтвердить необходимость проведения ТО.

Качество проведения технического обслуживания связано, в первую очередь, с диагностикой предотказного состояния, во-вторых, возможностью существующих систем предсказывать ход развития такой ситуации. Из достоинств предлагаемой системы технического обслуживания можно выделить непрерывную диагностику состояния котельной до прогнозируемого момента наступления предаварийной ситуации.

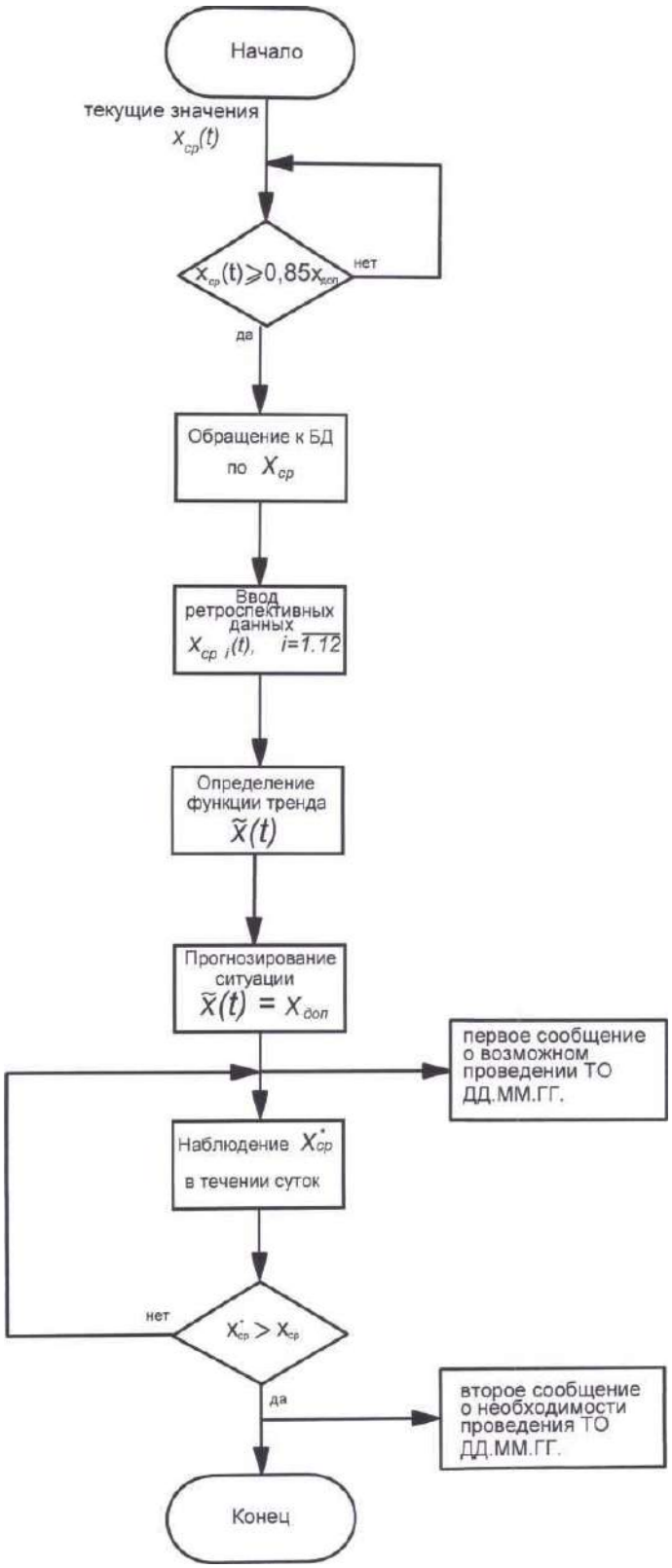


Рис. 5 Блок-схема организации процедуры прогнозирования выполнения ТО

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соболев Л.Г. Обработка результатов измерений в судостроении: Учебное пособие. Л.: ЛКИ, 1983, 47 с.
2. Хруцкий О.В., Погуляева М.А. Техническое обслуживание судового энергооборудования//Турбины и дизели. 2010. № 5, с. 52 – 56.
3. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л.: Издательство Энергоатомиздат. Ленингр. отделениение, 1991. — 304 с.
4. Максимова М.А., Рогов С.С. Мониторинг технического состояния судового энергетического оборудования//Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2016. № 42/43. с.125 – 29.

REFERENCES

1. Sobolev L.G. *Obrabotka rezultatov izmereny v sudostroenii: uchebnoe posobie* [Processing of measurement results in shipbuilding: Textbook]. Leningrad, LSbI Publ., 1983, 47 p. (In Russian).
2. Hrutsky O.V., Pogulyaeva M.A. *Tehnicheskoe obslujivanie sudovogo energooborudovaniya* [Maintenance of ship power equipment]. Proc. "Turbines and diesel engines ", 2010, No. 5, pp. 52 – 56. (In Russian).
3. Novitsky P.V., Zograf I.A. *Otsenka pogreshnosti rezultatov izmerehy: 2-e izdanie* [Estimation of measurement errors: 2nd edition] Leningrad: Energoatomizdat Leningrad branch Publ., 1991, 304 p. (In Russian).
4. Maksimova M.A., Rogov S.S. *Monitoring tehnicheskogo sostoyaniya sudovogo energiticheskogo oborudovaniya* [Monitoring of technical condition of the ship's power equipment]. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, 2016, Nos. 42/43, pp. 125 – 129. (In Russian).

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

УДК 621.431.74

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВИБРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В.В. Герасиди, канд. техн. наук, доцент, Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск, e-mail: gerasidi@rambler.ru

В настоящее время в различных отраслях народного хозяйства, в том числе и на судах морского флота РФ используются электрические машины, которые находят широкое применение в судовых энергетических установках как в качестве главных, так и вспомогательных. В статье приведены результаты полученных норм вибрации электрических машин на основании рассмотренных национальных, международных и зарубежных стандартов, рекомендаций фирм производителей и нормативных документов членов МАКО. В статье выявили, что критериями, принятыми для оценки вибрации контроля технического состояния электрических машин, являются различные параметры вибрации и диапазоны частот. Полученные результаты анализа позволили предложить, в порядке обсуждения, нормы вибрации электрических машин. Сделан вывод о необходимости провести анализ по сравнению результатов, полученных специалистами испытательных лабораторий по контролю вибрации электрических машин на морских судах в эксплуатации с рекомендациями нормативных документов.

Ключевые слова: *электрические машины, контроль, параметры вибрации, диагностика, подшипниковые узлы, производители, стандарты, классификационные общества*

ANALYSIS OF MODERN REGULATIONS FOR VIBRATION CONTROL OF ELECTRIC MACHINES

V.V. Gerasidi, PhD, associate professor, Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, e-mail: gerasidi@rambler.ru

At present, electric machines are used in various sectors of the national economy, including ships of the Russian fleet, both as main and auxiliary engines in ship power plants. The article presents the review of vibration norms as applicable to electric machines on the basis of national requirements, international and foreign standards, recommendations of manufacturers, normative documents of the classification societies – IACS members. The article demonstrates that the criteria adopted to assess the vibration control of the technical condition of electric machines include vibration parameters and frequency ranges. The obtained results of the analysis allowed to propose, as a matter of discussion, the vibration standards of electric machines. Summing up the results of the analysis, it was concluded that there is a need to compare the results obtained by specialists of testing laboratories for vibration control of electric machines on ships in service with the recommendations of regulatory documents.

Keywords: *electrical machines, control, vibration parameters, diagnostics, bearing assemblies, manufacturers, standards, classification societies*

В настоящее время в различных отраслях народного хозяйства, в том числе и на судах морского флота РФ используются электрические машины (ЭМ) таких фирм как ABB Ltd., Siemens Industry Inc., HYUNDAI ELECTRIC & ENERGY SYSTEMS CO., Ltd, WEG Inc., Emerson Electric Industrial Ltd., Clemens Lammers GmbH., AVK International GmbH., CUMMINS Inc., CATERPILLAR Inc. и др. с высотой оси вала *H* от 56 мм до 710 мм, различного назначения и компоновки. Например, в морской отрасли ЭМ находят широкое применение в судовых энергетических установках как в качестве главных, так и вспомогательных двигателей.

Современные нормативные документы по контролю технического состояния и диагностики ЭМ и их элементов регламентируются:

- национальными и международными стандартами [1, 2, 5, 8 – 12];
- зарубежными стандартами [3, 4, 6, 7];
- рекомендациями крупных производителей ЭМ, подшипниковых узлов ЭМ и классификационных обществ – членов МАКО, в которых приводятся рекомендуемые нормы вибрации ЭМ.

Во всех перечисленных выше документах [1 – 9, 11, 12] рассматриваются нормы вибрации ЭМ по результатам измерений вибрации на невращающихся и вращающихся частях. В данном обзоре будут рассматриваться критерии для оценки вибрации ЭМ только на невращающихся частях подшипниковых узлов машин (см. рис. 1 – 4). На рис. 1 – 4 представлены точки контроля параметров вибрации горизонтального и вертикального исполнения ЭМ.

Критериями, принятыми для оценки вибрации контроля технического состояния ЭМ, являются следующие величины [3, 4, 6 – 8, 10, 11]:

- среднеквадратичные значения С.К.З. (R.M.S) перемещения $S_{\text{с.к.з.}}$, мкм; скорости $v_{\text{с.к.з.}}$, мм/с; ускорения $a_{\text{с.к.з}}$, м/с^2, измеренные в широком диапазоне частот в соответствии с требованиями [8, 10, 11];
- размах (двойная амплитуда колебаний) виброперемещения S_f «пик – пик» ($S_{p\text{-}p}$ Peak to peak) и пиковые значения виброскорости на оборотной частоте вращения $v_{o\text{-}p}$ «пик» (Peak) [3, 4, 6 – 8].

В стандарте [1] изложена методология вибрационного диагностирования электродвигателей, в которую входят:

- общие положения;
- общие рекомендации по методологии диагностирования эксплуатируемых электродвигателей;
- визуальный контроль;
- спектральный анализ;
- анализ временной формы сигнала;
- анализ фазовых соотношений, ODS-анализ.

Представлены примеры из практики анализа вибрации электродвигателей:

- неравномерный воздушный зазор;
- дефект обмотки статора;
- деформация рамы статора и др.

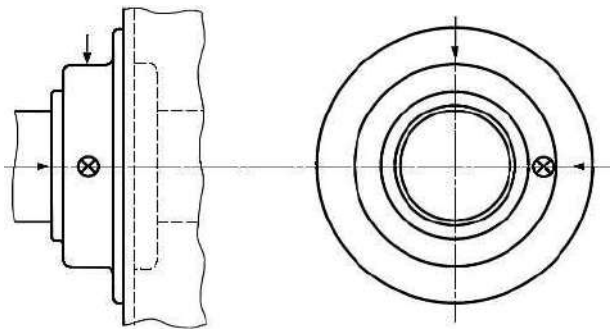


Рис. 1 Рекомендуемое расположение датчиков на одном или обоих краях машины

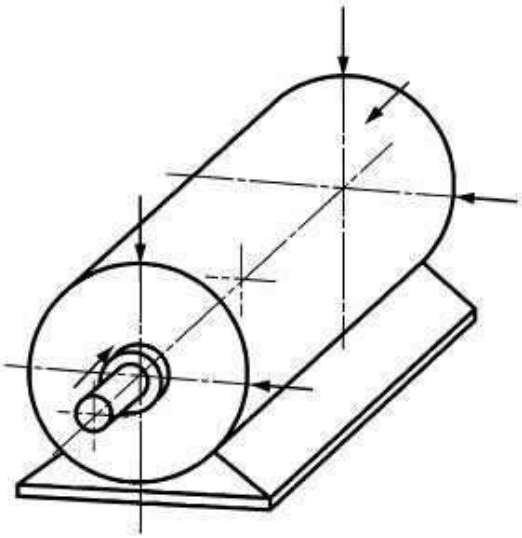


Рис. 2 Расположение датчиков на краях машины в случаях,
когда установка датчиков по рис. 1 невозможна без разборки машины

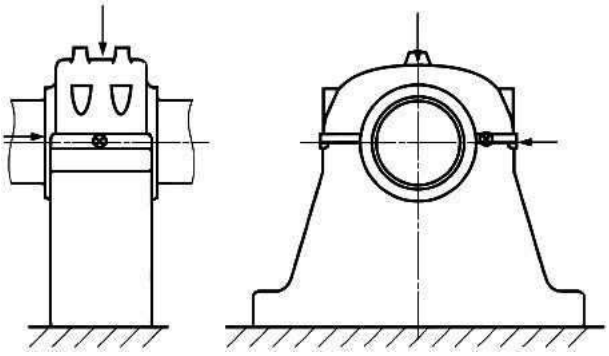


Рис. 3 Расположение датчиков у стояковых подшипников

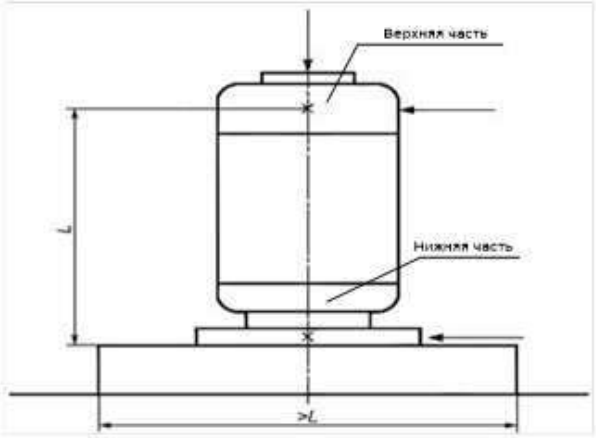


Рис. 4 Измерения для машин с вертикальным расположением
(измерения рекомендуется проводить на корпусах подшипников, а если невозможно, – то в наиболее близких к ним точках)

В стандарте [2] рассматриваются нормы вибрации ЭМ, которые используются в качестве привода движителя на морских судах. Для контроля технического состояния электродвигателей в стандарте [2] приняты нормы:

стандарта [10] параметры вибрации С.К.З в широком диапазоне частот в точках контроля (см. рис. 1 – 4 и табл. 1);

параметры вибрации составляющих значений на основной частоте (первая гармоника) по [10] табл. 1 (обычно менее 5 мм/с) и второй гармоники по [11] табл. 2 (классы 1 – 3).

В табл. 1 стандарта [10] указаны нормы вибрации ЭМ с высотой оси вращения вала от 160 до 315 мм и выше, мощностью от 15 кВт до 50 МВт, на различных классах опор и граничных зонах *A*, *B*, *C*, *D* [11]. В табл. 2 стандарта [11] указаны нормы вибрации машин различных классов.

Высота оси вращения вала *H* – расстояние, измеренное между осью вращения вала и плоскостью основания машины, готовой к поставке.

Для машины без опоры или с поднятой опорой, или для вертикально установленной машины высоту оси вращения вала определяют так, как если бы машина тех же размеров была установлена горизонтально на обычных опорах. Если такое определение размеров невозможно, за значение высоты оси вращения вала берут половину диаметра машины [10].

Таким образом, стандарт [2] учитывает стандарты [10, 11], где указываются нормы вибрации ЭМ, которые не должны превышать $v_{с.к.з.}$ = 7,1 мм/с и $a_{с.к.з}$ = 90 мкм на жестких опорах. Если значения вибрации превышают указанные нормы, это, чаще всего, связано с дисбалансом ротора и проблемами электромагнитного характера, и необходимо проводить диагностику оборудования по таким критериям, как составляющие гармоник вибрации на частоте вращения по [10] табл. 1 и 2 (обычно менее 5 мм/с) и второй по [11] табл. 3 (обычно менее 11 мм/с) классы 1 – 3.

Зона *A* – в эту зону попадает, как правило, вибрация новых машин, вводимых в эксплуатацию.

Зона *B* – машины, вибрация которых попадает в эту зону, обычно считают пригодными для эксплуатации без ограничения сроков.

Зона *C* – машины, вибрация которых попадает в эту зону, обычно считают непригодными для длительной непрерывной эксплуатации. Такие машины могут функционировать ограниченный период времени до начала ремонтных работ.

Зона *D* – уровни вибрации в данной зоне обычно могут вызывать серьезные повреждения машин [10].

В примечаниях к стандартам [2] и [10] также было указано, что:

- вибрации, наведенные от судового оборудования, не должны превышать значения $v_{с.к.з.}$ = 14 мм/с [2];
- в случае работы на переменных скоростях или с разными нагрузками измерения проводят для всех режимов, при которых машина работает продолжительное время. Для оценки степени виброактивности машины берут максимальное значение вибрации по всем режимам, в которых проводились измерения [10];
- если измеренная вибрация превышает допустимую, но при этом возможно, что большой вклад в вибрацию вносят внешние источники, измерения следует проводить на неработающей машине, чтобы оценить степень влияния сторонних источников. Если вибрация неработающей машины превышает 25 % вибрации машины в процессе ее работы, следует осуществить коррекцию результатов измерений для уменьшения влияния наведенной вибрации [10].

В стандартах [5, 12] указываются нормы вибрации для электродвигателей постоянного тока и трехфазных машин переменного тока в зависимости от высоты оси вращения 56 мм и более. Критериями, принятыми для оценки вибрации электродвигателей, будут являться параметры вибрации С.К.З., измеренные в широком диапазоне частот от 10 Гц до 1000 Гц в точках контроля (см. рис. 1 – 4 и табл. 3 и 4).

Таблица 1

Границы зон вибрационного состояния для машин группы 1 и 2. Машины номинальной мощностью от 15 до 300 кВт; ЭМ с высотой оси вращения вала от 160 до 315 мм и более 300 кВт, но не более 50 МВт; ЭМ с высотой оси вращения вала выше 315 мм [10]

Класс опоры	Граница зон	Группа 1 перемещения, мкм		Группа 2 скорости, мм/с	
		160 ⩽H⩽ 315	H ⩾ 315	160 ⩽ H ⩽ 315	H ⩾ 315
Жесткие	A/B	22	29	1,4	2,3
	B/C	45	57	2,8	4,5
	C/D	71	90	4,5	7,1
Податливые	A/B	37	45	2,3	3,5
	B/C	71	90	4,5	7,1
	C/D	113	140	7,1	11,0

Таблица 2

Примерные границы зон для машин различных классов [11]

<table>
<tr><th>$v_{с.к.з.}$, мм/с</th><th>Класс 1</th><th>Класс 2</th><th>Класс 3</th><th>Класс 4</th></tr>
<tr><td>0,28</td><td rowspan="3">A</td><td rowspan="4">A</td><td rowspan="6">A</td><td rowspan="8">A</td></tr>
<tr><td>0,45</td></tr>
<tr><td>0,71</td></tr>
<tr><td>1,12</td><td rowspan="2">B</td></tr>
<tr><td>1,8</td><td rowspan="2">B</td></tr>
<tr><td>2,8</td><td rowspan="2">C</td><td rowspan="3">B</td></tr>
<tr><td>4,5</td><td rowspan="2">C</td><td rowspan="3">B</td></tr>
<tr><td>7,1</td><td rowspan="5">D</td><td rowspan="3">C</td></tr>
<tr><td>11,2</td><td rowspan="4">D</td><td rowspan="3">C</td></tr>
<tr><td>18</td><td rowspan="3">D</td></tr>
<tr><td>28</td><td rowspan="2">D</td></tr>
<tr><td>45</td></tr>
</table>

Класс 1 – отдельные части двигателей и машин, соединенные с агрегатом и работающие в обычном для них режиме (серийные электрические моторы мощностью до 15 кВт являются типичными машинами этой категории).

Класс 2 – машины средней величины (типовые электромоторы мощностью от 15 до 875 кВт) без специальных фундаментов, жестко установленные двигатели или машины (до 300 кВт) на специальных фундаментах.

Класс 3 – мощные первичные двигатели и другие мощные машины с вращающимися массами, установленные на массивных фундаментах, относительно жестких в направлении измерения вибрации [2].

В табл. 3 указаны максимально допустимые значения вибросмещения, виброскорости и виброускорения для различных высот оси вращения вала от 56 мм до 280 мм и более в зависимости от категории и крепления электродвигателей (жесткие или гибкие опоры).

В табл. 4 указаны максимально допустимые значения виброскорости для различных высот оси вращения вала от 56 мм до 400 мм и более в зависимости от номинальной частоты вращения ЭМ.

Можно отметить общие и отличительные данные по стандартам [5, 12]:

1. в стандарте [12] приводятся нормы вибрации $v_{с.к.з.}$;

2. в стандарте [5] указаны максимально допустимые значения С.К.З. вибросмещения, виброскорости и виброускорения для высоты оси вращения вала ЭМ от 56 мм до 280 мм и более, а в стандарте [12] только виброскорость для высоты оси вращения вала ЭМ от 56 мм до 400 мм и более.

3. в стандарте [5] указаны типы крепления опор электродвигателей(категория "A" – машины без специальных требований к вибрации; категория "B" – машины со специальными требованиями к вибрации), а в стандарте [12] не указаны типы крепления опор электродвигателей, а указываются категории "N", "R" и "S" (нормальные "N"; с пониженной вибрацией "R"; с особо жесткими требованиями по вибрации "S").

4. в стандарте [5] говорится о том, что если значение $v_{с.к.з.}$ машин с высотой оси $H > 280$ мм (табл. 3, категория A) превышает 2,3 мм/с, и при этом установлено, что причиной является электромагнитная составляющая вибрации на двойной частоте, то допустимый уровень виброскорости увеличивается с 2,3 до 2,8 мм/с. Это необходимо заранее согласовать между изготовителем и потребителем. Оценка осевой вибрации подшипников зависит от назначения и конструкции подшипника. Для упорных подшипников осевая (аксиальная) вибрация вызывает пульсации механических напряжений, которые могут разрушить металлические гильзы подшипника скольжения или детали подшипника качения. Для оценки допустимых уровней осевой вибрации подшипников следует использовать данные табл. 3.

5. в стандартах [5] и [12] приведены одинаковые допустимые значения $v_{с.к.з.}$ для различных высот оси вращения вала с жестким креплением электродвигателей.

В зарубежных национальных стандартах [3, 4, 6, 7] указываются предельно допустимые значения параметров вибрации и ЭМ нефтяной и химической промышленности для больших мощностей от 75 кВт до 75МВт. Критериями, принятыми для оценки вибрации ЭМ, будут являться параметры вибрации $v_{с.к.з.}$ в широком диапазоне частот от 10 Гц до 1000 Гц и $S_{p\text{-}p}$ на оборотной частоте вращения ЭМ в точках контроля на рис. 1 – 4.

Таблица 3

Максимально допустимые значения вибросмещения, виброскорости и виброускорения для различных высот оси вращения вала [5]

Категория машин	Крепление	Высота оси вращения, мм								
		$56 \leqslant H \leqslant 132$			$132 < H \leqslant 280$			$H > 280$		
		Вибросмещение, μм	Виброскорость, мм/с	Виброускорение, м/с^2	Вибросмещение, μм	Виброскорость, мм/с	Виброускорение, м/с^2	Вибросмещение, μм	Виброскорость, мм/с	Виброускорение, м/с
A	Упругое	25	1,6	2,5	35	2,2	3,5	45	2,8	4,4
	Жесткое	21	1,3	2,0	29	1,8	2,8	37	2,3	3,6
B	Упругое	11	0,7	1,1	18	1,1	1,7	29	1,8	2,8
	Жесткое	–	–	–	14	0,9	1,4	24	1,5	2,4

Примечания: 1. Производитель и покупатель должны согласовать точность измерений в пределах ±10 %.

2. За высоту оси машины без лап, с приподнятыми лапами или любой машины, установленной вертикально, следует принимать высоту оси машины с такой же базовой станиной, но с горизонтальным расположением вала машины на лапах.

3. Хорошо сбалансированные и удовлетворяющие требованиям, содержащимся в табл. 3, машины, будучи смонтированными в составе установки, могут иметь высокие вибрации, обусловленные неподходящим фундаментом, присоединенной нагрузкой или пульсациями питающей сети. Вибрация может быть также обусловлена резонансом собственных частот колебаний присоединенной нагрузки и несбалансированных масс машины. В этом случае испытаниям, кроме машины, должны подвергаться остальные элементы привода каждый в отдельности (см. стандарт ИСО 10816-3 [10]).

Таблица 4

Допустимые значения вибрации ЭМ [12]

Категория машины	Номинальная частота вращения, n, мин$^{-1}$	Максимальное С.К.З. виброскорости машины, мм/с, для высот оси H, мм, установленной				
		в свободно подвешенном состоянии				в жесткоскрепленном состоянии
		$56 \leqslant H \leqslant 71$	$71 \leqslant H \leqslant 132$	$132 < H \leqslant 225$	$H > 225$	$H > 400$
N	$600 \leqslant n \leqslant 1800$ $1800 \leqslant n \leqslant 6000$	1,12 1,12	1,8 1,8	1,8 2,8	2,8 4,5	2,8 2,8
R	$600 \leqslant n \leqslant 1800$ $1800 \leqslant n \leqslant 6000$	0,71 0,71	0,71 1,12	1,12 1,8	1,8 2,8	– –
S	$600 \leqslant n \leqslant 1800$ $1800 \leqslant n \leqslant 6000$	0,45 0,45	0,45 0,71	0,71 1,12	1,12 1,8	– –

Выпускаемые ЭМ для нефтяной и химической промышленности должны соответствовать [3, 4, 6, 7]:

- параметрам вибрации при приемосдаточных испытаниях стандарту [7];
- максимально допустимым параметрам вибрации во время эксплуатации по стандартам [3, 6];
- конструкционным требованиям ассоциации производителей электрооборудования, в которых также прописаны нормы вибрации [4].

В стандарте [4] указываются нормы вибрации ЭМ больших мощностей от 75 кВт до 75 МВт и дается ссылка на нормы: стандартов [5, 10] табл. 1, 3; $v_{с.к.з.}$ не должны превышать 2,8 мм/с на жестких опорах; $v_{о\text{-}р.}$ – 3,8 мм/с и $S_{p\text{-}p}$ – 90 мкм на оборотной частоте ЭМ.

В стандартах [3,6] указываются нормы вибрации ЭМ стандартов мощностью от 375 кВт до 2240 кВт, высотой оси вращения Н $315 \leqslant H \leqslant 710$ мм. Максимально допустимые параметры вибрации во время эксплуатации ЭМ не должны превышать $v_{с.к.з.}$ в пределах от 1,8 мм/с до 3,6 мм/с на жестких опорах и $v_{о\text{-}р}$ от 2,5 мм/с до 4,5 мм/с.

В стандарте [7] указываются нормы вибрации во время приемо-сдаточных испытаний электрического оборудования нефтяной и химической промышленности по конструкционным требованиям стандарта [4]. Максимально допустимые параметры вибрации ЭМ в соответствии настоящего стандарта [7] представлены в табл. 5.

Таблица 5

Максимально допустимые параметры вибрации ЭМ на упругих опорах во время сдаточных испытаний [7]

Параметр	Частота вращения ЭМ, мин$^{-1}$					
	⩽500	600	750	1000	1500	3000
Основная частота вибрации, Гц	8,3	10	12,5	16,7	25	50
СКЗ в широкой полосе частот, мм/с	1,26	1,44	1,8	2,34	2,7	2,7
Виброскорость на основной частоте, мм/с	1,7	2,0	2,5	3,3	3,8	3,8
Примечание. Для машин с жестким креплением предельные значения параметров вибрации необходимо умножить на 0,8 [7].						

Во всех перечисленных стандартах [1 – 9, 11 – 14] критерии для оценки вибрации ЭМ на невращающихся частях являются на подшипниковых узлах машин, которые адекватно реагируют на динамические силы машины. В связи с этим необходимо рассмотреть стандарт [9]. В стандарте [9] указываются уровни вибрации действующие на подшипники качения (см. рис. 5). Максимально допустимые уровни вибрации представляют собой амплитудно-частотный диапазон значений виброскорости в пределах от 0,01 мм/с до 10 мм/с.

Фирмы производители ЭМ с высотой оси вала $H - 56 \leqslant H \leqslant 710$ заявляют, что изготовление ими ЭМ соответствуют стандартам [3, 4, 5, 6, 7, 11].

В настоящее время на морских судах в качестве привода движителей устанавливаются гребные ЭД горизонтального исполнения. Производители мощных электродвигателей, например, фирма ABB Ltd., приводит максимально допустимые уровни вибрации $v_{с.к.з.}$ в диапазоне частот от 10 Гц до 1000 Гц в пределах от 1,8 мм/с до 7,1 мм/с [13].

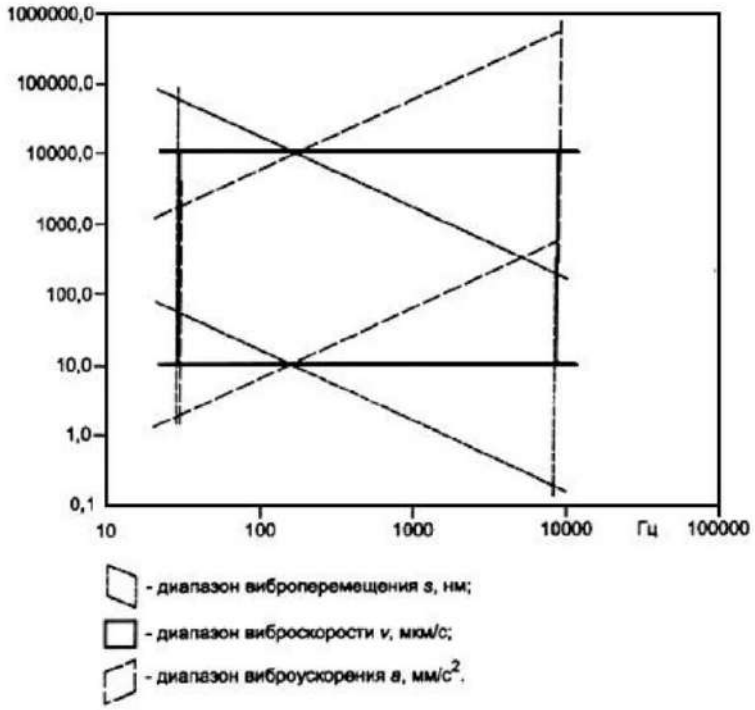


Рис. 5 Амплитудно-частотный диапазон виброскорости и соответствующие ему амплитудно-частотные диапазоны виброперемещения и виброускорения [10]

Производитель ЭМ фирма WEG Inc. (высотой оси вращения вала $56 \leqslant H \leqslant 280$ мм и более) в своих рекомендациях по уровню вибрации дает сведения о замене подшипниковых узлов на 50 тыс. ч, если уровни вибрации не превышают $v_{\text{с.к.з.}} = 0{,}72$ мм/с [14].

Производители ЭМ в морской отрасли проводят исследования вибрации ЭМ под нагрузкой в условиях, приближенных к эксплуатации, и указывают свои рекомендации по нормам вибрации. Например, производитель HYUNDAI ELECTRIC & ENERGY SYSTEMS CO., Ltd. указывает зоны технического состояния по параметрам вибрации $S_{p\text{-}p}$ для ЭМ горизонтального и вертикального расположением вала. Параметры вибрации ЭМ с вертикальным расположением вала выше, чем с горизонтальным расположением вала на 50 % во всех точках контроля указанных на рис. 1 – 4 [15].

На основании рекомендаций производителей и стандартов [3, 4, 6] на рис. 5 представлены обобщенные автором зависимости виброскорости оборотной частоты вращения $v_{o\text{-}p.}$ (пересчитанные по данным размаха виброперемещения $S_{p\text{-}p}$) от частоты вращения вала ЭМ мощностью от 7 кВт до 75 МВт с горизонтальным расположением вала.

На рис. 6 видны Зоны A, B, C параметров вибрации. Зона "A" – уровни вибрации во время эксплуатации; "B" – предупреждение; "C" – вывод машины из эксплуатации. Производители ABB Ltd., Siemens Industry Inc. и стандарты [3, 4, 6] указывают максимально допустимые параметры вибрации.

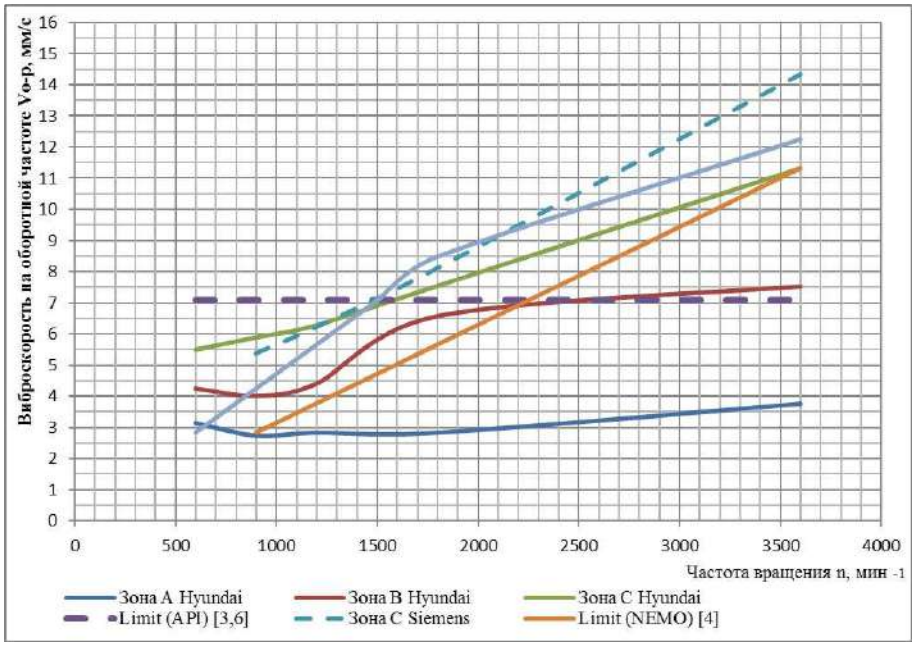


Рис. 6 Зависимости виброскорости на оборотной частоте $V_{\text{о-р}}$ от частоты вращения ЭМ с горизонтальным расположением вала мощностью от 7 кВт до 75МВт

Для ЭМ с вертикальным расположением вала необходимо параметры вибрации умножить на коэффициент 1,5 [15]. Например, из рис. 6 видно, что на частоте вращения 1500 мин–1 максимально допустимый (зона *C* по данным HYUNDAI ELECTRIC & ENERGY SYSTEMS CO., Ltd) порог виброскорости на оборотной частоте $v_{o\text{-}p}$ составляет 6,8 мм/с, а для ЭМ с вертикальным расположением вала будет составлять на оборотной частоте $v_{o\text{-}p}$ составляет 10 мм/с.

В настоящее время существуют требования, предъявляемые членами МАКО, а именно, DNV GL. В этом нормативном документе указываются нормы вибрации ЭМ $v_{\text{с.к.з.}}$ в широкой полосе частот от 4 до 200 Гц [16]. Максимально допустимые значения составляют для ЭМ с горизонтальным исполнением вала $v_{\text{с.к.з. (4-200)}} = 12$ мм/с, с вертикальным необходимо умножить параметры вибрации полученные в верхней части ЭМ на коэффициент 1,5 (рис. 4) [16]. Для генераторов с приводом от ДВС максимально допустимые значения составляют 18 мм/с, причем $v_{o\text{-}p}$ не должен превышать 7 мм/с. Производители генераторов Emerson Electric Industrial Ltd., Clemens Lammers GmbH., AVK International GmbH., CUMMINS Inc., CATERPILLAR Inc. с приводом от ДВС мощностью до 100 кВт, установленные на мягких опорах и имеющую жесткую связь с ДВС, значения $v_{\text{с.к.з.}}$ достигают 45 мм/с.

Выполненный анализ стандартов [1 – 12], рекомендаций фирм производителей ЭМ [13 – 15] и нормативных документов членов МАКО [16], в том числе – РС, показал:

1. в качестве параметров контроля вибрации ЭМ предлагается использовать среднеквадратичные значения С.К.З. (R.M.S) скорости $v_{с.к.з.}$, мм/с, размах (двойная амплитуда колебаний) виброперемещения $S_{p\text{-}p}$ «пик – пик» (Peak to peak) мкм и пиковые значения виброскорости на оборотной частоте вращения $v_{o\text{-}p}$ «пик» (Peak), мм/с;

2. в рамках выполненной по заказу Регистра НИР по договору Регистра с АО «ЦНИИМФ» №19-45800 от 26.03.19 и имеющимся документам РС можно предложить проект норм вибрации ЭМ (см. рис. 7, проект);

3. опыт эксплуатации ЭМ установленных на морских судах показывает, что ЭМ являются приводом различных судовых механизмов (движители, насосы, вентиляторы, компрессоры, сепараторы и т.д.), которые имеют различные мощности, частоты вращения, компоновки, креплением опор и показывают различные уровни вибрации. В связи с этим необходимо провести дополнительный анализ по сравнению результатов полученных специалистами испытательных лабораторий по контролю вибрации ЭМ на морских судах в эксплуатации с рекомендациями нормативных документов.

На рис. 7 представлены предполагаемые нормы вибрации ЭМ на основе оценки значения виброскорости на оборотной (основной) частоте вращения ротора ЭМ $v_{о\text{-}р}$, мм/с. На рисунке видны Зоны *A*, *B*, *C*, *D* параметров вибрации.

Зона A – в эту зону попадает, как правило, вибрация новых машин, вводимых в эксплуатацию.

Зона B – машины, вибрация которых попадает в эту зону, обычно считают пригодными для эксплуатации без ограничения сроков.

Зона C – машины, вибрация которых попадает в эту зону, обычно считают непригодными для длительной непрерывной эксплуатации. Такие машины могут функционировать ограниченный период времени до начала ремонтных работ.

Зона D – уровни вибрации в данной зоне обычно могут вызывать серьезные повреждения машин [10].

Статья подготовлена в рамках выполнения Научно-исследовательской работы по заказу Регистра по договору №19-45800 от 26.03.19.

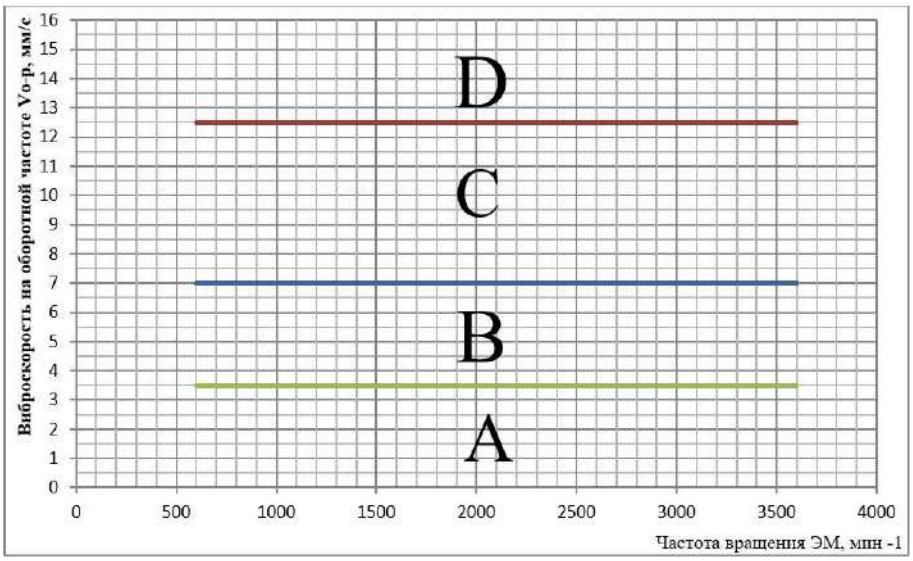


Рис. 7 Нормы вибрации ЭМ с горизонтальным расположением вала мощностью от 7 кВт до 75 МВт (проект)

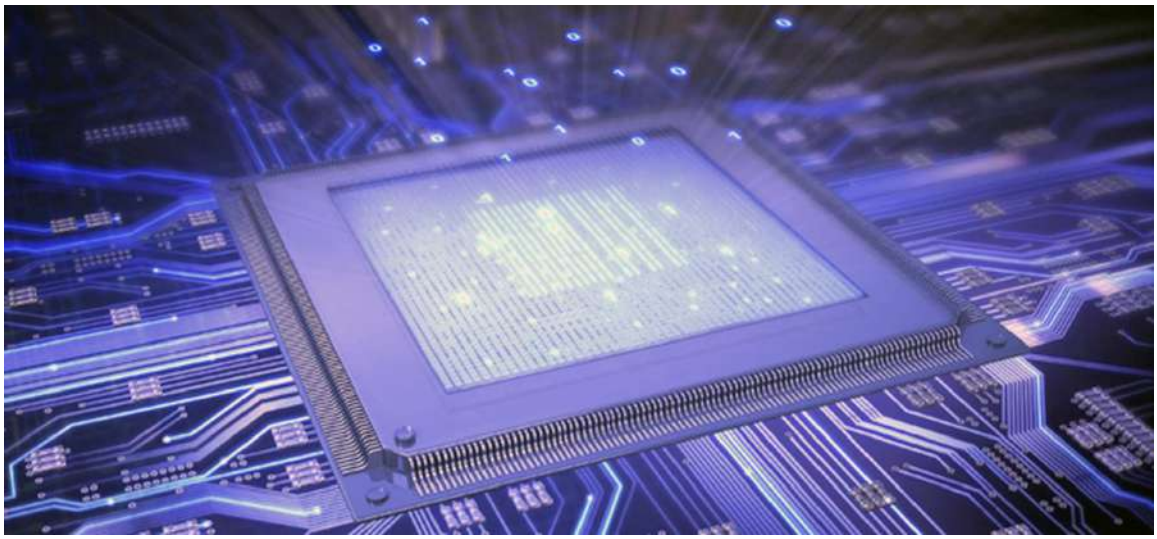
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ПНСТ 168-2016/ISO/DIS 13373-9. Мониторинг состояния и диагностика машин – вибрационный контроль состояния – часть 9: методы диагностики электродвигателей (ИСО 13373-9:2017) DIN ISO 13373-9-2018 Condition monitoring and diagnostics of machines - Vibration condition monitoring - Part 9: Diagnostic techniques for electric motors (ISO 13373-9:2017). М.: Стандартинформ, 2017.
2. ГОСТ Р ИСО 20283-4-2017 Вибрация. Измерения вибрации на судах. Часть 4. Измерения и оценка вибрации судовой пропульсивной установки. Идентичен BS ISO 20283-4:2012+A1:2014. Mechanical vibration. Measurement of vibration on ships. Measurement and evaluation of vibration of the ship propulsion machinery. М.: Стандартинформ, 2019.
3. American Petroleum Institute API STD 547-2017 General Purpose Form-wound Squirrel Cage Induction Motors – 185 kW (250 hp) through 2240 kW (3000 hp) – Second Edition.
4. American National Standards Institute ANSI/NEMAMG 1. 2016. Международный (зарубежный) стандарт. NEMA National Electrical Manufacturers Association NEMA MG 1. Motors and generators.
5. ГОСТ IEC 60034-14-2014. Машины электрические вращающиеся. Часть 14. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотами вала 56 мм и более. Измерения, оценка и пределы жесткости вибраций. Идентичен IEC 60034-14:2007(2018). Rotating electrical machines - Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher – Measurement, evaluation and limits of vibration severity. М.: Стандартинформ, 2015.
6. American Petroleum Institute API STD 541-2014 Form-wound Squirrel Cage Induction Motors-375 kW (500 Horsepower) and Larger. Fifth edition. Международный (зарубежный) стандарт.
7. ANSI/NETA ATS-2009. STANDARD FOR ACCEPTANCE TESTING SPECIFICATIONS for Electrical Power Equipment and Systems. Стандарт для приемосдаточных испытаний электроэнергетического оборудования и их систем.
8. ГОСТ ISO 2954-2014 Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Требования к средствам измерений. М.: Стандартинформ, 2019.
9. ГОСТ Р 52545.1-2006 (ИСО 15242-1:2004) Подшипники качения. Методы измерения вибрации. Часть 1. Основные положения (с Поправкой). М.: Стандартинформ, 2006.
10. ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин–1. Идентичен (ISO 10816-3:1998 "Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min when measured in situ"). М.: Стандартинформ, 2007.
11. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. ЧастьI. Общие требования. М.: Издательство стандартов, 1998.
12. ГОСТ 20815-93 (МЭК 34-14-82) Машины электрические вращающиеся. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотой оси вращения 56 мм и более. Измерение, оценка и допустимые значения. Идентичен IEC 60034-14: 1982 Rotating electrical machines – Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher – Measurement, evaluation and limits of the vibration severity. М.: ИПК Издательство стандартов, 1996.
13. ABB Ltd. Manual. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://library.e.abb.com/public/9efbcf3e6aa47928c1257b5200357e8b/DMPB%209016%20E%20Rev3.pdf – с. 60
14. ООО «ВЕГ» Manual. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.royal-ie.com/Admin/Logos/WEG-standard-stock-catalog-2017-complete-catalog-us100-brochure-english.pdf – с. A-55.
15. HYUNDAI ELECTRIC & ENERGY SYSTEMS CO., Ltd. Manual. Instruction manual for marine motor. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.hyundai-electric.com/elec/en/customer/downloadList.jsp – с. 16
16. DNVGL. Rules for classification ships. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RU-SHIP/2015-10/DNVGL-RU-SHIP-Pt6Ch8.pdf – с. 33

REFERENCES

1. PNST 168-2016/ISO/DIS 13373-9. *Monitoring sostoyaniya i diagnostika mashin – vibracionny kontrol sostoyaniya – chast 9: metody diagnostiki elektrodvigateley (ISO 13373-9:2017)* [DIN ISO 13373-9-2018 Condition monitoring and diagnostics of machines - Vibration condition monitoring - Part 9: Diagnostic techniques for electric motors (ISO 13373-9:2017)]. M.: Standartinform, 2017.
2. GOST R ISO 20283-4-2017 *Vibratsiya. Izmereniya vibratsii na sudah. Chast'4. Izmereniya i ocenka vibracii sudovoj propul'sivnoj ustanovki.* [Identichen BS ISO 20283-4:2012+A1:2014. Mechanical vibration. Measurement of vibration on ships. Measurement and evaluation of vibration of the ship propulsion machinery]. M.: Standartinform, 2019.
3. American Petroleum Institute API STD 547-2017 General Purpose Form-wound Squirrel Cage Induction Motors – 185 kW (250 hp) through 2240 kW (3000 hp) – Second Edition.
4. American National Standards Institute ANSI/NEMAMG 1. 2016. Mezhdunarodnyj (zarubezhnyj) standart. NEMA National Electrical Manufacturers Association NEMA MG 1. Motors and generators.
5. *GOST IEC 60034-14-2014. Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya. CHast' 14. Mekhanicheskaya vibraciya nekotoryh vidov mashin s vysotami vala 56 mm i bolee. Izmereniya, ocenka i predely zhestkosti vibracij. Identichen* IEC 60034-14:2007(2018)* Rotating electrical machines – Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher – Measurement, evaluation and limits of vibration severity. M.: Standartinform, 2015.
6. American Petroleum Institute API STD 541-2014 Form-wound Squirrel Cage Induction Motors-375 kW (500 Horsepower) and Larger – fifth edition. Mezhdunarodnyj (zarubezhnyj) standart.
7. ANSI/NETA ATS-2009. STANDARD FOR ACCEPTANCE TESTING SPECIFICATIONS for Electrical Power Equipment and Systems. Standart dlya priemosdatochnykh ispytany elektroenergeticheskogo oborudovaniya i ikh sistem.

8. *GOST ISO 2954-2014 Vibratsiya. Kontrol sostoyaniya mashin po rezultatam izmereny vibratsii na nevrashchayushchihsya chastyakh. Trebovaniya k sredstvam izmereny.*[Mechanical vibration. Condition monitoring of machinery using measurements made on non-rotating parts. Requirements for instruments] M.: Standartinform, 2019.
9. *GOST R 52545.1-2006 (ISO 15242-1:2004) Podshipniki kacheniya. Metody izmereniya vibracii. Chast 1. Osnovnye polozheniya (s Popravkoj).* [Rolling bearings. Measuring methods for vibration. Part 1. Fundamentals. (As amended)]. M.: Standartinform, 2006.
10. *GOST ISO 10816-3-2002. Vibratsiya. Kontrol sostoyaniya mashin po rezultatam izmereny vibratsii na nevrashchayushchikhsya chastyakh. Chast 3. Promyshlennye mashiny nominalnoy moshchnostyu bolee 15 kVt i nominalnoy skorostyu ot 120 do 15000 min^{-1}.*[Identichen ISO 10816-3:1998 "Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts – Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min when measured in situ"]. M.: Standartinform, 2007.
11. *GOST ISO 10816-1-97. Vibratsiya. Kontrol sostoyaniya mashin po rezultatam izmereny vibratsii na nevrashchayushchihsya chastyakh. Chast I. Obshchie trebovaniya.* [Mechanical vibration. Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 1. General guidelines] M.: Izdatel'stvo standartov, 1998.
12. *GOST 20815-93 (MEK 34-14-82) Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesya. Mekhanicheskaya vibratsiya nekotorykh vidov mashin s vysotoy osi vrashcheniya 56 mm i bolee. Izmerenie, otsenka i dopustimye znacheniya.* [Identichen IEC 60034-14:1982 Rotating electrical machines – Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher – Measurement, evaluation and limits of the vibration severity]. M.: IPK Izdatelstvo standartov, 1996.
13. AVV. *Spravochnaja informatsija. [`Elektronny resurs]*.[AVV. Reference. Electronic source] – Accessed at: https://library.e.abb.com/public/9efbcf3e6aa47928c1257b5200357e8b/DMPB%209016%20E%20Rev3.pdf – p. 60
14. *OOO "VEG" Spravochnaja informatsija. [Elektronny resursky].* [VEG Ltd Reference. Electronic source] – Accessed at: http://www.royal-ie.com/Admin/Logos/WEG-standard-stock-catalog-2017-complete-catalog-us100-brochure-english.pdf – p. A-55.
15. HYUNDAI ELECTRIC & ENERGY SYSTEMS CO., LTD. Manual. Instruction manual for marine motor. [Electronic source]. – Accessed at: http://www.hyundai-electric.com/elec/en/customer/downloadList.jsp – p. 16
16. NVGL. Rules for classification ships. [Electronic source]. – Accessed at: https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RU-SHIP/2015-10/DNVGL-RU-SHIP-Pt6Ch8.pdf – p. 33



ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 67.02

ВЕКТОРНО-МАТРИЧНЫЙ СПОСОБ ОПИСАНИЯ ПОЛОЖЕНИЙ В ЗАДАЧАХ АНАЛИТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КОРПУСА КОРАБЛЯ

М.А. Будниченко, канд. техн. наук, АО «ПО «Севмаш», Северодвинск, e-mail: smp@sevmash.ru
Д.В. Кузьмин, канд. техн. наук, доцент, АО «ПО «Севмаш», Северодвинск, e-mail: dymitr72@bk.ru
А.Ю. Спиридонов, АО «ПО «Севмаш», Северодвинск, e-mail: smp@sevmash.ru

В статье обоснована целесообразность применения аналитических методов в задачах математического моделирования процессов формирования корпуса корабля. Установлено, что задачи позиционирования корпусных конструкций в процессе сборки и монтажа аналогичны задачам о положениях пространственных манипуляторов с большим числом степеней свободы. Показана возможность применения алгоритмов кинематики роботов, основанных на векторно-матричном способе описания положений, в задачах создания аналитических моделей для исследования процессов формирования корпуса корабля, отвечающего определенным требованиям к точности его геометрических размеров и формы. С помощью аналитической модели системы из двух соединяемых на стапеле цилиндрических блок-модулей, разработанной на основе векторно-матричного способа, получены функции, связывающие положения базовых точек блок-модулей в системе координат стапеля с угловыми смещениями осей блок-модулей и позволяющие ориентировать положение одного блок-модуля относительно другого с точностью, задаваемой допусками на угловую несоосность.

Ключевые слова: *кораблестроение, корпусные конструкции, взаимозаменяемость, точность, векторно-матричный способ, аналитические модели, автоматизация*

MATRIX METHOD FOR DESCRIBING POSITIONS IN ANALYTICAL TASKS OF SHIP HULL MODELLING

M.A. Budnichenko, PhD, JSC "PO "Sevmash", Severodvinsk, e-mail: smp@sevmash.ru
D.V. Kuzmin, PhD, associate professor, JSC "PO "Sevmash", Severodvinsk, e-mail: dymitr72@bk.ru
A.Yu. Spiridonov, JSC "PO "Sevmash", Severodvinsk, e-mail: smp@sevmash.ru

The article demonstrates the applicability of analytical methods in mathematic modelling of ship hull formation. It has been determined that the problems of positioning hull structures during assembly and erection are similar to those of manipulators with a large number of degrees of freedom. Applicability of robot kinematics algorithms has also been demonstrated. These algorithms are based on matrix method which describes positions in development of analytical models to investigate the process of ship hull formation meeting particular requirements for accuracy of its geometric dimensions and forms. Through the analytical model of the system made up by two interconnected cylindrical unit modules constructed as per matrix method the functions that link together the positions of reference points of the unit modules in the slipway coordinate system and their angular misalignment have been derived. These functions make it possible to position one unit module against the other with the accuracy defined by angular misalignment tolerances.

Keywords: *shipbuilding, hull structures, interchangeability, accuracy, matrix method, analytical models, automation*

В настоящее время в отечественном кораблестроении происходят преобразования, направленные на увеличение производительности труда в условиях жестких требований к качеству продукции, техническая сложность которой постоянно возрастает. Эти преобразования имеют принципиальный характер: технологии, основанные на методе компенсации, предполагающем достижение требуемой точности за счет выполняемых вручную пригоночных работ, уступают место технологиям, в основу которых положен «машиностроительный» принцип взаимозаменяемости и широкое применение средств автоматизации [1 – 3]. Соответственно, все большее значение в кораблестроении приобретает математическое моделирование объектов производства, производственных процессов и систем. В решении некоторых задач проектирования и управления производственными процессами хорошие результаты могут быть получены с помощью методов аналитического моделирования. В сравнении с численной, стохастической или имитационной моделями, преимущество аналитической модели исследуемого объекта состоит в возможности получения результатов в виде формул, строго обоснованных и доказанных. Особенности, ограничивающие применение аналитических методов, состоят в том, что создание адекватных аналитических моделей многомерных объектов, а также необходимые преобразования аналитических выражений являются трудоемкими и требуют умения применять достаточно сложный математический аппарат. В то же время, имеющиеся универсальные математические пакеты программ дают возможность выполнять преобразования аналитических выражений в автоматизированном режиме; существует также математическое и алгоритмическое обеспечение, позволяющее автоматизировать сам процесс создания аналитических моделей сложных, многомерных систем, что создает предпосылки для широкого применения аналитических методов в решении прикладных инженерных задач кораблестроения.

Аналитические модели целесообразно использовать тогда, когда общие законы, которым подчиняется объект исследования, хорошо известны. В кораблестроении к таким задачам можно отнести задачи, связанные с формированием корпуса корабля, отвечающего определенным требованиям к точности его геометрических размеров и формы. Если процесс постройки корпуса корабля рассматривать как позиционирование в трехмерном пространстве одних конструкций относительно других, то для автоматизации создания аналитических моделей, описывающих этот процесс, очень перспективным представляется применение алгоритмов кинематики манипуляторов, основанных на векторно-матричном способе описания положений, изложенных в [4].

Действительно, целью управления объектом в захватном устройстве робота является обеспечение заданного положения объекта в пространстве с требуемой точностью, что достигается относительными перемещениями приводных звеньев манипулятора. В свою очередь, целью сборки и монтажа корпусных конструкций является получение корпуса корабля с размерами и формой, не выходящими за пределы заданных допусков, что, согласно принципу взаимозаменяемости, достигается за счет обеспечения требований к точности конструкций и к точности их позиционирования одна относительно другой. Таким образом, задачи, возникающие при формировании корпуса корабля, аналогичны задачам о положениях пространственных манипуляторов с разветвленной структурой и большим числом степеней свободы.

Рассмотрим процесс сборки корпуса корабля на стапеле из четырех блок-модулей (см. рис. 1). Цифрой «0» на схеме обозначен блок-модуль, система координат которого совмещена с системой координат (СК) стапеля *Oxyz*. Порядок сборки корпуса следующий: 0 – 1, 0 – 2, 2 – 3. В процессе сборки и монтажа необходимо обеспечить значения угловых и линейных смещений осей блок-модулей одна относительно другой в пределах установленных допусков, что контролируется положениями базовых точек P_i блок-модулей в СК стапеля. Аналитическая модель пространственной механической системы, изображенной на рис. 1, описывается равенствами:

$$r_1 = A_1 r_1^{\,1}; \tag{1}$$

$$r_2 = A_2 r_2^2; \tag{2}$$

$$r_3 = A_2 A_3 r_3^3; \tag{3}$$

$$A_i = \begin{bmatrix} R_i & p_i \\ 000 & 1 \end{bmatrix}; \tag{4}$$

$$R_i = \begin{bmatrix} f_{11}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i) & f_{12}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i) & f_{13}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i) \\ f_{21}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i) & f_{22}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i) & f_{23}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i) \\ f_{31}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i) & f_{32}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i) & f_{33}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i) \end{bmatrix}; \tag{5}$$

$$p_i = [g_1(\Delta x_i) \quad g_2(\Delta y_i) \quad g_3(\Delta z_i)]^T, \quad i=1,2,3. \tag{6}$$

В (1) – (3) обозначены r_i^i – векторы размерности (4 х 1) положений базовых точек в локальных СК, жестко связанных с блок-модулями. В состав матриц перехода (4) входят матрицы поворота (5) и векторы переноса (6).

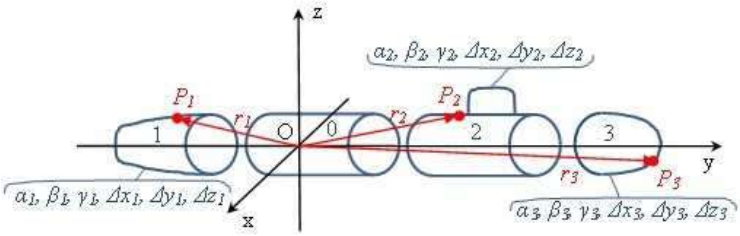


Рис. 1 Общая схема процесса сборки корпуса корабля:
0 – 3 – блок-модули; α_i, β_i, γ_i – угловые, Δx_i, Δy_i, Δz_i – линейные смещения блок-модулей;
r_i – векторы положений точек P_i блок-модулей в системе координат стапеля *Oxyz*, i = 1,2,3

Вычисление матриц (5) представляет собой отдельную задачу, решение которой покажем на примере углового звена размерной цепи по корпусу судна [5], техническим требованием которого является параллельность двух линий (см. рис. 2).

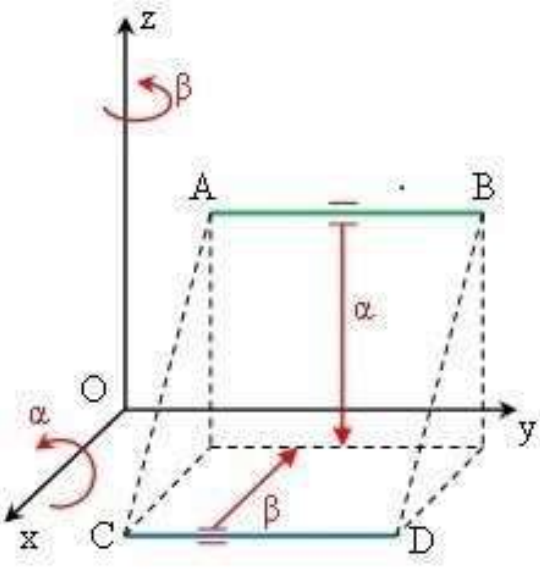


Рис. 2

Будем считать, что *AB* – линия одной конструкции, а *CD* – линия другой конструкции, которая должна быть параллельна линии *AB*. Линия *AB* – неподвижна в системе координат *Oxyz*, а *CD* является подвижной: ее непараллельность *AB* относительно теоретического положения, показанного на рис. 1, определяется углами α и β. Тогда данное угловое звено можно представить в виде манипулятора с двумя вращательными степенями свободы, линия *AB* которого связана с неподвижным основанием, а *CD* – с конечным звеном кинематической цепи манипулятора (рис. 3). Матрица поворота, вычисленная с помощью алгоритма компьютерного вывода

уравнений кинематики манипуляторов [4] и описывающая вращение линии *CD* в системе координат *Oxyz*, имеет вид [6]:

$$R = \begin{bmatrix} -\sin\beta\sin\alpha & -\sin\beta\cos\alpha & \cos\beta \\ \cos\beta\sin\alpha & \cos\beta\cos\alpha & \sin\beta \\ -\cos\alpha & \sin\alpha & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Можно убедиться, выполнив несложные вычисления, что при $\alpha,\beta = 0$ матрица (7) переводит вектор $\overline{CD} = [b_1 \quad b_2 \quad 0]^T$ в систему координат *Oxyz* неподвижной конструкции таким образом, что его координаты становятся равны координатам вектора $\overline{AB}$ в *Oxyz*:

$$R_{\substack{a=0\\b=0}} \cdot \overline{CD} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \\ -b_1 \end{bmatrix} = \overline{AB}, \quad (8)$$

то есть, CD // AB. Если в (8) принять $b_1 = 0$, то результат вычислений будет соответствовать тому, что изображено на рис. 3. В действительности, положение линии CD будет отличаться от теоретической параллельности линии AB на величины, задаваемые в (7) ненулевыми значениями углов α и β, изменяющимися в пределах полей допусков на угловую несоосность.

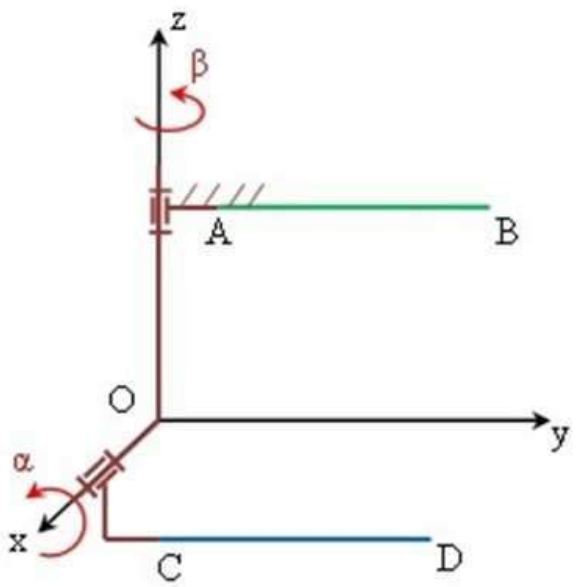


Рис. 3

При сборке корпуса корабля (см. рис. 1) последовательно решаются три одинаковые задачи позиционирования присоединяемого блок-модуля относительно конструкции, связанной с СК стапеля. Каждая из этих задач выполняется в два этапа:

- подведение блок-модуля к имеющейся на стапеле конструкции;
- точное позиционирование блок-модуля относительно конструкции.

Пусть для каждой из соединяемых конструкций используется *m* имеющихся на них базовых точек. Тогда решением задачи будет достижение таких состояний радиус-векторов $r_{ij}(\alpha_i,\beta_i,\gamma_i,\Delta x_i,\Delta y_i,\Delta z_i)$, $j = 1,2,\ldots,m$, при которых все угловые и линейные смещения конструкций одна относительно другой удовлетворяют условиям:

$$|\alpha_i| \leqslant [\alpha],\ |\beta_i| \leqslant [\beta],\ \ldots,\ |\Delta z_i| \leqslant [\Delta z], \quad (9)$$

где в скобках указаны допускаемые значения смещений. Подставив в (1) – (6) нулевые значения, учитывая геометрические параметры блок-модулей и величину зазора под сварку, мы можем вычислить теоретические положения базовых точек P_{ij}. В свою очередь, условия (9) определяют границы областей пространства вокруг теоретических положений, в которые требуется привести базовые точки, контролируя их положения с помощью высокоточных оптико-электронных средств измерений в процессе сборки корпуса корабля. То есть, от ограничений на величины смещений, заданных допусками на несоосность блок-модулей, необходимо перейти к ограничениям на положения базовых точек в СК стапеля. Векторные функции (1) – (3) с этой точки зрения не являются удобными, так как зависят от нескольких аргументов-смещений; поэтому их следует преобразовать так, чтобы получить набор скалярных функций, аргументом каждой из которых было бы только одно смещение. Поиск таких функций в каждом конкретном случае проводится с учетом того, что несоосности должны устраняться поочередно: сначала угловые, а затем – линейные. Желательно также, чтобы искомые функции представляли собой определенно положительные величины.

Найдем требуемые функции для двух соединяемых на стапеле блок-модулей (БМ) с четырьмя контролируемыми базовыми точками (см. рис. 4). Матрица перехода, задающая несоосность $БМ_0$ и $БМ_1$, имеет вид:

$$A = \begin{bmatrix} R & p \\ 000 & 1 \end{bmatrix}, \tag{10}$$

где R определяется равенством (7), $p = [\Delta x \quad 0 \quad \Delta z]^T$. Векторы положений r_j, базовых точек $БМ_1$ относительно начала координат O вычисляются по формуле (1) путем подстановки в нее (10) и равенств, описывающих положения указанных точек в системе координат, жестко связанной с $БМ_1$. Положения базовых точек $БМ_1$ относительно одноименных на $БМ_0$ описываются векторами (при исключенном четвертом столбце):

$$\rho_j = r_j - a_j,\ j = 1,4, \tag{11}$$

где $a_1 = [a\ 0\ 0]^T$;
$a_2 = [-a\ 0\ 0]^T$;
$a_3 = [0\ 0\ -a]^T$;
$a_4 = [0\ 0\ a]^T$;
a – радиус блок-модулей.

Разности векторов положений базовых точек соединяемых блок-модулей (1,2 и 3,4 соответственно) будут иметь вид [7]:

$$\rho_{21} = \rho_2 - \rho_1 = [-2a(\cos\beta - 1) \quad -2a\sin\beta \quad 0]^T, \tag{12}$$

$$\rho_{43} = \rho_4 - \rho_3 = [2a\sin\alpha\sin\beta \quad -2a\sin\alpha\cos\beta \quad 2a(\cos\alpha - 1)]^T, \tag{13}$$

где β – угловое смещение в плоскости ОП,
α – в плоскости ДП.

Возводя в квадрат (12) и (13), получим искомые функции:

$$\varphi_\beta(\beta) = \rho_{21}^T \rho_{21} = 8a^2(1 - \cos\beta); \tag{14}$$

$$\varphi_\alpha(\alpha) = \rho_{43}^T \rho_{43} = 8a^2(1 - \cos\alpha). \tag{15}$$

Определение значений функций (14) и (15) в процессе сборки корпуса корабля не представляет затруднений, так как векторы (11) вычисляются по координатам базовых точек, положения которых в СК стапеля точно измеряются с помощью лазерного трекера. Возможности современных измерительных систем таковы, что информацию о текущих значениях этих функций можно получать в режиме реального времени. С учетом (14) и (15) условия достижения угловой соосности блок-модулей можно записать в виде:

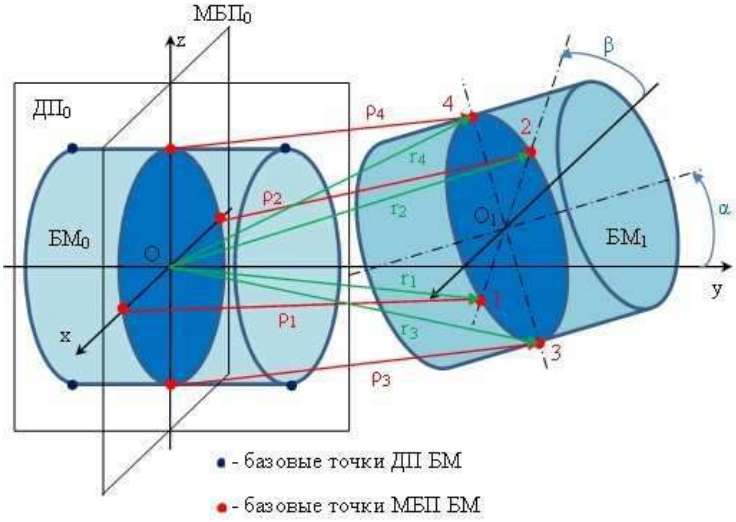


Рис. 4

$$\varphi_\beta \leqslant [\varphi_\beta],\ \varphi_\alpha \leqslant [\varphi_\alpha], \tag{16}$$

где $[\varphi_\beta] = \varphi_\beta([\beta])$, $[\varphi_\alpha] = \varphi_\alpha([\alpha])$ – допускаемые значения величин (14) и (15).

Таким образом, на основе результатов измерений положений базовых точек соединяемых между собой блок-модулей в СК стапеля можно обеспечить угловую соосность блок-модулей с точностью, определяемой заданными допусками. После того, как угловая соосность блок-модулей достигнута, устранение имеющейся линейной несоосности и выставление необходимого зазора под сварку не встретит затруднений. В настоящее время на основе (1) – (16) в АО «ПО «Севмаш» разрабатывается перспективный метод точного позиционирования блок-модулей корабля на стапеле, ориентированный на использование локальных измерительных сетей и трехмерных оптико-электронных средств измерений.

ВЫВОДЫ

1. Задачи точного позиционирования конструкций одна относительно другой, возникающие при сборке корпуса корабля, аналогичны задачам позиционирования объекта в захватном устройстве робота-манипулятора.

2. Алгоритмы автоматизированного формирования уравнений кинематики манипуляторов, основанные на векторно-матричном способе описания положений, могут быть использованы при создании и исследовании аналитических моделей для решения задач позиционирования корпусных конструкций с повышенной точностью.

3. Применение аналитического метода в разработке и теоретическом исследовании методов точного позиционирования блок-модулей в процессе сборки корпуса корабля на стапеле является результативным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будниченко М.А., Спиридонов А.Ю. Модернизация конструкторско-технологической подготовки производства и процессов строительства кораблей//Труды Крыловского государственного научного центра. – Вып. 374, 2015. – с. 187-194.
2. Будниченко М.А., Спиридонов А.Ю., Кузьмин В.В. Разработка и перспективы внедрения позиционно-сборочной технологии строительства атомных подводных лодок//Труды Крыловского государственного научного центра. – Вып. 381, 2017. – с. 133-138.
3. Будниченко М.А., Спиридонов А.Ю. Реализация метода "точной геометрии" при строительстве атомных подводных лодок//Морской вестник: научно-технический и информационно-аналитический журнал. – 2018. – № 2. – с. 25-27.

4. Кузьмин Д.В. Моделирование динамики мехатронных систем. Уравнения и алгоритмы: монография / Д.В. Кузьмин. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2008. – 120 с.
5. Адлерштейн Л.Ц. Точность изготовления и монтажа корпусных конструкций судов/ Л.Ц. Адлерштейн. – Л., Судостроение, 1978. – 256 с.
6. Кузьмин Д.В., Спиридонов А.Ю. Математическое описание звеньев размерных цепей по корпусу судна векторно-матричным способом//Оборона России: информационно-аналитический журнал, № 12, 2018. – с. 46 – 49.
7. Будниченко М.А., Голубкин А.С., Кузьмин Д.В. Обеспечение угловой соосности блок-модулей при сборке основного корпуса подводного корабля с применением локальных измерительных сетей // Труды Крыловского государственного научного центра. – Вып. 3 (389), 2019. – с. 180 – 184.

REFERENCES

1. Budnichenko M.A., Spiridonov A.Yu. *Modernizatsiya konstruktorsko-tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva i protsessov stroitelstva korabley* [Upgrading of design and technological support of production and ship construction processes] Transactions of the Krylov State Research Centre. Publ. 374, 2015, pp. 187 – 194.
2. Budnichenko M.A., Spiridonov A.Yu., Kuzmin V.V. *Razrabotka i perspektivy vnedreniya pozitsionno-sborochnoy tekhnologii stroitelstva atomnykh podvodnykh lodok* [Development and introduction prospects of positional assembling technology in construction of nuclear submarines] Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra [Transactions of the Krylov State Research Centre]. Publ. 381, 2017, pp. 133 – 138
3. Budnichenko M.A., Spiridonov A.Yu. *Realizatsiya metoda "tochnoy geometrii" pri stroitelstve atomnykh podvodnykh lodok* [Realization of "precise geometry" method in construction of nuclear submarines] Morskoy Vestnik: Sientific, Engineering, Information and Analytic Magazine. 2018, No. 2, pp. 25 – 27
4. Kuzmin D.V. *Modelirovanie dinamiki mekhatronnykh sistem. Uravneniya i algoritmy* [Mechatronic systems dynamic modeling. Formulas and algorithms]. Arkhangelsk, ASEU Publ., 2008, 120 p.
5. Adlershtein L.Ts. *Tochnost izgotovleniya i montazha korpusnykh konstruktsiy sudov* [Accuracy in manufacturing and assembly of ship hull structures]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 1978, 256 p.
6. Kuzmin D.V., Spiridonov A.Yu. *Matematicheskoe opisanie zvenev razmernykh tsepey po korpusu sudna vektorno-matrichnym sposobom* [Mathematical descriptions of ship hull dimension chains based on vector-matrix method]. Oborona Rossii: Information and Analytic Magazine. 2018, No. 12, pp. 46 – 49
7. Budnichenko M.A., Golubkin A.S., Kuzmin D.V. *Obespechenie uglovoy soosnosti blok-moduley pri sborke osnovnogo korpusa podvodnogo korablya s primeneniem localnykh izmeritelnykh setey* [Angular alignment of modules in main hull assembling of underwater platform by means of local measurement grids] [Transactions of the Krylov State Research Centre]. Publ. 3(389), 2019, pp. 180 – 184

НЕФТЕГАЗОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 629.5.067.2

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СПАСАТЕЛЬНЫХ ШЛЮПОК АРКТИЧЕСКИХ МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОВЫХ СООРУЖЕНИЙ И ВОЗМОЖНЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ

В.И. Таровик, канд. техн. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: v_tarovik@ksrc.ru
С.И. Косьмин, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: s_kosimin@ksrc.ru
В.И. Димитров, ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, e-mail: V.Dimitrov@adm.gazprom.ru
С.М. Синяков, ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, e-mail: S.Siniakov@adm.gazprom.ru
П.А. Утямишев, ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, e-mail: P.Utiamishev@adm.gazprom.ru

Спасательные шлюпки морских нефтегазовых сооружений во всех своих модификациях практически полностью идентичны спасательным шлюпкам, предназначенным для использования на судах различных типов. Это положение находится в полном соответствии с действующей международной и отечественной нормативной документацией, однако оставляет за пределами своего внимания принципиально значимые для успешности спасательной операции функциональные качества спасательной шлюпки, в частности – ее оптимальный энергетический ресурс, а также плавучесть и непотопляемость в условиях ледового сжатия. Эти факторы требуют отражения в технических требованиях к проектированию арктических спасательных шлюпок, а соответственно – и новых проектных решений. Требует также согласованного понимания и концептуальный вопрос о том, что такое эвакуация персонала и экипажа в приложении к морской нефтегазовой платформе или морской буровой установке. Сведение в единый процесс как технических вопросов создания спасательных шлюпок морских нефтегазовых сооружений, так и положений нормативной документации позволит в перспективе создать и успешно использовать спасательные шлюпки, адекватные условиям их применения в полярных акваториях.

Ключевые слова: *морское нефтегазовое сооружение, эвакуация персонала, спасательная шлюпка, пропульсивный комплекс, двухкорпусная конструкция, общее расположение*

EFFECTIVENESS ASSESSMENT FOR LIFEBOATS OF ARCTIC OFFSHORE OIL AND GAS FACILITIES AND POSSIBLE PROMISING DESIGN SOLUTIONS

V.I. Tarovik, PhD, Krylov State Research Center, St. Petersburg, e-mail: v_tarovik@ksrc.ru
S.I. Kosmin, Krylov State Research Center, St. Petersburg, e-mail: s_kosimin@ksrc.ru
V.I. Dimitrov, PJSC "Gazprom", St. Petersburg, e-mail: V.Dimitrov@adm.gazprom.ru
S.M. Sinyakov, PJSC "Gazprom", St. Petersburg, e-mail: S.Siniakov@adm.gazprom.ru
P.A. Utyamishev, PJSC "Gazprom", St. Petersburg, e-mail: P.Utiamishev@adm.gazprom.ru

Lifeboats of offshore oil and gas facilities in all their modifications are identical to lifeboats intended for use on ships of various types. This provision is in full compliance with the actual international and domestic regulatory documents, however, it leaves out factors that are fundamentally important for the success of the rescue operation, in particular, the lifeboat's optimal energy resource and its buoyancy and unsinkability in conditions of compression of floating ice fields. These factors require being reflected in the technical regulations for the design of Arctic lifeboats, and, accordingly, new design decisions. A coordinated understanding of the conceptual question of what is the evacuation of personnel and crew as applied to an offshore oil and gas platform or offshore drilling rig is also necessary. Combining both the technical issues of creating lifeboats for offshore oil and gas facilities and the provisions of regulatory documentation into one process will allow prospectively to create and successfully use the lifeboats that are adequate to the conditions of their application in polar waters.

Keywords: *offshore oil and gas installations, the evacuation of staff, lifeboat, propulsion complex, double hull construction, general arrangement*

ВВЕДЕНИЕ

При анализе базовых международных и отечественных нормативных документов [1 — 8], можно отметить универсальность и практически полную аналогию технических требований к спасательным шлюпкам морских нефтегазовых сооружений (МНГС) и спасательным шлюпкам, предназначенным для использования на судах. Такая универсальность дает формальные основания для проектирования и строительства спасательных шлюпок и их спусковых устройств без учета, казалось бы, очевидных архитектурно-конструктивных отличий МНГС и судов, а также условий их использования.

Из анализа последствий аварий и хода выполнения спасательных работ, приведенных во многих источниках, в частности в [9 — 11], может быть сделано предположение о том, что назрела необходимость более внимательного учета специфики применения спасательных шлюпок для эвакуации персонала МНГС.

Проблемы при использовании спасательных шлюпок МНГС могут появляться уже в процессе их спуска под воздействием порывов ветра. Поэтому для обеспечения успешности спасательной операции, существенное значение имеет безопасность использования шлюпочного тросового спускового устройства, характерным параметром которого является большая высота спуска [9]. Этот вопрос требует специального рассмотрения, которое планируется выполнить в ближайшем будущем.

Следующим критичным этапом аварийного использования спасательной шлюпки является постановка шлюпки на воду, особенно в условиях сильного волнения. Здесь большую роль играет опыт командира шлюпки, т.е. субъективный человеческий фактор и надежность срабатывания разобщающего устройства.

Собственные функциональные качества спасательной шлюпки начинают играть роль с момента ее постановки на воду. А в связи с тем, что МНГС все шире используются на ледовых акваториях шельфа, в перспективе потребуется адаптация шлюпки к операциям по ее постановке в ледовых условиях, а также дальнейшего управляемого движения и свободного дрейфа. Требует оценки и вопрос о необходимом и целесообразном энергетическом ресурсе ее пропульсивного комплекса. Результаты выполненных проектных работ и накопленная к настоящему времени информация дает основания полагать, что назрела необходимость перехода к следующему эволюционному этапу развития спасательных шлюпок МНГС с переосмыслением некоторых требований нормативной документации к их функциональным качествам [12].

Первым шагом в этом направлении, очевидно, должен быть отход от принципов отмеченной выше формальной универсальности технических требований к спасательным шлюпкам МНГС и спасательным шлюпкам для судов. Проектные особенности спасательных шлюпок морских сооружений должны отражать ряд специфичных для них факторов, том числе:

- различия архитектурно-конструктивных типов МНГС (гравитационные, полупогружные, самоподъемные и МНГС судового типа);
- неподвижность МНГС в течение длительного времени и хорошо известное место расположения в акватории морских работ;
- наличие судов обеспечения в непосредственной близости от МНГС и их постоянная функциональная готовность к выполнению спасательных операций;
- отсутствие практической необходимости выполнения действующих нормативных требований по обеспечению энергетического ресурса пропульсивного комплекса спасательной шлюпки для движения на большие расстояния в течение 24 ч со скоростью 6 уз.;
- необходимость обеспечения движения спасательной шлюпки как по водной, так и по ледовой поверхности на проектное расстояние;
- наличие дрейфующих ледовых полей в окрестности морского сооружения, нагромождений, торосов и стамух;
- оптимизация формы корпуса спасательной шлюпки и обеспечение его ледовой прочности с целью исключения возможного разрушения в условиях ледового сжатия.

Для учета перечисленных выше условий становится актуальным внесение соответствующих дополнений в действующую нормативную документацию по конструкции спасательных шлюпок МНГС и технологии их использования. При этом необходимо также согласованное базовое концептуальное определение процесса эвакуации, ее начала и завершения. В действующих базовых нормативных документах эвакуационная система определяется как «средство для быстрого перемещения людей с посадочной палубы судна на спасательные шлюпки и плоты, находящиеся на воде» [1, гл. III, ч. A, п. 14.]. В отношении персонала аварийной МНГС эвакуационная система, определяемая таким образом, своей задачи по сохранению жизни людей не выполняет, так как они продолжают оставаться в зоне действия поражающих факторов аварии, в непосредственной близости от аварийного МНГС. Тогда к эвакуационной системе целесообразно применить требование о выполнении морской операции по перемещению людей за пределы опасной зоны, в которой они будут находиться в безопасности в течение проектного времени ожидания спасательной операции, подхода морских или воздушных спасательных средств. Соответственно, может быть предложено следующее концептуальное определение эвакуации: «*Эвакуация – это первая и основная часть спасательной операции, целью которой является перемещение людей с аварийного морского сооружения за пределы действия поражающих факторов аварии*». Аналогичные определения приводятся и в некоторых иностранных публикациях [13]. Тогда спасательная шлюпка МНГС становится функциональной частью эвакуационной системы, для которой принципиально значимыми становятся следующие параметры:

- оптимальный энергетический и временной ресурс пропульсивного комплекса, достаточный для ее перехода в зону безопасности и дальнейшего пассивного позиционирования в ожидании выполнения общей спасательной операции;
- способность движения по водной и ледовой поверхности;
- сохранность корпуса в условиях ледового сжатия.

Предложения по основным перспективным направлениям развития арктических спасательных шлюпок МНГС.

Прежде всего, перспективная спасательная шлюпка МНГС должна соответствовать гидрометеорологическим и ледовым условиям ее применения, а также концептуальному определению эвакуации как процесса транспортировки людей за пределы действия поражающих факторов аварии. Соответственно, необходимо оценить, насколько некоторые основные принципиально значимые технические требования, сформулированные в гл. IV базового нормативного документа [2], соответствуют задачам по эвакуации персонала морских нефтегазовых сооружений, работающих в условиях российского шельфа. На основании такой оценки может быть сформулирована концепция дальнейшего функционального развития арктической спасательной шлюпки, а также технические требования к ее проектированию, изготовлению и использованию.

Требования к средствам приведения спасательной шлюпки в движение.

Из ряда основных требуемых проектных параметров, сформулированных в [2], разд. 4.4.6.8, необходимо отметить обязательность обеспечения «движения полностью нагруженной спасательной шлюпки со скоростью 6 узлов в течение не менее 24 часов», т.е. на расстояние порядка 140 морских миль. С точки зрения предлагаемой выше формулировки эвакуации, требование о необходимости такого длительного движения выглядит избыточным. В связи с тем, что позиция МНГС строго фиксирована, а ее промышленная эксплуатация обеспечивается флотом расположенных рядом судов снабжения и обеспечения безопасности, отход спасательной шлюпки на большое расстояние теряет смысл. Соответственно, более целесообразной представляется версия пропульсивной системы спасательной шлюпки, которая могла бы обеспечить кратковременный активный режим ее движения на проектное безопасное расстояние. Тогда снимается необходимость оснащения спасательной шлюпки МНГС дизельным двигателем и его сервисным оборудованием, запасами топлива, масел и пр., значительно упрощаются требования по обеспечению технологической готовности и текущему обслуживанию.

Плавучесть спасательной шлюпки.

Разд. 4.4.4 в [2] не содержит специальных требований по обеспечению плавучести спасательной шлюпки в условиях ледового сжатия. Очевидно, к корпусу спасательной шлюпки, предназначенной для использования в ледовых условиях, должны быть предъявлены требования по соответствующему обеспечению местной и общей прочности, оптимальной форме корпуса, обеспечению герметичности и непотопляемости.

Безусловно, должны выполняться известные требования к функциональным качествам закрытой спасательной шлюпки, в том числе: снабжение, автономность, обитаемость, остойчивость, термостойкость корпуса и пр., следовательно, основные перспективные проектные задачи по адаптации спасательной

шлюпки морского нефтегазового сооружения к арктическим условиям ее использования, могут быть сконцентрированы на следующих направлениях:

- разработка пропульсивного комплекса, обеспечивающего движение спасательной шлюпки по водной и ледовой поверхности на проектное безопасное расстояние;
- разработка корпуса спасательной шлюпки, обеспечивающего герметичность и непотопляемость в условиях ледового сжатия.

Пропульсивный комплекс спасательной шлюпки нового типа.

В соответствии с приведенной выше формулой эвакуации, пропульсивный комплекс спасательной шлюпки должен обеспечить ее движение по водной или ледовой поверхности за пределы зоны вероятного воздействия поражающих факторов аварии МНГС. На безопасном расстоянии спасательная шлюпка должна обеспечить режим аварийного позиционирования (возможно – пассивного дрейфа) и выживания людей в течение расчетного времени общей спасательной операции. Необходимость движения по водной и ледовой поверхности расстояние требует выбора движителя, отличного от гребного винта. Известно, что для обеспечения движения в ледовых полях даже невысокой сплоченности от пропульсивного комплекса с винтовым движителем требуется относительно высокая мощность, которую практически невозможно реализовать в приемлемых габаритах спасательной шлюпки. Из возможных альтернатив могут рассматриваться роторно-винтовые (шнековые) движители и воздушные винты. Работы в этих направлениях ведутся как для спасательных, так и для дежурных шлюпок.

Целью этой статьи является демонстрация возможности использования сжатого газа (воздуха или азота) для создания реактивной тяги истекающей струи, достаточной для движения типовой спасательной шлюпки в течение 2 – 3 мин. Этого времени достаточно для вывода шлюпки за пределы зоны действия поражающих факторов аварии, что и требуется в соответствии с приведенным выше концептуальным определением эвакуации. Научно-техническое обоснование возможности создания такого движителя потребовало выполнения комплекса теоретических и экспериментальных исследований, в результате которых было определено необходимое давление сжатого газа, его объем, параметры соплового устройства и подобрана запорная арматура (рычажный клапан высокого давления). Теоретические исследования режимов хранения сжатого газа в емкостях высокого давления при низких температурах российской Арктики показали отсутствие значимых изменений его физических параметров в течение длительного времени.

На основании этих исследований был построена натурная модель спасательной шлюпки с реактивно-пневматическим движителем и проведены ее мореходные испытания, см. рис. 1.

Рис. 1 Натурные мореходные испытания реактивно-пневматического движителя спасательной шлюпки (фото авторов статьи)

Экспериментально показано, что такой тип движителя способен обеспечить проектный режим движение спасательной шлюпки по водной поверхности. Измерения ускорения и силы тяги движителя на разгонном участке показали значения порядка ~ 5 м/с^2 и ~ 3 т соответственно.

Динамические и кинематические характеристики движения спасательной шлюпки по ледовой поверхности в натурных условиях не исследовались. В условиях гладкого ледового поля, при низких значениях сил трения, пройденное расстояние, очевидно, будет большим. Однако, параметры движения по торосистым ледовым полям, битому и разреженному льду, а также по ледовым полям с невысокой сплоченностью требуют своего исследования.

Конструкция реактивно-пневматического движителя отличается надежностью и простотой, его запуск выполняется поворотом рычага клапана высокого давления. Расчетное время приведения спасательной шлюпки с таким движителем в рабочий режим сокращается на величину около 5 – 6 мин за счет отсутствия технологических операций по подготовке и запуску дизельной энергетической установки. Исключается также проблема хранения и запуска дизеля в условиях низких отрицательных температур. Простота конструкции реактивно-пневматического движителя, отсутствие необходимости текущих регламентных работ, характерных для дизельных двигателей, и широкие возможности увеличения энергетического ресурса за счет повышения давления сжатого газа и увеличения объема емкостей высокого давления дают основания рассчитывать на перспективность его применения.

Необходимо, однако, отметить предстоящие проблемы по согласованию применимости такого движителя с положениями отечественной и международной нормативной документации. Проблематика несоответствия требований действующей нормативной документации реальным условиям применения спасательных шлюпок МНГС в арктических акваториях требует организации широкой дискуссии на эту тему в ближайшее время.

Непотопляемость спасательной шлюпки в условиях ледового сжатия.

Вопрос о выживании спасательной шлюпки в условиях ледового сжатия не является новым [13 — 16]. Известно техническое решение компании Aker Arctic Canada [17], приведенное на рис. 2, которая с 2002 года с различной степенью успешности занимается разработкой закрытой герметичной самоходной спасательной шлюпки для ледовых условий (*Ice strengthened lifeboat, ISL*). В 2016 году была проведена серия модельных испытаний в открытой воде и ледовых условиях. Авторами проекта заявлено, что мореходность шлюпки обеспечена при высоте волнения до 7,5 м и при движении в паковом льду, толщина которого, однако, не сообщается. Шлюпка имеет форму корпуса, устойчивую к воздействию льда, а также надежную пропульсивную систему. Винторулевая система выполнена упрочненной с ледовыми усилениями и конструктивной ледовой защитой. Информации об использовании спасательной шлюпки этого проекта на действующих МНГС нет, поэтому, скорее всего, работа над проектом ISL продолжается и в настоящее время.

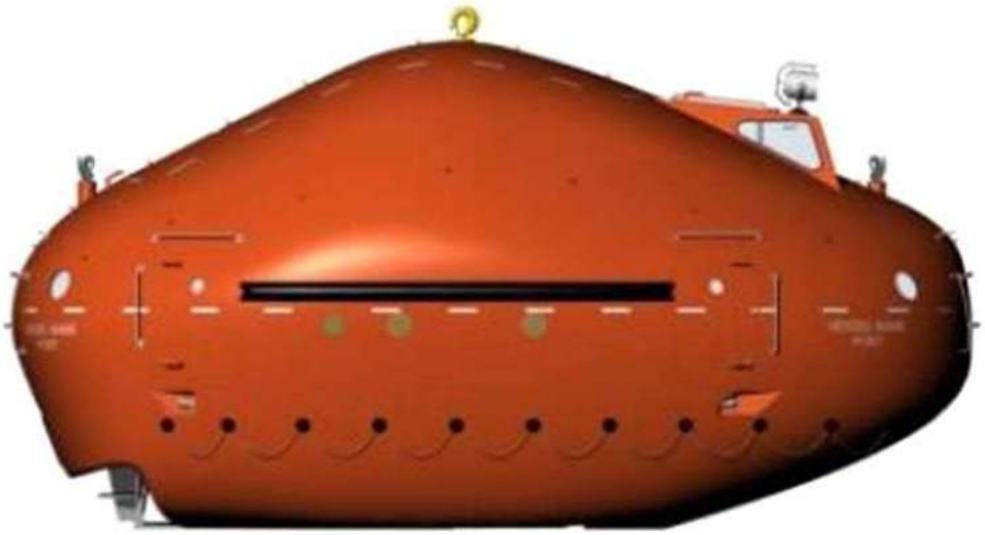


Рис. 2 Концептуальный проект арктической шлюпки (Ice strengthened lifeboat, ISL) компании Aker Arctic Canada. (источник фото — Aker Arctic Technology Inc Newsletter, https://akerarctic.fi/app/uploads/2019/05/arctic_passion_news_1_2017_Ice-strengthened-Lifeboat.pdf)

На основании общей архитектуры спасательной шлюпки типа ISL, при сопоставлении ее основных параметров с аналогичными образцами, можно сделать некоторые предварительные выводы (см. табл. 1). В частности, напрашивается вывод о том, что стремление реализовать упрочненную арктическую спасательную шлюпку за счет формы корпуса и его ледовых усилений, а также повышения мощности энергетической установки, приводят к проектным решениям, которые сложно связать с типовыми параметрами спасательных шлюпок аналогичной вместимости. Из табл. 1 видно, насколько громоздким получается вариант шлюпки типа ISL. Ее вес и размерения получаются близкими к основным параметрам спасательных шлюпок с вдвое большей вместимостью, а мощность энергетической установки почти в шесть раз выше аналогов. Понятно, что это плата за повышенные ледовые качества ISL и, вероятно, это будет серьезным препятствием в ее продвижении к широкому использованию.

Таблица 1

Технические параметры некоторых типов спасательных шлюпок

Тип полностью закрытой спасательной шлюпки	Изготовитель. Поставщик	Вес при полной загрузке, тонн	Д/Ш/В/О L/B/H/D, метр	Мощ-ность, кВт	Вмести-мость, чел.
ISL Ice Strengthened Lifeboat	Aker Arctic (Canada), Robert Allan Ltd.	19,4	10,0/5,4/6,0/–	191	60
NM75F	Ningbo New Marine Lifesaving Equipment Co.Ltd. (China)	8,03	7,5/2,8/3,1/1,2	20,6	60
NM85F	Ningbo New Marine Lifesaving Equipment Co.Ltd. (China)	11,67	8,5/3,2/3,1/–	20,6	85
MM58F	Zhenjiang Matchau Marine Equipment Co., Ltd. (China)	7,26	5,8/2,9/3,1/1,2	—	52
MM80F	Zhenjiang Matchau Marine Equipment Co., Ltd. (China)	9,60	8,0/2,9/3,1/1,2	—	72
GRB75F	Chongqing Gathering Marine Equipment Co., Ltd. (China)	7,86	7,6/2,8/3,1/1,2	20,6	55
GRB80F	Chongqing Gathering Marine Equipment Co., Ltd. (China)	8,86	8,0/3,0/3,1/1,2	20,6	65
GR117F	Chongqing Gathering Marine Equipment Co., Ltd. (China)	18,6	11,7/3,6/3,4/1,3	20,6	150
JYN 74	VIKING Norsave Life-saving Equipment (Norway)	7,70	7,4/2,7/3,0/1,1	20,6	52
JYN 75	VIKING Norsave Life-saving Equipment (Norway)	9,80	7,5/3,2/3,3/–	20,6	68
JYN 115	VIKING Norsave Life-saving Equipment (Norway)	19,6	11,6/3,8/3,5/–	30,0	136
YZ75F	ООО «Компания Топ Марин», (Россия)	8,25	7,5/2,8/–/–	20,6	66
YZ85F	ООО «Компания Топ Марин», (Россия)	11,7	8,5/3,2/–/–	20,6	91
KISS 800 T	PALFINGER Marine (Austria)	10,1	8,6/2,9/2,9/–	—	70
LBT 750 T	NOREQ (Norway)	8,61	7,5/2,9/3,3/–	—	68
LBT 1180 T	NOREQ (Norway)	22,0	11,8/4,2/3,7/–	33,5	150
DY-QFP-8.50	Deyuan Marine Co Ltd. (China)	9,68	8,5/3,1/3,1/1,2	—	63

При разработке российской спасательной шлюпки, предназначенной для использования в ледовых акваториях, необходимо решить вопрос о приоритетах. В проекте ISL приоритетной целью является естественное стремление сохранить герметичность корпуса в условиях ледового сжатия и обеспечить требуемые параметры ходкости в паковых льдах. Проектное решение такой задачи требует соответствующего формирования корпуса, обеспечения его проектной ледовой прочности, расположения относительно мощной энергетической установки и технических средств обеспечения обитаемости для 60 чел.

В авторской концепции, изложенной в этой статье, для арктической спасательной шлюпки предусматривается проектное решение, при котором герметичность и непотопляемость в условиях ледового сжатия требуется только от обитаемого прочного объема спасательной шлюпки. Тогда целесообразным вариантом обеспечения выживания людей в обитаемом объеме спасательной шлюпки является ее двухкорпусная компоновка. При этом, внешний легкий корпус шлюпки обеспечивает ее мореходные качества, а внутренний прочный корпус обитаемого объема обеспечивает безопасность расположенных в нем людей.

Проектным сценарием позиционирования спасательной шлюпки в дрейфующем ледовом поле предусматривается возможное разрушение легкого корпуса. При этом прочный корпус сохраняет свою прочность и герметичность и должен выдавливаться на поверхность силами ледового сжатия.

Проектное предложение общего расположения арктической спасательной шлюпки МНГС.

В соответствии с концептуальным определением эвакуации, т.е. необходимостью обеспечения движения спасательной шлюпки по водной и ледовой поверхности на безопасное расстояние, а также в связи с требованиями по выживаемости в условиях ледового сжатия, необходима коррекция технических требований к функциональным качествам арктической спасательной шлюпки. Некоторые возможные проектные решения для арктической спасательной шлюпки нашли отражения в патентах [18, 19].

Коррекция облика спасательной шлюпки и ее трансформация в арктический вариант, предназначенный для использования на МНГС, ведет к изменению общего расположения. Возможным вариантом может быть

такое проектное решение, при котором распложенные по бортам спасательной шлюпки баллоны, заполненные газом высокого давления, являются заменой дизельному двигателю и гребному винту.

Второй отличительной особенностью арктической спасательной шлюпки является ее двухкорпусное исполнение, позволяющее избежать разрушения обитаемого объема спасательной шлюпки в условиях ледового сжатия. В дополнение, такая компоновка дает возможность значительно повысить противопожарную защиту за счет размещения в межбортном пространстве термоизолирующих материалов.

Конфигурация днища арктической спасательной шлюпки должна обеспечить устойчивость прямолинейного движения по водной поверхности, а также по торосистому и покрытому снегом льду.

Еще один аспект общего проектирования требует своего обоснования. Так, при проектировании арктической спасательной шлюпки для конкретного МНГС необходимо выполнить обоснование ее вместимости. В [1] отмечается только ограничение по максимально допустимой вместимости спасательной шлюпки, равной 150 чел. Очевидно, параметр вместимости должен оцениваться на основании расчетов времени эвакуации при различных вариантах проектных аварий. Процесс эвакуации требует высокой скорости выполнения всех технологических операций, среди которых большое значение имеет время размещения людей в спасательной шлюпке. Концепция двухкорпусной арктической спасательной шлюпки предполагает целесообразным размещение в ней 20 — 25 чел. При этом основные проектные параметры шлюпки находятся в пределах типовых весов и размерений типовых закрытых танкерных шлюпок аналогичной вместимости.

Концепция общего расположения двухкорпусной арктической шлюпки с реактивно-пневматическим движителем, использующим энергию сжатого газа (воздуха или азота) отражена в патенте [20] и приведена на рис. 3.

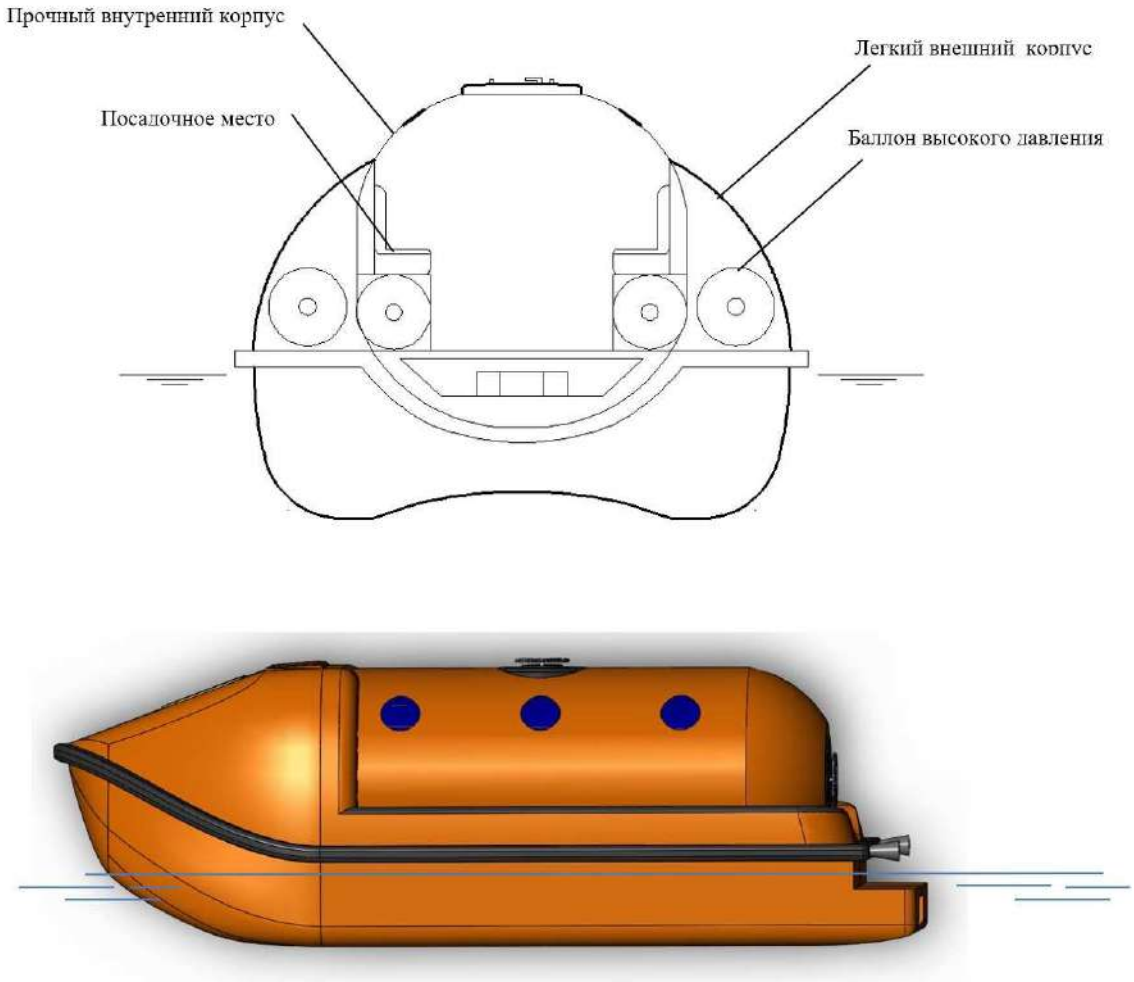


Рис. 3 Концепция общего расположения двухкорпусной арктической шлюпки
(авторское концептуальное проектное решение)

ВЫВОДЫ

Активное развитие офшорной морской техники, предназначенной для работы на российском арктическом нефтегазовом шельфе, требует определенного пересмотра концепции эвакуации персонала и экипажа морских нефтегазовых платформ и морских буровых установок. Такой вывод следует из обобщенной оценки эффективности используемых на морских сооружениях спасательных шлюпок, на которую в значительной степени влияют известные арктические условия. Соответственно, требуются новые научно-технические и проектные решения, возможность принятия которых, в свою очередь, связана с разработкой и согласованием определенных дополнений и коррекций соответствующих разделов нормативной документации.

В частности, определение эвакуации как процесса перемещения людей с аварийного морского сооружения за пределы действия поражающих факторов аварии дает возможность коррекции требований к энергетическому ресурсу пропульсивного комплекса спасательной шлюпки в сторону его упрощения и проектного сокращения времени действия. Таким научно-техническим и проектным решением является, например, реактивно-пневматический движитель, в котором используется сила реактивной тяги струи сжатого газа. Его работоспособность была теоретически обоснована и экспериментально подтверждена.

Вторым принципиально значимым фактором безопасности эвакуационной операции является обеспечение выживания людей, находящихся в спасательной шлюпке, подверженной разрушительным воздействиям ледового сжатия. Использование двухкорпусной конструкции позволяет сохранить герметичность и непотопляемость обитаемого прочного корпуса, который под действием внешних сил выдавливается на ледовую поверхность, при этом легкий внешний корпус теряет герметичность и разрушается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SOLAS-74. Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море. [SOLAS-74. International Convention for the Safety of Life at Sea]. Режим доступа: http://library.arcticportal.org/1696/1/SOLAS_consolidated_edition2004.pdf
2. Международный кодекс по спасательным средствам (Кодекс КСС/LSA). [LSA Code – International Life-Saving Appliance Code]. Режим доступа: http://www.racingyachtmanagement.com/misc/lsa_code.pdf
3. Правила по оборудованию морских судов. Часть II. Спасательные средства. Российский Морской Регистр Судоходства, 2020
4. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. Часть XVII. Спасательные средства. Российский Морской Регистр Судоходства, 2019.
5. Правила классификации, постройки и оборудования морских плавучих нефтегазодобывающих комплексов. Российский Морской Регистр Судоходства, 2020.
6. Руководство по техническому наблюдению за судами в эксплуатации. Российский Морской Регистр Судоходства. 2020.
7. ГОСТ Р 53451-2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Средства спасения экипажей инженерных сооружений, эксплуатируемых на акваториях, коллективные. Актуализация 01.06.2019 г.
8. Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс). ЦНИИМФ, С.-Петербург, 2016.
9. Oil Rig Disasters. Offshore Drilling Accidents. Режим доступа: http://members.home.nl/the_sims/rig/index.htm
10. Accident Investigation. The Nautical Institute Reports. Режим доступа: https://www.nautinst.org
11. Lang J.S. Review of Lifeboat and Launching Systems' Accidents. Safety Study 1/2001. Режим доступа: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/377610/Lifeboat_Study.pdf
12. Таровик В.И., Косьмин С.И., Димитров В.И., Синяков С.М., Утямишев П.А. Эвакуационные системы и спасательное оборудование морских нефтегазовых сооружений в Арктике. Offshore Russia, № 4 [22], ноябрь 2018.
13. Poplin J., Wright B., Dickins D. Overview and Background of Escape, Evacuation and Rescue of Offshore Personnel in the Arctic. 2014.
14. Kennedy A., Simoes Re A.J., Veitch B. Operational Limitations of Conventional Lifeboats in Sea Ice. NRC Publications Archive, Canada
15. Simoes Re A.J., Veitch S. Evacuation in Ice: Ice Loads on a Lifeboat During Field Trials. OMAE2013-10689, June 9 – 14, 2013, Nantes, France.
16. Nedrevag K. Requirements and concepts for arctic evacuation. Master Thesis, delivered 14.06.2011.
17. Model testing of Ice Strengthened Lifeboat. Aker Arctic Technology Inc. Newsletter. Arctic Passion News 1/2017/13.
18. Спасательная шлюпка закрытого типа для эвакуации и спасания персонала с морских объектов в ледовых условиях. Патент РФ № 2648 620. Дата регистрации 27.03.2017 г.
19. Спасательная шлюпка закрытого типа для эвакуации и спасания персонала морских нефтегазовых платформ, транспортных и технологических судов в ледовых условиях. Патент РФ № 2630871. Дата регистрации 13.09.2017 г.
20. Двухкорпусная спасательная шлюпка закрытого типа для эвакуации и спасания персонала и экипажа морских объектов в ледовых условиях. Патент РФ № 2 708 067. Дата регистрации 04.12.2019 г.

REFERENCES

1. *SOLAS-74. Mezhdunarodnaya Konventsiya po okhrane chelovecheskoy zhizni na more.* [SOLAS-74. International Convention for the Safety of Life at Sea]. Accessed at: http://library.arcticportal.org/1696/1/SOLAS_consolidated_edition2004.pdf

2. *Mezhdunarodnyy kodeks po spasatelnym sredstvam (Kodeks KSS / LSA)* [LSA Code – International Life-Saving Appliance Code]. Accessed at: http://www.racingyachtmanagement.com/misc/lsa_code.pdf
3. Rules for the Equipment of Sea-Going Ships. Part II. Life-Saving Appliances. Russian Maritime Register of Shipping, 2020. (In Russian)
4. Rules for the Classification, Construction and Equipment of Mobile Offshore Drilling Units and Offshore Fixed Platforms. Part XVII. Life-saving appliances. Russian Maritime Register of Shipping, 2018. (In Russian)
5. Rules for the Classification, construction and Equipment of Floating Offshore Oil-and-Gas Production Units. Russian Maritime Register of Shipping, 2020. (In Russian)
6. Guidelines on Technical Supervision of Ships in Service. Russian Maritime Register of Shipping, 2020. (In Russian)
7. *GOST R 53451-2009. Sredstva spaseniya ekipazhey inzhenernykh sooruzheniy, ekspluatiruyemykh na akvatoriyakh, kollektivnyye* [Means of rescue of the crews of engineering structures operated on water areas, collective.] (in Russ). Updated 01.06.2019 y
8. *Mezhdunarodnyy kodeks dlya sudov, ekspluatiruyushchikhsya v polyarnykh vodakh* [The International Code for Ships Operating in Polar Waters]. TSNIIMF, St. Petersburg, 2016.
9. Oil Rig Disasters. Offshore Drilling Accidents. Accessed at: http://members.home.nl/the_sims/rig/index.htm
10. Accident Investigation. The Nautical Institute Reports. Accessed at: https://www.nautinst.org
11. Lang J.S. Review of Lifeboat and Launching Systems' Accidents. Safety Study 1/2001. Accessed at: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/377610/Lifeboat_Study.pdf
12. Tarovik V.I., Kosmin S.I., Dimitrov V.I., Sinyakov S.M., Utyamishev P.A. *Evakuatsionnye sistemy i spasatelnoye oborudovaniye morskikh neftegazovykh sooruzheniy v Arktike.* [Marine evacuation systems and rescue equipment of oil and gas facilities in the Arctic] Offshore Russia, No. 4 [22], November 2018.
13. Poplin J., Wright B., Dickins D. Overview and Background of Escape, Evacuation and Rescue of Offshore Personnel in the Arctic. 2014.
14. Kennedy A., Simoes Re A.J., Veitch B. Operational Limitations of Conventional Lifeboats in Sea Ice. NRC Publications Archive, Canada
15. Simoes Re A.J., Veitch S. Evacuation in Ice: Ice Loads on a Lifeboat During Field Trials. OMAE2013-10689, June 9-14, 2013, Nantes, France.
16. Nedrevag K. Requirements and concepts for arctic evacuation. Master Thesis, delivered 14.06.2011.
17. Model testing of Ice Strengthened Lifeboat. Aker Arctic Technology Inc. Newsletter. Arctic Passion News 1/2017/13.
18. Closed lifeboat for evacuation and rescue of personnel from marine objects in ice conditions. RF Patent No. 2648620. Registration date 03.27.2017.
19. Closed lifeboat for evacuation and rescue of personnel of offshore oil and gas platforms, transport and technological vessels in ice conditions. RF patent No. 2630871. Registration date 13.09.2017
20. Double hull rescue boat of a closed type for the evacuation and rescue of personnel and crew of offshore facilities in ice conditions. RF Patent No. 2708067. Registration date 12.04.2019.

УДК 629.5.067.3

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И НОВОЕ ПРОЕКТНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ СПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ СПАСАТЕЛЬНЫХ ШЛЮПОК МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОВЫХ СООРУЖЕНИЙ

В.И. Таровик, канд. техн. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: v_tarovik@ksrc.ru
С.И. Косьмин, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: s_kosimin@ksrc.ru
В.И. Димитров, ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, e-mail: V.Dimitrov@adm.gazprom.ru
С.М. Синяков, ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, e-mail: S.Siniakov@adm.gazprom.ru
П.А. Утямишев, ПАО «Газпром», Санкт-Петербург, e-mail: P.Utiamishev@adm.gazprom.ru

В статье рассматривается вопрос о функциональной устойчивости тросовой спусковой системы спасательной шлюпки морского нефтегазового сооружения. Технологические риски морской спусковой операции во многом определяются высоким расположением спусковой рампы, когда при аварийном спуске загруженной спасательной шлюпки она может попасть под воздействие ветровых порывов, столкнуться с опорными конструкциями или бортом морского сооружения. Анализ материалов аварий на морских нефтегазовых сооружениях показывает катастрофические последствия реализации такого сценария. Кроме разрушения корпуса спасательной шлюпки вероятно также нештатное срабатывание разобщающего устройства, ее зависание или падение. С целью исключения подобных событий в статье предлагается использовать конструктивные особенности спусковой рампы морского нефтегазового сооружения и расположить спасательную шлюпку на специальной демпфированной спусковой платформе.

Ключевые слова: *спусковое устройство, функциональная устойчивость спускового устройства, эвакуация персонала, гравитационное морское сооружение, полупогружная буровая установка, самоподъемная буровая установка*

URGENT ISSUES OF FUNCTIONAL SUSTAINABILITY AND NEW DESIGN SOLUTIONS FOR LAUNCHING DEVICES OF LIFEBOATS ON OFFSHORE OIL AND GAS FACILITIES

V.I. Tarovik, PhD, Krylov State Research Center, St. Petersburg, e-mail: v_tarovik@ksrc.ru
S.I. Kosmin, Krylov State Research Center, St. Petersburg, e-mail: s_kosimin@ksrc.ru
V.I. Dimitrov, PJSC "Gazprom", St. Petersburg, e-mail: V.Dimitrov@adm.gazprom.ru
S.M. Sinyakov, PJSC "Gazprom", St. Petersburg, e-mail: S.Siniakov@adm.gazprom.ru
P.A. Utyamishev, PJSC "Gazprom", St. Petersburg, e-mail: P.Utiamishev@adm.gazprom.ru

The article considers the issue of the functional sustainability of the system for lifeboat launch from an offshore oil and gas platform. Technological risks of the sea launch are largely determined by the high level of positioning of the launch ramp above the water line. During an emergency launch of a loaded lifeboat it can be affected by wind gusts and collide with supporting structures of the platform. An analysis of accident data on offshore oil and gas rigs and platforms has shown the disastrous consequences of such a scenario. In addition to the destruction of the hull of a lifeboat, the possibility of the lifeboat release mechanism damage may also lead to lifeboat hanging or falling down. In order to eliminate the possibility of such outcomes, the article proposes the application of the design features of the offshore oil and gas structure launch ramp and to place the lifeboat onto a special damped descent platform.

Keywords: *lifeboat davit, functional sustainability of the davit, evacuation of staff, gravitational marine installation, semi-submersible drilling rig, jack-up drilling rig*

ВВЕДЕНИЕ

Анализ результатов исследований морских аварий, связанных с необходимостью эвакуации людей с аварийных судов или морских нефтегазовых сооружений (МНГС) [1], показывает, что успешность спасательной операции во многом зависит от процесса спуска загруженных спасательных шлюпок. Можно также утверждать, что спуску спасательных шлюпок соответствуют максимальные риски среди всех этапов спасательной операции. Как следствие реализации этих рисков, на этапе выполнения спусковых операций, происходит наибольшее количество инцидентов, имеющих фатальные последствия. Во многом это связано с технологическими трудностями, а часто – и с невозможностью управления спуском шлюпки в реальных

условиях. Для того, чтобы спусковое устройство соответствовало реальным условиям его использования, оно должно обладать высокой степенью функциональной устойчивости, т.е. противодействовать внешним возмущениям в процессе спусковой операции.

Морская операция по спуску коллективных спасательных средств имеет свои сложности как в безледовых, так и в ледовых акваториях арктического шельфа, при этом основными факторами, определяющими эффективность спусковой операции, являются ветер, волнение, низкие температуры воздуха, а также параметры сплоченности и торосистости ледового поля. Необходимо также отметить сложность постановки спускаемой шлюпки на воду при волнении, когда механизм разобщения шлюпки и тросовой системы должен отстегнуть шлюпку одновременно от носового и кормового спусковых тросов. Командир шлюпки должен выполнить эту ответственную операцию в момент, когда шлюпка находится на подошве волны, так чтобы при подъеме шлюпки на гребень волны не было нагрузки на гаках.

При всей сложности учета этих факторов, дополнительным важнейшим качеством морских нефтегазовых сооружений, определяющих успешность спусковой операции, является необходимость спуска спасательных средств с большой высоты. Этот параметр крайне важен при оценке эффективности как коллективных, так и индивидуальных спасательных средств. Из описания аварии в [2] видно, насколько уязвима гравитационная тросовая система спуска спасательной шлюпки с морской платформы. Может показаться странным, но фактор высоты не нашел отражения в действующей нормативной документации, где, как отмечено в [1], очевидны прямые аналогии по конструкции спусковых устройств как для судов, так и морских платформ.

Соответственно, проявляются два наиболее ответственных фактора, определяющих функциональную устойчивость спускового устройства и успешность спусковой операции – высота спуска загруженной шлюпки и надежность разобщающего устройства спасательной шлюпки.

Отдельно отметим, что в последние годы активно развивается направление по использованию на морских сооружениях шлюпок свободного падения, идея применения которых пришла из танкерного флота. Целесообразность использования такой технологии эвакуации с высокого борта аварийных морских нефтегазовых сооружений еще требует проверки временем, и сегодня нет примеров их успешного применения в условиях реальных аварий. При этом, определяющим фактором, делающим невозможным их применение на российском арктическом шельфе и в акваториях полуострова Сахалин, очевидно, является наличие ледовых полей в течение длительного времени года. Возможность использования шлюпок свободного падения в штормовую погоду также требует своего обоснования.

Поразительно малый процент успешных спусковых операций при покидании персоналом и экипажами аварийных морских сооружений [3] требует отхода от универсальности инженерных решений и отмеченных выше аналогий. В связи с расширением промышленной активности на российском арктическом шельфе, актуальными являются разработки специальных, специфичных для каждого типа морских нефтегазовых платформ, спусковых устройств. Соответственно, требуется и разработка нормативной документации, в которой отражалась бы эта специфика.

В связи с этим представляется целесообразным еще раз подчеркнуть основные технически требования к конструкции спусковых устройств:

- обеспечение плавного безопасного спуска спасательных средств с большой высоты в условиях ветра и волнения;
- необходимость специальных проектных решений для платформ определенных типов;
- минимизация требований по техническому обслуживанию;
- минимизация времени спусковых операций;
- высокий уровень текущей технологической готовности;
- простота и надежность конструкции;
- минимизация затрат на изготовление, поставку, монтаж, хранение и обслуживание.
- возможность многократного использования для плановых операций по спуску и подъему людей и грузов.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПУСКОВЫХ УСТРОЙСТВ ОСНОВНЫХ ТИПОВ МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПЛАТФОРМ

Хорошо известны основные общие требования [4] к спусковым устройствам судов и морских сооружений:

- обеспечивать безопасный спуск нагруженных шлюпок при дифференте до 100 и крене до 200 на любой борт,
- спуск спасательных средств должен осуществляться только под действием силы их тяжести, т.е. спуск должен быть гравитационным;

- минимум текущего технического обслуживания, все части спускового устройства должны быть легко доступными для экипажа, а их обслуживание – легко выполнимым;
- спусковые устройства (за исключением тормозов лебедки) должны быть прочными и выдерживать нагрузку в 2,2 раза большую максимальной рабочей нагрузки, а конструктивные элементы иметь минимальный запас прочности 4,5;
- оставаться работоспособными в условиях обледенения;
- обеспечивать безопасную посадку людей в шлюпку.

Выполнение этих требований не гарантирует, однако, успешности спусковой операции в условиях ветра и волнения. Характерным примером практической невозможности использования тросовых гравитационных спусковых устройств в условиях даже умеренной штормовой погоды является катастрофа самоподъемной нефтяной платформы на месторождении Гюнешли в Каспийском море в декабре 2015 года. [2]. Здесь проявилась отмеченная выше проблема надежности разобщающих устройств спасательных шлюпок и фактор высоты спуска.

Для промышленного освоения российского арктического нефтегазового шельфа используются морские платформы трех основных типов:

- гравитационные (тип МЛСП «Приразломная»);
- полупогружные (тип ППБУ «Полярная звезда»);
- самоподъемные (тип СПБУ «Арктическая»).

Следует отметить, что характерным проектным решением для морских платформ, перечисленных выше типов является расположение спасательных шлюпок на спусковой рампе, вынесенной за пределы основных размерений сооружения. При этом спуск шлюпок производится с использованием тросовой системы, не имеющей функциональных различий со своим судовым аналогом. Как отмечено выше, использование тросовых спусковых систем на высоких морских сооружениях имеет принципиально значимый для безопасности спусковых операций недостаток – способность к раскачиванию под воздействием порывов ветра во время спуска спасательной шлюпки. Здесь фактор высоты имеет определяющее значение.

Для спасения и эвакуации персонала МЛСП «Приразломная» в состав спасательного оборудования входят четыре спасательные шлюпки танкерного типа (3×68 чел., 1×60 чел.), в исходном положении расположенные на спусковой рампе (см. рис. 1) и раскрепленные на тросовых спусковых устройствах в защитном контейнере.

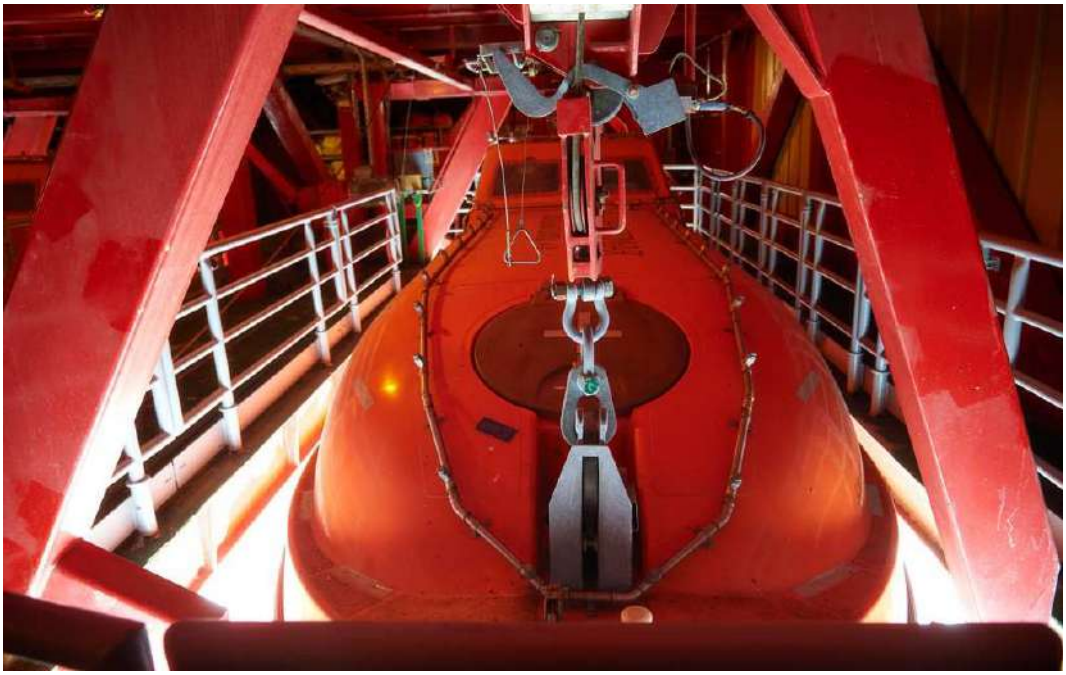


Рис. 1 Расположение спасательных шлюпок МЛСП «Приразломная» на спусковой рампе.
(источник фото: — Остров безопасности. Газпром нефть.
https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2016-april/1113029/)

Из рис. 2 видно, что при спуске шлюпки в условиях штормовой погоды, при резких порывах возможны ее удары о корпус платформы. При высоте расположения спусковой рампы ~ 20 м в течение проектного времени спуска ~ 20 с резкий порыв может раскачать спасательную шлюпку, нанести повреждения ее корпусу, подвергая риску гибели находящихся в ней людей. Как уже отмечено выше, попытка спуска спасательных шлюпок при пожаре на СПБУ в Каспийском море на месторождении Гюнешли, [2], привела к реализации именно такого катастрофического сценария.

Рис. 2 Спуск спасательной шлюпки МЛСП «Приразломная»
(фото выполнено в ПАО «Газпром» и предоставлено для публикации авторами статьи)

Аналогичные проектные решения применяются также на ППБУ «Полярная звезда», где на спусковой рампе с тросовой системой спуска установлены 4×64 чел. спасательные шлюпки танкерного типа. На рис. 3 показано исходное расположение шлюпки в защитном контейнере.

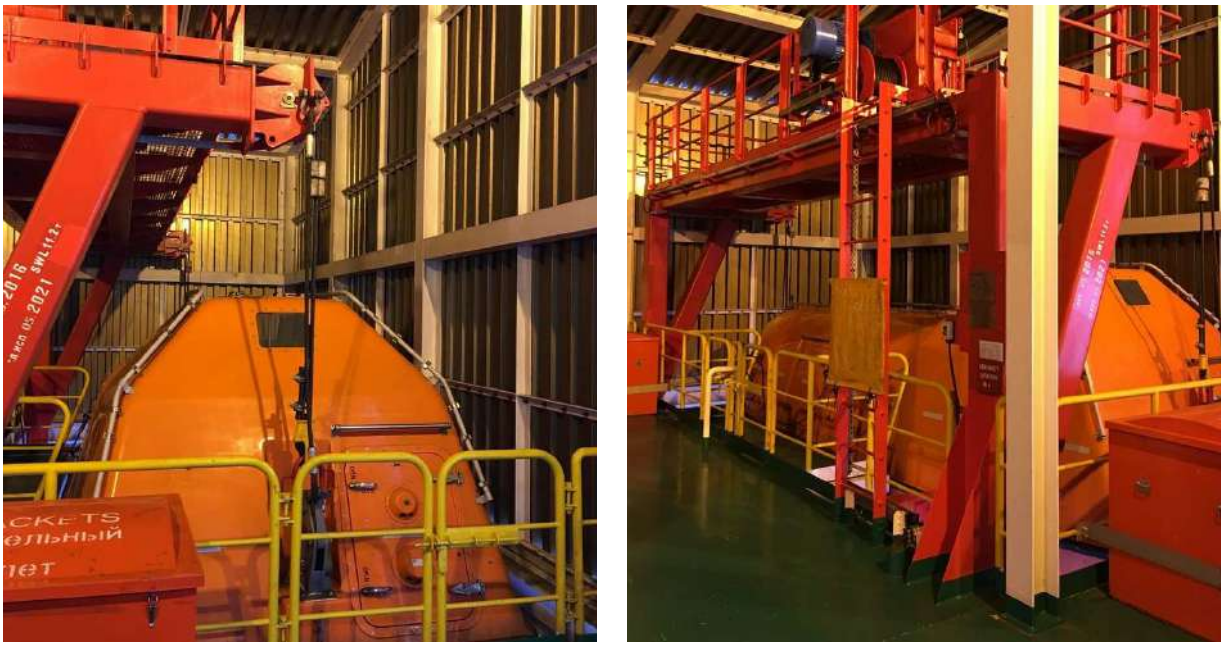


Рис. 3 Расположение спасательной шлюпки на спусковой рампе ППБУ «Полярная звезда»
(фото выполнено в ПАО «Газпром» и предоставлено для публикации авторами статьи)

На СПБУ «Арктическая» спусковая рампа не имеет метеорологической защиты (см. рис. 4), а в остальном для тросовой спусковой системы использованы аналогичные МЛСП и ППБУ технические решения.

Рис. 4 Расположение спасательной шлюпки на спусковой рампе СПБУ «Арктическая»
(фото выполнено в ПАО «Газпром» и предоставлено для публикации авторами статьи)

Уязвимость тросовой системы морских сооружений требует разработки инженерно-технических и проектных решений, которые могли бы повысить функциональную устойчивость спускового оборудования. Одним из возможных научно-технических и проектных направлений является разработка устройств, позволяющих контролировать движение спускаемой спасательной шлюпки под действием штормовых порывов ветра в горизонтальной плоскости.

Вторым отмеченным выше фактором, в большой степени определяющим безопасность спусковой операции, является функциональная устойчивость разобщающего устройства. Его конструкция должна обеспечивать разобщение шлюпки от удерживающей ее тросовой системы в двух вариантах. Один вариант отсутствия нагрузки, например, при восхождении шлюпки на гребень волны, второй – под нагрузкой. Этот способ должен предусматривать надежную защиту от случайного или преждевременного разобщения. Строгое следование требованиям [4], однако, не дает гарантий от сбоя в работе разобщающих устройств. В средствах информации приводятся многочисленные случаи его самопроизвольного срабатывания.

Статистические исследования показали, что основной причиной аварий со спасательными шлюпками является отказ оборудования, в рамках которого отказ механизма снятия нагрузки определяется как наиболее частая причина несчастных случаев со смертельным исходом. Общей чертой этих явлений было непроизвольное освобождение одного или обоих носового и кормового гаков. Аварийные инциденты, связанные с нарушением работы разобщающего устройства происходят не только в условиях аварий на морских сооружениях, но также и при спуске и подъеме спасательных шлюпок во время тренировочных операций, [5]. Классификация инцидентов со спасательными шлюпками и их спусковыми системами приведена, например, в [6].

2. ПРОЕКТНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОНТРОЛИРУЕМОГО СПУСКА СПАСАТЕЛЬНОЙ ШЛЮПКИ МОРСКОГО НЕФТЕГАЗОВОГО СООРУЖЕНИЯ

Главными проблемными факторами, влияющими сегодня на успешность спусковой операции, являются:

- риск аварийного раскачивания спускаемой шлюпки в горизонтальной плоскости под воздействием разнонаправленных ветровых порывов;

- риск обрыва, преждевременного срабатывания или отказа разобщающего устройства спасательной шлюпки.

Эти проблемные факторы определяют актуальность задачи по разработке технических средств контроля движения шлюпки в процессе ее спуска, соответственно необходим поиск проектных решений, позволяющих исключить отмеченные аварийные риски. В качестве одного из таких проектных решений может быть рассмотрен вариант, схема которого показана на рис. 5, когда спасательную шлюпку предлагается установить на спусковой платформе. В своем нижнем положении спусковая платформа может быть заглублена под поверхностный слой воды или расположена на ледовой поверхности.

Такое проектное решение позволяет создать инструменты управления перечисленными выше рисками, а именно:

- обеспечить поглощение энергии ветрового порыва, вызывающего движения шлюпки в горизонтальной плоскости и удержать спусковую платформу от столкновения с бортом или опорной конструкцией морского сооружения специальным упором;
- разработать технические средства активного противодействия силовому воздействию ветрового порыва;
- исключить необходимость управления носовым и кормовым разобщающими устройствами шлюпки, а в перспективе – исключить эти устройства из конструкции шлюпки.

Поглощение энергии ветрового порыва может быть реализовано, например, в конструкции спусковой платформы с использованием упорного гидравлического демпфера с высоким коэффициентом динамической вязкости рабочей жидкости. В качестве иллюстрации расчетные оценки кинематических параметров демпфированной спусковой платформы при ее предельном апериодическом движении приведены на рис. 5.

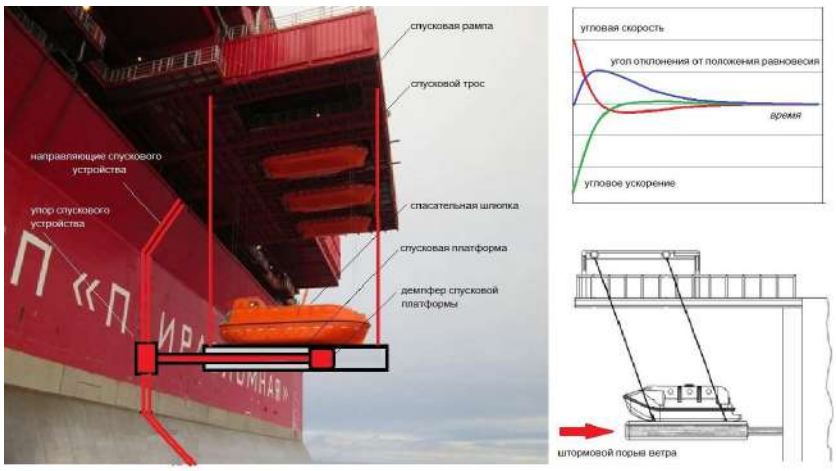


Рис. 5 Вариант расположения демпфированной спусковой платформы ЛСП «Приразломная» (авторское концептуальное решение)

В дополнение к варианту пассивного управления спуском спасательной шлюпки за счет использования эффекта вязкостного демпфирования в конструкции упора ее спусковой платформы, могут быть рассмотрены и проектные варианты активного противодействия силе ветрового порыва. В этом случае задача будет состоять в обеспечении силового удержания спусковой платформы в исходном состоянии равновесия, причем параметры силы противодействия должны быть соизмеримы с параметрами ветрового порыва. Это потребует исследований взаимных пространственных и временных корреляционных зависимостей возмущающей и компенсирующей сил для системы автоматического управления временными и пространственными параметрами силового блока активной компенсации.

Очевидно, в перспективе потребуется отойти от отмеченной выше универсальности требований к спусковым устройствам спасательных средств, опираясь только на действующие нормы, требования и правила. Разработка пассивных и активных технических средств обеспечения безопасности спусковых операций для конкретного морского сооружения потребуют выполнения его аэродинамических модельных испытаний и исследований реакции спусковой платформы спасательной шлюпки на ветровые порывы с различными временными и пространственными параметрами.

Как было отмечено выше, разобщающие устройства спасательных шлюпок являются значимыми факторами риска, поэтому их исключение является одной из перспективных задач при разработке спусковых систем спасательных средств морских сооружений. Одним из возможных проектных решений может быть размещение спасательной шлюпки на демпфированной тросовой спусковой платформе.

ВЫВОДЫ

Основными рисками при спуске спасательных шлюпок морских нефтегазовых сооружений с большой высоты являются риски их раскачивания под воздействием ветровых порывов и возможное разрушение при ударах о борт или опорные конструкции. Дополнительным риском является нештатное срабатывание разобщающего устройства спасательной шлюпки, выход из строя или его обрыв. Эти риски во многом связаны с прямым переносом требований по конструкции спусковых устройств, применяемых для морских судов на аналогичные требования для спусковых устройств спасательных шлюпок, применяемых для морских нефтегазовых сооружений.

Обращает на себя внимание наличие важной конструктивной особенности, когда для спуска спасательных шлюпок с высокого борта морских нефтегазовых сооружений используется стационарная спусковая рампа. Это принципиально отличает такое спусковое устройство от его судовых аналогов, где используются шлюпбалки различных типов. Наличие стационарной спусковой рампы дает возможность повысить функциональную устойчивость спускового устройства, когда непосредственный спуск спасательной шлюпки может быть заменен спуском демпфированной спусковой платформы с расположенной на ней спасательной шлюпкой. Такое проектное решение дает возможность исключить опасное раскачивание спасательной шлюпки на протяженной спусковой тросовой системе под воздействием ветровых порывов и предупредить ее возможные удары о корпус морского сооружения за счет поглощения энергии ветрового порыва. Использование спусковой платформы дает также возможность исключить задачу управления разобщающим устройством спасательной шлюпки и снять проблему его выхода из строя или нештатного срабатывания.

Возможно, окажутся перспективными и направления по разработке технических средств, позволяющих компенсировать ветровое воздействие на спусковую платформу управляемым силовым противодействием в режиме активного автоматического управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таровик В.И., Косьмин С.И., Димитров В.И., Синяков С.М., Утямишев П.А. Эвакуационные системы и спасательное оборудование морских нефтегазовых сооружений в Арктике. Offshore Russia, № 4 [22], ноябрь 2018, с. 66 – 70.
2. Тагиев Р.М. Что случилось на Гюнешли. Журнал-каталог Противопожарная защита, 2016, с. 50.
3. Oil Rig Disasters. Offshore Drilling Accidents. Режим доступа: http://members.home.nl/the_sims/rig/index.htm.
4. Международный кодекс по спасательным средствам. Кодекс КСС [International Life-Saving Appliance (LSA) Code. LSA Code].
5. Accident Investigation. The Nautical Institute Reports. Режим доступа: https://www.nautinst.org
6. Lang J.S. Review of Lifeboat and Launching Systems' Accidents. Safety Study 1/2001. https://assets.publishing.service.gov.uk.

REFERENCES

1. Tarovik V.I., Kosmin S.I., Dimitrov V.I., Sinyakov S.M., Utyamishev P.A. *Evakuatsionnyye sistemy i spasatelnoye oborudovaniye morskikh neftegazovykh sooruzheniy v Arktike.* [Systems of evacuation and rescue equipment of offshore oil &gas installations in Arctic]. Offshore Russia, November 2018, pp. 66 – 70. (In Russian)
2. Tagiyev R.M. *Chto sluchilos na Gyuneshli.* [What happened at Gyuneshly platform] Firefighting magazine-catalogue, 2016, p. 50.
3. Oil Rig Disasters. Offshore Drilling Accidents. Accessed at: http://members.home.nl/the_sims/rig/index.htm.
4. Международный кодекс по спасательным средствам. Кодекс КСС [International Life-Saving Appliance (LSA) Code. LSA Code.]
5. Accident Investigation. The Nautical Institute Reports. Accessed at: https://www.nautinst.org
6. Lang J.S. Review of Lifeboat and Launching Systems' Accidents. Safety Study 1/2001. Accessed at: https://assets.publishing.service.gov.uk.

ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЕЙ

1.1 Материал статьи должен являться оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, соответствовать профилю журнала. Он должен содержать информацию, подтверждающую актуальность и практическую значимость исследования, а также информацию о внедрении его результатов.

1.2 Авторы несут личную ответственность за то, что текст статьи не содержит материалов:

- рекламного характера;
- содержащих государственную тайну;
- публикация которых приведет к нарушению действующего законодательства РФ в сфере защиты информации и интеллектуальной собственности.

1.3 В тексте статьи может быть указан источник финансирования выполненных исследований.

1.4 К материалу должна быть приложена рецензия (отзыв) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному научному направлению. Формат рецензии доступен на интернет-сайте журнала (http://www.rs-class.org/ru/register/research/ntsb/). Статьи для аспирантов должны быть подписаны их научным руководителем.

1.5 Материалы для публикации в журнале предоставляются авторами на безвозмездной основе.

1.6 Общие требования к оформлению материалов.

1.6.1 Объем материалов в электронном виде должен составлять не более 20000 печатных знаков. В этот объем включаются таблицы, схемы, диаграммы и т. д., а также изображения в виде иллюстраций.

1.6.2 Статья должна содержать следующую информацию:

- заглавие на русском и английском языках, точно отражающее содержание статьи (не более 120 печатных знаков);
- фамилию, имя, отчество авторов приводятся полностью. Количество указанных авторов статьи не должно превышать 4 чел;
- сведения об авторах: по каждому из авторов должны быть приложены на русском и английском языках подробные сведения — ученые степень и звание, должность, место работы (принятое в уставе организации официальное название), город, телефон и адрес электронной почты автора;
- индекс УДК;
- аннотацию, в которой четко определены основные цели, задачи, содержание и результаты проведенного исследования, возможности его практического применения. Приводится на русском и английском языках. Объем от 100 до 250 слов;
- ключевые слова: 8 — 10 слов/словосочетаний, наиболее полно отражающих тему статьи. Недопустимо использование слов общего характера (например, — проблема, решение). Предоставляются на русском и английском языках (Key words). Ключевые слова по возможности не должны повторять термины заглавия и аннотации, а должны использовать термины из текста статьи и термины, определяющие предметную область, а также включать другие важные понятия, позволяющие облегчить и расширить возможности нахождения статьи средствами информационно-поисковой системы;
- основной текст статьи: общие принципы построения статьи могут варьироваться в зависимости от тематики и особенностей проведенного исследования. Рекомендуется выделять в тексте статьи постановку задачи, описание методов решения, анализ результатов и выводы. Если имеется перевод статьи на английский язык, желательно его представить;
- список литературы.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЕНИЮ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

2.1 Список литературы обязательно оформляется в двух вариантах: на кириллице и на латинице. Список литературы на кириллице приводится в конце статьи, оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003. Библиографические ссылки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008.

2.2 Кириллические названия в списке литературы транслитерируются на латиницу. Для автоматизации процесса транслитерации можно воспользоваться программным обеспечением, которое доступно по адресу www.translit.ru (в раскрывающемся списке «Варианты» выбрать вариант BGN).

2.3 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на статьи из журналов.

2.3.1 Для русскоязычных статей рекомендуются следующие схемы библиографической ссылки:

.1 полное описание статьи:

• авторы (транслитерация);
• заглавие статьи (транслитерация);
• [перевод заглавия статьи на английский язык в квадратных скобках];
• название русскоязычного источника (транслитерация);
• [перевод названия источника на английский язык];
• выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;

.2 описание статьи только с переводом заглавия статьи на английский язык:

• авторы (транслитерация);
• перевод заглавия статьи на английский язык;
• название русскоязычного источника (транслитерация и курсив);
• [перевод названия источника на английский язык];
• выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;
• указание на языке статьи (In Russ.) после описания статьи.

Предлагаемая схема:

Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. Title of Journal, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49 – 53.

Пример:

Byzov A.L., Utina I.A. The centrifugal effects on amacrine cells in the retina of frog. Neirofiziologia [Neurophysiology]. 1971; (3): 293–300. (In Russ.)

2.3.2 Число авторов не ограничивается тремя, а указывается, по возможности, все или в разумных пределах.

2.3.3 Заглавие статьи не берется в кавычки.

2.3.4 Год ставится за заглавием журнала.

2.3.5 Название источника выделяется курсивом. Применение курсива для названия источника очень важно, т. к. исполнение одним шрифтом заглавия статей и источника в русскоязычных ссылках часто приводит к ошибочному их представлению в системах цитирования.

2.4 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на другие виды изданий.

2.4.1 Рекомендуется следующая схема описания монографии (книги, сборника):

• автор(ы) монографии;
• название монографии (транслитерация и курсив);
• [перевод названия монографии в квадратных скобках];
• выходные данные: место издания на английском языке — Moscow, St. Petersburg; издательство на английском языке, если это организация (Moscow St. Univ. Publ.), и транслитерация, если издательство имеет собственное название с указанием на английском, что это издательство: GEOTAR-Media Publ., Nauka Publ.;
• количество страниц в издании.

Пример: Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Pt. 1, 464 p.

2.5 Примеры описаний литературных источников в латинице.

2.5.1 Описание статьи из электронного журнала:

Kontorovich A.E., Korzhubaev A.G., Eder L.V. [Forecast of global energy supply: Techniques, quantitative assessments, and practical conclusions]. Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie, 2006, no. 5. (In Russ.) Available at: http://www.vipstd.ru/gim/content/view/90/278/). (accessed 22.05.2012).

2.5.2 Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. [Experimental study of the strength of joints "steelcomposite"]. Trudy MGTU "Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh system" [Proc. of the Bauman MSTU "Mathematical Modeling of Complex Technical Systems"], 2006, no. 593, pp. 125 – 130. (In Russian).

2.5.3 Описание материалов конференций:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi" [Proc. 6th Int. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"]. Moscow, 2007, pp. 267 – 272. (In Russian).

Нежелательно включать только переводное название конференции, так как оно при попытке найти эти материалы идентифицируется с большим трудом.

2.5.4 Описание переводной книги:

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. Vibration problems in engineering. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. Kolebaniia v inzhenernom dele. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.).

2.5.5 Описание Интернет-ресурса:

Kondrat'ev V.B. Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost' [The global pharmaceutical industry]. Available at: http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmacevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html. (accessed 23.06.2013).

2.5.6 Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov V.I. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyi tor. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. And math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

2.5.7 Описание ГОСТ:

GOST 8.586.5-2005. Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkostei i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroistv [State Standard 8.586.5 – 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

3. ТРЕБОВАНИЯ К АННОТАЦИЯМ

3.1 Основные цели и задачи аннотации.

Аннотация является кратким резюме большой по объему работы, имеющей научный характер. Аннотация может публиковаться самостоятельно, в отрыве от основного текста и, следовательно, должна быть понятной без обращения к самой публикации.

По аннотации к статье читателю должна быть понятна суть исследования.

По аннотации читатель должен определить, стоит ли обращаться к полному тексту статьи для получения более подробной, интересующей его информации.

Аннотации к статьям доступны на сайте журнала http://www.rs-class.org/ru/register/research/ntsb/.

Аннотация на русском языке является основой для подготовки авторского резюме на английском языке, но не должна переводиться дословно (калькой), при этом должны соблюдаться основные правила и стилистика английского языка. Использование автоматизированных программ для перевода категорически запрещено. При обнаружении низкого качества перевода аннотации статья будет отклонена.

3.2 Структура, содержание и объем аннотации.

Аннотация должна излагать существенные факты работы, не должна преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации.

Приветствуется структура аннотации, повторяющая структуру статьи и включающая введение, цели и задачи, методы, результаты/обсуждение, заключение/выводы.

Аннотация включает:

• цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью;

• краткое изложение основных фактов работы, при этом необходимо:

следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;

не включать несущественные детали;

обеспечивать, чтобы текст был связным – с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т.д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.);

использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in this study»;

• выводы, сопровождаемые рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает…»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в аннотации не приводятся.

В тексте аннотации следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций.

Текст аннотации должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок.

Сокращенные и условные обозначения, кроме общеупотребительных, применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме.

В аннотации не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста аннотации определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), должен быть от 100 до 250 слов.

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕКСТА

4.1 Редактор – MS Word.

4.2 Шрифт: Times New Roman, размер шрифта – 14, цвет – черный, начертание – обычное. Интервал между строками – 1,5; абзацный отступ – 1,25; ориентация – книжная; поля – 2 см со всех сторон. Текст должен быть выровнен по ширине. Красные строки обязательны.

4.3 Разделы статьи (кроме «Введение» и «Выводы») нумеруются арабскими цифрами. Допускается не нумеровать разделы (заголовки), служащие лишь для акцентирования тем в небольшом тексте.

4.4 Нумерация пунктов и в списках — арабскими цифрами.

4.5 Ссылки на источник в списке литературы нумеруются арабскими цифрами и приводятся в тексте в квадратных скобках.

4.6 Подстрочные примечания (вынесенные из основного текста в конец полосы) связываются с текстом сносками в виде арабских цифр и нумеруются в пределах каждой отдельной полосы (страницы). Цифры набираются на верхнюю линию шрифта.

4.7 Кавычки оформляются символами «...» для наименований, набранных кириллицей, и символами "..." для наименований, набранных латиницей.

5. ОФОРМЛЕНИЕ ФОРМУЛ, ТАБЛИЦ И ИЛЛЮСТРАЦИЙ

5.1 Формулы должны быть набраны в в редакторе формул MS Word или символьным шрифтом. Вставки формул в виде картинок любого формата не допускаются. Размер кегля для формул – 12. Формулы, если их больше одной и если на них есть ссылки, нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках по правому краю полосы.

5.2 Таблицы, если их больше одной, должны быть пронумерованы. Таблицы должны иметь заголовок, если только они не следуют сразу за текстом, однозначно определяющим их содержание. Номер таблицы и заголовок размещаются над таблицей. Таблицы должны быть выполнены в MS Excel или MS Word и встроены в текст статьи. Вставка таблиц в виде картинок любого формата не допускается. Размер кегля для таблиц – 11.

5.3 Иллюстрации (рисунки), если их больше одной (одного), должны быть пронумерованы и иметь подпись (если только содержание иллюстрации не понятно однозначно из предшествующего текста). Графические и фотоматериалы должны быть представлены в форматах JPEG, TIFF, быть качественными и иметь разрешение не менее 300 dpi.

5.4 Публикация фотографий/изображений в журнале «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» осуществляется в соответствии с требованиями статьи 1274 части четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации от 18 декабря 2006 г. N 230-ФЗ. Свободное использование материалов в информационных и научных целях осуществляется с обязательным соблюдением следующих условий:

- указание автора или иного лица, являющегося правообладателем;
- указание источника заимствования;
- использование материалов в объеме, оправданном целью цитирования.

6. РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ СТАТЕЙ

6.1 Текст статьи в электронном виде следует направлять непосредственно в адрес главного редактора журнала (boyko.ms@rs-class.org).

6.2 Статьи, направляемые в журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», проходят двухуровневую процедуру рецензирования. На первом этапе рецензирования автор направляет в редакцию текст статьи с приложением внешней рецензии (отзыва) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному направлению. На втором этапе текст статьи с отзывом направляется в отделы ГУР соответствующей специализации и независимым рецензентам. Также статья может быть представлена на соответствующей секции Научно-технического совета Регистра и передана ученым секретарем секции Главному редактору вместе с заключением о возможности опубликования. Компетентные рецензенты имеют все возможности свободно высказать мотивированные критические замечания относительно уровня и ясности изложения представленного материала, его соответствия профилю журнала, новизны и достоверности результатов. Решение о публикации статьи принимается главным редактором и редакционной коллегией журнала, с учетом всех имеющихся материалов и рецензий.

6.3 По результатам рецензирования статья может быть принята, отклонена или направлена автору на доработку.

6.4 Материалы, не утвержденные Редакционной коллегией к размещению в журнале, возвращаются автору с объяснением причины отказа в публикации.

6.5 Издание осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих его тематике, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Рецензии хранятся в издательстве и в редакции издания в течение 5 лет.

6.6 Редакция издания обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

В оформлении издания использовались графические материалы из открытых источников сети интернет:

http://gibka-rezka-svarka.ru/
http://ns.abunda.ru/84637-ogromnye-vinty-bolshix-korablej-27-foto.html
http://www.cloveritservices.com/Home.aspx
www.fonstola.ru/
www.wallpapers.ru/
http://www.ye42oester.nl/
http://miraziz.uz/
http://www.radioscanner.ru/
http://xn–24-dlcyxgbyj.xn–80asehdb/?p=4257
http://www.russiapost.su/archives/12268
http://utimenews.org/ru/
http://kmtp.ru/
http://www.efg-berlin.de/
http://maritimeforum.net/
http://korabley.net/
http://demoweb.hermosoft.com/efos/

Фото для обложки журнала предоставлено Гильмияровым Евгением Борисовичем, старшим инженером-инспектором Мурманского филиала РС

Российский морской регистр судоходства
Журнал
«Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства»
вып. 58/59

Редакционная коллегия журнала

Редактор *А.В. Спиленко*
Компьютерная верстка *С.С. Лазарева*
Дизайн концепции *М.В. Батракова*

Подписано в печать 24.07.2020. Формат 60 × 84/8
Усл. печ. л.: 12,3. Уч.-изд.л.: 12,1. Тираж 200

Российский морской регистр судоходства
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8
www.rs-class.org/ru/