



ISSN 2223-7097

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БАЛЛАСТНЫМИ ВОДАМИ
создание опытного образца 8

МОНТАЖ ПЛАВУЧИХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК
метод надвига на плаву 32

СИСТЕМА РЕГАЗИФИКАЦИИ НА СУДАХ-ГАЗОВОЗАХ
новые требования РС 91



№ 44/45
Декабрь
2016

Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 44/45, 2016

Научно-технический и информационно-аналитический журнал, издается с 1916 года.

Учредитель-издатель

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

Главный редактор

М.С. Бойко

E-mail: research.dept@rs-class.org

ISSN 2223-7097

Редакционная коллегия

В.И. Евенко – председатель, главный инженер – директор департамента классификации, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

М.С. Бойко – к.т.н., заместитель председателя, главный редактор журнала, начальник научно-исследовательского отдела, 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

М.А. Кутейников – д.т.н., начальник отдела конструкции корпуса и судовых устройств, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

В.А. Малышевский – д.т.н., проф., заместитель генерального директора, ФГУП «ЦНИИ конструктивных материалов «Прометей»

В.Н. Половинкин – д.т.н., проф., референт генерального директора, 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., заместитель генерального директора, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

В.Н. Тряскин – д.т.н., проф., первый проректор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Подписка на журнал может быть оформлена по каталогу Агентства «Роспечать». 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 ВИНТИ РАН. 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.

© Российский морской регистр судоходства, 2016

Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, №44/45, 2016

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: research.dept@rs-class.org

ISSN 2223-7097

Editorial board

Vladimir Evenko – Technical Director - Head of Classification Directorate, Chairman of Editorial board, RS

Maxim Boyko – Candidate of technical sciences, Deputy Chairman of Editorial board, Editor-in-Chief of Research Bulletin by RS, Head of the Research department, RS

Alexander Bolshev – Doctor of technical sciences, professor of St. Petersburg State Polytechnic University

Andrey Grigoriev – Candidate of technical sciences, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Mikhail Kuteynikov – Doctor of technical sciences, Head of the Hull department, RS

Victor Malyshevskiy – Doctor of technical sciences, professor, Chief Operating Officer of Central Research Institute of Structural materials “Prometey”

Valery Polovinkin – Doctor of technical sciences, professor, assistant of Chief Executive Officer, Krylov State Research Centre

Aleksander Rodionov – Doctor of technical sciences, professor of St. Petersburg State Marine Technical University

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

Anatoliy Sazonov – Doctor of technical sciences, professor of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, corresponding member of Russian Academy of Science

Oleg Timofeev – Doctor of technical sciences, Deputy Director General for Shipbuilding and Marine Technologies, Krylov State Research Centre

Vladimir Tryaskin – Doctor of technical sciences, professor, vice-chancellor of St. Petersburg State Marine Technical University

Subscription index is 87730 in Rospechat Agency.

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.

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 journals and editions, in which basic scientific results of doctoral and post-doctoral theses (in application for the scientific degrees of the Candidate and Doctor of Sciences) shall be published <http://perechen.vak2.ed.gov.ru/>.

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

© Russian maritime register of shipping, 2016

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

№ 44/45

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.

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.

**Санкт-Петербург
2016**

ОБРАЩЕНИЕ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА РС



УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Перед Вами новый выпуск журнала «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства». Традиционно на страницах журнала публикуются статьи, посвященные наиболее острым и актуальным вопросам обеспечения безопасности мореплавания и охраны окружающей среды, созданию научно-технической базы для проектирования, постройки и безопасной эксплуатации современной морской техники, а также вопросам развития нормативной базы Регистра, вопросам экономики и управления на морском транспорте, новым требованиям Международной морской организации (ИМО).

Настоящий выпуск не является исключением и продолжает традиции журнала. Среди наиболее существенных нормативных документов ИМО, вступающих в силу в 2017 году, следует отметить «Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в Полярных водах» и «Международную конвенцию о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года». Регистром в течение 2016 года проведен ряд мероприятий, направленных на обеспечение внедрения требований указанных нормативных документов ИМО в отечественную практику, включая подготовку соответствующих дополнений в нормативную базу Регистра, проведение тематической научной конференции («Полярный кодекс и безопасность судов ледового плавания»), расширенных заседаний секций научно-технического совета Регистра («Охрана окружающей среды» и «Проблемы человеческого фактора»). Технические аспекты внедрения требований указанных документов ИМО

в отечественную практику регулярно освещаются на страницах нашего журнала в рубриках «Безопасность мореплавания и охрана окружающей среды», «Прочность судов и плавучих сооружений», «Механические установки и движители», «Проблемы человеческого фактора», в том числе в новом выпуске журнала.

Еще одной важной задачей, к решению которой активно привлекается наш журнал, является информирование широкого круга специалистов о наиболее существенных изменениях в нормативной базе Регистра. В новом выпуске журнала в традиционной рубрике «Обозрение» представлена информация о введении новых знаков и словесных характеристик в символе класса судна. Появление данных знаков и словесных характеристик будет способствовать повышению конкурентных преимуществ судов с классом Регистра, повысит информативность символа класса для судовладельцев, фрахтователей и страховых компаний.

Широкий охват аудитории читателей и авторов статей журнала обеспечивается Регистром за счет выполнения мероприятий по повышению информационной доступности издания. В частности, в 2016 году к распространению журнала были привлечены филиалы Регистра: Мурманский, Дальневосточный, Астраханский, Архангельский. Журнал рассылается во все ведущие отечественные организации, обеспечивающие проектирование, постройку и эксплуатацию современной морской техники, а также в научно-исследовательские и учебные заведения, представляется на стенде Регистра во время крупнейших отраслевых мероприятий.

Проводимые Регистром мероприятия по развитию журнала предоставляют авторам уникальную возможность сообщить о практических результатах проведенной научной работы широкой аудитории, рассказать о внедрении в практику современных технических решений, поднять острые, дискуссионные вопросы, связанные с охраной окружающей среды и безопасностью человеческой жизни на море. Приглашаю заинтересованных авторов к сотрудничеству и предлагаю направлять Ваши предложения по дальнейшему развитию издания и материалы для публикации в адрес Редакционной коллегии журнала!

К.Г. Пальников
Генеральный директор
ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

ОБРАЩЕНИЕ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Представляем Вам новый выпуск журнала «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства». В течение 2016 года Редакционной коллегией журнала проведена активная работа, результатом которой стала подготовка «дорожной карты» развития издания на ближайшие два года, определяющей общую концепцию и перспективные направления совершенствования деятельности Регистра и Редакционной коллегии журнала. Разработан перечень мероприятий, способствующих реализации поставленных целей и задач, среди которых развитие авторитетного научно-технического периодического издания, публикация результатов научно-исследовательских работ в области решения актуальных задач проектирования, постройки и эксплуатации морской техники, содействие практическому внедрению и популяризации результатов научно-исследовательских работ.

Часть запланированных мероприятий уже реализованы в течение 2016 года. Организован онлайн-сервис для электронной подачи статей и материалов для публикации на официальном веб-сайте Регистра в разделе «Научно-исследовательская работа». В целях включения журнала в международные базы данных расширены и конкретизированы требования по подготовке материалов для публикации. По всем поступающим материалам проводится взаимодействие с авторами в целях подготовки статей в полном соответствии с требованиями международных баз данных. Включение журнала в международные базы данных является одним из наиболее важных направлений развития, предусмотренных «дорожной картой».

Редакционной коллегией журнала разработана и опубликована Редакционная этика, основанная на положениях Устава Регистра, Кодекса этики Регистра, рекомендациях Комитета по этике научных публикаций (Committee of Publication Ethics), а также ценном опыте авторитетных международных журналов и издательств.

Анализ публикационной активности по данным Российского индекса научного цитирования показывает положительную тенденцию в развитии издания. Значение двухлетнего импакт-фактора с 2014 года увеличилось более чем в 3 раза. Значение

пятилетнего импакт-фактора увеличилось более чем в 4 раза. Количество цитирований с 2014 года увеличилось более чем в 2,5 раза. Выполнение комплекса мероприятий по повышению показателей публикационной активности является одной из основных задач, предусмотренных «дорожной картой».



В новом выпуске журнала представлены статьи по широкому направлению теоретических и прикладных научных исследований. При этом традиционно часть статей содержат результаты научных исследований, выполненных по заказу Регистра в рамках реализации плана научно-исследовательских работ. В данном выпуске представлены результаты исследований Регистра в области новых методов определения величины ледовой нагрузки на корпус судна (раздел «Прочность судов и плавучих сооружений»), исследований в области методик определения максимальной длины свободных пролетов морских подводных трубопроводов, определению характерных опасностей установок регазификации сжиженного природного газа на судах-газовозах (раздел «Нефтегазовые комплексы»). Все результаты научно-исследовательских работ, выполняемых по заказу Регистра, используются при совершенствовании нормативных документов.

От имени Редакционной коллегии журнала выражаю благодарность авторам статей за направленные материалы, а также приглашаю всех заинтересованных авторов и читателей журнала к сотрудничеству!

М.С. Бойко
Главный редактор, к.т.н.



СОДЕРЖАНИЕ

Пальников К.Г. Обращение генерального
директора РС 2

Бойко М.С. Обращение главного редактора. 3

ОБОЗРЕНИЕ 6

БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

*Хорошев В.Г., Герасимов А.В., Самсонов А.В.,
Шалларь А.В., Дроздов В.В.* Создание опытного
образца судовой системы управления
балластными водами 8

*Фоканов В.П., Фоканов М.В., Шалларь А.В., Петров М.В.,
Гаврилова О.В.* Испытания масштабных моделей
СУБВ-УФ на ртутных лампах низкого
и среднего давления 14

Шарапов Д.А., Болшев А.С. Численная оценка
необходимой энергии для предотвращения
образования ледовых воротников
на морских причалах Арктики 20

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

Власьев М.В. Выбор оптимального числа самоходных
судов-бункеровщиков для доставки СПГ-топлива
на суда в порту 26

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

Крыжевич Г.Б., Попов Н.Г. Монтаж плавучих
буровых установок методом надвига на плавку
с деформированием конструкций опорного
основания 32

*Андрюшин А.В., Григорьева О.А., Кутейников М.А.,
Болшев А.С., Фролов С.А., Зув П.С.* Определение
ледовых нагрузок на носовую и кормовую часть
современных судов ледовых классов и ледоколов
с наклонным бортом. 41

Бойко М.С., Добржинский К.А., Ткаченко И.В.
Численное моделирование слошинга в мембранном
танке СПГ газовеоза при бортовой качке
на регулярном волнении. 50

МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

*Борисов Р.В., Кутейников М.А., Лузянин А.А.,
Самойлов В.Р.* Оценка безопасности судна,
качающегося под действием нерегулярных ветра
и волн 56

K.G. Palnikov RS Director General address

M.S. Boyko Editor-in-Chief address

NEWSROOM

MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

*V.G. Khoroshev, A.V. Gerasimov, A.V. Samsonov,
A.V. Shallar, V.V. Drozdov* Creation
of a prototype shipboard
ballast water management system

*V.P. Fokanov, M.V. Fokanov, A.V. Shallar, M.V. Petrov,
O.V. Gavrilova* Testing of the BTW-UV control
systems scale models with low and middle
pressure mercury lamps

D.A. Sharapov, A.S. Bolshev Numerical estimation
of the necessary power input for prevention
of additional ice formation on the Arctic water
transport constructions

SEA TRANSPORT ECONOMICS AND MANAGEMENT

M.V. Vlasiev Selection of the optimal number
of self-propelled bunkering vessels to deliver LNG fuel
to ships in port

STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES

G.B. Kryzhevich, N.G. Popov Float-over assembly
of drilling rigs at sea with substructure constructions
deformation

*A.V. Andryushin, O.A. Grigoryeva, M.A. Kuteynikov,
A.S. Bolshev, S.A. Frolov, P.S. Zuev* Determination
of ice loads acting on the sloping sides of the bow
and stern of modern icebreakers
and ice-going ships

M.S. Boyko, K.A. Dobrzhinsky, I.V. Tkachenko
Numerical simulation of sloshing during roll
motion under regular wave excitation
in the membrane tank of a LNG carrier

SEAWORTHINESS

*R.V. Borisov, M.A. Kuteynikov, A.A. Luzyanin,
V.R. Samoylov* Safety assessment of a ship swaying
under the action of irregular wind and waves

Семенова В.Ю., Аунг Мьо Тхант Исследование влияния расстояния между судами и глубины фарватера на гидродинамические характеристики их совместной качки на мелководье 61

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

Константинова Н.И., Семибратова И.С., Терешина Н.А., Шапков А.О. Текстильные материалы пониженной пожарной опасности для судостроения 69

Горелик Б.А. Безасбестовые материалы для уплотнительных прокладок в соединениях судовых трубопроводов 75

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

Сазонов К.Е. Необходимо ли нормировать минимальный уровень мощности судов ледового плавания? 81

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

Романовский В.В., Мачульский В.Б., Куракин В.Н. Бесперебойное электроснабжение мощных судовых потребителей 85

РАДИОНАВИГАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Дубчук П.С., Припотнюк А.В., Устинов Ю.М. Исследование эволюции пяти поколений приема-передающих спутниковых станций международной морской системы связи ИНМАРСАТ 90

НЕФТЕГАЗОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ

Авдонкин А.С., Любомиров Я.М., Ярцев Б.А. Сравнительный анализ достоверности методик определения максимальной длины свободных пролетов морских подводных трубопроводов . . . 96

Харченко Ю.А., Тер-Саркисов Р.М., Бартнев В.Н. Турельные системы удержания нефтегазодобывающих платформ судового типа для замерзающих морских акваторий 102

Шурпьяк В.К., Власов А.А. Анализ характерных опасностей установок регазификации сжиженного природного газа на судах-газовозах 111

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Корзин М.М., Паргаменко М.Н., Кирпичников Р.Ю. Плазово-технологическая подготовка производства АПЛ 4-го поколения с использованием 3D модели 121

ПРОБЛЕМЫ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА

Зива И.И., Еришов В.А., Меньшиков В.И. Периодичность контроля функции готовности к принятию решений у судового специалиста . . 125
Правила предоставления статей 129

V.Yu. Semyonova, Aung Myo Thant Investigation of the influence of the distance between the ships and the fairway depth on the hydrodynamics characteristics of their joint motions in shallow water

MATERIALS AND WELDING

N.I. Konstantinova, I.S. Semibratova, N.A. Tereshina, A.O. Shashkov Low fire hazard textile materials for shipbuilding

B.A. Gorelik Non-asbestos materials for sealing gaskets in ship pipelines connections

MECHANICAL INSTALLATIONS AND PROPULSION

K.E. Sazonov Necessity of setting the minimum power level requirements for ice-going ships

ELECTRICAL EQUIPMENT

V.V. Romanovsky, V.B. Machulsky, V.N. Kurakin Regular supply of high power marine electric consumers

RADIO NAVIGATIONAL EQUIPMENT

P.S.Dubchuk, A.V.Pripotnyuk, Yu.M.Ustinov Evolution study of five generations of transceiver satellite stations of the international maritime communication system INMARSAT

OIL AND GAS FACILITIES

A.S. Avdonkin, Ya.M. Lyubomirov, B.A. Yartsev Comparative analysis of reliability methods for determination of the maximum length of free spans of subsea pipelines

Yu.A. Kharchenko, R.M. Ter-Sarkisov, V.N. Bartenev Turret mooring systems of ship-shaped floating oil and gas production units for freezing offshore sea areas

V.K. Shurpyak, A.A. Vlasov Specific hazards analysis of the LNG regasification plants on gas carriers

INFORMATION TECHNOLOGY

M.M. Korzin, M.N. Pargamenko, R.Yu. Kirpichnikov Lofting pre-production of the 4th generation NPS using 3D models

HUMAN ELEMENT PROBLEMS

I.I. Ziva, V.A. Yershov, V.I. Menshikov Periodicity of the function control of a ship specialist's readiness to make decisions

ОБОЗРЕНИЕ

НОВЫЕ ЗНАКИ В СИМВОЛЕ КЛАССА РС

Российский морской регистр судоходства с 5 сентября 2016 г. ввел новые дополнительные знаки и словесные характеристики в символе класса.

Символ класса в сжатой форме содержит описание основных конструктивных особенностей судна. Введение новых дополнительных знаков и словесных характеристик повысит информативность символа класса Регистра для судовладельцев, фрахтователей и страховых компаний.

Были введены в действие 15 дополнительных знаков и словесных характеристик:

- **LNG bunkering ship** – судно предназначено для bunkеровки топливом судов, работающих на сжиженном природном газе;
- **Standby vessel** – судно предназначено для выполнения дежурных функций и спасательных операций у плавучих буровых установок или морских стационарных платформ;
- **Supply vessel (OS)** – судно предназначено для обслуживания плавучих буровых установок или морских стационарных платформ;
- **Pipe laying vessel** – судно предназначено для укладки морских подводных трубопроводов (рис. 1);
- **Cable laying vessel** – судно предназначено для укладки подводного кабеля;
- **Pipe laying barge** – трубоукладочная баржа;
- **Cable laying barge** – кабелеукладочная баржа;
- **CONT** – судно, не являющееся ячеистым контейнеровозом, но приспособленное для перевозки контейнеров международного образца;



Рис. 1. Трубоукладочное судно

- **DG** – судно приспособлено для перевозки опасных грузов;
- **TMS** – на судне используется метод модифицированного освидетельствования гребного вала;

- **IWS** – судно подготовлено к освидетельствованию подводной части на плаву;

- **PMS** – судно оборудовано системой мониторинга технического состояния механической установки;

- **SO_x Cleaning** – на судне установлено устройство для снижения выбросов окислов серы;

- **GCU** – газозов оборудован устройством для сжигания газа.

Введение новых дополнительных знаков позволит повысить конкурентные преимущества судов в классе РС и информативность символа класса Регистра для судовладельцев, фрахтователей и страховых компаний.

Новые знаки в символе класса судна можно разделить на три основные группы:

- знаки, относящиеся к назначению судна;
- знаки, регламентирующие требования к освидетельствованию и мониторингу;
- знаки, касающиеся оснащения судна специализированными устройствами.

Рассмотрим подробнее некоторые из вышеперечисленных дополнительных знаков и характеристик.

К первой группе дополнительных знаков относится словесная характеристика **LNG bunkering ship** (рис. 2), которая добавляется в основной символ класса газозовам, перевозящим сжиженный природный газ (СПГ) и предназначенным для обеспечения передачи СПГ на суда, использующие СПГ в качестве топлива.



Рис. 2 Судно-бункеровщик СПГ

Новая словесная характеристика в символе класса содержит в себе требования к конструкции судов-бункеровщиков, устройству бункеровочных станций, грузовым системам и процедурам пере-

дачи бункерного топлива. Судно-бункеровщик СПГ должно отвечать требованиям Правил классификации и постройки судов для перевозки сжиженных газов наливом и Международного кодекса постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом (Кодекс IGC). Станция бункеровки СПГ должна быть расположена на открытой палубе в районе с достаточной естественной вентиляцией. Грузовая система и процедура передачи бункерного топлива должны быть разработаны таким образом, чтобы во время проведения бункеровочных операций не допускалось выделение жидкости или паров груза в атмосферу как из судна-бункеровщика, так и из принимающего судна. Судно-бункеровщик СПГ должно иметь возможность в случае возникновения чрезвычайной ситуации прервать операции по бункеровке на любом этапе, поэтому грузовые танки на нем не должны иметь ограничений по промежуточному заполнению грузовых танков. Также бункеровщикам СПГ предъявляются дополнительные требования в части аварийных систем, противопожарной защиты, систем управления передачей бункерного топлива и систем связи между судном-бункеровщиком и принимающим судном.

Другим знаком, относящимся к назначению судна, является знак возможности перевозки контейнеров международного образца – **CONT**. Данный знак добавляется к основному символу класса судна, приспособленного для перевозки груза в контейнерах международного образца на палубе и/или в определенных трюмах, но не имеющего словесной характеристики *Container Ship*, при этом в скобках указывается место транспортировки контейнеров: (**deck**) (**cargo hold(s) No.**).

Помимо вышеперечисленных знаков к первой группе также относится знак пригодности судна для перевозки опасных грузов. Судну, соответствующему требованиям части VI «Противопожарная защита» и освидетельствованному в соответствии с Руководство по техническому наблюдению за судами в эксплуатации и признанному пригодным для перевозки опасных грузов, к основному символу класса может быть добавлен знак **DG** с указанием в скобках в зависимости от типа перевозимого опасного груза (**bulk**) – навалом, (**pack**) – в упаковке. На судах с данным знаком в символе класса судна должны быть приняты дополнительные меры по обеспечению водой. Водопожарная система должна обеспечивать немедленную подачу воды под требуемым давлением путем постоянного поддержания давления в магистрали или с помощью дистанционного пуска пожарных насосов. В дополнение предъявляются особые требования к конструкции и расположению грузовых помещений, системам сигнализации

обнаружения пожара, а также к вентиляции и системам осушения грузовых помещений. Кроме того, на судне должны быть предусмотрены комплекты защитной одежды, стойкой к химическому воздействию и предназначенной для использования в аварийных ситуациях, и автономные дыхательные аппараты.

Освидетельствования для выдачи, возобновления или подтверждения документов о пригодности судна для перевозки опасных грузов заключается в проверке выполнения специальных требований главы II-2 Конвенции СОЛАС-74, требований Международного кодекса морской перевозки опасных грузов и Международного кодекса морской перевозки навалочных грузов с проведением, где необходимо, испытаний и проверки в действии систем, оборудования и снабжения. Пригодность судна для перевозки опасных грузов устанавливается инспектором Регистра на основании одобренного проектного анализа, подтверждающего соответствие конструкции и оборудования судна требованиям, обеспечивающим безопасную перевозку опасных грузов.

Ко второй группе, регламентирующей требования к освидетельствованию и мониторингу, относятся следующие дополнительные знаки: **TMS**, **PMS**, **IWS**.

Знак **TMS** в символе класса означает, что на судне используется метод модифицированного освидетельствования гребного вала в соответствии с Правилами классификационных освидетельствований судов в эксплуатации. Модифицированное освидетельствование валопровода проводится без выемки (подвижки) гребного вала. Одним из условий соответствия судна требованиям данного знака является внедрение и поддержание специализированной системы контроля состояния валопровода.

Вторым знаком из данной группы является знак **PMS (Planned Maintenance Scheme for Machinery)**, означающий, что судно оборудовано системой мониторинга технического состояния механизмов механической установки, а также что на судне введена или применяется схема планово-предупредительного технического обслуживания механизмов.

IWS (in-water survey) – знак подготовленности судна к освидетельствованию подводной части на плаву. Знак **IWS** присваивается судам, на которых, помимо прочих требований, подводная часть судна защищена от коррозии при помощи соответствующей системы антикоррозийной защиты, состоящей из комбинации системы покрытий и катодной защиты, а также на подводную часть корпуса нанесена соответствующая маркировка.

Окончание см. на стр. 13



БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 629.5.062.2

СОЗДАНИЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА СУДОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БАЛЛАСТНЫМИ ВОДАМИ

В.Г. Хорошев, д-р техн. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Санкт-Петербург, e-mail: krylov@krylov.spb.ru

А.В. Герасимов, канд. техн. наук, ЗАО «ЦНИИ СМ», Санкт-Петербург, e-mail: sudmash@sudmash.ru

А.В. Самсонов, канд. техн. наук, ЗАО «ЦНИИ СМ», Санкт-Петербург

А.В. Шалларь, канд. техн. наук, ООО «НПО ЭНТ», Санкт-Петербург

В.В. Дроздов, канд. геогр. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Санкт-Петербург

В соответствии с Постановлением Правительства РФ № 256 от 28.03.2012 Россия присоединилась к Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими (Лондон, 2004 г.). В соответствии с Конвенцией все морские суда должны быть снабжены оборудованием для обезвреживания балластных вод. В рамках Федеральной целевой программы «Развитие гражданской морской техники» на 2009 – 2016 годы специалистами ФГУП «Крыловский государственный научный центр», ЗАО «ЦНИИ СМ», ООО «НПО ЭНТ» и ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет» выполнены исследования различных возможных методов и способов обработки водяного балласта транспортных судов, а также проведена опытно-конструкторская работа по созданию судового оборудования обезвреживания балластных вод. Приводятся результаты ОКР по созданию системы обезвреживания балластных вод, включая изготовление и стендовые испытания опытного образца.

Ключевые слова: балластные воды, обезвреживание УФ-облучение, фильтрация, система управления, международная конвенция, испытания, опытный образец

CREATION OF A PROTOTYPE SHIPBOARD BALLAST WATER MANAGEMENT SYSTEM

V.G. Khoroshev, DSc, FSUE "Krylov State Research Centre", St. Petersburg, e-mail: krylov@krylov.spb.ru

A.V. Gerasimov, PhD, Central Research Institute of Marine Engineering, St. Petersburg

A.V. Samsonov, PhD, Central Research Institute of Marine Engineering, St. Petersburg

A.V. Shallar, PhD, LLC "NPO ENT", St. Petersburg

V.V. Drozdov, PhD, FSUE "Krylov State Research Centre", St. Petersburg

Within the framework of the Federal Target Program "Development of civil marine equipment" for 2009 - 2016 years, specialists of FSUE "Krylov State Research Centre", CJSC "Central Research Institute of Marine Engineering", "NPO ENT Co" and FSBEI HPE "Russian State Hydrometeorological University" studied various possible methods and modes of transport ships' ballast water treatment, also conducting research and development work on design of marine equipment for ballast water decontamination. The results of this work on the design of ballast waters decontamination system including bench tests of a prototype are provided.

Keywords: ballast water, neutralization, UV-irradiation, filtration, control system, International Convention, bench testing, experimental design

Морские транспортные суда для сохранения мореходных качеств и прочностных характеристик периодически принимают водный балласт. Вместе с балластной водой в судовые танки попадают морские организмы, икра, личинки, растения, а также возбудители опасных болезней, способных при сбросе балласта проникнуть в весьма удаленные от их первичного ареала экосистемы и акклиматизироваться, приводя к биологическому трансграничному загрязнению акваторий. В последнее время, в связи с активно увеличивающимся грузооборотом морского транспорта, эта проблема приобрела глобальный характер [1, 2, 3].

Главным международным документом, регламентирующим сброс водяного балласта, является Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими, принятая на 48-й сессии Комитета по защите морской среды (МЕРС) Международной морской организации (ИМО) в Лондоне 13 февраля 2004 года [4].

В рамках Федеральной целевой программы «Развитие гражданской морской техники» на 2009 – 2016 годы специалистами ФГУП «Крыловский государственный научный центр», ЗАО «ЦНИИ СМ», ООО «НПО ЭНТ» и ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет» выполнены исследования различных возможных методов и способов обработки водяного балласта транспортных судов, а также проведена опытно-конструкторская работа по созданию судового оборудования обезвреживания балластных вод [5, 6, 7, 8].

В рамках выполненной ОКР по созданию судового оборудования обезвреживания балластных вод при выборе метода обработки балласта учитывались следующие критерии:

- безопасность для экипажа и судна;
- совместимость с общесудовыми системами и судном в целом;
- исключение вреда окружающей среде;
- экономичность;
- эффективность.

На основе указанных критериев были выбраны методы механической фильтрации и воздействия ультрафиолетового излучения. Экспериментальным путем были определены наиболее оптимальные технические параметры устройств, работающих на этих принципах обезвреживания балласта: размеры ячеек фильтрующих элементов, спектр и мощность ультрафиолетового излучения, номенклатура контрольного оборудования для анализа параметров обрабатываемой воды.

Экспериментальное изучение воздействия указанных методов выполнялось с использованием различных культивированных видов фито- и зоо-

планктонных организмов, способных к межрегиональному распространению вместе с балластными водами судов.

На основании выполненных исследований был разработан и изготовлен опытный образец судового оборудования обезвреживания балластных вод, состоящий из агрегата обработки балласта методом фильтрации, агрегата обработки балласта методом ультрафиолетового облучения и блока контрольного оборудования.

Агрегат обезвреживания балластных вод методом механической фильтрации разработан на основе современных щелевых решеток. Щелевая решетка конструктивно представляет собой сетчатую конструкцию из высокоточного профиля ∇ -образной формы и поперечных несущих элементов в виде стержней. Несущие и профильные элементы в точках соприкосновения соединены сваркой в каждой точке их пересечения. Витки профиля направлены вершиной внутрь каркаса, что создает гладкую с рабочей стороны и не засоряемую с противоположной стороны поверхности фильтрующего элемента. Размер щели между витками, определяющий тонкость фильтрации, составляет 50 мкм. Схема щелевой решетки приведена на рис. 1.

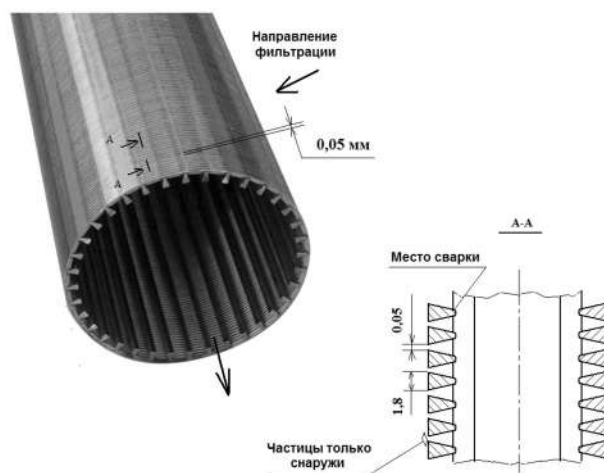


Рис. 1 Схема цилиндрической щелевой решетки

Фильтрующие элементы для блока фильтрации изготовлены из цилиндрической щелевой решетки диаметром 50 мм и длиной 800 мм. Блок фильтрации состоит из двух фильтров, в каждом из которых размещено 12 фильтрующих элементов.

Перепад давления на фильтрах в процессе обработки балласта контролируется преобразователем дифференциального давления. После достижения допустимого максимального перепада давления (из-за загрязненности фильтров) автоматически производится промывка фильтров за счет переключения арматуры с

электроприводом. При промывке фильтрат от одного из фильтров поочередно используется в качестве промывочной воды для другого фильтра. Продолжительность промывки фильтра составляет 6 минут, а средняя расчетная продолжительность фильтроцикла (время между промывками) составляет 9 – 11 часов.

Основные параметры агрегата обезвреживания балластных вод методом механической фильтрации:

- габаритные размеры: 1150 × 1050 × 1610 мм;
- масса 520 кг;
- производительность при заданном гидравлическом сопротивлении не менее 250 м³/ч;
- гидравлическое сопротивление при номинальной производительности 0,4 кгс/см² при чистых фильтрах;
- потребляемая мощность 2 кВт;
- рабочее давление 0,6 МПа;

Внешний вид агрегата обезвреживания балластных вод методом механической фильтрации представлен на рис. 2.

Управления включением-выключением оборудования, переключением в режим промывки и контроль работы системы осуществляется электронным пультом управления, располагающимся отдельно от агрегата.

Агрегат обезвреживания балластных вод методом ультрафиолетового облучения разработан на основе УФ-ламп низкого давления.

Основные параметры агрегата обезвреживания балластных вод методом ультрафиолетового облучения:

● напряжение питания (переменное) – 220/380 В, частота 50 Гц;

● суммарная потребляемая мощность – не более 17 кВт;

● производительность УФ модуля – не менее 250 м³/час;

● бактерицидная доза при УФ обезвреживании – не менее 200 мДж/см²;

● эффективность обезвреживания – соответствует правилу D-2 ИМО;

● срок службы (без учета УФ ламп) – не менее 20 лет;

● срок службы УФ ламп – не менее 9000 часов.

Агрегат состоит из блока обезвреживания (БО), расположенного на единой раме со шкафом управления, и системы промывки БО пресной водой. Оборудование содержит входные и выходные задвижки, позволяющие автоматически регулировать расход воды через БО, а также затворы, позволяющие производить промывку БО пресной водой.

Переход в различные режимы работы выполняется автоматически по результатам обработки текущей информации контрольно-эксплуатационного оборудования.

Система управления обеспечивает автоматический контроль, регистрацию и хранение параметров оборудования, а также данных об аварийных остановках и выходах контрольных параметров за пределы, обеспечивающие заданные характеристики работы.

Внешний вид агрегата обезвреживания балластных вод методом ультрафиолетового облучения представлен на рис. 3.

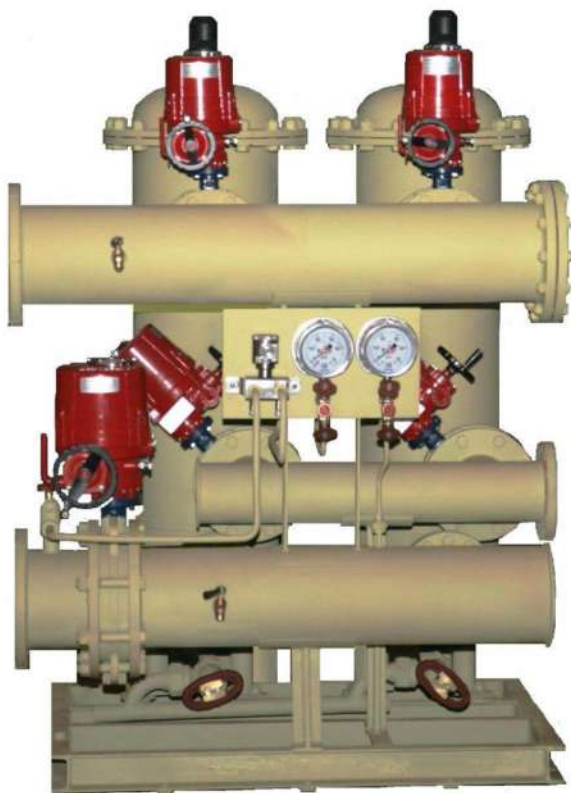


Рис. 2 Внешний вид агрегата фильтрации



Рис. 3 Внешний вид агрегата обезвреживания балластных вод методом ультрафиолетового облучения

Выполнена разработка системы мониторинга эффективности работы судовых установок обезвреживания балластных вод, в которой обоснован состав приборно-аналитической базы основных модулей для осуществления гидрохимического и гидробиологического анализа на судне или береговом испытательном стенде. Современные высокотехнологичные методы анализа гидробиологических и гидрохимических параметров балластных воды позволяют точно произвести оценку степени уничтожения нежелательных микроорганизмов в балластных водах. Возможность оперативной передачи полученных данных и результатов анализа на рабочий компьютер и, в дальнейшем, в компьютерную сеть судна или в сеть Интернет, является важным преимуществом данных методов, позволяющим обеспечить принятие управленческих решений в процессе удаленного доступа к информации о работе судовых установок обезвреживания балластных воды.

На рис. 4 показан внешний вид комплекта контрольного оборудования.



Рис. 4 Контрольное оборудование

Опытные образцы оборудования прошли комплексные стендовые испытания:

- испытания при работе по функциональному назначению в части биологической эффективности (на масштабных моделях с использованием культивированных моллюсков-интродуцентов и их личинок);
- испытания на функционирование системы управления агрегатами;
- испытания электрооборудования на воздействие климатических факторов;
- испытания на воздействие вибрации, качки и длительных наклонов.

Результаты всех испытаний положительные и соответствуют требованиям D-2 Международной конвенции. С учетом положительных результатов

предварительных испытаний установки на функционирование, испытаний масштабной модели по прямому назначению и испытаний электрооборудования на ВВФ решением комиссии РКД присвоена литера «О».

Созданные в рамках ОКР опытные образцы СООБ экологически безвредны (не используют активные вещества) и по основным технико-экономическим характеристикам не уступают аналогичному зарубежному оборудованию.

Разработанное оборудование защищено патентом на полезную модель «Судовое устройство для обезвреживания балластной воды».

Проработана возможность размещения судового оборудования и привязки его к общесудовой балластной системе на судах класса «река-море» для ряда проектов.

В качестве проекта судна для проработки размещения СУБВ выбрано судно проекта 00101, тип «Русич».

Суда типа «Русич» – это большие сухогрузные суда класса «река-море», с двойными бортами и двойным дном, с машинным отделением и надстройкой в кормовой части.

Балластно-осушительная система судна типа «Русич» состоит из 28 балластных цистерн, суммарным объемом 2150 м³, двух балластно-осушительных самовсасывающих центробежных насосов производительностью 250 м³/ч каждый и напором 0,3 МПа, гидравлической системы дистанционного управления запорной арматурой и автоматизированной системы управления режимами, включая датчики уровня и температуры в балластных танках. Балластные цистерны конструктивно размещены вдоль судна с обоих бортов и в форпике.

Исходная забортная вода поступает на вход балластно-осушительных насосов из кингстонных ящиков левого и правого бортов через фильтры грубой очистки с ячейкой 2,5 мм.

С учетом того, что разработанная в рамках комплекса ОКР «Балласт» система управления балластными водами конструктивно выполнена в виде отдельных модулей (установка фильтрации, установка УФ-обезвреживания, пульт управления фильтрами и пульт управления СУБВ), на судах проекта 00101 «Русич» имеется возможность размещения данной системы. Дополнительным положительным фактором при размещении разработанной СУБВ на действующих судах является возможность разборки агрегатов с целью обеспечения их погрузки в трюм через дверные проемы и последующей сборки агрегатов в трюме на месте монтажа.

На рис. 5 приведена схема балластно-осушительной системы с использованием разработанной системы управления балластными водами применительно к пр. 010001 «Русич».

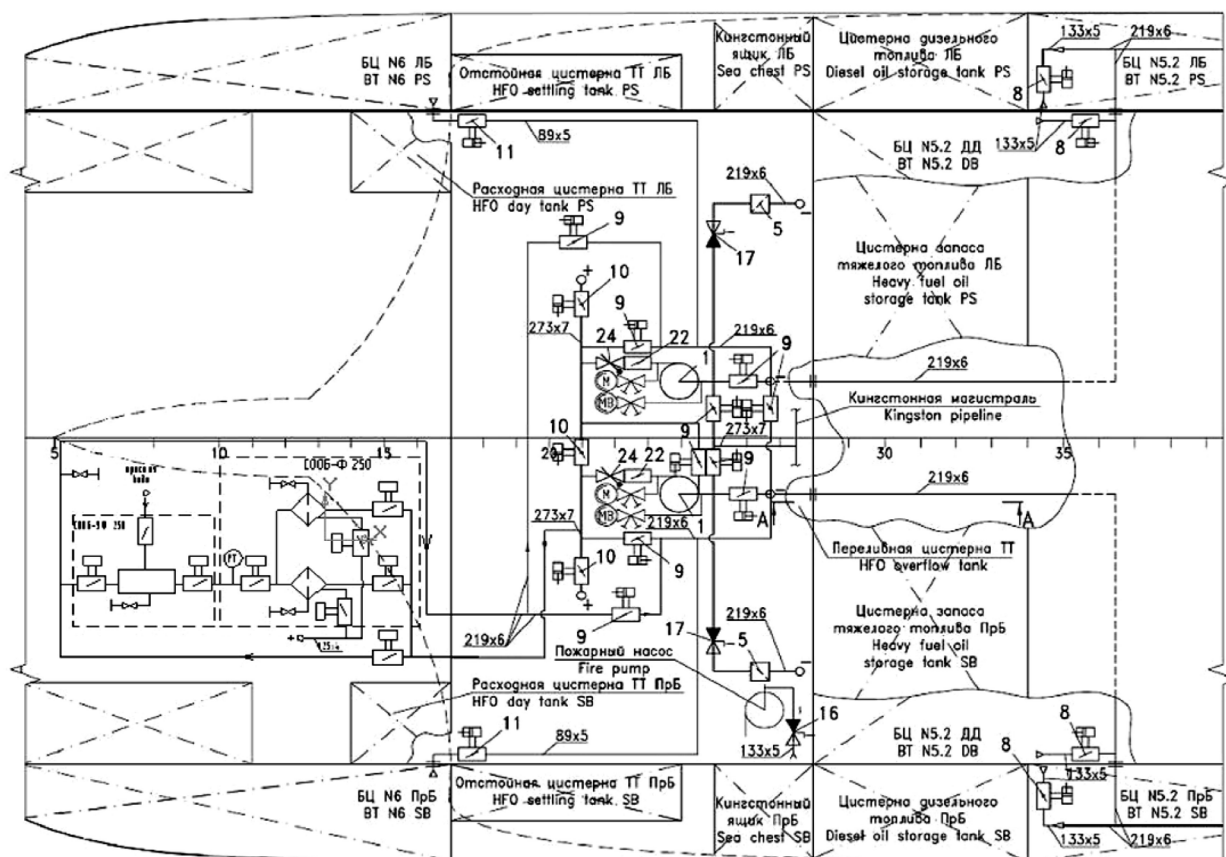


Рис. 5 Схема балластно-осушительной системы судна с СУБВ

Созданный опытный образец судового оборудования для обезвреживания балластных вод, который в результате лабораторных и стендовых испытаний полностью подтвердил эффективность выбранного метода обработки, может быть использован в балластных системах различных судов в широком диапазоне производительности.

С учетом блочно-модульного конструктивного исполнения, универсальности по варьированию основных параметров и проработок компоновочных решений типоряда оборудования с производительностью до 2000 м³/ч, разработанное судовое оборудование обезвреживания балласта способно обеспечить 100% импортозамещение.

В настоящее время решаются вопросы организации проведения полномасштабных судовых испытаний опытного образца, необходимых для получения типового одобрения РМРС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Global program of management of a water ballast (GloBallast) [Официальный сайт]. URL: http://globallast.imo.org/poster4_english.pdf (дата обращения 04.07.2015).
2. Дроздов В.В., Фрумин Г.Т., Косенко А.В., Боев А.С. Разработка и анализ показателей трансграничного биологического загрязнения балластными водами судов экосистемы Балтийского моря // Ученые записки РГТМУ. СПб.: Изд. РГТМУ. – 2013. – № 3 (26). – С. 172 – 189.
3. Решетов Н., Парфенов Л. Проблемы ограничения сброса балластных вод // Морской флот, № 5. – 2002. – С. 28 – 29.
4. Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года. – СПб.: Издательство ЗАО ЦНИИМФ, 2005. – 120 с.
5. Хорошев В.Г., Попов Л.Н., Петров М.В., Дроздов В.В., Гатин Р.И. Предотвращение загрязнения морских экосистем судовыми балластными водами: проблемы и пути решения / Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – № 40/41. – 2015. – С. 15 – 19.
6. Хорошев В.Г., Погдин Н.П., Гатин Р.И., Шалларь А.В., Герасимов А.В., Дроздов В.В. Разработка технологии и создание опытного образца отечественной системы управления балластными водами морских судов и судов класса «река-море» // Судостроение. 2015. – № 4. – С. 35 – 40.

7. Хорошев В.Г., Погодин Н.П. Нормативное и технологическое обеспечение предотвращения загрязнения морских экосистем судовым балластом. // Экология и развитие общества. СПб – 2015. – № 4 (15). – С. 51 – 59.
8. Герасимов А.В., Веселов Ю.С., Петров Н.М. Проблемы и перспективы создания судового оборудования обезвреживания балластных вод. / Научно-технический сборник «Судовое машиностроение», СПб – 2012 г.

REFERENCES

1. Global program of management of a water ballast (GloBallast). Available at: http://globallast.imo.org/poster4_english.pdf (accessed 04.07.2015).
2. Drozdov V.V., Frumin G.T., Kosenko A.V., Boev A.S. [Development and analysis of indexes of transboundary biological pollution of the Baltic Sea ecosystem by ships' ballast waters]. Uchenye zapiski RGGMU. [Proceedings of RSHU]. St.Petersburg, RSHU Publ., 2013, no. 3 (26), pp. 172 – 189. (In Russian).
3. Reshetov N., Parfenov L. [Problems of ballast waters' discharge limit]. Morskoy flot [Marine fleet], no. 5, 2002, pp. 28 – 29. (In Russian).

4. Mezhdunarodnaja konvencija o kontrole sudovyh ballastnyh vod i osadkov i upravlenii imi 2004 goda [International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments, 2004]. St.Petersburg, CJSC CNIIMF Publ., 2005, 120 p.
5. Horoshev V.G., Popov L.N., Petrov M.V., Drozdov V.V., Gatin R.I. [Prevention of pollution of marine ecosystems by ships' ballast waters: challenges and solutions]. Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva [Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping], no. 40/41, 2015, pp. 15 – 19. (In Russian).
6. Horoshev V.G., Pogodin N.P., Gatin R.I., Shallar' A.V., Gerasimov A.V., Drozdov V.V. [Development of technology and design of prototype of domestic management system of ballast waters of marine and river-sea going vessels]. Sudostroenie [Shipbuilding], 2015, no. 4, pp. 35 – 40. (In Russian).
7. Horoshev V.G., Pogodin N.P. [Regulatory and engineering support for prevention of pollution of marine ecosystems by ships' ballast]. Ekologiya i razvitie obshchestva [Ecology and development of society]. St.Petersburg, 2015, no. 4 (15), pp. 51 – 59. (In Russian).
8. Gerasimov A.V., Veselov Ju.S., Petrov N.M. [Challenges and opportunities for design of marine equipment for ballast water decontamination]. Nauchno-tehnicheskij sbornik "Sudovoe mashinostroenie" [Scientific and technical proceeding "Marine Engineering"]. St.Petersburg, 2012. (In Russian).

Окончание. (начало на стр. 6)

В заключении отметим новые знаки, касающиеся оснащения судна специализированными устройствами.

Если на судне в качестве альтернативного метода снижения выбросов окислов серы применяется система очистки выхлопных газов из судовых установок сжигания жидкого топлива, одобренная Регистром с учетом положений резолюций ИМО МЕРС.184(59), к основному символу класса добавляется знак SO_x Cleaning.

GCU (gas combustion unit) – знак в символе класса, означающий, что судно-газовоз оснащено устройством для сжигания испарившегося груза, рассчитанным на максимально возможную в нормальной эксплуатации интенсивность испарения грузов. Данное устройство предназначено для понижения давления в грузовой емкости до допустимых значений.

Если судовые двигатели оснащены устройством для снижения выбросов окислов азота и испытаны в соответствии с Руководством ИМО рез. МЕРС.198(62), к основному символу класса может быть добавлен знак **DE+SCR**.

Более подробная техническая информация об условиях назначения судам дополнительных знаков и словесных характеристик содержится в нормативных документах Регистра, размещенных в свободном доступе на сайте <http://www.rs-class.org/>.

Текст подготовлен сотрудниками научно-исследовательского отдела: Батракова М.В., Добржинский К.А.

РС внедрил сервис электронной подачи статей для научного журнала

Регистр внедрил новый сервис для авторов, публикующих свои статьи в журнале «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства». Данный сервис представляет собой электронную форму подачи статей для публикации, которая позволит упростить взаимодействие авторов с редакцией журнала. В электронной форме учтены все необходимые метаданные для публикации. После заполнения формы, статья автоматически попадает на рассмотрение в научно-исследовательский отдел. Электронная форма размещена в разделе «Научно-исследовательская работа» на сайте www.rs-class.org.

Все направляемые на рассмотрение статьи должны быть подготовлены в соответствии с требованиями для публикации в журнале. Соответствующие инструкции по оформлению статей размещены на сайте РС, а также публикуются в каждом выпуске журнала.

The screenshot shows a web form for submitting articles. At the top, there's a header with the RS logo and navigation links. The main title of the form is 'Форму отправки статей'. Below it, there's a subtitle 'Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства'. The form contains several sections with input fields and checkboxes, including fields for author name, affiliation, article title, abstract, keywords, and a section for uploading the full text of the article. There are also checkboxes for 'Дополнительно: резюме, аннотация, ключевые слова' and 'Для публикации: научная работа, обзор, статья, доклад, тезисы'. At the bottom, there's a 'Восстановить форму' (Restore form) button.

УДК 579.695

ИСПЫТАНИЯ МАСШТАБНЫХ МОДЕЛЕЙ СУБВ-УФ НА РТУТНЫХ ЛАМПАХ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ

В.П. Фоканов, к-т физ.-мат. наук, ООО «НПО ЭНТ», e-mail: fokanov@mail.ru, Санкт-Петербург

М.В. Фоканов, ООО «НПО ЭНТ», Санкт-Петербург

А.В. Шалларь, к-т техн. наук, ООО «НПО ЭНТ», Санкт-Петербург

М.В. Петров, АО «РМРС КЛАССИФИКАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ СУДОВ» (Турция)

О.В. Гаврилова, к-т биол. наук, доц., Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

В настоящей работе представлены результаты испытаний в аттестованной РМРС Испытательной лаборатории ООО «НПО ЭНТ» по обезвреживанию двух видов фитопланктона системой управления балластными водами воздействием ультрафиолетового излучения (СУБВ-УФ). В целях сопоставления характеристик, в том числе эффективности, проведены испытания двух типов масштабных моделей СУБВ-УФ-250 (расход воды 250 куб.м/ч) с применением ртутных газоразрядных ламп низкого давления (ЛНД) и лампы среднего давления (ЛСД). Эксперимент показал, что эффективность обезвреживания тест-объектов масштабными моделями (расход воды 10 куб.м/ч) на пяти ЛНД мощностью по 127 Вт каждая и на одной ЛСД мощностью 3.2 кВт в пределах погрешности измерений, одинакова.

Выполнено математическое моделирование и проведены расчеты эффективности обезвреживания методом вычислительной гидродинамики. Полученное согласие результатов экспериментов и расчетов дает обоснование для конструирования и судовых испытаний проектируемого СУБВ-УФ-250.

Ключевые слова: балластные воды судов, масштабная модель, ртутные лампы низкого и среднего давления, фитопланктон, компьютерная модель, метод вычислительной гидродинамики, испытательная лаборатория

TESTING OF THE BTW-UV CONTROL SYSTEMS SCALE MODELS WITH LOW AND MIDDLE PRESSURE MERCURY LAMPS

V.P. Fokanov, PhD, International Academy of Ecological and Human and Nature Safety Sciences, LLC "NPO ENT", St. Petersburg

M.V. Fokanov, International Academy of Ecological and Human and Nature Safety Sciences, LLC "NPO ENT", St. Petersburg

A.V. Shallar, PhD, International Academy of Ecological and Human and Nature Safety Sciences, LLC "NPO ENT", St. Petersburg

M.V. Petrov, JSC "RMRS CLASSIFICATION AND CERTIFICATION OF SHIPS" (Turkey)

O.V. Gavrilova, PhD, associate professor, St. Petersburg State University, St. Petersburg

The article presents the results of the tests carried out by the RMRS-certified NPO ENT test laboratory on the decontamination of the two types of phytoplankton by the ballast water ultraviolet radiation (BWT-UV) control system.

For the comparison of the characteristics, including efficiency, the tests of two types of BWT-UV-250 scale models (water flow of 250 m³/h) with the application of low pressure (LP) mercury gas-discharge lamps and a middle pressure (MP) lamp have been carried out. The experiment showed that the efficiency of decontamination of the two test objects by the scale models (water flow of 10 m³/h) with five LP lamps 127 W each and with one MP lamp 3.2 kW is identical.

Mathematical modeling has been executed and calculations of decontamination efficiency have been carried out using the method of computing hydrodynamics. The agreement of both experiments results and calculations justifies designing and the ship tests of the projected BWT-UV-250.

Keywords: ships' ballast water, scale model, low and middle pressure mercury lamps, phytoplankton, computer model, method of computing hydrodynamics, test laboratory

ВВЕДЕНИЕ

Технология обработки балластных вод включает две стадии: механическую фильтрацию, после которой балластная вода содержит микроорганизмы с размерами 10 – 50 мкм, и обезвреживание микроорганизмов различными методами.

Обезвреживание ультрафиолетовым (УФ) облучением – экологически чистая (не образующая токсических соединений), удобная в обслуживании и не требующая расходных материалов технология. Эффективность УФ технологии для различных микроорганизмов определяется получаемой ими дозой УФ облучения (произведение УФ облученности и времени воздействия).

Дозы дезактивации бактерий и вирусов, включая Toxicogenic *Vibrio cholera* (O1 and O139), *Escherichia coli* и *Intestinal Enterococci*, определяемых стандартом D-2 ИМО, для 100% эффективности небольшие. Проблемными для эффективного обезвреживания УФ облучением является фито- и зоопланктон. Определению эффективности обезвреживания балластной воды СУБВ-УФ, загрязненной двумя штаммами фитопланктона и посвящена эта работа.

На базе ООО «НПО ЭНТ» организована Испытательная лаборатория, предназначенная для испытания, под контролем РМРС, СУБВ-УФ после задержки фильтрами взвешенных частиц и организмов, имеющих наименьший размер ≥ 50 мкм. Испытания на суше в Испытательной лаборатории имеют целью определить пригодность предлагаемого проекта СУБВ-УФ для проведения полномасштабных судовых испытаний.

Испытательная лаборатория имеет оборудование для проведения береговых испытаний масштабных моделей СУБВ-УФ на соответствие требованиям РМРС и Правил G8 и владеет методиками измерений:

- зависимости эффективности обезвреживания воды, загрязненной тест-объектами, от дозы УФ облучения;
- пропускания водой УФ излучения;
- расхода воды через масштабную модель СУБВ-УФ,
- а также методиками:
 - испытаний ртутных дуговых УФ ламп низкого давления;
 - измерения пропускания кварца в УФ области спектра;
 - определения качества фильтрации воды на соответствие требованиям ИМО;
 - отбора проб воды при биологических испытаниях;
 - оценки состояния микроорганизмов.

В соответствии с пунктами 2.3.14 (G8) и 2.3.2 [1], Изготовитель СУБВ должен продемонстрировать путем математического моделирования и/или расчета что применение для береговых испытаний оборудования уменьшенных размеров не повлияет в конечном итоге на функционирование и эффективность оборудования на судне того типа и тех размеров, для которых оно будет освидетельствовано.

Для выполнения этого требования в Испытательной лаборатории разработаны методика компьютерного моделирования процесса УФ облучения балластной воды внутри СУБВ-УФ и программное обеспечение расчета эффективности обезвреживания воды СУБВ-УФ различных конструкций, в том числе, масштабных моделей. Все уравнения для вычисления поля УФ излучения и характеристик потока воды написаны в общем виде, что позволяет программе решать задачу нахождения эффективности обеззараживания с любыми начальными и граничными условиями.

Компьютерное моделирование СУБВ-УФ позволяет сравнить экспериментальные результаты с расчетными и провести наземные испытания масштабных моделей СУБВ-УФ по эффективности обезвреживания в соответствии с требованиями РМРС и правилом G8. Кроме того, компьютерное моделирование позволяет на стадии испытаний масштабных моделей выявить детали процесса УФ обезвреживания воды и, при необходимости, принять меры к устранению проблем.

1. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД

Гидравлическая схема испытательного стенда, содержащего модели танков балластных вод, расходомер, масштабную модель СУБВ-УФ и запорную арматуру с кранами отбора проб до и после УФ обработки представлена на рис. 1. На фотографии рис. 2 представлен общий вид стенда. Номера позиций рис. 1 и 2 совпадают.

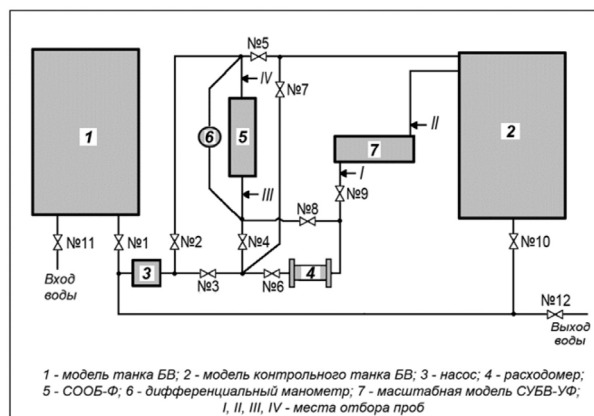


Рис. 1 Гидравлическая схема стенда для испытаний масштабных моделей СУБВ



Рис. 2 Испытательный стенд

1 - модель танка БВ; 2 - модель контрольного танка БВ; 3 - насос; 4 - расходомер; 5 - СУБВ-Ф; 6 - дифференциальный манометр; 7 - масштабная модель СУБВ-УФ на ЛНД

Для проведения испытаний приготавливается искусственно морская контаминированная фитопланктоном вода в модели танка балластных вод (БВ) (1) следующим образом:

- модель танка БВ заполняется водопроводной водой, очищенной угольным фильтром;
- в воду, залитую в модель танка БВ, загружается морская соль до концентрации 35 г/л и тщательно перемешивается помещенными в танки мешалками;
- производится измерения солености приготовленной морской воды у поверхности и у дна модели танка;
- при солености равной 33PSU вода танка БВ контаминирована приготовленной заранее концентрированной суспензией фитопланктона.
- производится измерение пропускания морской воды на длине волны 254 нм. Результат измерения пропускания морской воды на длине волны 254 нм – 80%/см.

При проведении испытаний открывают соответствующие краны, насос (3) прокачивает воду с контролируемым расходомером объемным расходом через масштабную модель в модель контрольного танка БВ (2).

Отбор проб воды «до» и «после» обезвреживания производился, в соответствии с правилами D-2 ИМО, изокинетически, без нарушения движения воды в масштабной модели.

В испытаниях участвовали масштабные модели СУБВ-УФ на пяти ЛНД мощностью 127 Вт каждая и на одной ЛСД мощностью 3 кВт, и устанавливался расход воды, равный 10 куб.м/ч.

Вода в контрольном танке БВ (2) до отбора проб выдерживалась в течение пяти суток, моделируя балластный танк судна, в соответствии с правилами ИМО.

2. ОПИСАНИЕ ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ

В качестве типичных представителей инвазий использовались следующие тест объекты из коллекции живых микроорганизмов CALU ресурсного центра «Культивирование микроорганизмов» научного парка Санкт-Петербургского государственного университета. В соответствии с требованиями D-2 к испытаниям в исходной суспензии присутствовали тест-объекты, относящиеся к разным филам: представители эукариотических зеленых водорослей (фила Chlorophyta) и прокариотические солеустойчивые бактерии (фила Firmicutes).

Тест-объекты отличаются по клеточной организации и относятся к разным филам:

- D65 – эукариотическая эвригаллиная водоросль (Chlorophyta, фила Viridaplantae);

- D6 – эукариотическая галофильная водоросль (Chlorophyta, фила Viridaplantae).

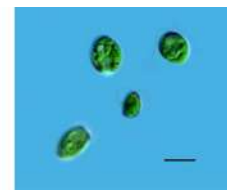


Рис. 3 А - *Dunaliella terricola* CALU1006 (штамм D6),
Б - *Asteromonas gracilis* ALU1373 (штамм D65). Световая
микроскопия, ДИК. Масштаб = 10 мкм

В пробах воды подсчитывались общее количество клеток, количество подвижных клеток, неподвижных клеток и деформированных клеток. Критерием эффективности обезвреживания выбрано изменение в результате УФ облучения количества подвижных клеток – отношение концентрации подвижных клеток микроорганизма в пробах после УФ облучения к концентрации подвижных клеток на входе в масштабную модель.

3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СУБВ-УФ

Компьютерная модель СУБВ-УФ на ЛНД

Для СУБВ-УФ-250 и масштабных моделей выполнены расчеты эффективности обезвреживания микроорганизмов (доля выживших, %), и средние значения УФ дозы в модели СУБВ-УФ, а также гistogramмы распределений этих величин по струям БВ.

Модель воспроизводит программными средствами процесс прокачивания контаминированной воды через 3D модель блока обезвреживания СУБВ-УФ. Программа производит расчет эффективности обезвреживания балластной воды, проходящей через СУБВ-УФ, от контаминации инвазивными одноклеточными организмами, а также контаминированной воды в других системах водоподготовки (сточные воды и пр.).

Программа написана на языке Java. Входными данными для работы программы являются «потoki протекания жидкости» в Лагранжевом приближении. Они являются результатом работы CFD пакета OpenFoam. Генерируемые этим пакетом струи потока протекают в поле излучения УФ ламп 3D модели установки.

Сначала производится расчет интенсивности излучения от всех УФ ламп в каждой дискретной точке всех потоков. Каждая лампа делится на 1000 излучающих сегментов лампы. При расчете распределения УФ излучения внутри масштабной модели учитываются отражение и рефракция на

кварцевом кожухе, а также поглощение света за счет коэффициента пропускания водой УФ излучения. Для оптимизации времени расчет происходит многопоточно, с использованием пула потоков.

Затем программа интегрирует УФ дозы для каждого потока по времени, с целью нахождения интегральной дозы, которую в среднем получил микроорганизм, перемещающийся при прохождении через СУБВ-УФ в данном потоке. Значение дозы, полученной микроорганизмом, сравнивается с присущим конкретному микроорганизму значением УФ дозы обезвреживания, например со значением D_{90} – дозы, при которой количество микроорганизмов уменьшается в 10 раз, и определяется процент выживших микроорганизмов в данном потоке.

Для получения средней УФ дозы усредняются значения доз УФ, полученных микроорганизмом, по всем потокам.

3D модель результатов расчета визуализируются с использованием технологии Java3D, как это представлено на рис. 4.

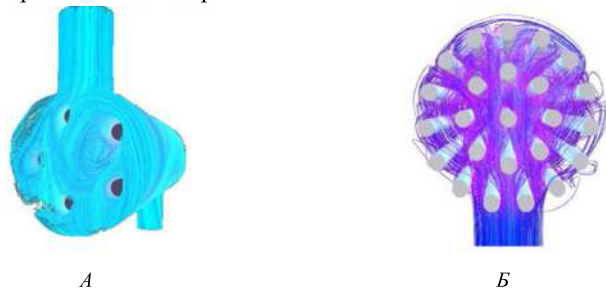


Рис. 4 Распределение водяных потоков в зоне УФ облучения воды ЛНД:

А – масштабная модель СУБВ-УФ, Б – СУБВ-УФ

На рис. 5 представлена цветная двумерная диаграмма распределения доз (А) и долей выживших микроорганизмов (Б) по сечению выходного патрубка масштабной модели СУБВ-УФ.

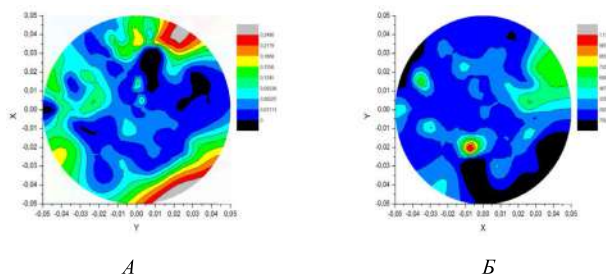


Рис. 5 Распределение по сечению выходного патрубка масштабной модели на ЛНД:

А – значений УФ доз в единицах Дж/м²;

Б – значений долей выживших клеток штамма D6

Расчетное значение средней УФ дозы для СООБ-УФ-250 – 230 мДж/см², для масштабной модели на ЛНД – 190 мДж/см², масштабной модели на ЛСД – 208 мДж/см².

Ранее нами в лабораторном эксперименте измерена доза D_{90} , обеспечивающая десятикратное снижение подвижных клеток. При обезвреживании фитопланктона D6 излучением ЛНД эта доза составила 115 мДж/см², для D65 – 323 мДж/см².

В табл. 1 приведено сравнение результатов эксперимента и расчета эффективности обеззараживания микроорганизмов с известным значением D_{90} .

Таблица 1

Сравнение результатов эксперимента и расчета эффективности обеззараживания микроорганизмов

D_{90} , мДж/см ²	Доля выживших, %				
	СУБВ-УФ-250		Масштабная модель на ЛНД		Масштабная модель на ЛСД
	расчет	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
115 (D6)	4	7	4 – 6	–	–
200	14	18	–	–	–
200*	12	–	–	–	–
320 (D65)	28	34	1 – 4	0,2	< 10
*Для СУБВ-УФ-250 с усовершенствованными дисками					

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ МАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ СУБВ-УФ НА ЛНД

Расчетная доля выживших клеток *Dunaliella* D6 составляет 7%.

Объемный расход воды в эксперименте – 10 куб.м/ч. Объект испытаний – одноклеточная зеленая водоросль *Dunaliella terricola* CALU1006 (штамм D6). При анализе проб воды, отобранных изокинетически, подвижных клеток фитопланктона штамма D6 на выходе масштабной модели оказалось 5,3% от подвижных клеток на входе.

В одном из опытов пробы были отобраны на выходном патрубке масштабной модели в режиме «сильная струя». Этот режим с небольшими отклонениями от изокинетического был применен с целью частичного учета распределения эффективности обезвреживания, представленного на рис. 6. При этом обработанная вода отбиралась из зон сечения выходного патрубка с разными процентами выживания. При анализе этих проб воды выжило 4,2% клеток фитопланктона штамма D6.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ МАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ СУБВ-УФ НА ЛСД

Масштабная модель содержит одну ЛСД DQ3024 (Heraeus) мощностью 3 кВт, с длиной разрядного промежутка 25 см. Проведено определение мощности ЛСД в спектральном диапазоне 230 – 280 нм по результату измерений радиометром ТКА – в режиме С. Рассчитанная по формуле Кейтца [2] мощность УФ-С лампы DQ3024 получилась равной 237 Вт. Это значение мощности применялось при математическом моделировании масштабной модели на ЛСД.

УФ доза D_{90} , обеспечивающая десятикратное снижение подвижных клеток штамма D65 при облучении ЛСД в спектральной области С прибора ТКА, определенная в предварительном эксперименте, равна 320 мДж/см². Результат расчета доли подвижных клеток штамма D65 для масштабной модели на одной ЛСД мощностью 3 кВт – 0,2%.

На рис. 6 показаны вид масштабной модели на ЛСД и ее математическая модель.



А

Б

Рис. 6 Обеззараживание излучением ЛСД:
А – лабораторная установка на одной ртутной лампе среднего давления; Б – 3D модель установки.

На рис. 7 приведена гистограмма распределения снижения концентрации подвижных клеток одноклеточной зеленой водоросли штамм D65, по 435 струям.

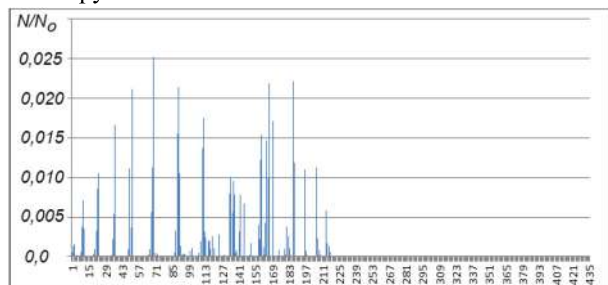


Рис. 7 Гистограмма распределения по струям значения отношения количества подвижных микроорганизмов на выходе установки к числу микроорганизмов на входе

Объемный расход воды в эксперименте – 10 куб.м/ч. Объект испытаний – одноклеточная

зеленая водоросль *Asteromonas gracilis* CALU1373 (штамм D65).

Среднее число клеток на входе в установку – 11 500 кл/мл, из них **подвижных – 9100**

Среднее число клеток на выходе из установки – 4 500 кл/мл, из них **подвижных – <1000**

Коэффициент обезвреживания балластной воды > 9 раз (< 10%).

Вывод: испытание масштабной модели на одной ЛСД мощностью 3 кВт по одноклеточной зеленой водоросли штамма D65 показало, в пределах погрешности измерений, такую же эффективность обезвреживания, как масштабная модель на пяти ЛНД мощностью 127 Вт каждая.

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СУБВ-УФ-250

Результаты компьютерного моделирования работы опытного образца СУБВ-УФ-250 приведены в табл. 1. В строках табл. 1 представлены сравнительные результаты для СУБВ-УФ-250 и масштабной модели на ЛНД. Модели 3D сравниваемых образцов подобны в том смысле, что обе являются многоламповыми, движение воды соответствует турбулентному режиму (рис. 4), конструкция образцов не содержит каких-либо внутренних приспособлений для выравнивания доз УФ облучения по сечению блока обезвреживания.

Математическое моделирование работы СУБВ-УФ позволило по эффективности обезвреживания микроорганизмов (табл. 1) оптимизировать конструкцию СУБВ-УФ-250 посредством установки двух дисков с отверстиями, плоскости которых перпендикулярны осям УФ ламп, у входного и выходного патрубков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытательной лабораторией НПО ЭНТ, аттестованной РМРС для испытаний методик и оборудования, предназначенных для обезвреживания балластных вод судов от переносимых между различными районами Мирового океана инвазивных морских организмов, методами фильтрации и УФ обеззараживания, в соответствии с Правилами D-2 ИМО, проведены испытания масштабных моделей СУБВ-УФ, работающих на ртутных разрядных лампах низкого давления (ЛНД) и лампе среднего давления (ЛСД).

Разработана компьютерная модель для расчета эффективности УФ обезвреживания как для масштабных моделей, так и для натурных систем, основанных на УФ технологии.

Проведены испытания и расчеты на примерах обезвреживания балластной воды от микроводорослей фитопланктона.

Получено совпадение результатов расчетных и экспериментальных значений эффективности обезвреживания в пределах погрешностей измерений. Совпадение результатов испытаний и модельных расчетов для масштабных моделей на ЛНД и ЛСД позволяет использовать возможности Испытательной лаборатории НПО ЭНТ для проектирования оборудования обезвреживания балластных вод судов.

В ходе испытаний, совместно с анализом тематических работ, сделаны выводы:

- при необходимости экономии технологических площадей судов, предназначенных для размещения оборудования, предпочтительными являются СУБВ-УФ, использующие ЛСД;
- если, при тех же расходах обрабатываемой балластной воды, предпочтение отдается экономии электроэнергии, то следует применять СУБВ-УФ на ЛНД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство РМРС по применению требований Международной Конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлению ими, СПб, Российский морской регистр судоходства, 2004.
2. Ke, Q.S., Bolton, J.R. 2011. Ultraviolet Lamp Efficiencies: Modern Derivation of the Keitz Formula and Other Efficiency Issues, 2-nd North American Conference on Ozone, Ultraviolet and Advanced Oxidation Technologies, Session 12, 624-627.

REFERENCES

1. Guidelines on Application of the Requirements of International Convention for the Control and Management of Ships Ballast Water and Sediments. Russian maritime register of shipping, 2004. (In Russian)
2. Ke, Q.S., Bolton, J.R. 2011. Ultraviolet Lamp Efficiencies: Modern Derivation of the Keitz Formula and Other Efficiency Issues, 2-nd North American Conference on Ozone, Ultraviolet and Advanced Oxidation Technologies, Session 12, 624-627.

Расширенное заседание секции «Охрана окружающей среды» Научно-технического совета Российского морского регистра судоходства

В 2016 в Главном Управлении Регистра прошло расширенное заседание секции «Охрана окружающей среды» Научно-технического совета Российского морского регистра судоходства». Тема заседания – «Вступление в силу Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими 2004 года». Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими вступает в силу 8 сентября 2017 года. В расширенном заседании секции приняли участие представители судоходных компаний, научно-исследовательских организаций, отечественные и зарубежные разработчики оборудования и представители РС.

На заседании был представлен краткий обзор результатов сессии Комитета по охране морской среды Международной морской организации, как в части требований к управлению балластными водами, так и в части требований к снижению выбросов в атмосферу. Также с докладами, посвященными требованиям Конвенции, выступил представитель РС. В частности, было рассказано о

сроках применения требований Конвенции, предусмотренных Конвенцией исключениях, стандартах управления и обработки балластных вод, а также о необходимых судовых документах. Помимо этого, были затронуты вопросы, касающиеся освидетельствования судов в эксплуатации на соответствие требованиям Конвенции, объектов технического наблюдения согласно положениям Конвенции, существующих поручений морских администраций и требований к судам, плавающим под флагом Российской Федерации.



УДК 627.042

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА НЕОБХОДИМОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЕДОВЫХ ВОРОТНИКОВ НА МОРСКИХ ПРИЧАЛАХ АРКТИКИ

Д.А. Шарапов, к-т техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, e-mail: sharapov@bk.ru, тел. +79213737870

А.С. Большев, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, e-mail: bolshev@cef.spbstu.ru

Освоение Арктического региона является одним из приоритетных направлений развития России. Данный регион интересен по ряду причин, среди которых помимо стратегических интересов стоит выделить развитие Северного морского пути и добычу углеводородов и других полезных ископаемых. Для освоения данной территории необходимо строительство инфраструктуры, в том числе морских портов, которые смогли бы бесперебойно принимать суда/танкеры в сложных ледовых условиях Арктики. В условиях холодного климата происходит непрерывное образование льда на акватории. В случае швартовки танкера механическое удаление льда между танкером и причалом может оказаться затруднительно. Вследствие большей теплопроводности стальных конструкций (стенки танкера и причала), может образовываться ледовый нарост, который может увеличивать нагрузки на причал, и, вследствие своего размера препятствовать отчаливанию или швартовке танкеров. Одним из способов недопущения образования ледового нароста (ледового воротника) является обогрев, который может выполняться различными способами. В работе рассматривается метод термодинамического расчета обогрева в приложении к трубопункту для предотвращения образования ледовых утолщений на поверхности морских причалов Арктики.

Ключевые слова: ледовый воротник, ледовый нарост, обмерзание причала, Арктический порт, МКЭ, термодинамика

NUMERICAL ESTIMATION OF THE NECESSARY POWER INPUT FOR PREVENTION OF ADDITIONAL ICE FORMATION ON THE ARCTIC WATER TRANSPORT CONSTRUCTIONS

D.A. Sharapov, PhD, associate professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, e-mail: sharapov@bk.ru, tel. +79213737870

A.S. Bolshev, DSc, professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, e-mail: bolshev@cef.spbstu.ru

The Arctic is a very important developing region due to a number of reasons, one being the Northeast Passage, considerably facilitating the transportation of cargoes from China and Japan to Europe and therefore economically effective. Another important reason is huge deposits of mineral resources including hydrocarbons. The region development necessitates the construction of a new infrastructure, including sea and ocean ports operable in the severe Arctic conditions. During the cold season there is continuous ice formation on the sea surface preventing normal moorage at the ports. Mechanical ice removal can be complicated in some cases and therefore another method should be used to destroy ice bounds. One method is to melt ice at the vessel-moorage wall contact area to facilitate moorage and pull out operations. The present article describes a heating method to avoid ice collar growth on the steel surfaces of the quay.

Keywords: ice collar, ice adfreeze, quay heating, Arctic port, FEM, thermodynamics

ВВЕДЕНИЕ

В современных реалиях, с учетом перспектив глобального изменения климата, одной из стратегий Российской Федерации является укрепление своих позиций в Арктике. Интерес к освоению данного региона вызван не только стратегическими, но и экономическими причинами. В частности, к проектам, вызывающим интерес с точки зрения экономики, можно отнести добычу нефти и газа на Арктическом шельфе. На сегодня подтверждены колоссальные залежи полезных ископаемых на российском шельфе, однако, их добыча сопряжена с

трудностями, обусловленными местоположением и климатическими условиями региона. Удаленность развитой инфраструктуры, значительные глубины, полярная ночь, волновые и ледовые воздействия разного характера, затруднения с передачей информации, невозможность оперативного оказания помощи или проведения эвакуации – это факторы, в значительной степени затрудняющие проектирование, строительство и эксплуатацию шельфовых сооружений Арктики. Причальные сооружения Арктики испытывают схожий спектр воздействий. Строительство причальных сооружений портов Арктики может производиться как в рамках

проектов по добыче сырья, так и в виде самостоятельных проектов для обеспечения судоходства региона. Развитие региона потребует решения логистических проблем, которое может быть найдено путем развития судоходства. Другим поддерживающим развитие фактором может стать рост значения Северного Морского пути, который способен перекроить мировую карту грузопотоков.

Для обеспечения Арктического судоходства необходимо строительство причалов, способных противостоять указанным воздействиям. В первую очередь при проектировании учитывают особенности мерзлых грунтовых оснований и ледовые воздействия, которые, как правило, являются основополагающими нагрузками и соответственно определяют стоимость конструкции. В некоторых случаях, вследствие экстремальных отрицательных температур, на морской акватории и причальных сооружениях происходит интенсивное образование льда, которое мешает судоходству. Нормальной практикой является удаление «лишнего» льда с акватории и с причалов. Однако, в случае длительной стоянки судна удаление намерзшего между судном и причалом льда бывает невозможно. Более того, за счет большой теплопроводности стальных элементов обшивки судна и конструкции причала, образующийся лед значительно толще окружающего льда на акватории. Известны случаи, когда намерзший лед блокировал судно, не давая ему отчалить, и мешал швартовке подходящих судов.

Решением данной проблемы может стать введение тепловой энергии максимально близко к зоне роста ледового нароста, тем самым препятствующее увеличению его размеров. Обмерзание по типу ледовой бочки (баствы) происходит при постоянно изменяющемся уровне воды, когда основное намерзание льда происходит тонкими слоями при каждом колебании уровня. Данный механизм ранее рассматривался Лосетом и Марченко [1]. Другая модель обмерзания по типу ледовых воротников (колларов), когда рассматривается термический равномерный рост льда вокруг конструкций охлажденных холодным воздухом, рис. 1. Данный механизм рассматривался в работах [2], [3], [4]. Для оценки энергозатрат на предотвращение обмерзания, рассматривалась модель обмерзания по типу ледового воротника, так как данный случай не требует рассмотрения циркуляции воды и переменного теплопотока, которые сложно учитывать при расчете. Современные нормативные документы, в большинстве, устанавливают необходимость регулирования ледовой обстановки и удаление намерзшего льда. В частности [5], [6], указывают на необходимость учета данного явления, однако вопросы удаления намерзшего льда прямым обогревом не рассматриваются. Более того существует большая вариабельность результатов

расчетов ледовых нагрузок по разным методикам. Так проведенное исследование [7] показало, что оценки ледовой нагрузки разными экспертами могут отличаться в несколько раз. В связи с этим рассмотрение вмерзания и методов борьбы с ним представляет интерес.

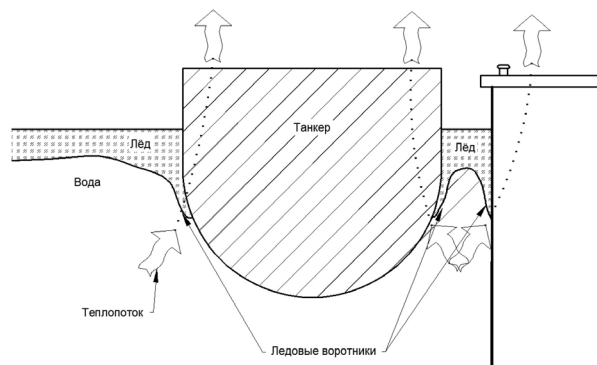


Рис. 1 Обмерзание причала и танкера по типу ледовых воротников во время стоянки танкера у причала

1. РАССЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Для рассмотрения описанной проблемы необходимо сформировать расчетную модель с учетом необходимых допущений. Для этого будем рассматривать единичную длину сооружения, для которой будем задавать приведенные параметры. Рассматриваем участок акватории, прилегающий к причалу. Длину участка принимаем из условия отсутствия влияния боковых границ выделенной области на результат. Верхняя граница выделенной водной области граничит с воздушной областью, для которой задается температура. Водная область граничит с заанкеренной стальной стенкой причального сооружения. Стальная стенка в данном рассмотрении принята из трубошпунта 1420 × 14. Внутри трубошпунта размещается источник тепловой энергии. Область причала за стенкой отсыпана песком. Для песчаного заполнителя принимаются табличные значения теплопроводности и плотности. По верху конструкции располагается бетонный ростверк. Размеры грунтового массива выбираются из условия отсутствия влияния на результат вокруг причальной стенки. Водная область помимо переноса тепла кондукцией, обладает свойствами конвекционного теплопереноса. Глубина рассматриваемой области принимается значительно больше ожидаемой глубины обмерзания сооружения, чтобы границы не оказывали влияния на результирующий профиль льда вокруг сооружения. Так как рассматривается обогрев морского причала, используются параметры, соответствующие соленой морской

воде. В частности, приближенная температура замерзания принимается минус 1,73 °С. Данная температура используется в качестве граничного условия по нижней границе рассматриваемой модели. Также данная температура является начальным условием модели, при условии нахождения водной области в жидкой фазе. Считается, что образование льда происходит равномерно с поверхности водной области и с поверхности трубошпунта в областях, где температура опускается ниже точки замерзания.

Основной теплоперенос в рассматриваемой модели выполняется металлической трубошпунтовой стенкой. Соответственно ее размеры, в первую очередь толщина, являются определяющими факторами при расчете обмерзания. На теплоперенос также влияют разнообразные покрытия. Коррозия металла может также вызывать изменения теплопереноса [8]. Коррозионная корка на поверхности металла также может влиять на сцепление льда со стенкой и таким образом изменять величину нагрузок при подвижках льда. На направление и интенсивность тепловых потоков влияет наличие бетонной пробки в стальных трубах [5].

Рассматривается динамическая постановка задачи. Основными переменными параметрами в данной постановке являются время вмерзания и температура окружающей среды. Данные параметры наряду с термическими характеристиками сооружения определяют толщину нарастающего на поверхности сооружения/стенки льда [3], [2]. Так как рассматривается обмерзание причальной стенки по типу ледовых воротников, то не происходит значительных колебаний уровня в момент интенсивного роста ледового воротника.

Рассматриваемая КЭ постановка представляет собой упрощенную 3D модель. Рассматривается единичная приведенная ширина модели, в которой ширина определяется исходя из периодического профиля трубошпунта. Водная область и область засыпки представлены единичными толщинами, то есть фактически в 2D постановке.

На рис. 2 представлена схема, описывающая граничные условия модели. По правой и левой границе заданы условия отсутствия теплового потока, что является эквивалентом теплоизоляции в расчетных пакетах. Нижняя и верхняя границы модели задаются температурами. При этом данные температуры могут быть зависимыми от времени, для обеспечения устойчивой сходимости при больших градиентах рассчитываемых величин. Область введения дополнительной энергии в виде тепла расположена в трубошпунте и отмечена на рис. 2. В заданной области для различных расчетов вводится разное количество энергии для определения влияния на результирующий профиль льда [1].

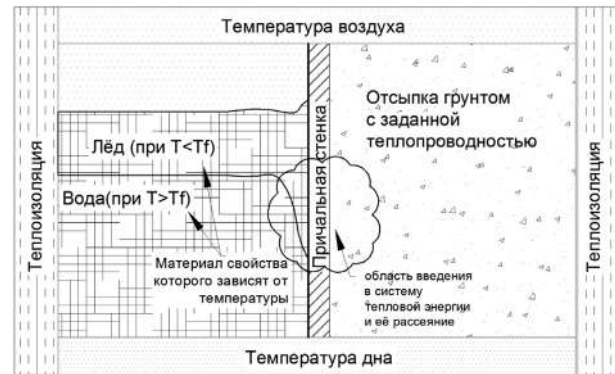


Рис. 2 Схема граничных условий рассматриваемой модели

Математически рассматриваемую задачу можно описать уравнением баланса энергии, уравнение (1).

$$\frac{\partial u}{\partial t} - a^2 \Delta u = f(r, t) \quad (1)$$

a^2 — коэффициент температуропроводности,
 $f(r, t)$ — функция тепловых источников,
 $\Delta = \nabla^2$ — оператор Лапласа,
 $u = u(r, t)$ — задает температуру в точке с координатами r в момент времени t .

При постановке задачи в декартовых координатах $x = (x_1, x_2, x_3)$:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - a^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x_3^2} \right) = f(x, t) \quad (2)$$

Для описания роста льда, а именно движения границы вода-лед необходимо учитывать не только изменение свойств материала, но и энергетические затраты на фазовое преобразование непосредственно в зоне роста льда. Стефан предложил [9] решение данной проблемы. Для численного расчета следует использовать модифицированную теплоту плавления материала с учетом латентной теплоты плавления, уравнение (3). Приводя выражение (2) к удобному виду для описания рассматриваемого процесса, получим:

$$(\rho \cdot c \cdot dT + l \cdot dm) \frac{d}{dt} - \frac{\partial}{\partial x_1} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) = \rho w \quad (3)$$

где: x_1 — вертикальная ось (перпендикулярная к поверхности льда);
 k — коэффициент теплопроводности;
 T — температура;
 ρ — плотность;
 w — внутреннее тепловыделение;
 l — теплота образования льда;
 c — теплоемкость.

Обогрев рассматриваемой модели происходит через плоский КЭ, расположенный внутри трубошпунта на высоте образования льда, уравнение (4).

$$-n(-k \nabla T) = Q \quad (4)$$

где k — коэффициент теплопроводности;
 T — температура;
 Q — теплоток.

При расчете учитывается зависимость коэффициентов от температуры. При переходе через точку смены фазового состояния для воды и льда меняются коэффициенты теплоемкости и теплопроводности [10]. Данные перемены коэффициентов в модели описываются функциями, меняющими свое значение в области перехода через температуру смены фазового состояния [11], [12].

Данный способ был использован при расчетах консолидации торосов и образовании ледовых бастлов (бочек) в университетском центре на Свальбарде [11], [13]. Аналогичная модель использовалась для поиска отклонений при проведении измерений толщин льда в условиях Свальбарда [14].

Схема разбивки расчетной модели на конечные элементы представлена на рис. 3.

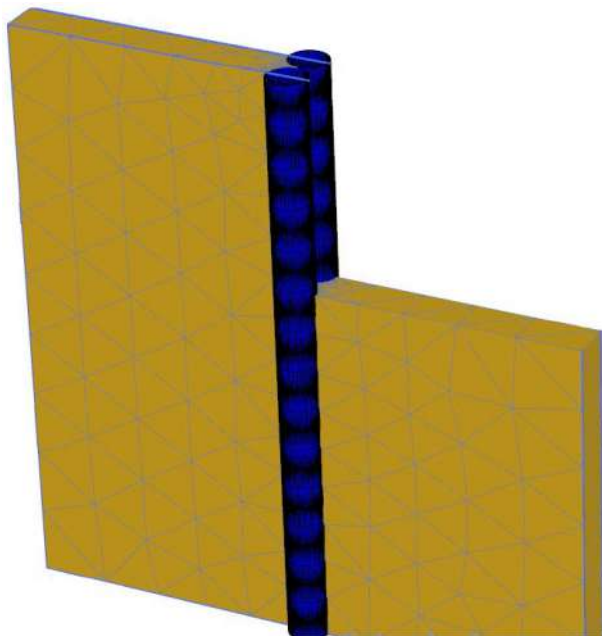


Рис. 3 Расчетная схема с разбивкой на КЭ

На рис. 3 представлен выбранный участок конструкции для расчета с разбивкой на КЭ. В средней части располагается вертикально-ориентированный трубопункт [15], внутри которого, располагается нагревательный элемент. Продолжительность динамического расчета принималась в пределах одной недели при температуре на 10°C ниже точки замерзания [3].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для наглядного представления результатов численного моделирования был использован

параметр K , представляющий собой отношение толщины льда на поверхности сооружения к толщине ровного термообразованного льда на акватории за тот же период, рис. 4. Располагая сведениями о толщине льда на акватории или времени и температуре вмерзания, и параметром K , можно оценить возможные затраты энергии на обогрев причала из трубопункта для предотвращения образования ледовых воротников.



Рис. 4 Характерные размеры ледового воротника

По результатам расчетов, представленных на рис. 5, можно сделать вывод, о том, что обогревательный элемент мощностью около 500 Вт, расположенный внутри трубопункта, может привести к остановке роста дополнительного льда на стенках данного элемента. В случае повышения мощности обогрева до 1000 Вт наблюдается утоньшение окружающего льда на контакте с трубопунктом. Данные значения справедливы для вмерзания при температуре на 10°C меньше температуры замерзания воды в течение непродолжительной стоянки судна. В случае наличия ледового покрова до начала расчета, значения будут отличаться. Соленость воды влияет на температуру замерзания, но так как в работе рассматривается относительная температура (ниже точки замерзания), то дополнительных поправок зависимости температуры замерзания от солености не требуется.

Обогревающий элемент внутри трубопункта целесообразно располагать на минимальном расстоянии от зоны образования льда, при этом возможно использование специальных изоляционных средств для уменьшения теплопотерь через внутренне пространство трубопункта (например, бетонную пробку).

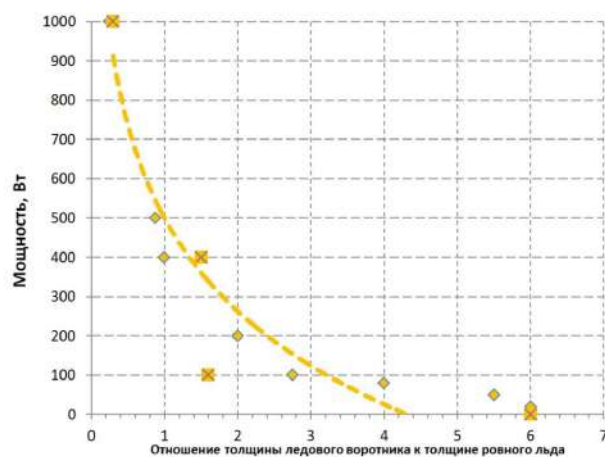


Рис. 5 Зависимость толщины намерзаемого на сооружение льда (ледового воротника) и мощности обогрева для заданных условий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Строительство причалов в условиях Арктики сопряжено с рядом трудностей, в том числе с обмерзанием причалов, что, в свою очередь, приводит к затруднению или невозможности проводить операции у причала. Так как бесперебойное функционирование причалов является наиважнейшим фактором, то необходимы мероприятия по удалению намерзающего льда. Механическое удаление не всегда возможно, если швартовка уже произведена или в случае когда необходимо отчалить после стоянки в течение определенного времени. Помимо прямого механического удаления льда используют специальные покрытия, уменьшающие адгезию льда. Известны примеры использования барботажа.

В работе представлен общий случай расположения гипотетического нагревательного элемента внутри причальной стенки, выполненной из трубошпунта. Профиль трубошпунта должен быть учтен при расчете, так как происходит перераспределение энергии и значительные потери тепла. Теплоизоляция внутреннего пространства трубошпунта и пространства со стороны сооружения не дает значительного эффекта, так как основные потери происходят через металлическую стенку трубошпунта.

Подобная модель расчета может быть применена для расчета обогрева стенки судна в момент стоянки у причала. При использовании обогрева стенки судна и шпунта эффективность растопления значительно повышается. В момент стоянки судна также возможно использование теплоизоляции поверхности воды между судном и причалом для уменьшения теплопотерь в атмосферу, и, следовательно, для уменьшения количества образующегося

льда. На теплопотери также влияет грунт-заполнитель внутри причала и конструкция ростверка.

По результатам расчетов для принятой конструкции можно сделать вывод о том, что для предотвращения обмерзания одного шпунтового элемента необходима энергия, превышающая 1 кВт. Однако, в силу допущений и упрощений, принятых в модели, полученные значения являются приближенными и могут варьироваться в значительной степени. Затрачиваемая энергия находится в зависимости от температуры воздуха и продолжительности вмерзания, то есть от величины морозо-градусо-дней, определяемых в соответствии с [3], [16], [4]. Для уточнения значений следует использовать точную геометрию рассматриваемого причала, а также проводить верификацию на основании физических экспериментов. На основании дополнительных физических экспериментов возникает вероятность использования уточняющих коэффициентов для учета вмерзания причала.

Представленный расчет может быть полезен для грубой оценки вероятных энергозатрат, а также как основа для проведения точного численного моделирования для заданного причала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Loset S., Marchenko A. Field studies and numerical simulations of ice bustles on vertical piles // *Cold Regions Science and Technology*. – 2009. – Т. 58, № 1-2. – С. 15-28.
2. Sharapov D., Shkhinek K., DelValls T. Á. Ice collars, development and effects // *Ocean Engineering*. – 2016. – Т. 115. – С. 189-195.
3. Sharapov D., Shkhinek K. A method to determine the horizontal ice loads on the vertical steel structures which adfreeze to the ice level // *Coastal Engineering*. – 2014. – Т. 88, № 0. – С. 69-74.
4. Шарапов Д. А., Шхинек К. Н., Большев А. С. Горизонтальные ледовые нагрузки на вмерзшие сооружения // *Российский морской регистр судоходства: НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК*. – 2012. № 35. – С. 75-84.
5. ISO-19906 Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures. International Organization for Standardization, 2010.
6. API-RP-2N Recommended practice for planning, designing, and constructing structures and pipelines for arctic conditions. American Petroleum Institute, 1995.
7. Loset S., Shkhinek K., Gudmestad O., Strass P., Michalenko E., Frederking R., Karna T. Comparison of the physical environment of some Arctic seas // *Cold Regions Science and Technology*. – 1999. – Т. 29, № 3. – С. 201-214.
8. Wall H., Wadsö L. Corrosion rate measurements in steel sheet pile walls in a marine environment // *Marine Structures*. – 2013. – Т. V.33. – С. 21-32.
9. Stefan J. Über die theorie der eisbildung, insbesondere uber die eisbildung in polarmeere // *Ann. Phys.* – 1891. – Т. 42 (2). – С. 269-286.
10. Actions from Ice on Arctic Offshore and coastal Structures: Student's Book for Institutes of Higher Education. / Loset S., Shkhinek K., Gudmestad O. T., Hoyland K. – St. Petersburg: Publisher "LAN", 2006.
11. Marchenko A. Thermodynamic consolidation and melting of sea ice ridges // *Cold Regions Science and Technology*. – 2008. – Т. 52, № 3. – С. 278-301.

12. Ram P. K. The Dirac Delta Function and Delta Sequences // Mathematics in Science and Engineering / Ram P. K. Elsevier, 1983. – C. 1-19.
13. Sharapov D., Shkhinek K. Numerical calculation of the ice grow and empirical calculation results // Advanced Materials Research, Proceedings of 3rd International Conference on Materials and Products Manufacturing Technology (ICMPMT 2013), September 25-26, Changsha, China. – 2013.
14. Strub-Klein L., Høyland K. V. Spatial and temporal distributions of level ice properties: Experiments and thermo-mechanical analysis // Cold Regions Science and Technology. – 2012. – T. 71, № 0. – C. 11-22.
15. Crawford R. J., Byfield M. P. A numerical model for predicting the bending strength of Larssen steel sheet piles // Journal of Constructional Steel Research. – 2002. – T. 58, № 10. – C. 1361-1374.
16. Шаропов Д. А., Шхинец К. Н. Ледовые нагрузки на вмержшие сооружения // Труды RAO / CIS Offshore 2011. – 2011.

REFERENCES

1. Loset S., Marchenko A. Field studies and numerical simulations of ice bustles on vertical piles. Cold Regions Science and Technology. 2009, vol. 58, № 1-2, pp. 15-28.
2. Sharapov D., Shkhinek K., DelValls T. Á. Ice collars, development and effects. Ocean Engineering. 2016, vol. 115, pp. 189-195.
3. Sharapov D., Shkhinek K. A method to determine the horizontal ice loads on the vertical steel structures which adfreeze to the ice level. Coastal Engineering. 2014, vol. 88, pp. 69-74.
4. Sharapov D. A., Shkhinek K. N., Bol'shev A. S. Gorizontaľ'nye ledovye nagruzki na vmerzshie sooruzheniya [Gorizontaľ ice loads on ice-bounded structures]. Nauchno-tekhicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva [Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping]. 2012, N 35, pp. 75-84. (In Russian)
5. ISO-19906 Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures. International Organization for Standardization, 2010.
6. API-RP-2N Recommended practice for planning, designing, and constructing structures and pipelines for arctic conditions. American Petroleum Institute, 1995.
7. Loset S., Shkhinek K., Gudmestad O., Strass P., Michalenko E., Frederking R., Karna T. Comparison of the physical environment of some Arctic seas. Cold Regions Science and Technology. 1999, vol. 29, N 3, pp. 201-214.
8. Wall H., Wadsö L. Corrosion rate measurements in steel sheet pile walls in a marine environment. Marine Structures. 2013, vol.33, pp. 21-32.
9. Stefan J. Über die theorie der eisbildung, insbesondere über die eisbildung in polarmeere. Ann. Phys. 1891, vol. 42 (2), pp. 269-286.
10. Loset S., Shkhinek K., Gudmestad O. T., Høyland K. Actions from Ice on Arctic Offshore and coastal Structures: Student's Book for Institutes of Higher Education. St. Petersburg: Publisher "LAN", 2006.
11. Marchenko A. Thermodynamic consolidation and melting of sea ice ridges. Cold Regions Science and Technology. 2008, vol. 52, N 3. pp. 278-301.
12. Ram P. K. The Dirac Delta Function and Delta Sequences. Mathematics in Science and Engineering. Elsevier, 1983, pp. 1-19.
13. Sharapov D., Shkhinek K. Numerical calculation of the ice grow and empirical calculation results. Advanced Materials Research, Proceedings of 3rd International Conference on Materials and Products Manufacturing Technology (ICMPMT 2013), September 25-26, Changsha, China. 2013.
14. Strub-Klein L., Høyland K. V. Spatial and temporal distributions of level ice properties: Experiments and thermo-mechanical analysis. Cold Regions Science and Technology. 2012, vol. 71, pp. 11-22.
15. Crawford R. J., Byfield M. P. A numerical model for predicting the bending strength of Larssen steel sheet piles. Journal of Constructional Steel Research. 2002, vol. 58, N 10, pp. 1361-1374.
16. Sharapov D. A., Shkhinek K. N. Ledovye nagruzki na vmerzshie sooruzheniya [Ice loads on ice-bounded structures]. Trudy RAO / CIS Offshore [Proc. RAO/CIS Offshore], 2011. (In Russian)



ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 629.563.82

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА САМОХОДНЫХ СУДОВ-БУНКЕРОВЩИКОВ ДЛЯ ДОСТАВКИ СПГ-ТОПЛИВА НА СУДА В ПОРТУ

М.В. Власьев, канд. техн. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург,
e-mail: m_vlasev@ksrc.ru

В статье рассмотрена актуальная задача повышения эффективности работы бункеровочного флота порта и предложен способ выбора оптимального количества самоходных судов-бункеровщиков для доставки СПГ-топлива на суда, в основу которого положена теория массового обслуживания, а также разработанные автором алгоритмы. Описана модель функционирования судна-бункеровщика при доставке СПГ-топлива, которая учитывает все временные интервалы и необходимое время для выполнения заданного объема работы. Приведен пример решения оптимизационной задачи определения необходимого состава бункерного флота для условного порта.

Ключевые слова: бункеровщик, порт, доставка СПГ топлива, модель функционирования, метод, оптимизация, эффективность, бункеровочная база

SELECTION OF THE OPTIMAL NUMBER OF SELF-PROPELLED BUNKERING VESSELS TO DELIVER LNG FUEL TO SHIPS IN PORT

M.V. Vlasiev, PhD, FSUE "Krylov State Research Centre", St. Petersburg,
e-mail: m_vlasev@ksrc.ru

The article deals with the currently important task of improving the port's bunkering fleet efficiency. The method of selection of the self-propelled bunkering vessels optimal number to deliver LNG fuel to ships is suggested. The technique is based on the queuing theory, as well as algorithms developed by the author. The model of the self-propelled bunkering vessel functioning with LNG fuel delivery, which allows for all time intervals, and the time required to perform a given volume of works are described together with a sample solution of an optimization task for the determination of the required structure of the self-propelled bunkering vessels fleet for a conditional port.

Keywords: self-propelled bunkering vessels, port, LNG fuel delivery, model of functioning, method, optimization, efficiency, bunkering terminal

Бункеровка как хозяйственная деятельность по материально-техническому снабжению судов топливом и смазочными материалами является одной из самых важных и востребованных услуг в любом порту мира.

Поиск способов усовершенствования транспортно-логистических схем доставки топлива конечному потребителю в контексте основных тенденций мирового хозяйства является наиболее актуальной задачей для бункерного бизнеса.

В большинстве морских портов бункеровка судов осуществляется с использованием самоходных судов-бункеровщиков.

В мире ожидается переход с нефтяного судового топлива на газовое, что обусловлено, в первую очередь, ужесточением экологических норм по выбросам для мирового коммерческого судоходства. Использование сжиженного природного газа (СПГ) в качестве судового топлива является одним из способов решения данной проблемы, и это окажет большое влияние на индустрию бункеровки судов, что, в свою очередь, потребует создания сложной цепи поставок данного вида топлива, чтобы удовлетворить спрос на него в разных регионах мира.

Учитывая сказанное, здесь рассматривается проблема организации поставок СПГ-топлива на суда с помощью специальных судов-бункеровщиков, т.е. обоснование типа таких судов и определение потребности в них.

Наиболее распространенная схема организации бункеровки судов топливом посредством самоходных судов-бункеровщиков выглядит следующим образом: бункеровщик принимает топливо у причала бункеровочной базы и направляется к причалу отстоя, где он ждет заявку от бункеруемого судна, либо направляется непосредственно к такому судну, если заявка уже поступила. Если к моменту

окончания бункеровки судна других заявок нет, бункеровщик направляется к причалу отстоя. После исчерпания запаса топлива на бункеровщике он возвращается на бункеровочную базу для приема СПГ-топлива (самобункеровки).

Одним из основных технических параметров судна-бункеровщика при выборе оптимального варианта является его производительность, которая обеспечивает бункеровку любого судна в пределах минимального времени нахождения его в рассматриваемом порту.

Технологический процесс работы самоходного судна-бункеровщика можно разбить на две основные операции: «заправка бункеровщика» СПГ-топливом на бункеровочной базе и выдача им этого топлива судам-клиентам – «бункеровочная операция» (рис. 1).

Время, затрачиваемое на выполнение этих операций, принято называть циклом работы бункеровщика. При этом имеется в виду, что во время бункеровочной операции с заправляемыми судами бункеровщиком выдается все количество топлива, принятое им на бункеровочной базе, за исключением постоянных технологически необходимых переходящих остатков, величина которых обычно не превышает 10 % от общей вместимости бункеровщика.

Бункеровочная компания одновременно и хранит, и отгружает топливо судам-потребителям. Ее можно рассматривать как некую систему массового обслуживания, где судно-бункеровщик обслуживает поступающие от судов-клиентов заявки, удовлетворяя их спрос на топливо, предоставляемое здесь бункеровочной компанией.

Основными составляющими такой системы являются поток поступающих через случайные промежутки времени требований (заявок) и аппарат обслуживания.

Согласно [4] анализ фактического потока поступления заявок на бункеровку судов в порту в

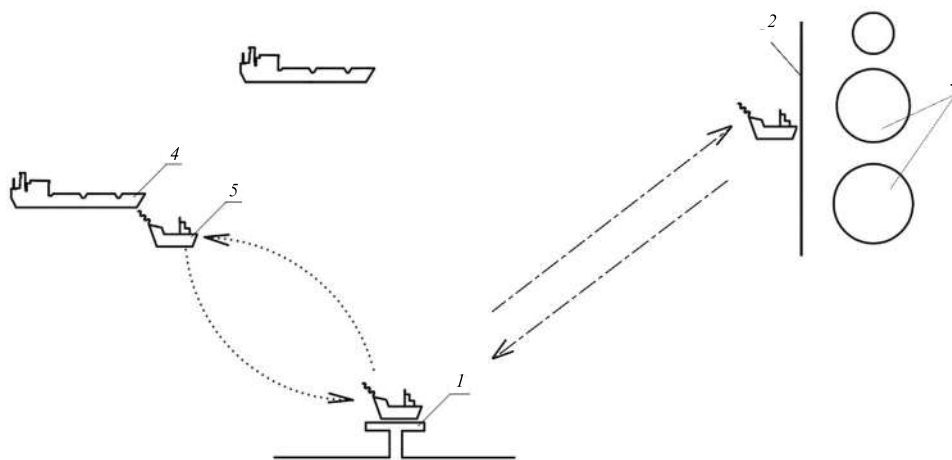


Рис. 1 Схема работы судна-бункеровщика:

1 – причал отстоя; 2 – причал бункеровочной базы (гравитационного типа); 3 – бункеровщик; 4 – судно-клиент; 5 – топливные склады бункеровочной базы

промежутке времени t показал, что их статистическое распределение соответствует простейшему потоку и может быть описано законом Пуассона:

$$P_n = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!}, \quad (1)$$

где n – количество поступающих в систему заявок;
 λ – параметр потока, равный среднему количеству заявок, поступающих в систему.

Функция распределения времени обслуживания предполагается экспоненциальной [1], [3]:

$$F(t) = 1 - e^{-\mu t}, \quad (2)$$

где $t > 0$, μ – параметр обслуживания (здесь, ее интенсивность).

Величина интенсивности обслуживания μ определяется

$$\mu = \frac{1}{t_{об}}, \quad (3)$$

где $t_{об}$ – среднее время обслуживания одним заправщиком одной заявки.

Учитывая случайный характер возникновения необходимости бункеровки СПГ-топливом судов и случайное время бункеровки, возможны и простои морских судов, ожидающих бункеровки, и простои бункеровщиков в случае отсутствия заявок от судов, требующих бункеровки.

Для решения задачи используются следующие формулы, которые отражают вероятность нахождения в системе количества судов, ожидающих бункеровку [1], [3]:

$$P_{бун.суд} = \begin{cases} \left(\frac{\rho}{S!} \right)^S \cdot P_{бун} \text{ при } S = 0, 1 \dots V \\ \left(\frac{\rho}{V!} \right)^S \left(\frac{\rho}{V} \right)^{S-V} \cdot P_{бун} \text{ при } S > V \end{cases} \quad (4)$$

где S – количество судов, нуждающихся в бункеровке;
 V – количество судов-бункеровщиков;
 ρ – интенсивность нагрузки системы $\rho = \lambda/\mu$;
 $P_{бун.суд}$ – вероятность бункеровки судов;
 $P_{бун}$ – вероятность простоя судов-бункеровщиков.

Вероятность простоя всех бункеровщиков $P_{бун}$ рассчитывается по формуле

$$P_{бун} = \left\{ \sum_{s=0}^{V-1} \frac{\rho^s}{S!} + \frac{\rho^V}{V!} \cdot \frac{V}{V-\rho} \right\}^{-1} \quad (5)$$

Среднее количество простаивающих бункеровщиков $N_{бун}$ определяется по формуле

$$N_{бун} = \sum_{s=0}^{V-1} (V-s) P_s = \sum_{s=0}^{V-1} (V-s) \frac{\rho^s}{S!} P_{бун} \quad (6)$$

Среднее количество простаивающих судов, ожидающих бункеровку $N_{суд}$ определяется выражением

$$N_{суд} = \frac{\rho}{V-\rho} \cdot \frac{\rho^V}{V!} P_{бун} \quad (7)$$

Выбор оптимального числа бункеровщиков может быть произведен с использованием функции потерь G_n от простоя судов в ожидании бункеровки и от простоя бункеровщиков в единицу времени. Данная величина определяется зависимостью

$$G_n = C_1 N_{суд} + C_2 N_{бун} \quad (8)$$

где C_1 – потери от простоя судов, ожидающих бункеровку;
 C_2 – потери от простоя судов-бункеровщиков.

Оптимальное число судов-бункеровщиков определяется на основании минимизации величины G_n , для чего надо найти способ изменения V (количества судов-бункеровщиков):

$$G_n = \frac{\left\{ C_1 \frac{\rho}{V-\rho} \cdot \frac{\rho^V}{V!} + C_2 \sum_{s=0}^{V-1} (V-s) \frac{\rho^s}{S!} \right\}}{\left\{ \sum_{s=0}^{V-1} \frac{\rho^s}{S!} + \frac{\rho^V}{V!} \cdot \frac{V}{V-\rho} \right\}} \quad (9)$$

Расчет $N_{бун}$, $N_{суд}$, $G_n(V)$ производится с использованием формул (4)... (7), а оптимальное количество бункеровщиков V должно удовлетворять условию

$$G_n = (V-1) \leq G_n(V) \leq G_n(V+1) \quad (10)$$

Первым этапом решения данной задачи является определение элементов, из которых складывается время цикла работы судна-бункеровщика. Ниже в общем виде представлена зависимость для нахождения продолжительности цикла работы бункеровщика $T_{ц}$, снабжающего суда СПГ-топливом, который включает следующие технологические операции:

Налив СПГ-топлива в емкости судна-бункеровщика на бункеровочной базе:

- Отшвартовка бункеровщика от причала отстоя $t_{отшв}$;
- Переход на бункеровочную базу от причала отстоя $t_{пб.б}$;
- Швартовка к причалу бункеровочной базы $t_{шв}$;
- Захолаживание грузовых танков бункеровщиков $t_{захл}$;
- Налив СПГ-топлива в грузовые танки бункеровщика $t_{пб.б}^{бб}$;
- Вспомогательные операции $t_{всп}^{бб}$;
- Отшвартовка от причала бункеровочной базы $t_{отшв}$;

- Обратный переход к причалам отстоя $t_{пб.б}^{бб}$;
- Швартовка у причала отстоя $t_{шв}$.

Бункеровочная операция:

- Отшвартовка от причала отстоя $t_{отшв}$;
- Переход к бункеруемому судну $t_{пб.б}^c$;
- Швартовка к причалу отстоя $t_{шв}$.
- Бункеровка судна $t_{пб.б}^c$;
- Вспомогательные операции $t_{всп}^c$;
- Отшвартовка от судна $t_{отшв}$;
- Обратный переход $t_{пб.б}^c$;
- Швартовка к причалу отстоя $t_{шв}$.

Формула для определения продолжительности цикла работы бункеровщика $T_{ц}$ приобретает вид:

$$T_{ц} = (2t_{пб.б}^{бб} + t_{пб.б}^{бб} + 2t_{шв} + t_{захл} + 2t_{отшв} + t_{всп}^{бб}) + (2t_{пб.б}^c + t_{пб.б}^c + 2t_{шв} + 2t_{отшв} + t_{всп}^c) \quad (11)$$

После подстановки выражений для определения значений отдельных слагаемых она примет вид:

$$T_{\text{ц}} = \left(2 \frac{\bar{L}_{66}}{v_{\text{пб}}} + \frac{Q_{\text{пб}} \alpha_q}{M_{66}} + 2t_{\text{шв}} + 2t_{\text{отшв}} + t_{\text{всп}}^{\text{бб}} + t_{\text{захл}} \right) + \left(2 \frac{\bar{L}_c}{v_{\text{пб}}} + \frac{Q_{\text{пб}} \alpha_q}{M_6} + 2t_{\text{шв}} + 2t_{\text{отшв}} + t_{\text{всп}}^c \right), \quad (12)$$

где: $\bar{L}_{66}$ – расстояние от причала отстоя судов-бункеровщиков до бункеровочной базы, миль;
 $\bar{L}_c$ – среднее расстояние от причала отстоя до бункеруемого судна, миль;
 $v_{\text{пб}}$ – скорость хода бункеровщика, уз;
 $Q_{\text{пб}}$ – вместимость бункеровщика по СПГ-топливу, м³;
 α_q – коэффициент использования вместимости бункеровщика, учитывающий постоянные переходящие (по технологическим условиям) остатки топлива, принимается 0,90;
 M_{66} – средняя интенсивность налива СПГ-топлива в грузовые танки бункеровщика, м³/ч;
 M_6 – средняя интенсивность перекачки топлива в танки судна-клиента с судна-бункеровщика, м³/ч.

В зависимости от соотношения вместимости бункеровщика и количества топлива, принимаемого бункеровщиком, отдельные элементы цикла могут повторяться либо отсутствовать.

В соответствии с указанными элементами эксплуатационного цикла работы бункеровщика, среднее время обслуживания одним бункеровщиком одной заявки на бункеровку τ , может быть рассчитано с учетом формулы (3):

$$t_{\text{об}} = \frac{\left(2 \frac{\bar{L}_{66}}{v_{\text{пб}}} + \frac{Q_{\text{пб}} \alpha_q}{M_{66}} + 2t_{\text{шв}} + 2t_{\text{отшв}} + t_{\text{всп}}^{\text{бб}} + t_{\text{захл}} \right)}{\frac{Q_{\text{пб}}}{q}} + \left(2 \frac{\bar{L}_c}{v_{\text{пб}}} + \frac{q}{M_6} + 2t_{\text{шв}} + 2t_{\text{отшв}} + t_{\text{всп}}^c \right) \quad (13)$$

где q – среднее количество СПГ-топлива, выдаваемого судну-клиенту, м³.

В соответствии с приведенным выше алгоритмом была создана компьютерная программа «Бункеровка», написанная на языке программирования Си (C++). Данная программа позволяет производить поиск оптимального количества бункеровщиков с учетом интенсивности заявок на бункеровку, затрат времени на технологические операции и затрат на содержание самих бункеровщиков. Пример интерфейса программы «Бункеровка» представлен на рис. 2.

С помощью разработанной программы было произведено определение потребного количества бункеровщиков для доставки СПГ-топлива к бункеруемым судам в условном порту, с последующей минимизацией значения затрат на организацию цепи поставки СПГ-топлива. Исходные данные, принятые в расчете, приведены в табл. 1.

Бункеровка

Время работы буксировочной компании, ч (в течении суток): 16

Интенсивность поступления требований судов на бункеровку, судов/сутки: 12

Расстояние от причала отстоя до СПГ бункеровочной базы, м. миль: 5

Вместимость бункеровщика, м. куб.: 4000

Диаметр передаточных СПГ шлангов, дюймы (бункеровщик - судно клиент): 12

Количество передаточных СПГ шлангов, шт: 1

Скорость перекачки СПГ -топлива, кубм./м (бункеровщик - судно-клиент): 2300

Скорость бункеровщика, узл: 5

Среднее количество СПГ-топлива выдаваемого одному судну, м. куб.: 1000

Среднее расстояние от причала отстоя до бункеруемого судна, мор. миль: 3

Стоимость простоя судна-клиента, USD: 3000

Стоимость простоя бункеровщика, USD: 1500

Время на технологические операции по наливу СПГ топлива на бункеровщик и переходы, ч

Отшвартовка от причала отстоя: 0,5

Переход на бункеровочную базу: 0,83

Швартовка к причалу бункеровочной базы: 0,5

Налив СПГ топлива в грузовые танки бункеровщика: 1,07

Время на захолаживание СПГ танков и передачу выпара: 1

Время на вспомогательные операции: 0,75

Отшвартовка от причала бункеровочной базы: 0,5

Обратный переход к причалу отстоя: 0,83

Швартовка у причала отстоя: 0,5

Время на бункеровочные операции и переходы, ч

Отшвартовка от причала отстоя: 0,5

Переход к бункерному судну: 0,42

Бункеровка судна: 0,36

Время на захолаживание СПГ танков и передачу выпара: 1

Время на вспомогательные операции: 0,75

Отшвартовка от судна: 0,5

Обратный переход к причалу отстоя: 0,42

Швартовка у причала отстоя: 0,5

Среднее время, затраченное одним бункеровщиком при обслуживании одной заявки на бункеровку, ч: 6,26

Расчёт

Зависимость значений целевой функции Gn(V) от количества бункеровщиков

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Gn(V)	50014	10097	7417	3761	2020	3142	4068	5301	5301	5301	5301	5301	1054

Рис. 2 Интерфейс компьютерной программы «Бункеровка»

Таблица 1

Исходные данные

Время работы бункеровочной компании (в течение суток – обязательно светлое время), ч	16
Среднее количество СПГ-топлива, выдаваемого судну, м ³	1000
Вместимость бункеровщика, м ³	4 000
Среднее расстояние от причала отстоя до бункеруемого судна, мили	3
Расстояние от причала отстоя до бункеровочной базы, мили	5
Скорость бункеровщика, уз	5
Затраты времени на швартовку, ч	0,5
Затраты времени на отшвартовку, ч	0,5
Затраты времени на вспомогательные операции, ч	0,75
Время на захолаживание грузовых танков бункеровщика, ч	1
Скорость перекачки СПГ топлива с бункеровочной базы на бункеровщик (один шланг 14"), м ³ /ч	2 800
Скорость перекачки СПГ топлива с бункеровщика на судно-клиент (один шланг 12"), м ³ /ч	2 300
Среднее время обслуживания одним бункеровщиком одной заявки на бункеровку одного судна, ч	6,26

Согласно [5] поставщик бункерного СПГ-топлива должен обеспечить достаточное освещение для создания безопасной рабочей среды при выполнении бункеровочных операций. Если требуемое освещение не может быть обеспечено в ночное время или в ненастную погоду, то бункеровка судна должна быть отложена на дневной период с нормальным естественным освещением, поэтому в рассматриваемом примере время работы бункеровщиков принимается 16 часов в сутки.

На основе представленных зависимостей были выполнены расчеты по поиску оптимального количества бункеровщиков для различных потоков интенсивности поступления требований судов на бункеровку ($T_{\text{бун.суд}} = 6, 12$ и 18 судов/сутки). При этом рассматривались два варианта: 1) стоимость простоя судна-клиента $C_1 = 3000$ \$/судно, а стоимость простоя судна-бункеровщика $C_2 = 1500$ \$/бункер; 2) стоимость простоя судна-клиента и стоимость простоя судна-бункеровщика одинаковы, т.е. $C_1 = 500$ \$/судно и $C_2 = 1500$ \$/бункер соответственно. Величины стоимости простоя приняты условно. В обоих вариантах расчеты проведены при одинаковых временных затратах и пропускной мощности всей системы по доставке СПГ-топлива на судно.

Результаты расчета для варианта 1 приведены в табл. 2 и на рис. 3, а для варианта 2 – в табл. 3 и на рис. 4, из которых можно определить положение экстремума функции удельных затрат при том или ином количестве используемых бункеровщиков.

Таблица 2

Результаты расчета значения целевой функции $G_n(V)$ и оптимального количества бункеровщиков при различной интенсивности потока заявок на бункеровку

Количество бункеровщиков V	Интенсивность потока судов на бункеровку судов/сут		
	$\lambda = 0,375$ (6 судов/сут (16 ч))	$\lambda = 0,75$ (12 судов/сут (16 ч))	$\lambda = 1,125$ (18 судов/сут (16 ч))
1	13 904	58 014	133 830
2	3 790	18 197	47 955
3	2 415	7 417	22 029
4	2 992	3 761	11 018
5	4 186	2 828	5 901
6		3 142	3 656
7		4 068	2 980
8		5 301	3 213
9			3 987
10			5 082

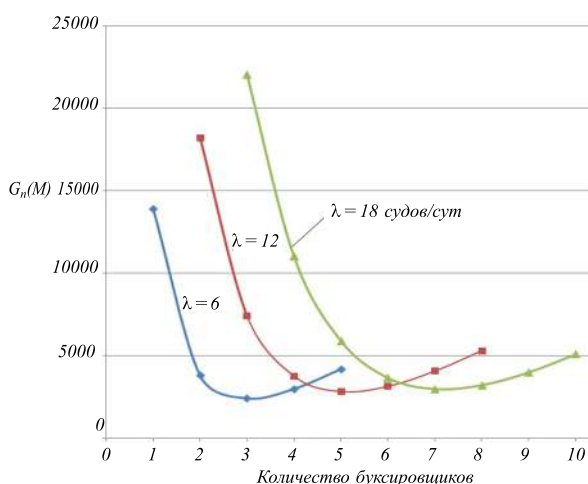


Рис. 3 Соотношение удельных затрат при различном количестве используемых бункеровщиков ($C_1 = 3000$ \$/судно, $C_2 = 1500$ \$/бункер)

Таблица 3

Результаты расчета значения целевой функции $G_n(V)$ и оптимального количества бункеровщиков при различной интенсивности потока заявок на бункеровку

Количество бункеровщиков V	Интенсивность потока судов на бункеровку судов/сутки		
	$\lambda = 0,375$ (6 судов/сут (16 ч))	$\lambda = 0,75$ (12 судов/сут (16 ч))	$\lambda = 1,125$ (18 судов/сут (16 ч))
1	5 978	26 309	62 493
2	1 671	7 150	20 305
3	1 733	2 510	8 092
4	2 772	1432	3 337
5	4 119	1 716	1 528
6	5 570	2 622	1 156
7		3 836	1 567
8		5 202	2 434
9		6 643	3 571
10			4 868

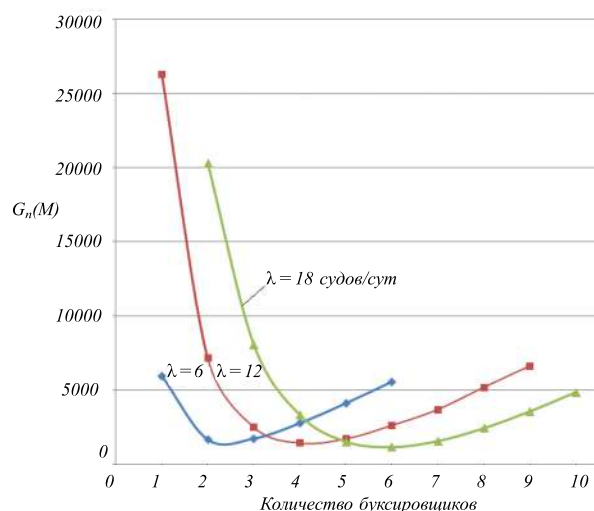


Рис. 4 Соотношение удельных затрат при различном количестве бункеровщиков ($C_1 = 1500$ \$/судно, $C_2 = 1500$ \$/бункер)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный способ оптимизации транспортно-логистической схемы организации бункеровки судов СПГ-топливом позволяет определить оптимальное количество бункеровщиков с использованием целевой функции в виде величины удельных затрат за простой бункеруемых судов и расходов на содержание судов-бункеровщиков и повышение экономической эффективности бункеровки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. / Е.С. Вентцель – Москва: Наука, 1988. – 208 с.
2. Лабскер Л.Г., Бабешко Л.О. Теория массового обслуживания в экономической сфере. / Л.Г. Лабскер, Л.О. Бабешко – Москва: Юнити, 1998. – 318 с.
3. Розенберг В.Я., Прохоров А.И. Что такое теория массового обслуживания. / В.Я. Розенберг, А.И. Прохоров – Москва: Советское радио, 1962. – 230 с.
4. Фролов А.С. Организация, планирование и технология перегрузочных работ в морских портах. / А.С. Фролов, П.В. Кузьмин, А.В. Степанец – Москва: Транспорт, 1979. – 408 с.
5. Информационный бюллетень Американского бюро судоходства "LNG Bunkering: Technical and Operational Advisory". [Электронный ресурс]: Доступен по адресу: http://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/2015/LNG_Bunkering%20Advisor.pdf content/dam/eagle/publications/2015/LNG_Bunkering%20Advisor.pdf (доступен 16.09.2016)

REFERENCES

1. Venttsel' E.S. Issledovanie operatsiy. Zadachi, printsipy, metodologiya [Operation research. Tasks, foundations, methodology]. Moscow: Nauka Publ., 1988, 208 p. (In Russian)
2. Labsker L.G., Babeshko L.O. Teoriya massovogo obsluzhivaniya v ekonomicheskoy sfere [Waiting theory in economic sphere]. Moscow: Yuniti Publ., 1998, 318 p. (In Russian)
3. Rozenberg V.Ya., Prokhorov A.I. Chto takoe teoriya massovogo obsluzhivaniya. [What is the waiting theory]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1962, 230 p. (In Russian)
4. Frolov A.S. Organizatsiya, planirovanie i tekhnologiya peregruzochnykh rabot v morskikh portakh [Organization, planning and technology of pick-and-place jobs in seaports]. A.S. Frolov, P.V. Kuz'min, A.V. Stepanets. Moscow: Transport Publ., 1979, 408 p. (In Russian)
5. LNG Bunkering: Technical and Operational Advisory Available at: http://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/2015/LNG_Bunkering%20Advisor.pdf content/dam/eagle/publications/2015/LNG_Bunkering%20Advisor.pdf (accessed 16.09.2016)



ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.563.21.002.72

МОНТАЖ ПЛАВУЧИХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК МЕТОДОМ НАДВИГА НА ПЛАВУ С ДЕФОРМИРОВАНИЕМ КОНСТРУКЦИЙ ОПОРНОГО ОСНОВАНИЯ

Г.Б. Крыжевич, д-р техн. наук, проф., ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

Н.Г. Попов, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург,
e-mail: krylov@krylov.spb.ru

На основе обобщения отечественного и зарубежного опыта работ по монтажу морских платформ методом надвига на плавуче анализировались особенности рационального осуществления транспортно-монтажных операций и этапы их проведения. Формулируются требования к большегрузным судам, перевозящим опорное основание и верхнее строение к месту монтажа полупогружных плавучих буровых установок на морской акватории. Обсуждаются особенности систем швартовки, используемых при монтаже. Анализируется конструкция стыковочных устройств, обеспечивающих соединение опорного основания платформ с верхним строением, сопровождающееся деформированием конструкций основания.

Ключевые слова: плавучие буровые установки, верхние строения платформ, монтаж морских платформ методом надвига на плавуче, полупогружные буровые установки, океанотехника

FLOAT-OVER ASSEMBLY OF DRILLING RIGS AT SEA WITH SUBSTRUCTURE CONSTRUCTIONS DEFORMATION

G.B. Kryzhevich, DSc, professor, FSUE "Krylov State Research Centre", St. Petersburg

N.G. Popov, FSUE "Krylov State Research Centre", St. Petersburg,
e-mail: krylov@krylov.spb.ru

The paper reviews the experience in the float-over assembly of marine platforms available in Russia and abroad to analyze the aspects of rational transport and installation operations and step-wise procedures. Requirements are formulated for heavy-lift vessels intended to carry the substructure and topsides to the installation site of semi-submersible drilling rigs at sea. Specific features of the mooring systems used during installation are discussed, as well as the design of mating structures providing the substructure and topsides juncture accompanied by the deformation of the substructure.

Keywords: floating drilling rigs, topsides, float-over assembly of marine platform, semi-submersible drilling units, marine structures

1. ОСОБЕННОСТИ НАПЛЫВНОГО СПОСОБА

Необходимость разработки месторождений в отдаленных местах, где требуются плавучие эксплуатационные платформы и платформы на гравитационном основании, стимулирует спрос на монтаж ВСП методом надвига на плаву с использованием саморазгружающихся (полупогружных) большегрузных транспортных судов (СБТС).

Метод надвига на плаву используется для монтажа плавучих и стационарных платформ более 30 лет. С ростом размера и веса ВСП их монтаж на

опорные основания (нижнюю часть ППБУ) методом налива становится все более привлекательной альтернативой их установке с использованием кранов большой грузоподъемности. Практика создания морских платформ показывает, что в большинстве случаев монтаж на плаву становится более предпочтительным методом, когда вес верхних строений превышает 10 тыс. тонн. Примером успешного выполнения монтажа методом надвига на плаву является стыковка и сборка ППБУ «Полярная звезда» из двух блоков (ВСП и опорного основания) в морских условиях (рис. 1 и 2), осуществлявшаяся по проекту, разработанному в



Рис. 1 Перевозка к месту монтажа опорного основания судном "Talisman" (а) и ВСП судном "Black Marlin" (б) и смонтированная из этих блоков наплым способом ППБУ «Полярная звезда» (в)

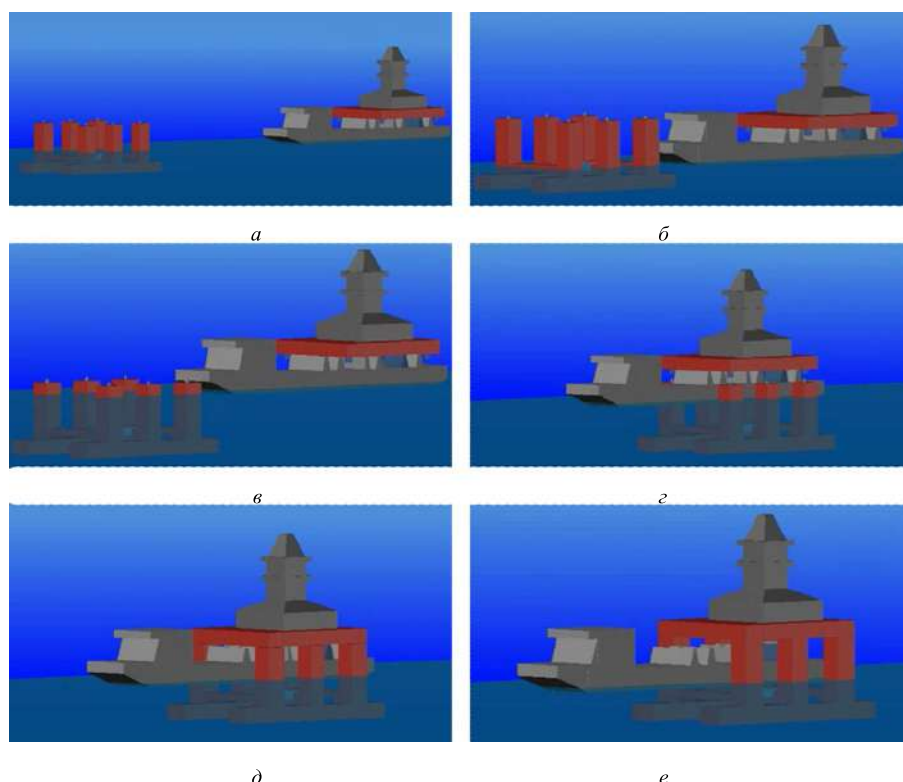


Рис. 2 Схемы выполнения операций при монтаже ВСП ППБУ «Полярная звезда» на опорное основание методом налива: а – подход СБТС с расположенным на его палубе ВСП к раскрепленному на якорях опорному основанию; б – остановка СБТС у опорного основания с выгруженным балластом; в – балластировка опорного основания; г – заход СБТС в пространство между колоннами опорного основания и его позиционирование (наведение); д – стыковка ВСП с опорным основанием, сопровождающаяся балластировкой судна и дебалластировкой опорного основания, а также заканчивающаяся соединением стыкуемых объектов с помощью сварки; е – дополнительные операции по дебалластировке опорного основания и балластировке СБТС, выход его из пространства между колоннами предварительно собранной установки

Крыловском государственном научном центре. Целью настоящей работы является обобщение отечественного и зарубежного опыта работ по монтажу морских платформ методом надвига.

Чтобы более взвешенно оценить, является ли метод установки на плаву лучшим выбором по сравнению с вертикальным способом, следует рассмотреть его преимущества и недостатки. К преимуществам относится:

- возможность монтажа ВСП большой массы;
- возможность монтажа ВСП на большом удалении от места его строительства при низких затратах на доставку к месту монтажа;
- снижение затрат на монтаж как за счет уменьшения количества и протяженности соединений, так и благодаря снижению продолжительности монтажа и минимизации количества часов работы в море;
- снижение риска срыва монтажа благодаря возможности его четкой регламентации.

Недостатки метода:

- необходимость детальной проработки проекта перевозки и монтажа ВСП;
- необходимость оснащения мест соединения опор основания платформы и ВСП относительно сложными стыковочными устройствами.

2. ЭТАПЫ ПРОВЕДЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-МОНТАЖНЫХ ОПЕРАЦИЙ НАПЛЫВНЫМ СПОСОБОМ

При проработке проекта транспортно-монтажных операций необходимо подразделить технологический процесс выполнения перевозки и монтажа ВСП на несколько этапов, первыми из которых являются изготовление и монтаж (на верхнем строении и опорном блоке) частей стыковочного устройства, необходимое по условиям безопасной перевозки подкрепление перевозимого объекта и его отгрузка.

Требования к этапу отгрузки регламентируются общим весом верхних строений, амплитудой прилива, размерами и оснащением причала завода. После отгрузки верхние строения в сборе должны быть выполнено закрепление ВСП на борту судна (баржи) для морской транспортировки (рис. 3 и 4). После прибытия судна с грузом на место сборки платформы из крупногабаритных модулей (рис. 5) должна быть окончательно выполнена подготовка к началу операции монтажа и предшествующей ему так называемой фазы ожидания окна погоды. Подготовительная работа на судне, перевозимом ВСП и опорном блоке должна включать, например, частичное или полное удаление соединений морских креплений, монтаж и подготовку к работе швартовных (стыковочных) лебедок, запуск



Рис. 3 Отгрузка 30000-тонного верхнего строения морской платформы на баржу HYSY229 компании Dockwise методом надвига, которое в дальнейшем было установлено наплавным способом на морскую платформу на газовом месторождении SHWE на шельфе Мьянмы



Рис. 4 Отгрузка фирмой Samsung Heavi Industri 20000-тонного верхнего строения полупогружной буровой установки «Полярная звезда» на СБТС компании Dockwise

оборудования и каналов информации для мониторинга движения и погодных условий, подготовку к активной работе системы передачи нагрузки (включая подготовку балластных систем).

Следующим этапом монтажа является позиционирование объектов стыковки (ВСП и опорного блока). СБТС с ВСП перемещают в опорный блок морского основания для подготовки к фазе стыковки (рис. 6). После того как судно располагается непосредственно над опорной структурой и пришвартовано, выполняется предварительное наведение (совмещение) верхней и нижней частей стыковочного устройства (рис. 7). При этом опоры верхнего строения должны быть совмещены с опорами блока.

Для наведения ВСП на опорное основание используются буксиры, лебедки или комбинация



Рис. 5 Стоянка судна на якорях при подготовке к началу операции монтажа верхнего строения полупогружной буровой установки «Полярная звезда»



Рис. 6 Заход СБТС с расположенным на нем ВСП в пространство между колоннами опорного блока основания для подготовки к фазе стыковки

этих технических средств. Совмещение конструкций производится по реперным точкам или на основе индикации, обеспечиваемой оптическими или лазерными системами.

Как только верхнее строение с помощью операции быстрой балластировки судна (или

опорного основания ППБУ) опускается на башни опорного блока и при этом в балластные цистерны поступает большое количество воды, что позволяет судну погрузиться (или опорному основанию ППБУ всплыть), начинается фаза стыковки. Вес верхнего строения полностью переносится на опорный блок и тем самым осуществляется посадка ВСП на опорное основание (или всплытие опорного основания ППБУ).

В послестыковочной фазе ВСП закрепляется (обычно с помощью сварки) на верхней части опорного блока морского основания, и между состыкованными объектами и судном проверяется наличие зазора или специальных прокладок (выполняемых из дерева), позволяющих обеспечить безопасный выход СБТС из смонтированного сооружения, точнее из его межопорного пространства (рис. 8). Затем судно отходит от опорного блока своим ходом или с помощью буксиров.

3. ТРЕБОВАНИЯ К БОЛЬШЕГРУЗНОМУ СУДНУ

Для выполнения операций по бескрановой установке СБТС должно отвечать следующим главным критериям:

- судно должно иметь достаточные запасы плавучести и остойчивости при всех положениях (осадках и углах дифферента) и видах загрузки (балластировки), реализуемых при транспортно-монтажных операциях;
- судно должно быть достаточно узким, чтобы войти между опорами основания платформы. Например, если расстояние между опорами ВСП с большими массогабаритными показателями (порядка 15000 т или более) составляет около 46 м, то с учетом



Рис. 7 Положение верхней и нижней частей стыковочного устройства (имеющих черный цвет) непосредственно перед стыковкой (а) и в момент завершения стыковки (б)



Рис. 8 Выход судна-перевозчика из межопорного пространства ППБУ с выполнением страховочных функций двумя буксирами

номинальных зазоров ширина судна не должна превышать 42 м;

- судно должно быть оснащено подвижными надстройками и иметь открытую корму. Для обеспечения идеального размещения верхнего строения на борту судна надстройки, облегчающие балансировку и балластировку, должны иметь возможность передвигаться, позволяя наилучшим образом разместить груз. Открытая корма позволяет судну во время последнего этапа установки выйти из межопорного пространства;

- судно должно обладать достаточной прочностью, чтобы без аварийных и катастрофических последствий удерживать и транспортировать тяжелые верхние строения. Должна быть проверена прочность судна и перевозимого груза при ударных нагрузках (при погрузке, при ударах волн в свешивающиеся с судна части перевозимого ВСП и т. д.);

- перед загрузкой судно обычно оснащается специальными креплениями и оборудованием для обеспечения безопасности погрузочных операций, транспортировки и монтажа. Для обеспечения точности установки груза на борту судна целесообразно использовать принятые при эксплуатации СБТС специальные приспособления.

4. СИСТЕМА ШВАРТОВКИ

Размеры системы швартовки, необходимой для большинства операций на плаву, должны быть рассчитаны с учетом ожидаемого перемещения судна, условий окружающей среды и геометрии платформы. Швартовные канаты, как правило, выполняются либо полностью из стали, либо имеют полипропиленовое окончание. Канаты и их предварительное натяжение рассчитываются и корректируются так, чтобы обеспечить точное позиционирование судна и свести к минимуму его

движение. Должен быть проверен период собственных колебаний судна, чтобы убедиться в отсутствии во время монтажа его резонансной качки.

Габариты элементов системы швартовки должны быть достаточно малы, чтобы ее было легко расположить, подключить к работе и отсоединить после проведения стыковки, и в то же время она должна быть достаточно мощной, чтобы надежно контролировать положение судна. При использовании при проведении морской операции обычных судов, предназначенных для перевозки грузов порядка 20000 тонн, швартовные лебедки выбираются, как правило, с тяговой мощностью около 110 т и диаметром троса не более 5-6 см. Обеспечить позиционирование в морских условиях уникальных (более крупных) судов будет трудно, для них потребуются специальные лебедки. При использовании в стыковочной операции относительно коротких тросов, которые прикрепляются к опорному блоку, пригодны лебедки с тяговым усилием порядка 45 т.

5. СТЫКОВОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА

Сложность и уникальность проведения транспортно-монтажных операций наплавным способом в значительной мере обусловлена необходимостью стыковки крупногабаритных супермодулей (ВСП и опорного основания) с высокой точностью (с обеспечением технологического зазора по свариваемым кромкам ВСП и НО по стыкуемым контурам всех шести колонн не более 2 – 3 мм, и разностенностью вертикально расположенных стыкуемых элементов – пластин, оболочек ребер жесткости и т. д., не превышающей величин такого же порядка). Такие значения допусков на стыковку исключают возможность применения для достижения необходимой точности при монтаже крупногабаритных супермодулей обычных подходов, основанных на применении системы допусков и посадок, принятой в машиностроении. В связи с этим обстоятельством при монтаже крупногабаритных супермодулей применяют принципиально иные технические решения и технологические приемы.

При их использовании также целесообразно установить допуски на точность изготовления супермодулей и выполнять контроль их соблюдения. В первую очередь, необходимо контролировать технологические допуски на отклонения от номинальных величин расстояний между сопрягаемыми при монтаже (посадочными) поверхностями ВСП и опорным основанием, составлявшие величины порядка 25 мм. Кроме того, необходимо контролировать отклонения от номинальных размеров, возни-

кающие при выполнении всех видов транспортировки супермодулей, сопровождающейся деформированием перемещаемых конструкций (например, при отгрузке ВСП с достроечной площадки на судно-перевозчик). Поскольку в конструкциях супермодулей остаточные напряжения при их сварке и сборке могут достигать величин порядка предела текучести, то любая транспортная операция может приводить к появлению как упругих, так и значительных остаточных деформаций ВСП и НО, приводящих к появлению дополнительных отклонений от номинальных размеров, существенно превышающих технологические допуски. При реализуемой в настоящее время технологии монтажа неблагоприятное влияние неточности изготовления крупногабаритных супермодулей и их дополнительного деформирования при погрузочно-транспортных операциях ликвидируется с помощью специальных стыковочных устройств. Они позволяют осуществлять принудительное совмещение стыкуемых поверхностей ВСП и опорного основания за счет упругого деформирования конструкций. Совмещение происходит, главным образом, благодаря относительно небольшим изменениям формы и размеров колонн опорного основания (а также, в случае монтажа ППБУ, его понтонов), происходящим под действием сил веса ВСП, переносимого постепенно с СБТС на основание. Перенос осуществляется путем балластировки судна-перевозчика, сопровождающейся увеличением его осадки. В случае монтажа ППБУ перенос веса может происходить также благодаря дебалластировке опорного основания и его всплытию.

Таким образом, для обеспечения стыковки и последующего соединения ВСП с опорным основанием используются стыковочные устройства, являющиеся важнейшими элементами системы

монтажа. Схема конструкции стыкового устройства приведена на рис. 9, схема установки его верхней части на ВСП – на рис. 10, а внешний вид стыковочного устройства после выполнения им своих функций при монтаже ВСП на опорном основании – на рис. 11.

В сечении по оси стыковочного устройства (рис. 9) показаны основные силовые конусные элементы 1 и 2, первый из которых неподвижно закреплен с помощью сварки на опорном основании, а второй способен перемещаться в вертикальном направлении в цилиндре 3, закрепленном неподвижно в приваренной к ВСП гильзе 4. При переносе веса ВСП с судна-перевозчика на опорное основание и наличии технологических отклонений стыкуемых поверхностей, т.е. при наличии несоосности конусных элементов 1 и 2, равной Δ , на элемент 1 действует боковая сила, смещающая элемент 1 в горизонтальном направлении и вызывающая упругое деформирование (изгиб) колонны опорного основания. Благодаря этому происходит уменьшение несоосности (вплоть до значений, не превосходящих допустимые по условиям сварки величины) и совмещение стыкуемых (свариваемых) элементов супермодулей. Вследствие особенностей геометрии контактных поверхностей боковое перемещение конусного элемента 1 сопровождается вертикальным перемещением элемента 2. Такое перемещение вызывает сжатие деформируемых элементов 5, выполненных из низкомолекулярных эластомеров и разделенных между собой смещаемыми в вертикальном направлении дисками 6. При удовлетворительном совмещении в горизонтальном направлении стыкуемых элементов ВСП и опорного основания могут иметь место недопустимо большие (по условиям сварки)

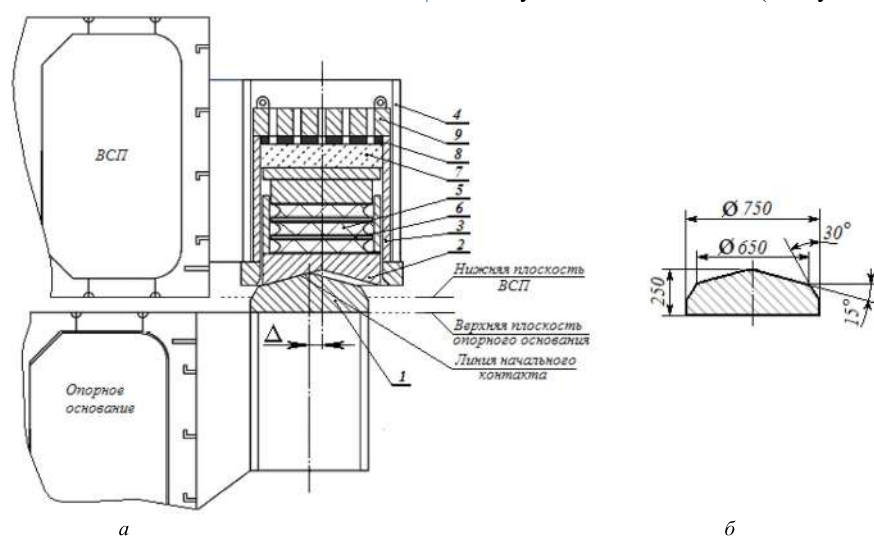


Рис. 9 Схема конструкции стыкового устройства, верхняя часть которого расположена на верхнем строении, а нижняя – на опорном основании: а – положение частей устройства непосредственно перед стыковкой (перед принудительным совмещением стыкуемых элементов ВСП и опорного основания); б – геометрия и размеры конусного элемента нижней части устройства, использовавшегося при монтаже супермодулей ППБУ «Полярная звезда»

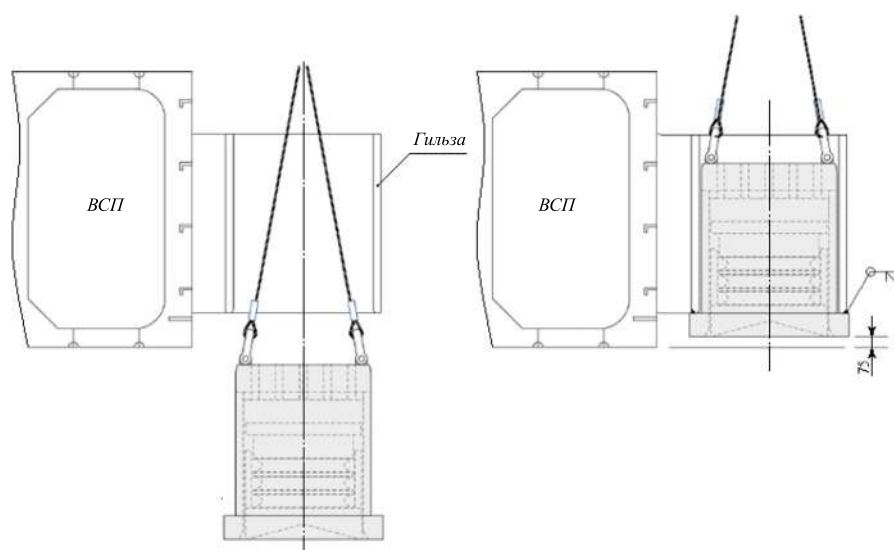


Рис. 10 Схема монтажа верхней части стыковочного устройства: а – положение верхней части перед монтажом на ВСП; б – положение после монтажа и приварки к гильзе, установленной на ВСП



Рис. 11 Вид стыковочного устройства после выполнения монтажа ВСП на опорном основании ППБУ «Полярная звезда»

вертикальные зазоры между свариваемыми элементами. В этом случае выполняется частичное выплавление прокладки 7, выполненной из термопластичного полимерного материала, разогреваемого с помощью электронагревательного элемента 8. Выплавление происходит при открытых отверстиях в крышке 9, неподвижно закрепленной на цилиндре 3.

Приведенные выше особенности технологии монтажа супермодулей морских платформ методом наплыва определяют необходимость предъявления достаточно жестких требований к элементам системы монтажа в части допустимых максимальных относительных смещений стыкуемых элементов и стыковочных нагрузок. Если эти смещения или нагрузки превышены, то монтаж может быть сорван или не обеспечена безопасность проведения работ. В частности, недопустимо превышение принятой в проекте допускаемой несоосности стыкуемых конических поверхностей верхних (устанавливаемых на ВСП) и нижних (устанавливаемых на опорных колоннах) частей стыковочного устройства. При оценке несоосности должны быть учтены технологические допуски на точность изготовления и совмещения стыкуемых поверхностей в горизонтальной и вертикальной плоскостях, нагрузки, вызванные внецентренным приложением усилий (перекосами), и другие значимые факторы.

Верхние значения вертикальных и боковых нагрузок на элементы стыковочного устройства определяются не только технологическими допусками на точность изготовления конструкций ВСП и опорного основания, допусками на деформации конструкций, наблюдаемые при погрузочно-транспортных операциях, но и конструкционной прочностью опорного основания и верхних строений. Как правило, во время проектирования верхних строений и основания платформы подробно не прорабатываются вопросы транспортировки и монтажа супермодулей. В таких случаях принятие

основных решений при конструировании и обеспечении прочности супермодулей должно сопровождаться анализом предыдущего опыта, накопленного при перевозке и монтаже платформ-прототипов.

6. ОГРАНИЧЕНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ МОНТАЖА НАПЛЫВНЫМ СПОСОБОМ

При проведении монтажа наплывом необходимо принимать во внимание ограничивающие условия окружающей среды (прежде всего ветро-волновые условия) и ограничения во времени, определяемые «окном» погоды. Место монтажа и ориентация опорного основания, принимаемая при его закреплении на месте монтажа платформы, должны устанавливаться с учетом защищенности от интенсивных ветро-волновых воздействий, результатов работ по выявлению направлений, откуда в разное время года приходит шторм, а также анализа метеоусловий на месте монтажа за прошлые годы. Хотя полученный таким образом результат не будет строго детерминированным, он все же позволит уменьшить риски задержки проведения и срыва операции монтажа, оценить продолжительность простоя из-за погодных условий для данного сезонного периода.

Длительность «окна» погоды должна быть согласована с продолжительностью основных этапов монтажа (в том числе с производительностью балластных систем, определяющей минимальную длительность балластировки). С учетом этих обстоятельств системы приема-откачки балласта судна и блоков монтируемого сооружения должна:

- иметь производительность, обеспечивающую выполнение операции стыковки за срок, ограниченный «окном» погоды (с учетом особенностей прогнозирования погодных условий желательно, чтобы этот срок не превышал 48 часов);
- обеспечить быстрое выравнивание осадки сооружения посредством несимметричного приема-откачки балласта для парирования неблагоприятных последствий любого перемещения центра тяжести;
- не допускать несанкционированное перетекание и неконтролируемое поступление воды в аварийных ситуациях;
- обеспечить быстрое возвращение к безопасной посадке (гарантировать обратимость монтажной операции).

Швартовы и тросы стыковки (а также кранцы, если они используются) имеют свои предельные критерии. Должны быть проверены границы передвижения баржи, с тем чтобы избежать столкновения судна с платформой. В заключительном анализе устанавливаются функциональные

зависимости волновых ограничений от направления подхода, что обеспечит безопасность работ.

Особое внимание должно быть уделено формулировке основных случаев нагружения для ВСП и опорного основания при транспортно-монтажных операциях. Действующие нагрузки должны определяться с учетом ограничений по интенсивности волнения, оценки нагрузок, вызванных волнением, и необходимости выполнения следующих операций:

- прием балласта в опорное основание до монтажной осадки (или установка опорного основания на грунт);
- позиционирование СБТС с находящимся на нем ВСП над опорным основанием;
- погружение СБТС или всплытие опорного основания до контакта ВСП с опорным основанием;
- стыковки ВСП с опорным основанием, сопровождающемся силовым деформированием конструкций основания на начальной стадии переноса веса ВС с баржи на опорное основание в случае несовпадения (несоосности) стыкуемых поверхностей ВСП и основания в горизонтальной плоскости;
- перенос веса ВСП с СБТС на опорное основание путем продолжения работ по балластировке;
- балластировка опорного основания до проектной осадки (если такая операция предусматривается).

Нагрузки на конструкции опорного основания должны определяться с учетом наружного и внутреннего гидростатического давления, балластировки опорного основания и веса конструкций ВСП. Необходимо принимать во внимание, что вследствие особенностей стыковочного устройства вес конструкций ВСП вызывает, во-первых, действие на колонны опорного основания не только вертикальных, но и горизонтальных усилий, зависящих от эксцентриситета сопрягаемых поверхностей верхней и нижней частей стыковочных устройств, и, во-вторых, при переносе веса ВСП с СБТС на опорное основание происходит деформирование опорного основания, сопровождающееся перераспределением контактных сил в стыковочных устройствах и внутренних сил в конструкциях ВСП и основания.

Нагрузки на конструкции ВСП определяются с учетом следующих процессов:

- совместного деформирования с конструкциями СБТС;
- переноса собственного веса ВСП с судна на опорное основание;
- балластировки СБТС;
- контактного взаимодействия с опорным основанием при силовом деформировании последнего в процессе стыковки.

Должны приниматься меры по предотвращению больших контактных усилий и ускорений при

позиционировании и швартовке СБТС в пространстве между колоннами опорного основания. При отсутствии возможности исключения контактов системы СБТС-ВСП с опорным основанием необходимо дополнительно учитывать контактные нагрузки.

В проекте транспортно-монтажной операции должны быть учтены все реально возможные аварийные условия нагружения и отражены в расчетах прочности и перемещений точек конструкций.

Возможность горизонтального смещения ВСП должна быть ограничена в период с момента начала переноса веса на опорное основание до установки постоянных связей между ВСП и опорным основанием.

Несущая способность средств, ограничивающих смещение, должна быть достаточной для удержания ВСП или палубы в наихудшем случае нагружения, включая ветровой крен и нагрузки от течения и волнения. Нагрузки следует рассматривать с учетом трения.

Крепление ВСП к опорному основанию после стыковки должно при любой посадке должно не разрушаясь воспринимать нагрузки, возникающие при меньшем из следующих углов наклона в сочетании с наклоном от ветра:

- угла, при котором происходит заливание;
- угла, при котором в сооружении или в его составных частях превышаются допускаемые напряжения;
- угла, равного 15°.

Опоры и крепления на барже, ограничивающие горизонтальное смещение ВСП, а также прочность и устойчивость элементов конструкций строения и нижнего основания должны иметь достаточную прочность для восприятия всех вертикальных и горизонтальных нагрузок, вызываемых наклонами ВСП и баржи во время переноса веса.

Опорное основание должно быть защищено от действия возможных аварийных нагрузок, таких как разрыв швартова (не относится к случаю, когда швартовы травятся во время стыковки ВСП), затопление технологических понтонов, нагрузки от падающих предметов, столкновение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в Крыловском государственном научном центре проработки и опыт создания ППБУ «Полярная звезда» и «Северное сияние» свидетельствуют о том, что монтаж в морских условиях платформ из крупногабаритных модулей (когда вес

верхних строений превышает 10 тыс. тонн) целесообразно осуществлять методом надвига на плаву с деформированием конструкций опорного основания. При этом достигается снижение затрат на монтаж как за счет исключения необходимости использования уникальных плавучих кранов большой грузоподъемности, так и благодаря снижению продолжительности монтажно-сборочных работ море. Одновременно обеспечивается:

- возможность монтажа морских платформ на большом удалении от места строительства их модулей при низких затратах на их доставку к месту работ;
- высокая надежность и безопасность проведения монтажа;
- снижение риска его срыва его сроков благодаря возможности четкой регламентации процесса монтажа;
- улучшение качества строительства морских платформ.

Использованные при строительстве ППБУ «Полярная звезда» и «Северное сияние» стыковочные устройства, рассматриваемые как важнейшие элементы системы монтажа, показали хорошую работоспособность и высокую надежность при выполнении принудительного совмещения стыкуемых контуров, осуществляемого за счет упругого деформирования конструкций опорного основания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алферов В.И., Крыжевич Г.Б., Подгорный Л.Н., Попов Н.Г., Шапошников В.М. Опыт разработки проекта морской перевозки супермодулей ППБУ «Полярная звезда» и технологии их сборки в морских условиях. – Труды Крыловского государственного научного центра, 2011, вып. 65 (349).
2. Правила разработки и проведения морских операций. НД 2-090601-004, Российский морской регистр судоходства, 2014.

REFERENCES

1. Alferov V.I., Kryzhevich G.B., L. Podgorny L.N., Popov N.G., Shaposhnikov V.M. Opyt razrabotki proekta morskoy pervozki supermodulej polupogrugnoy burovoy ustanovki "Poliamna Zvezda" i technologii ich sborki v morskikh usloviyakh [Transporting super modules of "Polyarnaya Zvezda" drilling unit and assembling them at sea]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra [Transactions of Krylov State Research Centre], 2011, 65 (349), pp. 5-16. (In Russian)
2. Rules for Planning and Execution of Marine Operations. Russian maritime register of shipping, 2014. (In Russian)

УДК 629.123

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА НОСОВУЮ И КОРМОВУЮ ЧАСТЬ СОВРЕМЕННЫХ СУДОВ ЛЕДОВЫХ КЛАССОВ И ЛЕДОКОЛОВ С НАКЛОННЫМ БОРТОМ

А.В. Андриюшин, д-р техн. наук, Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота (АО «ЦНИИМФ»), Санкт-Петербург, тел. +7 (812) 271-81-05,
e-mail: AndryushinAV@cniimf.ru

О.А. Григорьева, канд.техн.наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, тел. +7 (812) 312-85-72, e-mail: grigoryeva.oa@rs-class.org

М.А. Кутейников, д-р техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, +7 (812) 312-85-72, e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

А.С. Большев, д-р техн.наук, проф., Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, тел. +7 (812)297-59-54, e-mail: bolshev@cef.spbstu.ru

С.А. Фролов, канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, e-mail: frolov@cef.spbstu.ru

П.С. Зуев, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: ZuevPS@cniimf.ru

В данной статье представлена методология определения ледовой нагрузки, воздействующей на ледовый пояс судна. Этот метод также применим для кормовых оконечностей современных судов двойного действия. Расчетные параметры ледовой нагрузки позволяют оценивать прочность корпуса судна, работающего в различных ледовых условиях, в зависимости от скорости. Разработанная методика верифицирована в том числе и по результатам натурных измерений ледовой нагрузки. Результаты анализа показывают, что получаемая в расчете ледовая нагрузка коррелируется с расчетами результатов натурных измерений.

Ключевые слова: лед, суда двойного действия, корпус, методология, ледовые нагрузки, ледовое взаимодействие, ледовое давление, прочность льда

DETERMINATION OF ICE LOADS ACTING ON THE SLOPING SIDES OF THE BOW AND STERN OF MODERN ICEBREAKERS AND ICE-GOING SHIPS

A.V. Andryushin, DSc, Central Marine Research and Design Institute, St. Petersburg, tel. +7 (812) 271-81-05,
e-mail: AndryushinAV@cniimf.ru

O.A. Grigoryeva, PhD, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, tel. +7 (812) 312-85-72,
e-mail grigoryeva.oa@rs-class.org.

M.A. Kuteynikov, DSc, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, kuteynikov.ma@rs-class.org

A.S. Bol'shev, DSc, professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg,
tel. +7(812) 297-59-54, e-mail: bolshev@cef.spbstu.ru

S.A. Frolov, PhD, associate professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg,
e-mail: frolov@cef.spbstu.ru

P.S. Zuev, MSc, Central Marine Research and Design Institute, St. Petersburg, tel. +7 (812) 271-81-05,
e-mail: ZuevPS@cniimf.ru

This article presents the methodology of determination of ice loads acting on the ship ice belt. This method is also applicable for the calculation of ice loads acting on the stern of a modern double-acting ship. The design parameters of ice loads make it possible to check the hull strength of a ship operating in different ice conditions depending on her speed. The developed methods are verified according to the results of the ice loads full-scale measurements. The results of the analysis show that the designed ice loads (with an accuracy needed for the practical use) correspond to the calculations of the full-scale measurements results.

Keywords: ice, double-acting ships, hull, methodology, ice loads, ice interaction, ice pressure, ice strength

ВВЕДЕНИЕ

Настоящее время отмечено интенсивным развитием арктического судостроения и судоходства. Экономическая целесообразность обуславливает необходимость повышения технико-эксплуатационных характеристик ледокольных судов. Улучшение ледовой ходкости является одним из путей решения этой задачи. Последнее в свою очередь привело к разработке и внедрению на ледоколах и судах активного ледового плавания экстремальных носовых обводов с большими углами наклона ватерлинии и шпангоутов, что позволяет значительно снизить сопротивление ровного льда движению судна. Суда двойного действия, оборудованные винто-рулевыми колонками, также позволяют значительно повысить эффективность эксплуатации. В тяжелых ледовых условиях для судов двойного действия задний ход используется как основной операционный, что позволяет значительно снизить ледовое сопротивление. Кормовые обводы проектируются как экстремальные носовые. На чистой воде и в легких условиях судно работает передним ходом. Такой подход значительно улучшает ледовую ходкость и ходкость на чистой воде. Однако, носовая часть с экстремальными ледокольными обводами и корма судна двойного действия на режимах заднего хода подвержены повышенному воздействию ледовых нагрузок в сравнении с ранее проектируемыми и эксплуатируемыми судами. Для указанных случаев обеспечение прочности корпуса выходит за рамки опыта проектирования и эксплуатации традиционных ледокольных судов и не регламентируются действующими требованиями РС. Указанные обстоятельства определяют необходимость совершенствования методов назначения ледовых нагрузок на корпус судна в рамках общей задачи по

обеспечению его ледовой прочности. В статье представлены основные результаты указанных исследований применительно к наклонному борту ледового пояса района А.

ОСНОВНЫЕ СЦЕНАРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НОСОВОЙ И КОРМОВОЙ ЧАСТИ СУДНА ДВОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ С ЛЕДОВЫМ ПОКРОВОМ

В качестве основного сценария для определения ледовых нагрузок принимается удар «скулой» носа (кормы) о кромку ледового поля (торосистого образования), рис. 1, 2. Указанные сценарии могут быть реализованы как при самостоятельном плавании, так и при движении в канале под проводкой ледокола. Дополнительно для судов двойного действия необходимо рассматривать прямой удар кормы о лед, рис. 3, при самостоятельной эксплуатации на режимах заднего хода. На указанных рисунках: F_h , F_n , $(F_{vertical})_{hull}$ - горизонтальная, нормальная, вертикальная составляющие силы на корпус; w , b - длина и высота зоны контакта, β - угол наклона шпангоута в плоскости, перпендикулярной ледовой ватерлинии; φ - угол раствора кромки ледового покрова, α - угол наклона ватерлинии в расчетной точке контакта.

Для наклонного борта уровень ледовой нагрузки на корпус определяется разрушением кромки ледового покрова изгибом от силы, которая возникает при взаимодействии борта со льдом. При малых углах в сочетании с большой скоростью взаимодействия борта со льдом разрушения ледового покрова может происходить без изгиба, т.е. может реализоваться так называемый сценарий взаимодействия льда с прямостенным бортом (указанный сценарий будет рассмотрен подобно в последующих работах).

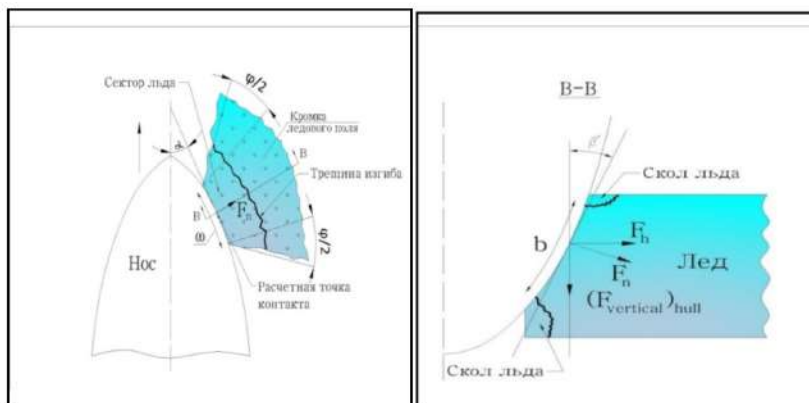


Рис. 1 Удар «скулой» носа о кромку ледового поля (торосистого образования)

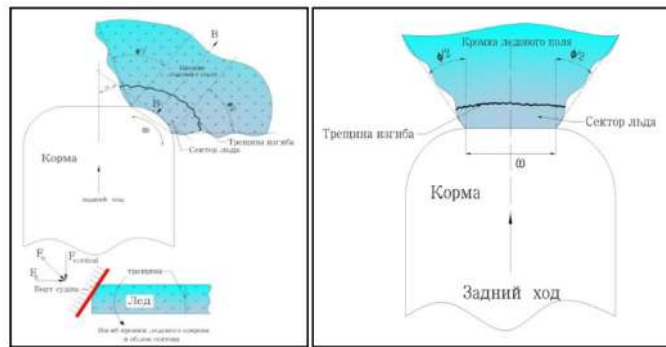


Рис. 2 Удар «скулой» кормы о кромку ледового поля (торосистого образования)

Рис. 3 Прямой удар кормы судна двойного действия о кромку ледового поля (торосистого образования)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ И ПРОЧНОСТИ ЛЬДА НА СМЯТИЕ

Локальная ледовая нагрузка определяется на основе гидродинамической теории вытеснения ледового порошка при взаимодействии борта судна с ледовым покровом, предложенной Д.Е. Хейсиным и В.А. Курдюмовым [1]. В последние годы указанный подход был усовершенствован и использован при определении ледовых нагрузок, воздействующих на борт судна, гребные винты (Е.М. Апполонов, Н. Soininen, А.В. Андрушин [2, 3, 4]). На рис. 4 представлены схемы локального разрушения льда при взаимодействии наклонного борта с ледовым покровом (ровный лед или консолидированная часть тороса). При взаимодействии борта с ледовым покровом происходит смятие льда в серединной зоне с последующим вытеснением ледового порошка, на краях лед скалывается, что приводит к уменьшению эффективной зоны смятия (зоны нагрузки).

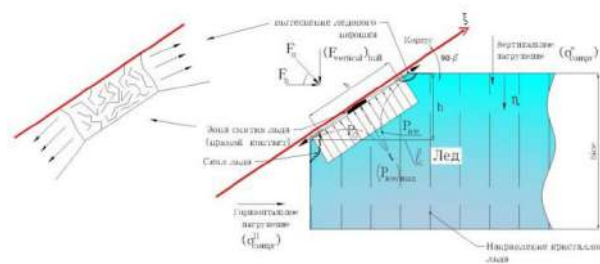


Рис. 4 Схема взаимодействия однолетнего ледового покрова с наклонным и прямостенным бортом носовой (кормовой) оконечности судна

В зоне смятия распределение контактного ледового давления может быть определено по формуле (1) [4,5].

$$\bar{p}_{ice} = 0,66854e^{(-\xi/a)} + 0,33147e^{(-\xi/c)} \quad (1)$$

где $\bar{p}_{ice} = \frac{P_{ice}}{(P_{ice})_{max}}$ – безразмерное контактное ледовое давление;

$(p_{ice})_{max}$ – максимум ледового контактного давления;

$\xi = \frac{x}{0,5b}$ – безразмерная зона контакта со льдом; $\xi \in [0,1]$,

0 – начало зоны контакта;

1 – конец зоны контакта;

b – высота зоны контакта,

a, c – параметры.

Важно отметить, что контактное давление не зависит от скорости взаимодействия при прочих равных условиях, т.е. разрушение льда происходит в хрупкой области. Объяснение этого феномена дано А.В.Андрушиным в работе [6] с учетом того факта, что вязкость ледового порошка обратно пропорциональна скорости его вытеснения. Последнее подтверждено экспериментальными исследованиями D.Finn, результаты которых представлены в работе [3].

Безразмерное среднее контактное давление или прочность льда на смятие:

$$\bar{p}_0 = \int_0^1 \bar{p}_{ice} dx = 0,16 \quad (2)$$

Максимум ледового контактного давления $(p_{ice})_{max}$ может быть определен по формуле Н.Soininen [3] в функции от прочности льда на одноосное сжатие. С учетом последнего среднее значение локального контактного ледового давления p_0 (или прочность льда на смятие σ_{crush})

$$p_0^{def} = \sigma_{crush} = c_{crush}^1 \sigma_{compr}^{c_{crush}^2} \quad (3)$$

где c_{crush}^1 и c_{crush}^2 – постоянные,

σ_{compr} – прочность льда на одноосное сжатие

Прочность льда на одноосное сжатие σ_{compr} определяется в зависимости от типа льда (ровный лед, консолидированная часть тороса, однолетний или многолетний ледовый покров, распресненный лед Сибирских рек), его солёности, температуры с учетом толщины снежного покрова, периода навигации. Для морского льда учитывается направление нагружения (направление кристаллов).

Среднее значение давления $p_0(b)$ по высоте зоны контакта b обшивки с ледовым покровом (см. рис. 4)

$$P_0(b) = \frac{1}{b} \int p_0(\xi) d\xi \quad (4)$$

где b - протяженность (высота) зоны контакта обшивки с ледовым покровом вдоль ξ , рис. 4.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ НА НАКЛОННЫЙ БОРТ ПРИ УДАРЕ О КРОМКУ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА

Схема ледовых нагрузок, действующих на наклонный борт, представлена на рис. 1. Вертикальная сила, действующая на кромку поля со стороны корпуса, определяется выражением

$$(F_{vertical})_{hull} = F_n \cos(90 - \beta') - f_d F_n \sin(90 - \beta') \quad (5)$$

где F_n - ледовая сила, нормальная к поверхности борта судна, β' - угол наклона борта по нормали к наружной обшивке, f_d - коэффициент динамического трения льда о поверхность корпуса.

$$F_n = f_n w \quad (6)$$

где f_n - удельная ледовая сила на единицу длины, w - длина контакта по ватерлинии

Удельная ледовая сила f_n

$$f_n = f_n^0 k_{scale} \quad (7)$$

где f_n^0 - локальная удельная ледовая сила; k_{scale} - масштабный фактор удельной ледовой силы f_n .

$$f_n^0 = \lim_{w \rightarrow 0} f_n = b p_0(b) \quad (8)$$

Масштабный фактор удельной ледовой силы может быть определен по формуле

$$k_{scale}(w) = c \cdot \exp[-w/\theta] + k \quad (9)$$

c, θ, k - коэффициенты.

Значения коэффициентов c, θ, k получены на основе анализа натурных данных по ледовым нагрузкам на корпус судна [7 - 13].

С другой стороны, максимальная вертикальная сила $F_{vertical}$ соответствует моменту облома сектора льда. Значение вертикальной силы облома кромки поля, может быть определено по формуле полученной на основе известного решения Папковича, см. работу [14].

$$(F_{vertical})_{ice} = k_{dyn}(Fr_{ice})k_{Ver} \times \quad (10)$$

$$\times [0,77 \frac{w}{(L_{typical})} + 1,11 \operatorname{tg}(\varphi_{design}/2)] \sigma_{bend} h_{ice}^2$$

где w - длина приложения распределенной нагрузки (длина зоны контакта корпуса с ледовым полем);

φ_{design} - расчетный угол раскрытия кромки ледового поля;

k_{dyn} - динамический коэффициент усиления нагрузки в зависимости от скорости нагружения ледового покрова;

σ_{bend} - прочность льда на изгиб,

$L_{typical}$ - характерная длина ледового покрова,

k_{Ver} - коэффициент.

Аналогично прочности льда на одноосное сжатие σ_{bend} определяется в зависимости от типа

льда (ровный лед, консолидированная часть тороса, однолетний или многолетний ледовый покров, распресненный лед Сибирских рек), его солёности, температуры с учетом толщины снежного покрова, периода навигации.

Динамический коэффициент усиления нагрузки k_{dyn} определяет увеличение силы поломки ледового покрова в зависимости от его скорости нагружения. Его значение определяется в зависимости от числа Фруда $k_{dyn} = f(Fr_{ice} = V_{typical} / \sqrt{gh_{ice}})$ ($V_{typical} = f(V)$ - характерная скорость нагружения ледового покрова в точке контакта борта со льдом, h_{ice} - толщина льда или консолидированной части тороса, V - скорость судна) на основе натурных данных по характерным размерам обломков льда в зависимости от скорости нагружения, а также с учетом теоретических решений, полученных в работах, см. [15, 17].

Параметры ледовой нагрузки (значение силы, длина и высота зоны контакта) определяются на базе уравнения

$$(F_{vertical})_{hull} = (F_{vertical})_{ice} \quad (11)$$

где $(F_{vertical})_{hull}$ - формула (5), $(F_{vertical})_{ice}$ - формула (10)

При решении уравнения 11 длина и высота контакта определяются выражениями (см. рис. 5).

$$w = w_0 + 2l \operatorname{tg}(\varphi_{design}/2) \quad (12)$$

$$b = 0,65(l^2 + h^2)^{0,5}, h = l \operatorname{tg}(90 - \beta') \quad (13)$$

φ_{design} - расчетный угол раскрытия сектора льда, w_0 - зона контакта в начале взаимодействия.

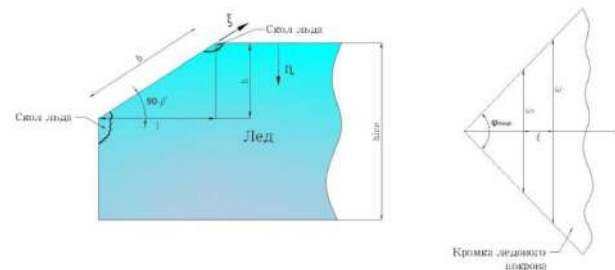


Рис. 5 Геометрические характеристики зоны контакта наклонного борта со льдом

Решение уравнения 11 относительно параметров ледовой нагрузки (значение ледовой силы, длина и высота зоны контакта) выполняется последовательными приближениями с учетом методики, предложенной Ю.Н.Алексеевым и К.Е.Сазоновым на основе результатов прямых измерений натурных обломков льда из разрушенного корпусом ледового покрова [16, 17].

По результатам решения определяются значения локальной силы $F_n(w, b)$, длина w и высота зоны контакта b , значение локального давления $p_0(b)$, а также

среднее ледовое давление $p_{average}(w, b) = F_n/(w \cdot b)$ по зоне контакта (w, b), а также давление $p_{average}(ws, b)$ для участка корпуса (s, b), s – шпация. Решение выполняется последовательными приближениями.

Представленная методология полностью применима для оценки ледовых нагрузок на «плоские» носовые обводы ледокола "Oden" и кормовые обводы судов двойного действия при угле входа ватерлинии 90 град, см. рис. 3 – удар кормы судна двойного действия о кромку льда.

Выше указывалось, что при малых углах развала шпангоута β' может быть реализован сценарий взаимодействия ледового покрова с прямостенным бортом, когда разрушение кромки ледового покрова не происходит. Методика определения ледовой нагрузки для этого случая будет представлена в последующих работах.

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА КОРПУС СУДНА

В процессе исследований выполнена верификация разработанного метода на базе сравнительного анализа результатов расчета с результатами натурными измерениями ледовых нагрузок, полученных в процессе испытаний судов различных ледовых категорий в широком диапазоне ледовых условий, включающих относительно легкие льды (Балтика) и Арктические многолетние ледовые образования.

Выполненный анализ показывает, что расчетные локальные ледовые нагрузки соответствуют экспериментальным данным с точностью, необходимой для проверки и назначения прочных размеров корпуса ледокольных судов.

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА РАСЧЕТНЫХ И ИЗМЕРЕННЫХ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА НОСОВУЮ ЧАСТЬ КОРПУСА АРКТИЧЕСКОГО ЛЕДОКОЛА "POLAR SEA"

Основные характеристики ледокола "Polar Sea" представлены в табл. 1. Измерительная система была установлена в носовой части судна и состояла из 60 отдельных измерительных пластин (локальных панелей) размером 0,41 м × 0,38 м. Пластины были объединены в единую измерительную панель. Ширина панели из пластин – 10 панелей вдоль ватерлинии (4 м по ватерлинии), высота – 6 панелей вертикально, см. рис. 6 [12, 13].

В данной статье представлены результаты сравнения расчетных нагрузок и измеренных в процессе испытаний в Чукотском море в мае 1983 года в многолетних торосистых льдах при

Таблица 1
Основные характеристики ледокола типа "Polar Sea" ("Polar Star")

Наибольшая длина, м	121,7
Длина по КВЛ (между перпендикулярами), м	107,3
Ширина по КВЛ, м	23,8
Высота борта, м	13,2
Осадка по КВЛ, м	8,5
Водоизмещение по КВЛ, т	13400

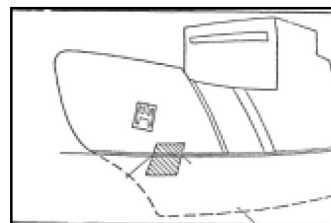


Рис. 6 Схема расположения системы пластин для измерения ледовых нагрузок на носовую часть ледокола "Polar Sea" [12, 13]

средней толщине ровного ледового покрова около 2 м [12, 13]. На рис. 7 представлены результаты расчета удельной ледовой силы в зависимости от длины контакта и соответствующие значения, полученные в результате измерений ледовых нагрузок на локальные панели размером 0,41 м × 0,38 м [11]. Анализ показывает хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

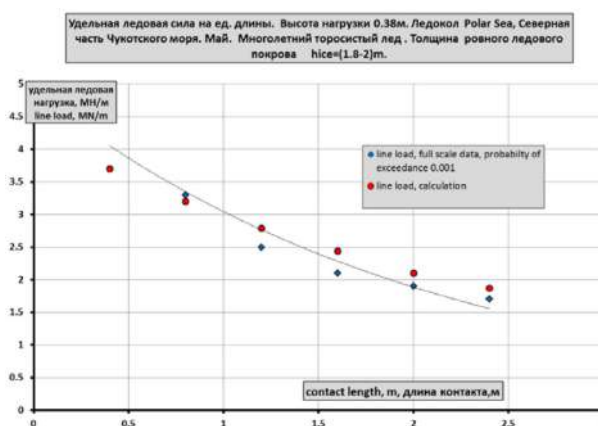


Рис. 7 Удельная ледовая сила на ед. длины. Высота нагрузки 0,38 м. Ледокол "Polar Sea", Северная часть Чукотского моря. Май. Многолетний торосистый лед. Средняя толщина ровного ледового покрова около 2 м

На рис. 8 представлено сравнение расчетных локальных давлений в зависимости от площади контакта с соответствующими, которые были получены в результате прямых измерений нагрузок в процессе испытаний арктических ледоколов

CCG "Louis S. St. Laurent", "Oden", "Polar Sea" в многолетних арктических льдах. Расчеты выполнены для случаев $b=0,38$ м и $b=0,78 > 0,38$ м для скоростей движения 3 и 8 узлов (режим набега) в торосах, где b – высота контакта, 0,38 м – высота панели.

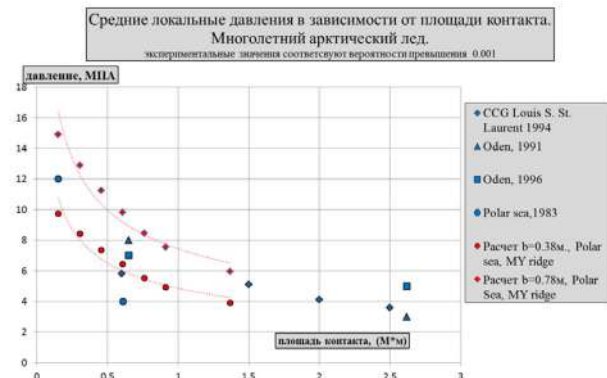


Рис. 8 Средние локальные давления в зависимости от площади контакта. Многолетний арктический лёд

Увеличение контактного давления для $b=0,78 > 0,38$ м связано с увеличением пиковости давления (при $b=0,78 > 0,38$ м зона панели может попасть в область высокого давления из-за неравномерности его распределения по зоне контакта).

Можно констатировать хорошую корреляцию расчетных и экспериментальных данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА РАСЧЕТНЫХ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК ИЗМЕРЕННЫМИ В ПРОЦЕССЕ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ СУДНА "KEMIRA" В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОЙ БОТНИКИ В ПЕРИОД ТЯЖЕЛОЙ ЗИМНЕЙ НАВИГАЦИИ 1985 Г. С ДЕКАБРЯ – ЯНВАРЯ ПО АПРЕЛЬ

Основные характеристики судна "Kemira" представлены в табл. 2. Схема установки датчиков для измерения нагрузок на шпангоут представлена на рис. 9. Сравнение выполнялось для нагрузок, измеренных в носовой части. Результаты натурных измерений нагрузок представлены в работах [7 - 10].

Таблица 2
Основные характеристики судна "Kemira"

Длина габаритная, м	112,7
Длина между перпендикулярами, м	105
Ширина, м	17,5
Высота борта, м	10,5
Осадка максимальная,	8,2
Дедвейт, т	8145
Мощность, MW	3,4

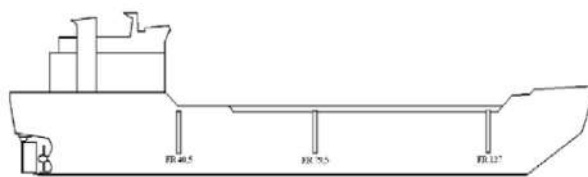


Рис. 9 Схема измерения ледовых нагрузок на корпусе ледокольного танкера "Kemira" [7 - 10]

Для сравнительного анализа были выполнены расчеты ледовых нагрузок применительно к эксплуатационным режимам, для которых были выполнены натурные замеры. Расчеты выполнялись для двух типичных временных периодов эксплуатации – для апреля, когда толщины термического льда достигают максимальных значений (до 0,7 м в среднем) при температурах близких к нулю, а также для периода декабрь – начало января, который характеризуется минимальными температурами и наиболее интенсивным нарастанием льда при его средней толщине около 0,4 м. Результаты анализа расчетных нагрузок и измеренных в процесс испытаний представлены на рис. 10, 11, 12, 13. Анализ показывает, что расчетные ледовые нагрузки определенные как для торосов (рис. 10), так и для ровного льда (рис. 11) хорошо согласуются с результатами натурных измерений. Необходимо отметить следующие типичные особенности ледовых нагрузок, воздействующих на носовую часть корпуса. При эксплуатации в апреле уровень ледовых нагрузок от воздействия торосистых образований значительно превышает соответствующий при эксплуатации в ровном льду, рис. 10. Это обусловлено более толстой консолидированной частью тороса, а также тем обстоятельством, что в весенние месяцы при резком потеплении окружающего воздуха торос менее интенсивно прогревается (растепляется), чем ровный лед из-за большей толщины и более толстого слоя снега. Последнее приводит к более резкому уменьшению прочности ровного льда в сравнении с консолидированной частью тороса. Однако, в декабре, при интенсивном нарастании отрицательных температур и термического (ровного) льда последний является более холодным и прочным, чем консолидированная часть тороса. Последнее, несмотря на большую толщину консолидированной части, приводит к практически одинаковым нагрузкам от ровного льда и консолидированной части тороса, см. рис. 13. Указанный эффект влияния температуры (времени эксплуатации) на уровень ледовых нагрузок хорошо иллюстрируется рис. 11. Нагрузки от ровного льда в апреле при толщине 0,7 м практически равны соответствующим для ровного льда толщиной 0,4 м в декабре – январе, см. рис. 11. Последнее объясняется

более высокими прочностными характеристиками ледового покрова в декабре – январе в сравнении с апрелем.

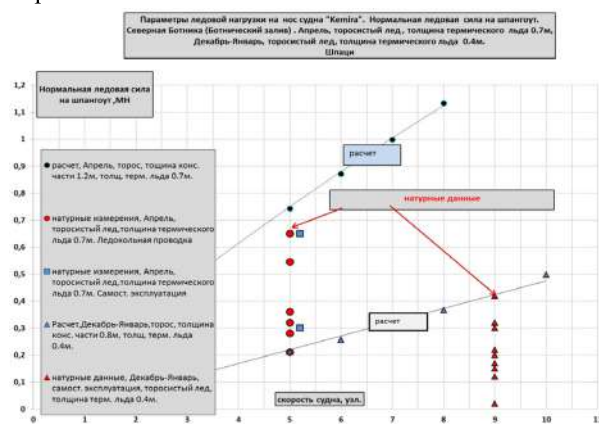


Рис. 10 Параметры ледовой нагрузки на нос судна "Kemira". Нормальная ледовая сила на шпангоут. Северная Ботника (Ботнический залив). Апрель, торосистый лед, толщина термического льда 0,7 м. Декабрь – январь, торосистый лед, толщина термического льда 0,4 м

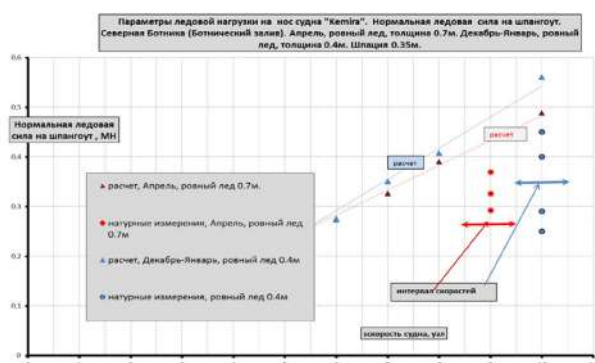


Рис. 11 Параметры ледовой нагрузки на нос судна "Kemira". Нормальная ледовая сила на шпангоут. Северная Ботника (Ботнический залив). Апрель, ровный лед, толщина 0,7 м. Декабрь – январь, ровный лед, толщина 0,4 м. Шпация 0,35 м

Наиболее высокие нагрузки были зафиксированы при эксплуатации в торосистых льдах в апреле, рис. 12. В работах [9, 10] представлены результаты вероятностно-статистического прогнозирования ледовой нагрузки на расчетный (проектный) уровень, соответствующий периоду возврата 1000 дней в процессе ледовой эксплуатации на Балтике (срок службы около 25 лет). Расчетная (проектная) сила на шпангоут составляет 0,81 МН, что соответствует режиму движения в канале, проложенном ледоколом в торосистом льду, со скоростью около 5 узл, рис. 12. Расчетная нагрузка по разработанной методике также близка к указанному значению.

Анализ наблюдений параметров ломки ледового покрова и зон контакта показывают на хорошее соответствие результатам расчетов. На рис. 14 показаны результаты расчета длины и высоты зоны

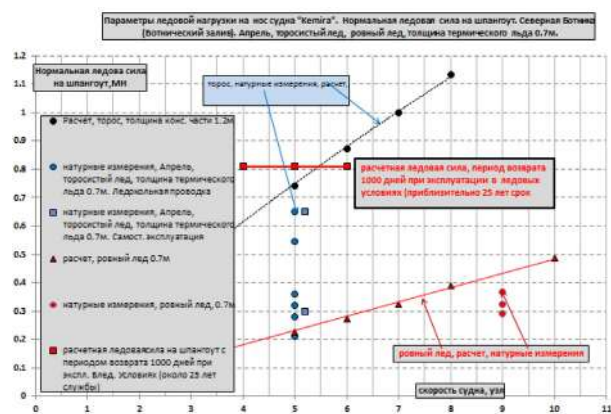


Рис. 12 Параметры ледовой нагрузки на нос судна "Kemira". Нормальная ледовая сила на шпангоут. Северная Ботника (Ботнический залив). Апрель, торосистый лед, ровный лед, толщина термического льда 0,7 м

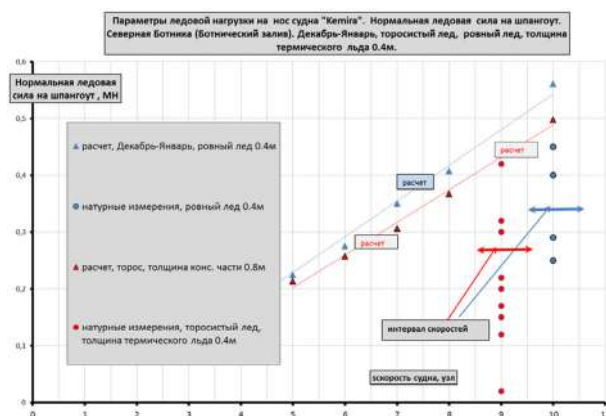


Рис. 13 Параметры ледовой нагрузки на нос судна "Kemira". Нормальная ледовая сила на шпангоут. Северная Ботника (Ботнический залив). Декабрь – январь, торосистый лед, ровный лед, толщина термического льда 0,4 м

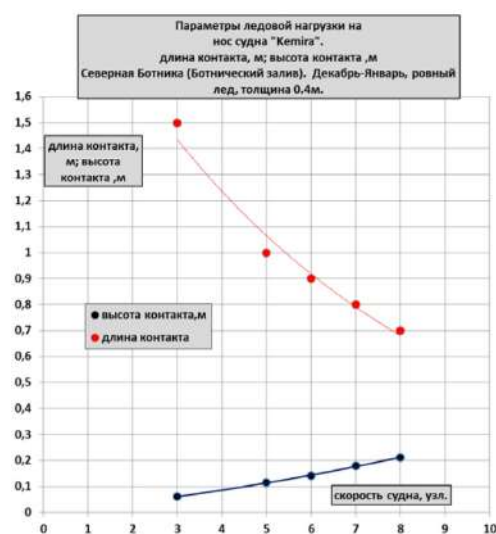


Рис. 14 Расчетные параметры ледовой нагрузки на нос судна "Kemira". Длина контакта, высота контакта. Северная Ботника (Ботнический залив). Декабрь – январь, ровный лед, толщина 0,4 м

контакта борта со льдом для носовой части судна "Kemira" при эксплуатации в ровном льду толщиной 0,4 м в Ботническом заливе в декабре. На рис. 15 представлена типичная зона контакта льда с бортом судна, форма носовой части которого близка к соответствующей для "Kemira", при эксплуатации в Северной Ботнике при толщине льда около 0,4 м и скорости около 3 - 4 узл. Высота и длина контакта составляют около 0,1 м и 1,2 м, что хорошо соответствует результатам расчета, см. рис. 14.

Результаты анализа показывают, что расчетные ледовые нагрузки с точностью, необходимой для практического применения, согласуются с соответствующими по результатам натурных измерений.

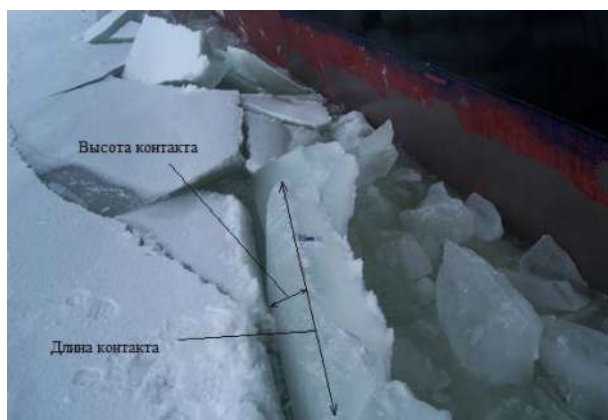


Рис. 15 Типичная зона контакта льда с бортом судна, форма скулы носовой части которого близка к соответствующей для "Kemira", при эксплуатации в Северной Ботнике при толщине льда около 0,4 м и скорости около 3 - 4 узл. Высота и длина контакта составляют около 0,1 м и 1,2 м

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен метод определения ледовых нагрузок на носовую часть (район AI) с традиционными формами обводов, а также с формами, которые в настоящее время не регламентируются действующими требованиями РС. Разработанные методы распространяются также и на кормовую часть современных ледокольных судов двойного действия. Определяемые параметры ледовых нагрузок позволяют выполнить проверку прочности корпуса при работе судна в различных ледовых условиях в зависимости от скорости движения. Расчетные методики верифицированы на базе сравнения с результатами натурных замеров ледовых нагрузок на корпусах ледокольных судов. Расчетные ледовые нагрузки с точностью, необходимой для практического применения, согласуются с соответствующими по результатам натурных измерений.

Разработанные методы реализованы в программном модуле "Ice Local", интегрированном в программный комплекс "Anchored Structures" [18, 19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курдюмов В.А., Хейсин Д.Е. Гидродинамическая модель удара твердого тела о лед // Прикладная механика. Том XII. №10.1976. С. 103-109.
2. Апполонов Е.М., Дидковский А.В., Кутейников М.А., Нестеров А.Б., Совершенствование методологии определения ледовых нагрузок // Санкт-Петербург. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2002. № 25. С. 83-100.
3. Soininen H. A propeller-ice contact model Dissertation for the degree of Doctor of Technology // VTT technical research centre of Finland. Espoo. 1988. 116 p.
4. Андрияшин А.В. Ледовые нагрузки для расчета местной прочности лопастей ледокольных гребных винтов. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. Санкт-Петербург. 2003. № 26. С. 93-107.
5. Евенко В.И., Сергеев А.А., Андрияшин А.В., Тарица Г.В., Щербаков И.В., Беляшов В.А. Современные методы обработки пропульсивных комплексов судов ледового плавания. Ледовые нагрузки. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. Санкт-Петербург. 2009. № 32.
6. Андрияшин А.В. Теория взаимодействия гребного винта со льдом. Обеспечение эксплуатационной прочности элементов пропульсивного комплекса судов ледового плавания и ледоколов. Диссертация на соискание ученой степени д.т.н. по специальности 05.08.01- Теория корабля и строительная механика // Санкт-Петербург, СПбГМТУ. 2000. 254 с.
7. M. Suominen, P. Kujala Analysis of short-term ice load measurements on board MS Kemira during the winters 1987 and 1988 – Aalto University, Espoo 2010. AALTO-AM-22
8. P. Kujala Semi-empirical Evaluation of long-term ice loads on ship hull – Marine Structure 1996, 849-871.
9. P. Kujala Results of Long-Term ice Load measurements on board chemical tanker Kemira in the Baltic sea during the winters 1987 to 1988, Research report 47 – Helsinki University of Technology laboratory of naval Architecture.
10. Kaj Riska Jorma Kamarainen. A Review of ice loading and the Evolution of the Finnish-Swedish Ice Class Rules.
11. R. Frederking, I. Kubat. A comparison of local ice pressure and line load distribution from ships studied in the SAFEICE project.
12. C. Daley, J.W. St John, R. Brown, J. Meyer, I. Glen Ice loads and ship response to ice, a second season, 1991.
13. C. Daley, S. Alawneh, D. Peters, B. Colbourne – GPU-Event-Mechanics Evaluation of ice Impact load Statistics – Arctic Technology Conference, Texas, USA, 10-12 February 2014.
14. Kerr A. The bearing capacity of floating ice plates subjected to static or quasi-static loads – Journal of Glaciology, Vol. 17 №76, 1976.
15. Сазонов К.Е. Исследование динамического разрушения ледового покрова – Судостроительная промышленность, вып. 19, 1991.
16. Alekseev Yu.N., Sazonov K.E., Shakhayeva L.M.. Estimation of Total Ice Resistance Component, Which Depends on Ice Crushing. – Problems of Shipbuilding, Ship Design Series, Issue 32, 1982.
17. Enkvist E. On the Ice Resistance Encountered by Ships Operating in the Continuous Mode of Icebreaking – The Swedish Academy of engineering Sciences in Finland. Report №24 1972
18. Bolshev A.S., Frolov S.A., Shkhinek K.N. Mathematical Modeling of Floating Anchored Objects Behavior under Ice Influence Proceedings of the Tenth (2012) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, Vladivostok, Russia, 2012. p.68-72.

19. Большев А.С., Фролов С.А., Кутейников М.А. Математическое моделирование поведения морских плавучих объектов в программном комплексе "Anchored Structures" // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2013. № 36. С. 68-90.

REFERENCES

1. Kurdjumov V.A., Khejsin D.E. Gidrodinamicheskaja model' udara tverdogo tela o led. [Hydrodynamic model of the interaction between a solid matter and ice]. Prikladnaya mehanika [Applied mechanics]. Vol. XII N 10.1976. pp. 103-109. (In Russian)
2. Appolonov E.M., Didkovskij A.V., Kutejnikov M.A., Nesterov A. B., Sovershenstvovanie metodologii opredelenija ledovyh nagruzok [Improvement of ice loads calculation methods]. Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva [Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping]. St.-Petersburg, 2002, N 25, pp. 83-100. (In Russian)
3. Soininen H. A propeller-ice contact model Dissertation for the degree of Doctor of Technology. VTT technical research center of Finland. Espoo. 1988. 116 p.
4. Andryushin A.V. Ledovye nagruzki dlja rascheta mestnoj prochnosti lopastej ledokol'nyh grebnyh vintov [Ice loads for strength calculation of icebreaking propeller blades]. Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva. [Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping]. St.Petersburg, 2013, N 36, pp. 93-107. (In Russian)
5. Evenko V.I., Sergeev A.A., Andryushin A.V., Tarica G.V., Shherbakov I.V., Beljashov V.A. Sovremennye metody otrabotki propul'sivnyh kompleksov sudov ledovogo plavaniya. Ledovye nagruzki [Modern methods of development of propulsion complexes of ice ships. Ice loads.] Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva. [Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping]. St.Petersburg, 2009, N 32. (In Russian).
6. Andryushin A.V. Teorija vzaimodejstvija grebnogo vinta so l'dom. Obespechenie ekspluatacionnoj prochnosti elementov propul'sivnogo kompleksa sudov ledovogo plavaniya i ledokolov. Diss. dokt. tekhn. nauk 05.08.01 – Teorija korablya i stroitel'naya mehanika. [Theory of interaction between propeller and ice. Providing operability strength of the elements of propulsion complex of ice ships and icebreakers. Dr. tech. sc. diss. 05.08.01 – Ship's theory and construction mechanics]. St.Petersburg, 2000, p. 254. (In Russian)
7. M. Suominen, P. Kujala. Analysis of short-term ice load measurements on board MS Kemira during the winters 1987 and 1988- Aalto University, Espoo 2010. AALTO-AM-22
8. P. Kujala. Semi-empirical Evaluation of long-term ice loads on ship hull – Marine Structure, 1996, pp. 849-871.
9. P. Kujala. Results of Long-Term ice Load measurements on board chemical tanker Kemira in the Baltic sea during the winters 1985 to 1988. Research report. 47 – Helsinki University of Technology laboratory of Naval Architecture.
10. Kaj Riska Jorma Kamarainen. A review of ice loading and the evolution of the Finnish-Swedish Ice Class Rules.
11. R. Frederking, I. Kubat. A comparison of local ice pressure and line load distribution from ships studied in the SAFEICE project.
12. C. Daley, J.W. St John, R. Brown, J. Meyer, I. Glen. Ice loads and ship response to ice, a second season. 1991.
13. C. Daley, S. Alawneh, D. Peters, B. Colbourne – GPU-Event-Mechanics Evaluation of ice Impact load Statistics. Arctic Technology Conference, Texas, USA, 10-12 February 2014.
14. Kerr A. The bearing capacity of floating ice plates subjected to static or quasi-static loads. Journal of Glaciology, vol. 17, N 76, 1976.
15. Sazonov K.E. Issledovanie dinamicheskogo razrushenija ledovogo pokrova - Sudostroitel'naja promyshlennost' [Investigation of dynamic ice cover destruction]. Sudostroitel'naya promyshlennost' Publ., Edition 19, 1991. (In Russian)
16. Alekseev Yu.N., Sazonov K.E., Shakhayeva L.M. Estimation of total ice resistance component, which depends on ice crushing. Problems of Shipbuilding, Ship Design Series, Issue 32, 1982.
17. Enkvist E. On the Ice Resistance Encountered by Ships Operating in the Continuous Mode of Icebreaking. The Swedish Academy of engineering Sciences in Finland. Report №24, 1972
18. Bolshev A.S., Frolov S.A., Shkhinek K.N. Mathematical Modeling of Floating Anchored Objects Behavior under Ice Influence. Proceedings of the Tenth (2012) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, Vladivostok, Russia, 2012, p.68-72.
19. Bol'shev A.S., Frolov S.A., Kutejnikov M.A. Matematicheskoe modelirovanie povedenija morskikh plavuchih ob'ektov v programmnom komplekse "Anchored Structures" [Mathematical modeling of sea floating platforms in "Anchored Structures" software system]. Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva [Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping]. St-Petersburg, 2013, N 36, pp. 68-90. (In Russian)

Встреча в РС проектной команды МАКО по механизмам

В Российском морском регистре судоходства (РС) состоялась первая встреча проектной команды по совершенствованию унифицированного требования МАКО ІЗ (Механические установки судов ледового плавания), созданной в рамках Международной ассоциации классификационных обществ (МАКО).

В настоящий момент проектная команда ведет работу по пересмотру унифицированного требования в отношении прочности рулевых систем, валопроводов и гребных винтов для присвоения ледоколам полярных классов. Ранее требование на ледоколы не распространялось.

Активное участие РС в работе команды, а также решение провести первую встречу именно в российском классификационном обществе обусловлены значитель-

ным опытом РС в области разработки требований и технического наблюдения за проектированием, постройкой и эксплуатацией судов ледовых классов и ледоколов. Сегодня в классе РС находятся атомные и дизель-электрические ледоколы ледовых классов от **Icebreaker6** до **Icebreaker9**. Под техническим наблюдением РС строится серия самых больших и самых мощных в мире ледоколов (60 МВт), которые будут способны преодолевать ледяные поля толщиной до 3-х метров.

В ходе встречи был проведен подробный анализ действующих требований классификационных обществ к пропульсивным установкам ледоколов и разработаны предложения по совершенствованию унифицированного требования ІЗ. В частности, разработаны формулы для расчета прочности отдельных элементов и методика, которая позволит проверить и окончательно их откорректировать.

УДК 532.54

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОШИНГА В МЕМБРАННОМ ТАНКЕ СПГ ГАЗОВОЗА ПРИ БОРТОВОЙ КАЧКЕ НА РЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

М.С. Бойко, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург

К.А. Добржинский, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,

e-mail: dobrzhinsky.ka@rs-class.org

И.В. Ткаченко, д-р техн. наук, проф. РАН, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет», Санкт-Петербург

В работе приводятся результаты численного моделирования слошинга в мембранном танке газовоза при бортовой качке на регулярном волнении. Для моделирования движения жидкости используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса. Для моделирования свободной поверхности используется метод объема жидкости (Volume of Fluid – VoF). Для верификации используемого ПО проведено сравнение результатов, полученных численно, с результатами эксперимента. Амплитудно-частотная характеристика бортовой качки газовоза определялась при помощи линейной теории качки. Целью работы являлось получение характера изменения величины давления на стенки танка и сравнение результатов с расчетными давлениями, полученными на основании Правил классификации и постройки судов для перевозки сжиженных газов наливом. Расчеты проводились при помощи упрощенных методик, полученные результаты имеют оценочный характер. Рассмотрено несколько вариантов загрузки судна (10%, 50%, 75% и 90%). Движение сжиженного газа, как вязкой жидкости, моделировалось при помощи свободно распространяемого комплекса OpenFOAM.

Ключевые слова: слошинг, СПГ, нагрузки, метод объема жидкости, регулярное волнение, бортовая качка, вязкая жидкость

NUMERICAL SIMULATION OF SLOSHING DURING ROLL MOTION UNDER REGULAR WAVE EXCITATION IN THE MEMBRANE TANK OF A LNG CARRIER

M.S. Boyko, PhD, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg

K.A. Dobrzhinsky, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: dobrzhinsky.ka@rs-class.org

I.V. Tkachenko, DSc, professor of RAS, FSEI State Marine Technical university, St. Petersburg

The results of numerical simulation of sloshing in the membrane tank of a LNG carrier during roll motion under regular wave excitation are presented. The Reynolds averaged Navier-Stokes equations are used. To estimate free surface elevation the Volume-of-Fluid (VoF) method is applied. The verification of the used software is presented. Roll-RAO is obtained using the linear theory of roll motion. The purpose of this study is to estimate the pressure change on the membrane tank wall of a LNG carrier. The results are compared with the design pressure value obtained from Rules for the Classification and Construction of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk. The evaluative results are obtained using simplified methods. Several variants of filling levels (10%, 50%, 75% and 90%) are investigated. Liquefied natural gas motion is simulated using open source code OpenFOAM.

Keywords: sloshing, LNG, loads, volume of fluid method, regular wave excitation, roll motion, viscous liquid

ВВЕДЕНИЕ

Колебание судна на взволнованной поверхности моря (например, при бортовой качке) влечет за собой колебательное движение жидкости в грузовых емкостях – так называемый слошинг. В результате такого рода движения жидкости возникают дополнительные гидродинамические нагрузки на стенки грузовых емкостей, величина которых бывает значительна, что может повлечь за собой повреждение системы хранения груза [1]. При этом

на величину нагрузки оказывает влияние не только уровень загрузки танка, но и соотношения между частотой волны, частотой собственных колебаний судна на волнении и частотой собственных колебаний жидкости в танке. Корректный учет нагрузок на стенки танка необходим для обеспечения безопасной эксплуатации судна-газовоза. Данная работа посвящена численному моделированию движения жидкости в мембранной грузовой емкости судна для перевозки сжиженного природного газа (СПГ) при бортовой качке на регулярном волнении.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В данной работе движение вязкой несжимаемой жидкости в замкнутом резервуаре описывается при помощи осредненных уравнений Рейнольдса и уравнений неразрывности. Для описания границы раздела между двумя фазами используется метод объема жидкости [2], [3]. Уравнения записываются в виде:

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial t} + (u_j) \frac{\partial(u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2(u_i)}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial u'_i u'_j}{\partial x_j} + g_i + F_s \quad (1)$$

$$\frac{\partial(u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

где F_s – сила поверхностного натяжения, возникающая только на границе раздела сред,
 u_i – вектор скорости,
 p – плотность,
 ν – кинематическая вязкость,
 g_i – ускорение свободного падения.

Уравнения (1) – (2) справедливы во всей расчетной области для обеих фаз.

Объем жидкости в ячейке сетки высчитывается как $F_{vol} = \gamma V_{cell}$, где V_{cell} – это объем ячейки сетки, а γ – объемная доля жидкости в ячейке. Значение γ варьируется от 0 до 1. В случае, если ячейка сетки полностью заполнена жидкостью, тогда $\gamma=1$. В том случае, если ячейка полностью заполнена газом, тогда $\gamma=0$. В настоящей работе используется следующая версия метода объема жидкости [4]:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \frac{\partial(u_j) \gamma}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\gamma(1-\gamma) U_r) \quad (3)$$

где U_r – поле скорости сжатия границы

Этот коэффициент, благодаря коэффициенту $\gamma(1-\gamma)$, активен только в области границы и не играет роли вне района границы раздела сред.

Плотность и кинематическая вязкость в каждой точке расчетной области высчитывается как средневзвешенное от объемной доли двух сред:

$$\rho = \gamma \rho_1 + (1-\gamma) \rho_2 \quad (4)$$

$$\nu = \gamma \nu_1 + (1-\gamma) \nu_2 \quad (5)$$

Сила поверхностного натяжения F_s определяется при помощи следующей зависимости:

$$F_s = \sigma k(x) n \quad (6)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения,
 n – вектор нормали к поверхности, который может быть вычислен по формуле:

$$n = \frac{\nabla \gamma}{|\nabla \gamma|} \quad (7)$$

∇ – оператор Гамильтона,
 k – кривизна поверхности, определяемая по формуле:

$$k(x) = \nabla n \quad (8)$$

Система уравнений (1) – (8) решается численно в пакете OpenFOAM методом контрольного объема.

Для описания бортовой качки судна, расположенного лагом к волнению, используется следующее уравнение, полученное методами линейной теории качки [5]:

$$\ddot{\theta} + 2\nu_0 \dot{\theta} + n_0^2 \theta = n_0^2 a_0 \sin(\omega t) \quad (9)$$

Решение уравнения представляется в виде:

$$\theta(\omega) = \frac{a_0}{\sqrt{(1 - (\frac{\omega}{n_0})^2)^2 + 4\nu_0^2 (\frac{\omega}{n_0})^2}} \quad (10)$$

где θ – укол крена,
 n_0 – собственная частота колебания судна,
 a_0 – эффективный угол волнового склона,
 ν_0 – коэффициент гашения.

Так как используемая математическая модель содержит ряд допущений, результаты расчета носят оценочный характер.

ВЕРИФИКАЦИЯ ИСПОЛЬЗУЕМОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В настоящей работе для верификации используемого программного обеспечения проводилось сравнение результатов тестовых расчетов с помощью OpenFOAM с экспериментальными данными, полученными в Делфтском техническом университете [6].

Задачей верификации являлось подтверждение возможности применения программного комплекса OpenFOAM для расчета давлений и определения характера движения жидкости в резервуаре, геометрические характеристики которого соответствуют форме грузового танка на судне для перевозки СПГ.

На рис. 1 показаны основные размерения модели призматического танка и положение датчиков. Расчетная область численного эксперимента и конт-

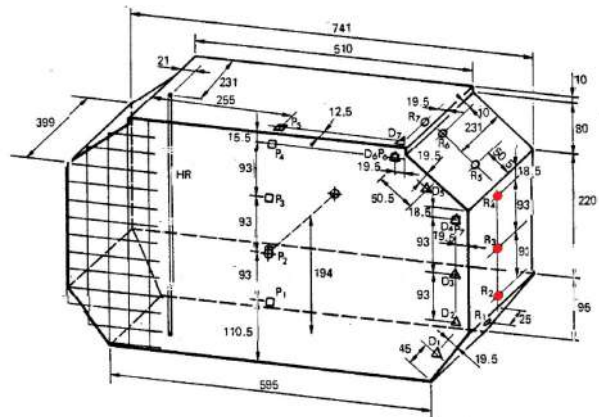


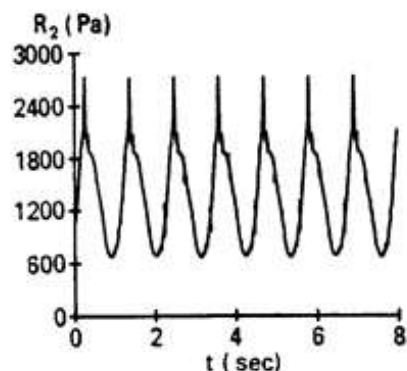
Рис. 1 Основные размерения модели и положение датчиков давления

рольные точки полностью совпадают с таковыми в эксперименте. Сравнение проводилось для случая имитации бортовой качки при заполнении танка на 61%, периода колебаний $T=1,112$ сек, амплитуды колебаний $\theta=0,10$ рад. Данные снимались в контрольных точках, совпадающих с датчиками давления R_2, R_3, R_4 .

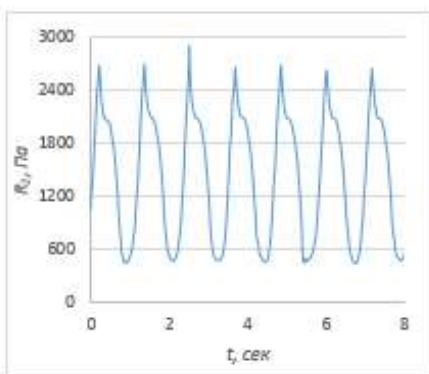
На рис. 2 показаны результаты, полученные в ходе эксперимента, и соответствующие им результаты, полученные численно. Характер и величина нагрузки, полученные в ходе численного моделирования, хорошо совпадают с таковыми в эксперименте.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОШИНГА В МЕМБРАННОЙ ГРУЗОВОЙ ЕМКОСТИ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ СПГ

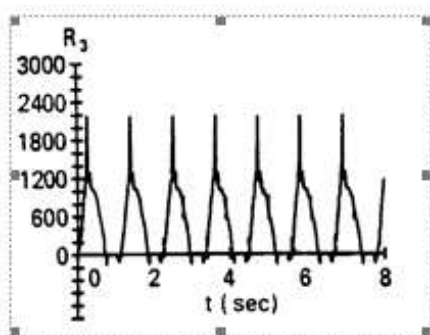
Численное моделирование проводилось для миделевой грузовой емкости газовоза длиной 283 м и грузоподъемностью 170000 м^3 . Амплитудно-частотная характеристика бортовой качки (рис. 3) строилась при помощи решения укороченного уравнения (10) для 4-х уровней относительной загрузки h/H СПГ в грузовых емкостях. Значение гравитационной постоянной принималось равным $g=9,81 \text{ кг/м}^3$, кинематическая вязкость газообразной



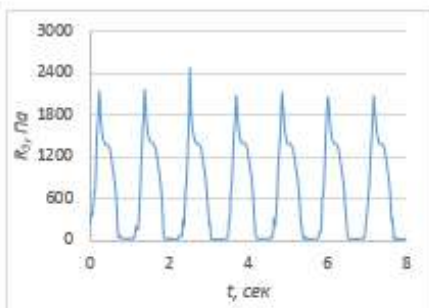
a



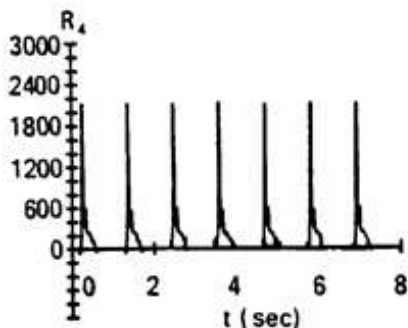
b



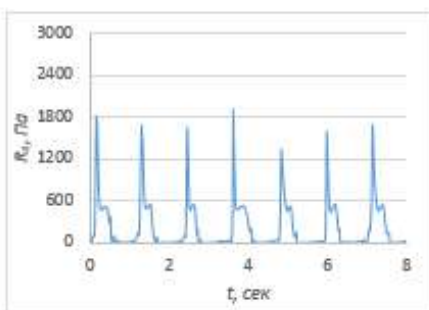
c



d



e



f

Рис. 2 Сравнение результатов эксперимента с результатами, полученными численно,
a, c, e – эксперимент, b, d, f – численное моделирование

фазы принималась $v_g = 1,4 \times 10^{-5}$ м²/сек, плотность газообразной фазы принималась $\rho_g = 0,74$ кг/м³, кинематическая вязкость жидкой фазы принималась $\nu_{liq} = 1 \times 10^{-6}$ м²/сек, плотность жидкой фазы принималась – $\rho_{liq} = 470$ кг/м³.

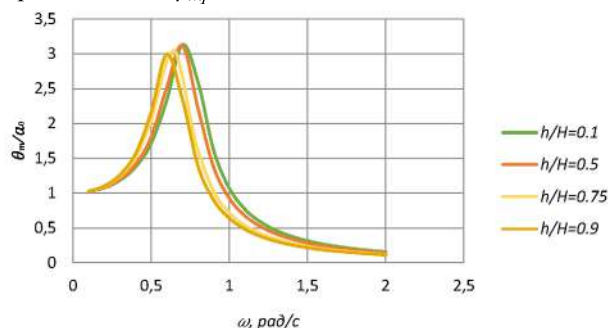


Рис. 3 АЧХ бортовой качки газозова

Длина волны была выбрана из условия: $\lambda = L = 283$ м. Высота волны определялась по широко распространенной в инженерной практике формуле Циммермана: $h_w = 0,17 \times \lambda^{0,715} = 9,63$ м. Выбор волновых условий обусловлен необходимостью получения оценочных значений нагрузки. Расчет выполнялся для следующих периодов волнения:

- $T_1 = 8,5$ с и $T_2 = 15,32$ с при $h/H = 0,1$;
- $T_3 = 8,84$ с и $T_4 = 8,36$ с при $h/H = 0,5$;
- $T_5 = 9,55$ с и $T_6 = 7,73$ с при $h/H = 0,75$;
- $T_7 = 9,89$ с и $T_8 = 7,32$ с при $h/H = 0,9$.

Периоды T_1, T_3, T_5, T_7 совпадают с собственным периодом колебаний судна при соответствующем уровне загрузки, периоды T_2, T_4, T_6, T_8 совпадают с собственным периодом колебаний жидкости, определяемой по формуле [7]:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g\pi}{b} \tanh\left(\frac{\pi h}{b}\right)}} \quad (11)$$

где b – ширина свободной поверхности,
 h – высота жидкости.

Амплитуды бортовых колебаний определялись в зависимости от АЧХ при соответствующей частоте колебаний и выбранных волновых условиях.

В начальный момент времени жидкость находится в состоянии покоя. Величина давления снималась в 5 участках по длине грузовой емкости: по центру, на расстоянии 17,32 м от центра и на

торцевых стенках емкости. На каждом участке давления снимались в 8 контрольных точках, положения которых показаны на рис. 4. Время симуляции – 40 сек. Предполагается, что указанное время позволяет корректно оценить характер и величину давления.

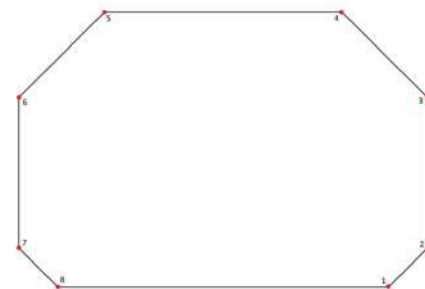


Рис. 4 Положение контрольных точек на поперечном сечении грузовой емкости

На рис. 5а – 5д в качестве примера представлено положение свободной поверхности при резонансной бортовой качке. На частичных уровнях загрузки в 50% и 75% наблюдается интенсивное нестационарное движение с перемещением жидкости по всему объему грузовой емкости и образованием пузырей газов у стенок.

На рис. 6а - 6д в качестве примера представлены графики изменения давления в контрольных точках 2 и 3 (по центру грузовой емкости) при разных уровнях загрузки и периоде волновых колебаний, совпадающим с периодом собственных колебаний жидкости в танке. Величина давления в симметричных точках одинакова, но смещена во времени на $T/2$.

В табл. 1 показаны максимальные значения манометрического давления, в зависимости от периода колебаний и уровня загрузки. Величина нагрузок при всех расчетных случаях не превышает расчетные значения, определяемые в соответствии с Правилами РС [8].

Наибольшие нагрузки возникают при уровне загрузки в 50%.

При уровнях загрузки в 10%, 75% и 90%, вследствие больших углов крена и более интенсивной качки, большие нагрузки возникают при периоде волны, совпадающим с периодом собственных колебаний судна.

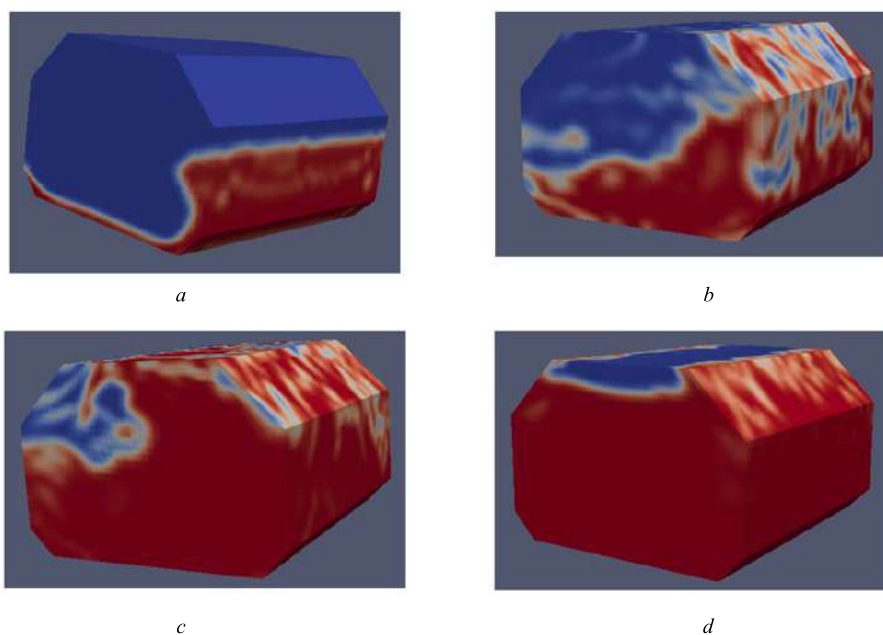


Рис. 5 Положение свободной поверхности при $t \approx 25$ сек на разных уровнях загрузки:
a – 10%; b – 50%; c – 75%; d – 90%

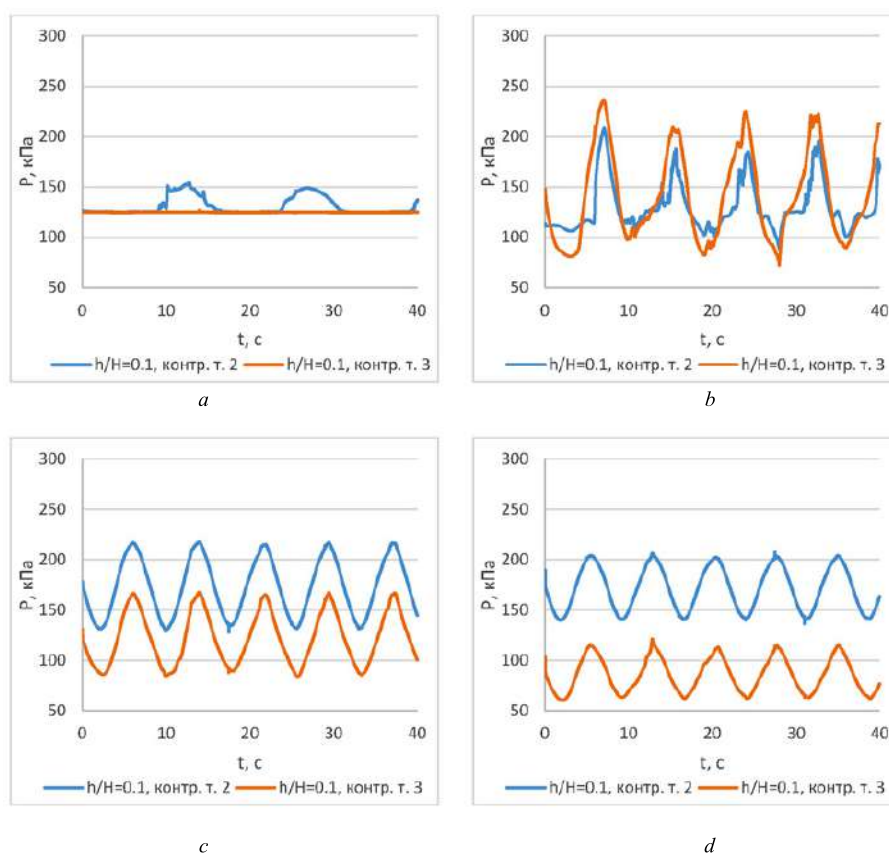


Рис. 6 Величина абсолютного давления в контрольных точках 2 и 3 при периодах волновых колебаний
a – T_2 , b – T_4 , c – T_6 , d – T_8

Таблица 1
Максимальные значения манометрического давления

	$h/H=0,1$ $T_1=8,5$ с	$h/H=0,5$ $T_3=8,84$ с	$h/H=0,75$ $T_5=9,55$ с	$h/H=0,9$ $T_7=9,89$ с
P_{max}	89кПа	188кПа	146кПа	142кПа
	$h/H=0,1$ $T_2=15,32$ с	$h/H=0,5$ $T_4=8,36$ с	$h/H=0,75$ $T_6=7,73$ с	$h/H=0,9$ $T_8=7,32$ с
P_{max}	79кПа	187кПа	124кПа	112кПа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе приведены результаты численного моделирования нагрузок на стенки грузовой емкости мембранного типа при бортовой качке судна газовоза на регулярном волнении. Оценочные расчеты показали, что метод объема жидкости позволяет получать корректные значения давления на стенки танка. Также расчеты показали, что расчеты гидродинамических нагрузок при регулярной бортовой качке с периодом, соответствующим периоду собственных колебаний жидкости в танке, не во всех случаях приводит к возникновению максимально возможных нагрузок на стенки грузовых емкостей при бортовой качке судна на регулярном волнении.

Конференция РС-СКФ: «Полярный кодекс и безопасность судов ледового плавания»

В 2016 году в рамках Международной выставки ТРАНСТЕК состоялась организованная Российским морским регистром судоходства (РС) и ПАО «Совкомфлот» (СКФ) конференция «Полярный кодекс и безопасность судов ледового плавания».

Полярный кодекс вступает в силу с 1 января 2017 года. Конференция была организована РС и СКФ как площадка для диалога между представителями научных центров, судоходных компаний и Регистра и обсуждения особенностей внедрения документа в отечественной морской индустрии.

С приветственным словом к участникам обратился директор Департамента государственной политики в области морского и речного транспорта Виталий Клюев. Открыли конференцию генеральный директор РС Константин Пальников и первый заместитель генерального директора – главный инженер СКФ Игорь Тонковидов.

Представитель ИМО, технический офицер ИМО Михаил Гаппов представил краткий обзор существующей международной нормативной базы для судов, эксплуатирующихся в замерзающих морях, и подробно остановился на деятельности ИМО по полярным вопросам после принятия Полярного кодекса.

Первый заместитель генерального директора - главный инженер СКФ Игорь Тонковидов выступил с докладом о современных транспортных решениях как ключевом элементе

REFERENCES

1. T. Gavory, P.E. de Seze. Sloshing in membrane LNG carriers and its consequences from a designer's perspective. Available at: http://www.gtt.fr/sites/gtt/files/2012_sloshing-membrane-lng-carriers-and-its-consequences-from-designs-perspective-2009-pdf-1-1-mo.pdf. (accessed at 20.08.2016).
2. Hirt, C.W., Nichols, B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J. of Comp. Physics. 1981. V 39 (1), pp 201-225.
3. Hassan Hemida. Open FOAM tutorial: Free surface tutorial using interFoam and rasInterFoam. 2008.
4. Rushe H. Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flow at high phase fractions. PhD Thesis. 2002.
5. Semenov-Tyan-Shanskiy V.V., Blagoveschenskiy S.N., Holidilin A.N. Kachka korablya [Ship motion]. Saint-Petersburg, Sudostroenie Publ., 1969, 392 p. (In Russian).
6. Mikelis N.E., Journee J.M.J. Experimental and Numerical Simulations of Sloshing Behaviour in Liquid Cargo Tanks and its Effect on Ship Motions. National Conference on Numerical Methods for Transient and Coupled Problems, 9-13 July 1984, Venice, Italy.
7. Faltinsen, O. M. and Timokha, A., 2009. Sloshing. Cambridge University Press.
8. Rules for the Classification and Construction of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk. Saint-Petersburg, Russian maritime register of shipping. 2016. (In Russian)
9. N. Tryaskin, I. Tkachenko, A. Dukarskiy, V. Yakimov, V. Tryaskin, D. Kiselev. Simulation of the Sloshing in the Prismatic Gas Tank after Impact Interaction of the Vessel with Ice Barrier. Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference. 2012.
10. Dukarskiy A. O., Tkachenko I. V., Tryaskin V. N., Tryaskin N. V., Yakimov V. V., D. Kiselev. Simulation of the sloshing in prismatic tank of the LNG carrier under impact interaction with ice barrier. Marine Intellectual Technologies, №4, 2011. (In Russian)

крупных промышленных проектов в Арктике. Он рассказал об уникальном опыте работы в арктических и субарктических морях, который Группа компаний «Совкомфлот» накопила за последнее десятилетие.

РС представил на конференции Руководство по применению положений Международного кодекса для судов, эксплуатирующихся в Полярных водах (Полярного кодекса). Данный документ разработан Регистром для удобства клиентов и является инструментом для определения перечня требований Кодекса, применимых к конкретному судну. Документ будет применяться при освидетельствовании судов и судового оборудования, рассмотрении проектной документации и документации на суда в постройке и эксплуатации.

Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова ознакомил присутствующих на конференции специалистов с результатами проведенной по заказу Регистра работы по созданию рекомендаций по подготовке Наставления по эксплуатации судов в полярных водах в полном соответствии с требованиями Полярного кодекса.

Об опыте разработки рекомендаций по допустимым безопасным и опасным режимам движения судна во льдах рассказал первый проректор Санкт-Петербургского государственного морского технического университета профессор Владимир Трякин.

С материалами конференции можно ознакомиться на сайте РС, в разделе «Научно-исследовательская работа», «Материалы семинаров».



МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

УДК 629.12.001.11

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ СУДНА, КАЧАЮЩЕГОСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ВЕТРА И ВОЛН

Р.В. Борисов, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет», Санкт-Петербург

М.А. Кутейников, д-р техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail kuteinikov.ma@rs-class.org

А.А. Лузянин, канд. техн. наук, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет», Санкт-Петербург

В.Р. Самойлов, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург

В действующем критерии погоды характеры качки и ветра, в основном, детерминированные. Критерий или удовлетворяется, или не удовлетворяется. Он не учитывает возможные отличия в конструкциях судов и особенности конкретного района плавания с конкретными ветро-волновыми условиями. Его трудно корректировать даже с использованием экспериментальных результатов. Поэтому определение уровня безопасности при использовании критерия затруднено.

В настоящей статье рассматривается совместное действие ветра и волн с учетом их нерегулярности. При этом используются спектры фактического ветра и волн, а средняя скорость ветра является связующим звеном между спектрами.

Движение судна моделируется с помощью уравнения качки, в общей постановке нелинейного как по демпфированию, так и по восстанавливающим силам. В процессе исследования показана возможность значительного упрощения его решения.

Спектр качки определяется с помощью упрощенной линеаризации нелинейного демпфирования и диаграммы статической устойчивости.

Оценка вероятности опрокидывания может быть осуществлена с использованием аналитических формул на основе предположения гауссова распределения для бортовой качки и распределения Пуассона для возникновения опрокидывания.

Предлагаемый стохастический подход позволяет, в принципе, производить оценку безопасности конкретного судна. Учет различий в конструкции может быть выполнен на основе, например, вероятности опрокидывания или превышения некоторого критического угла наклона.

Ключевые слова: нормирование устойчивости, качка, нерегулярное волнение, безопасность мореплавания, ветровые и волновые нагрузки, вероятностные и детерминистические методы расчета

SAFETY ASSESSMENT OF A SHIP SWAYING UNDER THE ACTION OF IRREGULAR WIND AND WAVES

R.V. Borisov, DSc, professor, FSEI State Marine Technical University, St. Petersburg

M.A. Kuteynikov, Dsc, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg,
e-mail: kuteinikov.ma@rs-class.org

A.A. Luzyanin, PhD, FSEI State Marine Technical University, St. Petersburg

V.R. Samoylov, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg

The nature of roll and wind in the current weather criterion is deterministic. The criterion is either fulfilled or not fulfilled. It does not take into account the possible differences in ship designs and particular qualities of a specific navigation area with the specific wind and waves conditions. It is difficult to correct the weather criterion even using the experimental data. Therefore, the definition of the safety level using the criterion is complicated.

The combined effect of wind and waves is considered in this article taking into account their irregularity. Wherein the spectra of actual wind and waves are used and the mean wind speed is the connecting link between the spectra.

The motion of the vessel is modelled with the help of roll equation in common formulation nonlinear both by damping and by restoring forces. The possibility for a significant simplification of its solution is shown during the study.

The assessment of capsizing probability can be realized by using the analytical formula based on the assumption of Gaussian distribution for roll and Poisson distribution for the occurrence of capsizing.

The proposed stochastic approach renders it possible, in principle, to assess the safety of a particular ship. The accounting for the differences in ship design can be made on the basis of, for instance, capsizing probability or the excess of a critical heel angle.

Keywords: stability normalization, roll motions, irregular waves, seafaring safety, wind and wave loads, probabilistic and deterministic calculation methods

В существующих нормах ИМО остойчивость по критерию погоды K считается достаточной, если при указанном ниже условном действии ветра и волнения выполняется требование к критерию. При этом считается, что:

1. Судно находится под воздействием ветра постоянной скорости, направленного перпендикулярно к его диаметральной плоскости, которому соответствует плечо ветрового кренящего момента l_{w1} (рис. 1);

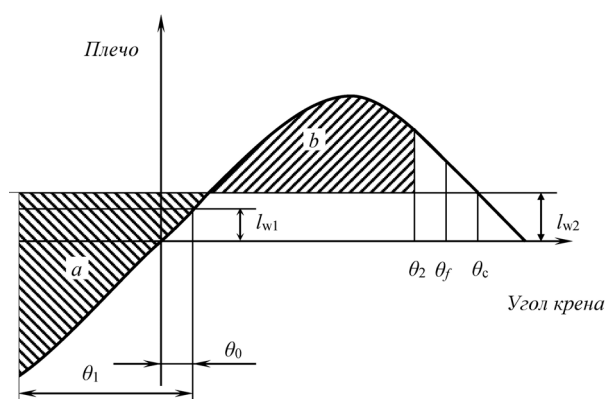


Рис. 1

2. От статического угла крена θ_0 , вызванного постоянным ветром и соответствующего первой точке пересечения горизонтальной прямой l_{w1} и кривой восстанавливающих плеч $l(\theta)$, под действием волн судно кренится на наветренный борт на угол, равный амплитуде бортовой качки θ_1 ;

3. На накрененное судно динамически действует порыв ветра, которому соответствует плечо кренящего момента l_{w2} ;

4. Вычисляются и сравниваются площади a и b , заштрихованные на рис. 1. Площадь b ограничена кривой $l(\theta)$ восстанавливающих плеч, горизонтальной прямой, соответствующей кренящему плечу $l_{w2} = 1,5 l_{w1}$, и углом крена $\theta_f = 50^\circ$, либо углом крена θ_c , соответствующим точке второго пересечения прямой l_{w2} с кривой восстанавливающих плеч — в зависимости от того, какой из этих углов меньше. Площадь a ограничена кривой восстанавливающих плеч, прямой l_{w2} и углом крена, равным $\theta_0 - \theta_1$;

5. Остойчивость судна по критерию погоды $K = b/a$ считается достаточной, если площадь b равна или больше площади a , т.е. $K \geq 1$;

6. Характеры динамически приложенных порывов и амплитуд качки считаются детерминированными.

Этот критерий или удовлетворяется, или не удовлетворяется. Он не учитывает возможные особенности конкретного района плавания с конкретными ветровыми и волновыми условиями. Его трудно корректировать даже с использованием экспериментальных результатов. Поэтому определение уровня безопасности при использовании критерия затруднено.

В настоящей статье рассматривается совместное действие ветра и волн с учетом их нерегулярности. При этом используются спектры фактического ветра и волн, а средняя скорость ветра является связующим звеном между спектрами.

Действие ветра моделируется двумя составляющими: действием средней постоянной скорости ветра и колебаниями скорости ветра (порывы). Основная идея состоит в том, что постоянно действующий ветер вызывает дрейф с постоянной скоростью, так как будет наблюдаться равенство гидродинамической силы, действующей на подводную часть судна при качке, и противоположной по направлению силы действия среднего ветра. При этом предполагается, что изменение сил от действия порывов ветра по времени происходят быстро, так что у гидродинамических реакций, обусловленных качкой не хватает времени, чтобы полностью развиваться, и таким образом, ими пренебрегают.

Боковой ветер дует со скоростью $w(t)$.

Чтобы определить постоянный кренящий момент и момент от порывов ветра, проводится линеаризация скоростного напора воздуха.

Давление ветра p , связанное со скоростью потока $w(t)$, будет равно

$$p = \frac{1}{2} \rho_{\text{возд.}} w^2(t), \quad (1)$$

где $\rho_{\text{возд.}}$ — плотность воздуха.

Скорость ветра $w(t)$ определяется в виде суммы средней скорости ветра $\bar{w}$ и мгновенной скорости ветра колебания $\delta w(t)$, а именно:

$$w(t) = \bar{w} + \delta w(t). \quad (2)$$

Если пренебречь составляющими второго порядка, на основе предположения, что коэффициент изменчивости поля ветра мал, линейризованное выражение давления ветра получится равным:

$$p(t) = \bar{p} + \delta p(t), \quad (3)$$

где $\bar{p}$ – постоянное давление ветра, равное

$$\bar{p} = \frac{1}{2} \rho_{\text{возд.}} \bar{w}^2; \quad (4)$$

$\delta p(t)$ – переменное давление ветра, равное

$$\delta p(t) \approx \rho_{\text{возд.}} \bar{w} \delta w(t). \quad (5)$$

Тогда горизонтальная сила от действия ветра будет равна

$$F_w(t) = F_{0w} + \delta F_w(t), \quad (6)$$

где F_{0w} – постоянная боковая сила (она же средняя)

$$F_{0w} = \frac{1}{2} \rho_{\text{возд.}} \bar{w}^2 C_y A_{\text{п}}, \quad (7)$$

а $\delta F_w(t)$ – переменная

$$\delta F_w(t) \approx \rho_{\text{возд.}} \bar{w} \delta w(t) C_y A_{\text{п}}. \quad (8)$$

В выражениях (7) и (8)

$A_{\text{п}}$ – площадь парусности – площадь проекций всех конструкций на диаметрально плоскость;

C_y – коэффициент аэродинамического сопротивления, зависящий от наличия надстроек, развитости надводных конструкций и их формы и т.д.

Постоянный кренящий момент от ветра M_{w1} можно вычислить по формуле

$$M_{w1} = F_{0w}(H_{\text{п}} + H_{\text{гд}}) = \frac{1}{2} C_y \rho_{\text{возд.}} \bar{w}^2 A_{\text{п}}(H_{\text{п}} + H_{\text{гд}}), \quad (9)$$

где $H_{\text{п}}$ – высота центра приложения аэродинамического давления над ватерлинией. Центр давления при равномерном распределении по высоте ветровой нагрузки совпадает с центром тяжести площади парусности;

$H_{\text{гд}}$ – расстояние центра гидродинамического давления от ватерлинии вниз. При статическом действии ветра он обычно принимается равным половине осадки $T/2$.

Величина среднего ветрового момента предполагается не зависящей от мгновенного угла крена при качке.

Плечо постоянного кренящего момента будет равно

$$l_{w1} = \frac{M_{w1}}{D} = \frac{1}{2D} C_y \rho_{\text{возд.}} \bar{w}^2 A_{\text{п}}(H_{\text{п}} + H_{\text{гд}}). \quad (10)$$

Здесь D – весовое водоизмещение судна.

Из обычного уравнения статики можно получить постоянный угол крена θ_0 , относительно которого при воздействии волн происходят качка судна

$$Dl(\theta) = M_{w1}, \quad (11)$$

где $l(\theta)$ – плечо статической остойчивости, получается при расчетах статики судна. Угол крена θ_0 удобнее получать графически, как это показано на рис. 1, но можно определять аналитическим путем, предварительно проводя аппроксимацию $l(\theta)$.

Переменный кренящий момент вычисляется следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta M_{w2}(t) &\approx \delta F_w(t)(T + H_{\text{п}} - z_g) = \\ &= C_y \rho_{\text{возд.}} \bar{w} \delta w(t) A_{\text{п}}(T + H_{\text{п}} - z_g). \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь предполагается, что изменение сил от действия порывов ветра по времени происходят быстро, так что гидродинамические реакции не успевают развиваться. Если бы использовался подход «масштаба медленного времени», плечо силы от порывистости можно было бы считать равным плечу силы для постоянного ветра, т. е. $H_{\text{п}} + H_{\text{гд}}$.

Плечо переменного кренящего момента можно определить по формуле

$$l_{w2} = l_{w1} + \delta l_{w2}, \quad (13)$$

где δl_{w2} – дополнительное плечо кренящего момента, возникающего именно от порывов ветра

$$\delta l_{w2}(t) = \frac{\delta M_{w2}(t)}{D} = \frac{1}{D} C_y \rho_{\text{возд.}} \bar{w} \delta w(t) A_{\text{п}}(T + H_{\text{п}} - z_g). \quad (14)$$

Порывистость ветра, т. е. колебания скорости ветра около среднего значения $\bar{w}$, является нулевым средним гауссовым процессом, который можно охарактеризовать во временной/частотной области соответствующим спектром порывов $S_w(\omega)$. Он может принимать различные формы в зависимости от типа ветра, от средней скорости в географической зоне, от шероховатости местности и т. д. В предложенном в [6] компактном виде он приведен в выражении

$$S_w(\omega) = 4K^* \frac{\bar{w}^2}{\omega} \frac{X_D^2}{(1 + X_D^2)^{4/3}}, \quad (15)$$

где $K^* = 0,003$ и

$X_D = 600 \frac{\omega}{\pi \bar{w}}$ – параметры спектра.

В соответствии с процедурой линейризации давления, описанной выше, спектр момента линейризованных колебаний от ветра может быть получен в форме:

$$S_{\delta M_{w2}}(\omega) = [C_y \rho_{\text{возд.}} \bar{w} \delta w A_{\text{п}}(T + H_{\text{п}} - z_g)]^2 S_w(\omega). \quad (16)$$

При этом не принимаются во внимание эффект некоторой пространственной неравномерности поля скоростей ветра и эффект неустойчивости процесса.

Учитывая (14), спектральную плотность для плеча переменного ветрового момента $\delta l_{w2} = (t)$ можно записать в виде:

$$S_{\delta l_{w2}}(\omega) = [\rho_{\text{в}} \bar{v}_{\text{в}} C_y A_{\text{п}}(T + H_{\text{п}} - z_g)]^2 \frac{S_w(\omega)}{D^2}. \quad (17)$$

С помощью $S_{l_{w2}}(\omega)$ может быть получена дисперсия

$$D_{\delta l_{w2}} = \int_0^{+\infty} S_{\delta l_{w2}}(\omega) d\omega. \quad (18)$$

Зная дисперсию, можно с заданной обеспеченностью $a_{l_{w2}}$ получить плечо δl_{w2}

$$\delta l_{w2} = a_{l_{w2}} \sqrt{D \delta l_{w2}}. \quad (19)$$

Бортовая качка корабля при действии волн в общем случае моделируется нелинейным уравнением

$$(J_x + \lambda_{44})\ddot{\theta} + v_{44}(\dot{\theta}) + D l(\theta) = M_b(t), \quad (20)$$

где J_x – момент инерции массы судна;
 λ_{44} – момент инерции присоединенных масс;
 $v_{44}(\dot{\theta})$ – нелинейный коэффициент демпфирования;
 $M_b(t)$ – возмущающий момент от волн.

Если колебания судна при качке происходят около нулевого начального угла, диаграмму статической остойчивости линеаризуют, представив

$$l(\theta) = \left. \frac{dl(\theta)}{d\theta} \right|_{(\theta=0)} \theta = h_0 \theta. \quad (21)$$

В окрестности θ_0 диаграмму статической остойчивости можно линеаризовать аналогичным образом

$$l(\theta) = \left. \frac{dl(\theta)}{d\theta} \right|_{(\theta=\theta_0)} (\theta - \theta_0) = h_{\theta_0} (\theta - \theta_0) = h_{\theta_0} \vartheta, \quad (22)$$

где h_{θ_0} – обобщенная метacentрическая высота при угле θ_0 ;
 $\vartheta = (\theta - \theta_0)$ – относительный угол крена. (23)

В общем случае демпфирование имеет нелинейный характер

$$v_{44}(\dot{\theta}) = v_{44}\dot{\theta} + w_{44}\dot{\theta} |\dot{\theta}| + \dots,$$

но обычно для него применяют линеаризацию, поэтому в уравнение качки можно подставить $v_{44}(\dot{\theta}) = v_{44}\dot{\theta}$. В окрестности θ_0 будет

$$v_{44}(\dot{\theta}) = v_{44\theta_0} \dot{\vartheta}. \quad (24)$$

С учетом (22), (23) и (24) линеаризованное уравнение качки под действием волн в относительных координатах можно записать в виде:

$$(J_x + \lambda_{44})\ddot{\vartheta} + v_{44\theta_0}\dot{\vartheta} + D h_{\theta_0} \vartheta = M_b(t). \quad (25)$$

Для решения уравнения (20) разделим все члены его на первый коэффициент. Тогда получим

$$\ddot{\vartheta} + 2v_{\theta_0}\dot{\vartheta} + n_{\theta_0}^2 \vartheta = n_{\theta_0}^2 m_b(t). \quad (26)$$

Здесь

$$2v_{\theta_0} = \frac{v_{44}\theta_0}{(J_x + \lambda_{44})} - \quad (27)$$

коэффициент затухания в окрестности $\theta = \theta_0$;

$$n_{\theta_0} = \sqrt{\frac{D h_{\theta_0}}{J_x + \lambda_{44}}} - \quad (28)$$

частота бортовой качки в окрестности $\theta = 0$;

$$n_{\theta_0} = \sqrt{\frac{D h_{\theta_0}}{J_x + \lambda_{44}}} - \quad (29)$$

частота бортовой качки в окрестности $\theta = \theta_0$; связь между этими частотами определяется соотношением

$$\frac{n_{\theta_0}}{n_{\theta}} = \sqrt{\frac{n_{\theta_0}}{h_{\theta}}}; \quad (30)$$

$$m_b(t) = \frac{M_b(t)}{D h_0} \quad (31)$$

безразмерный возмущающий момент от волн.

С учетом (30) уравнение (26) можно переписать в виде:

$$\ddot{\vartheta} + 2v_{\theta_0}\dot{\vartheta} + n_{\theta_0}^2 \frac{h_{\theta_0}}{h_0} \vartheta = n_{\theta_0}^2 m_b(t). \quad (32)$$

Для описания нерегулярного волнения, используется спектральный подход, основанный на допущениях линейной гидродинамической теории. Возмущающий момент от воздействия волн должен быть гауссовым процессом, спектр которого $S_{M_b}(\omega)$ можно оценить по спектру углов волнового склона $S_{\alpha}(\omega)$:

$$S_{M_b}(\omega) = [D h_0 \kappa_{\theta}(\omega)]^2 S_{\alpha}(\omega). \quad (33)$$

Здесь $\kappa_{\theta}(\omega)$ – коэффициент, учитывающий конечность размеров судна. Он рассчитывается для каждого конкретного судна по соответствующим формулам, полученным в теории качки.

Спектр углов волнового склона $S_{\alpha}(\omega)$ может быть определен по формуле

$$S_{\alpha}(\omega) = \frac{\omega^4}{g^2} S_r(\omega), \quad (34)$$

где $S_r(\omega)$ – спектр морского волнения.

Спектр безразмерного возмущающего момента от волн запишется в виде:

$$S_{m_b}(\omega) = \frac{S_{M_b}(\omega)}{(D h_0)^2} = [\kappa_{\theta}(\omega)]^2 \frac{\omega^4}{g^2} S_r(\omega). \quad (35)$$

В общем случае для определения спектра $S_{\vartheta}(\omega)$ выходного процесса ϑ может быть использовано линейное уравнение (32). Тогда

$$S_{\vartheta}(\omega) = \frac{n_{\theta_0}^4 S_{m_b}(\omega)}{[n_{\theta_0}^2 - \omega^2]^2 + [2v_{\theta_0}\omega]^2}, \quad (36)$$

С помощью спектра $S_{\vartheta}(\omega)$ может быть получена дисперсия:

$$D_{\vartheta} = \int_0^{+\infty} S_{\vartheta}(\omega) d\omega. \quad (37)$$

Подставив в (37) выражение (30) и (35), получим для дисперсии амплитуд качки от волнения:

$$D_{\vartheta} = \int_0^{+\infty} \frac{n_{\theta_0}^4 S_{m_b}(\omega)}{[n_{\theta_0}^2 \frac{h_{\theta_0}}{h_0} - \omega^2]^2 + [2v_{\theta_0}\omega]^2} d\omega. \quad (38)$$

Дисперсия угловых скоростей получается по формуле

$$D_{\dot{\vartheta}} = \int_0^{+\infty} \frac{\omega^2 n_{\theta_0}^4 S_{m_b}(\omega)}{[n_{\theta_0}^2 \frac{h_{\theta_0}}{h_0} - \omega^2]^2 + [2v_{\theta_0}\omega]^2} d\omega. \quad (39)$$

Амплитуда качки при воздействии нерегулярного волнения можно определять в зависимости от заданной обеспеченности a_g по формуле:

$$\vartheta_1 = a_g \sqrt{D_g} \quad (40)$$

Средняя амплитуда качки определяется при 46,5% обеспеченности

$$\vartheta_{\text{ср.}} = \sqrt{D_g} \quad (41)$$

Максимальная амплитуда качки определяется при 0,5% обеспеченности

$$\vartheta_{\text{max}} = 3,25 \sqrt{D_g} \quad (42)$$

Конкретные условия плавания будут учитываться через значения l_{w1} (т.е. θ_0), l_{w2} с заданной обеспеченностью и ϑ_1 с заданной обеспеченностью. Выбор величин $a_{l_{w2}}$ и a_g влияет на жесткость требований по обеспечению неопрокидывания и требует проведения дополнительных исследований и согласований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Луговский В.В. Теоретические основы нормирования остойчивости морских судов Ленинград. «Судостроение», 1971.
- 2 Благовещенский С.Н. Национальные требования к остойчивости неповрежденных судов. – В сб.: Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости. М.–Л., «Транспорт», 1965 (Регистр СССР).
- 3 Севастьянов Н.Б. Основные вопросы нормирования остойчивости промысловых судов. – В сб.: Теоретические и практические вопросы остойчивости и непотопляемости. М.–Л., «Транспорт», 1965 (Регистр СССР).

- 4 Francescutto A., Serra A., Scarpa S. "A Critical Analysis of Weather Criterion for Intact Stability of Large Passenger Vessels", Proc. 20th Int. Conf. OMAE.01, Rio de Janeiro, 3-8 June 2001. Davenport A. G. Spectrum of Horizontal Gustiness near the Ground in Strong Winds., Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 87, April 1961, pp. 194-211.
- 5 Vassalos D., Jasionowski A., Cichowicz J. Weather Criterion. Questions and Answers. Proc. STAB2003, Madrid, 2003, pp. 695-705.

REFERENCES

- 1 Lugovskiy V. V. Teoreticheskie osnovi normirovaniya ostoichivosti morskikh sudov [Theoretical basis for normalization of seagoing vessels stability]. Leningrad. "Sudostroenie" Publ., 1971. (In Russian)
- 2 Blagoveshenskiy S. N. Nacionalnie trebovaniya k ostoichivosti nepovrezhdennih sudov. V sb.: Teoreticheskie i prakticheskie voprosi ostoichivosti i nepotoplyaemosti [Undamaged vessels stability national requirements. Theoretical and practical questions of stability and floodability]. M.–L., "Transport" Publ., 1965 (Registr SSSR). (In Russian)
- 3 Sevastianov N. B. Osnovnie voprosi normirovaniya ostoichivosti promislovih sudov. V sb.: Teoreticheskie i prakticheskie voprosi ostoichivosti i nepotoplyaemosti [Main issues of stability normalization of fishery vessel. Theoretical and practical questions of stability and floodability]. M.–L., "Transport" Publ., 1965 (Registr SSSR). (In Russian)
- 4 Francescutto A., Serra A., Scarpa S. "A Critical Analysis of Weather Criterion for Intact Stability of Large Passenger Vessels", Proc. 20th Int. Conf. OMAE.01, Rio de Janeiro, 3-8 June 2001. Davenport A. G. Spectrum of Horizontal Gustiness near the Ground in Strong Winds., Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 87, April 1961, pp. 194-211.
- 5 Vassalos D., Jasionowski A., Cichowicz J. Weather Criterion. Questions and Answers. Proc. STAB2003, Madrid, 2003, pp. 695-705.

УДК 629.12.073.243.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ СУДАМИ И ГЛУБИНЫ ФАРВАТЕРА НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ СОВМЕСТНОЙ КАЧКИ НА МЕЛКОВОДЬЕ

В.Ю. Семенова, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, тел.: +7-905-229-71-98, e-mail: sem_viktoria@mail.ru; viktosemenova@yandex.ru
Аунг Мьо Тхант, аспирант, Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, e-mail: aungmyothant.amt@mail.ru

В статье рассматривается трехмерная потенциальная задача о совместной качке двух судов на мелководье. Ее решение осуществляется численным методом. Проводится исследование влияния изменения расстояния между судами и глубины фарватера на значения коэффициентов присоединенных масс и демпфирования. Производится апробация разработанных авторами численного метода и программы расчета. Приводятся результаты расчетов присоединенных масс и коэффициентов демпфирования для двух пар судов, расположенных параллельно друг другу. Производится анализ полученных результатов в зависимости от изменения расстояния между судами и глубины.

Ключевые слова: мелководье, метод интегральных уравнений, совместная качка судов, присоединенные массы, коэффициенты демпфирования

THE INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE DISTANCE BETWEEN THE SHIPS AND THE FAIRWAY DEPTH ON THE HYDRODYNAMICS CHARACTERISTICS OF THEIR JOINT MOTIONS IN SHALLOW WATER

V.Yu. Semyonova, DSc, professor, FSEI State Marine Technical University, St. Petersburg, tel. +7-905-229-71-98, e-mail: sem_viktoria@mail.ru; viktosemenova@yandex.ru
Aung Myo Thant, postgraduate student, FSEI State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: aungmyothant.amt@mail.ru

The article deals with potential three-dimensional problem of two ships' joint motion in shallow water. Its solution is carried out by a numerical method. The investigation of the influence of the distance change between the ships and the fairway depth on the coefficients values of added masses and damping is made. The developed numerical method and calculation program are tested. In the paper there are presented the results of the calculations of the added mass and damping coefficients for the two pairs of the ships located side-by-side, followed by the analysis of the results, depending on the change of the distance between the ships and depth.

Keywords: shallow water, method of the integral equations, joint motions of the ships, added masses of a ship, damping coefficients

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации судов, в частности при грузовых операциях в портах и гаванях, необходимо уметь определять гидродинамические характеристики и амплитуды колебаний судов при их совместной качке в жидкости ограниченной глубины.

В условиях фарватера, ограниченного по глубине, будет происходить еще более значительное изменение всех гидродинамических реакций, действующих на оба судна со стороны окружающей их воды, вследствие чего изменятся и мореходные качества обоих судов по сравнению с их качкой в бесконечно глубокой жидкости.

В настоящей работе задача о совместной качке двух судов на мелководье решается с помощью численного метода на основании трехмерной потенциальной теории.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА

В соответствии с линейной теорией качки судна, потенциалы движения жидкости судна А и судна В и можно представить в виде следующей суперпозиции:

$$\Phi_A = \sum_{j=1}^6 U_{jA} \Phi_{jAA} + \sum_{j=1}^6 U_{jB} \Phi_{jBA}, \quad (1)$$

$$F_B = \sum_{j=1}^6 U_{jB} \Phi_{jBB} + \sum_{j=1}^6 U_{jA} \Phi_{jAB} \quad (2)$$

где U_{jA} , U_{jB} – скорости отдельных видов качки судна А и судна В.

Потенциалы Φ_A и Φ_B должны удовлетворять уравнению Лапласа, граничным условиям на свободной и смоченной поверхностях, а также условиям на дне водоема:

$$\frac{\partial \Phi_A}{\partial \xi} - v \Phi_A = 0; \quad \frac{\partial \Phi_B}{\partial \xi} - v \Phi_B = 0; \quad v = \frac{\omega^2}{g} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Phi_{jAA}}{\partial n} = n_{jA}; \quad \frac{\partial \Phi_{jBA}}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial \Phi_{jAB}}{\partial n} = 0; \quad \frac{\partial \Phi_{jBB}}{\partial n} = n_{jB}; \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \Phi_A}{\partial \xi} = 0, \quad \xi \rightarrow -h; \quad \frac{\partial \Phi_B}{\partial \xi} = 0, \quad \xi \rightarrow -h$$

Граничные условия непротекания n_{jA} , n_{jB} имеют общий вид:

$$\begin{aligned} n_1 &= \cos(n, \xi); \quad n_2 = \cos(n, \eta); \quad n_3 = (n, \xi); \\ n_4 &= \eta \cos(n, \zeta) - \zeta \cos(n, \eta); \quad n_5 = \zeta \cos(n, \xi) - \xi \cos(n, \zeta); \\ n_6 &= \xi \cos(n, \eta) - \eta \cos(n, x) \end{aligned} \quad (5)$$

и должны выполняться соответственно на смоченной поверхности судна А и судна В.

Задача сводится к определению потенциалов Φ_{jAA} , Φ_{jBA} , Φ_{jAB} , Φ_{jBB} , обусловленных отдельными видами качки и гидродинамическим взаимодействием судов.

Для ее решения используется теорема Грина, согласно которой каждый из искомым потенциалов можно представить как

$$\begin{aligned} \Phi_{jAA}(\xi, \eta, \zeta) &= \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{jA1}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) G_{AA}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_A + \\ &+ \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{jB1}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) G_{BA}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_B \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{jAB}(\xi, \eta, \zeta) &= \frac{1}{4\pi} \iint_{S_A} \sigma_{jA1}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) G_{AB}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_A + \\ &+ \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{jB1}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) G_{BB}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_B \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{jBA}(\xi, \eta, \zeta) &= \frac{1}{4\pi} \iint_{S_A} \sigma_{jA2}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) G_{AA}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_A + \\ &+ \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{jB2}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) G_{BA}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_B \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{jBB}(\xi, \eta, \zeta) &= \frac{1}{4\pi} \iint_{S_A} \sigma_{jA2}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) G_{AB}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_A + \\ &+ \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{jB2}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) G_{BB}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_B \end{aligned} \quad (9)$$

Функция Грина, входящая в выражения (6) – (9) определяется, согласно Wehausen [4], для случая жидкости конечной глубины h , как

$$\begin{aligned} G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) &= \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \\ &+ \int_0^\infty \frac{2(k+v)e^{-kh} \cosh k(\zeta+h) \cosh k(\zeta_1+h)}{k \sinh kh - v \cosh kh} J_0(kR) dk + \\ &+ j2\pi \frac{(\mu_0^2 - v^2) \cosh \mu_0(\zeta+h) \cosh \mu_0(\zeta_1+h)}{(\mu_0^2 - v^2)h + v} J_0(\mu_0 R), \end{aligned} \quad (10)$$

где $r = \sqrt{(\xi - \xi_1)^2 + (\eta - \eta_1)^2 + (\zeta - \zeta_1)^2}$ – расстояние между точкой, находящейся в жидкости, и точкой, в которую помещен источник;

$r_1 = \sqrt{(\xi - \xi_1)^2 + (\eta - \eta_1)^2 + (\zeta - \zeta_1 + 2h)^2}$ – расстояние между точкой жидкости, и точкой, представляющей собой зеркальное отражение источника относительно дна водоема.

$R = \sqrt{(\xi - \xi_1)^2 + (\eta - \eta_1)^2}$;

μ_0 – положительный корень трансцендентного уравнения

$$\mu_0 \tanh \mu_0 h = \frac{\omega^2}{g} = v \quad (11)$$

При этом μ_0 удовлетворяет условию $\mu_0 > v$.

Выражение для функции Грина (10) может быть представлено согласно John [2] в виде бесконечных рядов:

$$\begin{aligned} G(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) &= \\ &= 2\pi \frac{(v^2 - \mu_0^2) \cosh \mu_0(\zeta+h) \cosh \mu_0(\zeta_1+h)}{(\mu_0^2 + v^2)h - v} (Y_0(\mu_0 R) - jJ_0(\mu_0 R)) + \\ &+ 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\mu_k^2 + n_2) \cos \mu_k(\zeta+h) \cos \mu_k(\zeta_1+h)}{(\mu_0^2 + n^2)h - v} K_0(\mu_k R), \end{aligned} \quad (12)$$

где μ_k – положительные корни уравнения

$$\mu_k \tanh \mu_k h + v = 0 \quad (13)$$

При этом:

$$\pi(k - \frac{1}{2}) \leq \mu_k h \leq \pi k:$$

Выражение (12) для функции Грина более удобно для вычислений и используется в большинстве практических случаев.

Неизвестные интенсивности σ_j определяются из граничных условий на смоченных поверхностях судов [1]:

$$\begin{aligned} & - \frac{1}{2} \sigma_{jA1}(\xi, \eta, \zeta) + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_A} \sigma_{jA1}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G_{AA}}{\partial n}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_A + \\ & + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{jB1}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G_{BA}}{\partial n}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_B = n_{jA}; \\ & - \frac{1}{2} \sigma_{jB1}(\xi, \eta, \zeta) + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_A} \sigma_{jA1}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G_{AB}}{\partial n}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_A + \\ & + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{jB1}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G_{BB}}{\partial n}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_B = 0; \\ & - \frac{1}{2} \sigma_{jA2}(\xi, \eta, \zeta) + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_A} \sigma_{jA2}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G_{AA}}{\partial n}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_A + \\ & + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{jB2}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G_{BA}}{\partial n}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_B = 0; \\ & - \frac{1}{2} \sigma_{jB2}(\xi, \eta, \zeta) + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_A} \sigma_{jA2}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G_{AB}}{\partial n}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_A + \\ & + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_B} \sigma_{jB2}(\xi_1, \eta_1, \zeta_1) \frac{\partial G_{BB}}{\partial n}(\xi, \eta, \zeta, \xi_1, \eta_1, \zeta_1) dS_B = n_{jB}. \end{aligned} \quad (14)$$

Для численного решения полученных интегральных уравнений смоченная поверхность каждого судна разбивается на конечное число плоских треугольных панелей (рис. 1), что трансформирует интегральные уравнения в систему алгебраических:

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \sigma_{jA1} + \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^N \sigma_{jA1n} \frac{\partial}{\partial n} G_{AA n} \Delta S_{An} + \\ & + \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^K \sigma_{jB1k} \frac{\partial}{\partial n} G_{BA k} \Delta S_{Bk} = n_{jA}; \\ & -\frac{1}{2} \sigma_{jB1} + \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^N \sigma_{jA1n} \frac{\partial}{\partial n} G_{AB n} \Delta S_{An} + \\ & + \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^K \sigma_{jB1k} \frac{\partial}{\partial n} G_{BB k} \Delta S_{Bk} = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \sigma_{jA2} + \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^N \sigma_{jA2n} \frac{\partial}{\partial n} G_{AA n} \Delta S_{An} + \\ & + \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^K \sigma_{jB2k} \frac{\partial}{\partial n} G_{BA k} \Delta S_{Bk} = 0; \\ & -\frac{1}{2} \sigma_{jB2} + \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^N \sigma_{jA2n} \frac{\partial}{\partial n} G_{AB n} \Delta S_{An} + \\ & + \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^K \sigma_{jB2k} \frac{\partial}{\partial n} G_{BB k} \Delta S_{Bk} = n_{jB} \end{aligned} \quad (16)$$

где N – число панелей смоченной поверхности судна А,
 K – число панелей смоченной поверхности судна В.

Z Axis

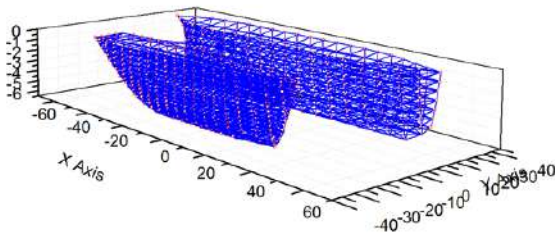


Рис. 1 Сухогруз «Стахановец Котов» и буксир при траверзном расположении. Представление смоченных поверхностей с помощью треугольных панелей

После определения интенсивностей из решения систем (15) – (16) потенциалы могут быть найдены как

$$\begin{aligned} \varphi_{jAA} &= \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^N \sigma_{jA1} G_{AA n} \Delta S_{An} + \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^K \sigma_{jB1} G_{BA k} \Delta S_{Bk} \\ \varphi_{jAB} &= \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^N \sigma_{jA1} G_{AB n} \Delta S_{An} + \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^K \sigma_{jB1} G_{BB k} \Delta S_{Bk} \\ \varphi_{jBA} &= \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^N \sigma_{jA2} G_{AA n} \Delta S_{An} + \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^K \sigma_{jB2} G_{BA k} \Delta S_{Bk} \\ \varphi_{jBB} &= \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^N \sigma_{jA2} G_{AB n} \Delta S_{An} + \frac{1}{4\pi} \sum_{k=1}^K \sigma_{jB2} G_{BB k} \Delta S_{Bk} \end{aligned} \quad (17)$$

Коэффициенты присоединенных масс и демпфирования определяются в соответствии со следующими выражениями [1]:

$$\begin{aligned} \lambda_{ijAA} &= \rho \iint_{SA} (-Re\varphi_{jAA} - \frac{U}{\omega_K} \frac{\partial}{\partial \xi} Im\varphi_{jAA}) n_j dS_A; \\ \mu_{ijAA} &= \rho \iint_{SA} (-\omega_K Im\varphi_{jAA} - U \frac{\partial}{\partial \xi} Re\varphi_{jAA}) n_j dS_A; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{ijBA} &= \rho \iint_{SA} (-Re\varphi_{jBA} - \frac{U}{\omega_K} \frac{\partial}{\partial \xi} Im\varphi_{jBA}) n_j dS_A; \\ \mu_{ijBA} &= \rho \iint_{SA} (-\omega_K Im\varphi_{jBA} - U \frac{\partial}{\partial \xi} Re\varphi_{jBA}) n_j dS_A; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{ijBB} &= \rho \iint_{SB} (-Re\varphi_{jBB} - \frac{U}{\omega_K} \frac{\partial}{\partial \xi} Im\varphi_{jBB}) n_j dS_B; \\ \mu_{ijBB} &= \rho \iint_{SB} (-\omega_K Im\varphi_{jBB} - U \frac{\partial}{\partial \xi} Re\varphi_{jBB}) n_j dS_B; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{ijAB} &= \rho \iint_{SB} (-Re\varphi_{jAB} - \frac{U}{\omega_K} \frac{\partial}{\partial \xi} Im\varphi_{jAB}) n_j dS_B; \\ \mu_{ijAB} &= \rho \iint_{SB} (-\omega_K Im\varphi_{jAB} - U \frac{\partial}{\partial \xi} Re\varphi_{jAB}) n_j dS_B; \end{aligned} \quad (21)$$

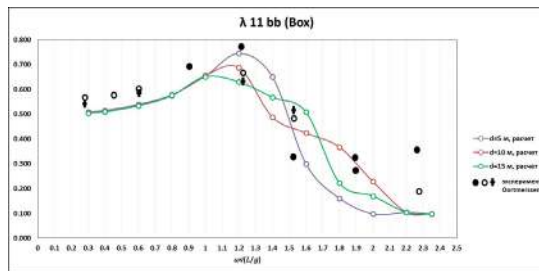
где ω_K – кажущаяся частота.

В выражениях (18) – (21) коэффициенты λ_{ijAA} , μ_{ijAA} , λ_{ijBB} , μ_{ijBB} представляют собой собственные коэффициенты присоединенных масс и демпфирования судна А и судна В. Коэффициенты λ_{ijAB} , μ_{ijAB} , λ_{ijBA} , μ_{ijBA} являются исключительно коэффициентами их гидродинамического взаимодействия между собой.

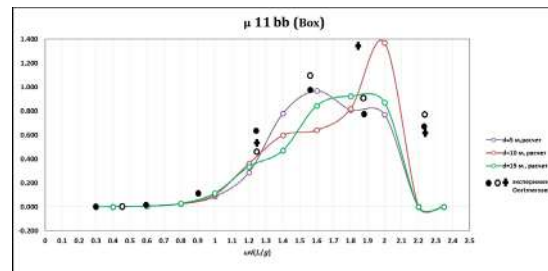
3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании изложенного метода была разработана программа расчета гидродинамических характеристик совместной качки двух судов в условиях мелководья.

В целях апробации, полученные результаты были сопоставлены с экспериментальными данными Oortmerssen [3]. На рис. 2 и 3 представлено сопоставление коэффициентов присоединенных масс и демпфирования для вертикального цилиндра и прямоугольного параллелепипеда с экспериментами Oortmerssen [3]. Расчеты выполнялись для глубины 22 м и расстояниями между объектами, равными 5, 10 и 15 м.

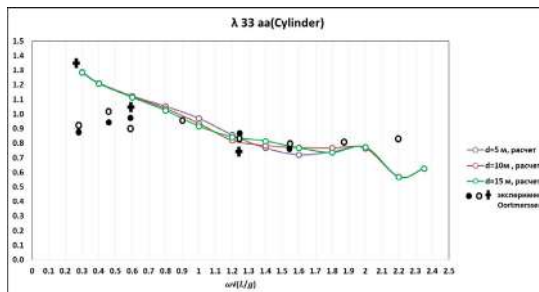


А)

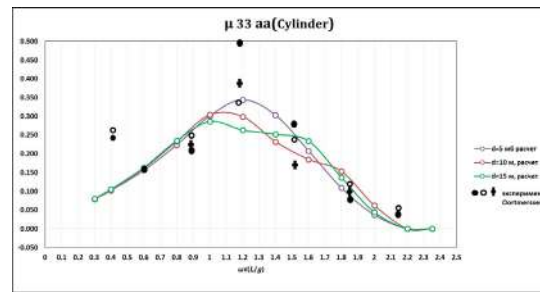


Б)

Рис. 2 Значения присоединенных масс (А) и коэффициентов демпфирования (Б) для параллелепипеда

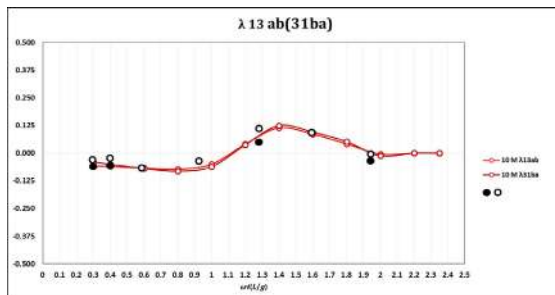


А)

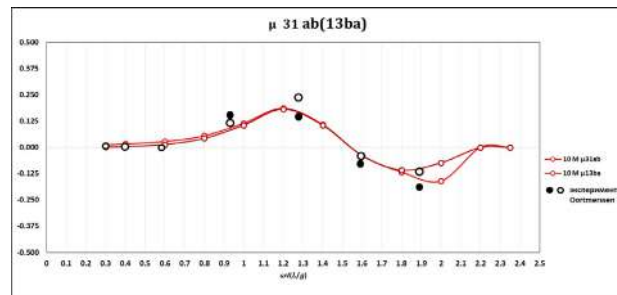


Б)

Рис. 3 Значения присоединенных масс (А) и коэффициентов демпфирования (Б) для вертикального цилиндра



А)



Б)

Рис. 4 Значения присоединенных масс (А) и коэффициентов демпфирования (Б) для параллелепипеда и вертикального цилиндра при их совместной качке

Из всех приведенных сопоставлений видно достаточно хорошее согласование полученных результатов с экспериментальными данными.

С целью исследования влияния изменения глубины и расстояния между судами на их гидродинамические коэффициенты присоединенных масс и демпфирования, расчеты проводились для двух пар судов: сухогруз «Новгород» ($L=138$ м, $B=20,6$ м, $T=9$ м, $\delta=0,68$) и лихтеровоз «Алексей

Косыгин» ($L=232$ м, $B=32$ м, $T=10,6$ м, $\delta=0,616$), сухогруз «Стахановец Котов» ($L=121$ м, $B=20,2$ м, $T=6,2$ м, $\delta=0,624$), и буксирное судно ($L=90$ м, $B=17,8$ м, $T=5,48$ м, $\delta=0,667$). При этом рассматривалось траверзное расположение этих судов.

На рис. 5 представлены расчеты некоторых безразмерных коэффициентов присоединенных масс и демпфирования для лихтеровоза «Алексей Косы-

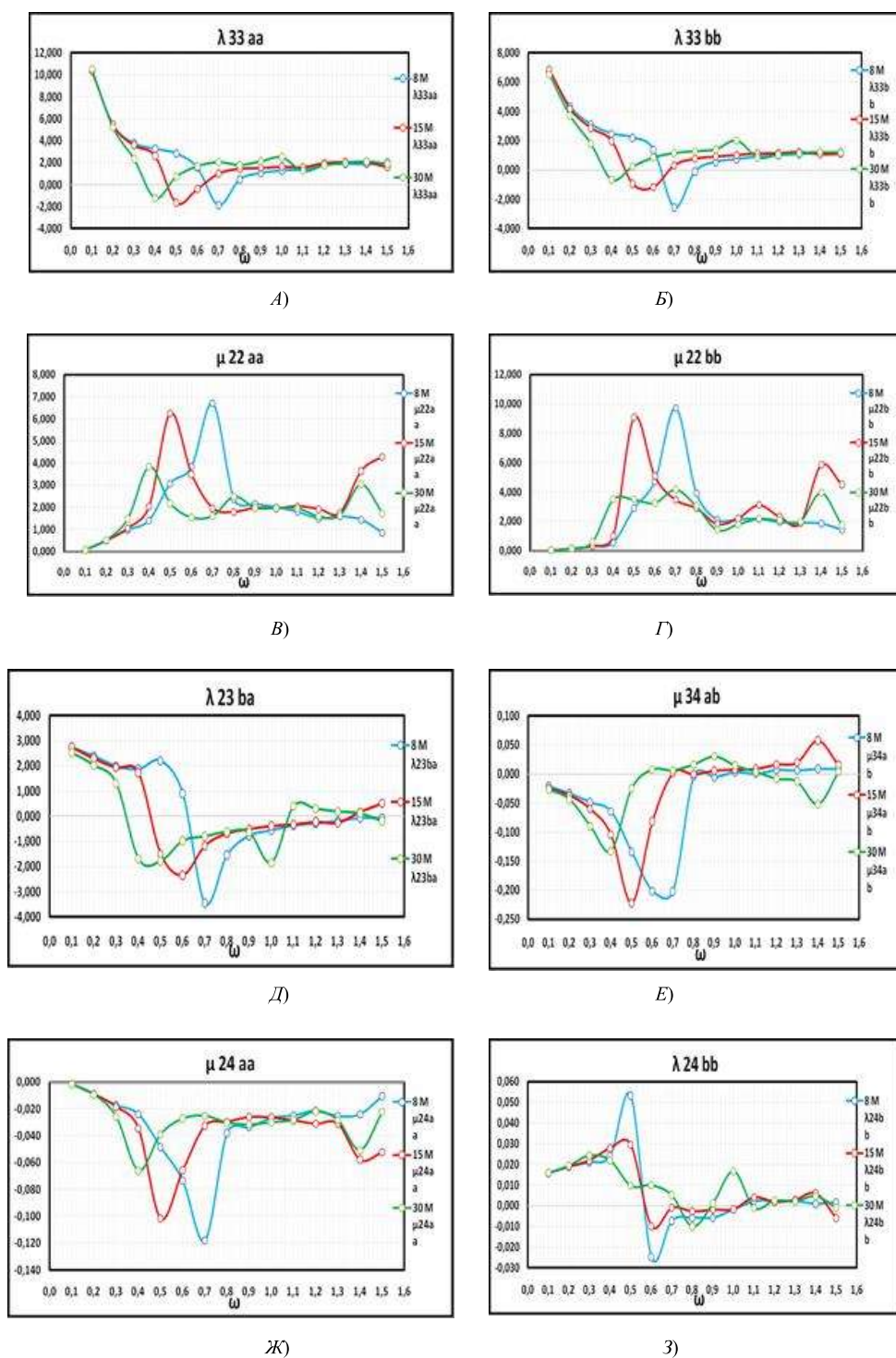


Рис. 5 Значения коэффициентов присоединенных масс и демпфирования при траверсном расположении лихтеровоза «Алексей Косыгин» (А, В, Д, Ж) и сухогруза «Новгород» (Б, Г, Е, З) при глубине $h = 15$ м в зависимости от изменения расстояния между бортами ($d = 8, 15, 30$ м)

гин» и сухогруза «Новгород» в зависимости от изменения расстояния между бортами при фиксированном значении глубины.

Аналогичные результаты для сухогруза «Стахановец Котов» и буксира приведены на рис. 6.

С целью объективного исследования влияния изменения расстояния на значения гидродинамических коэффициентов на рис. 5 – 6 приведены как основные коэффициенты, так и коэффициенты, обусловленные гидродинамическим взаимодействием судов.

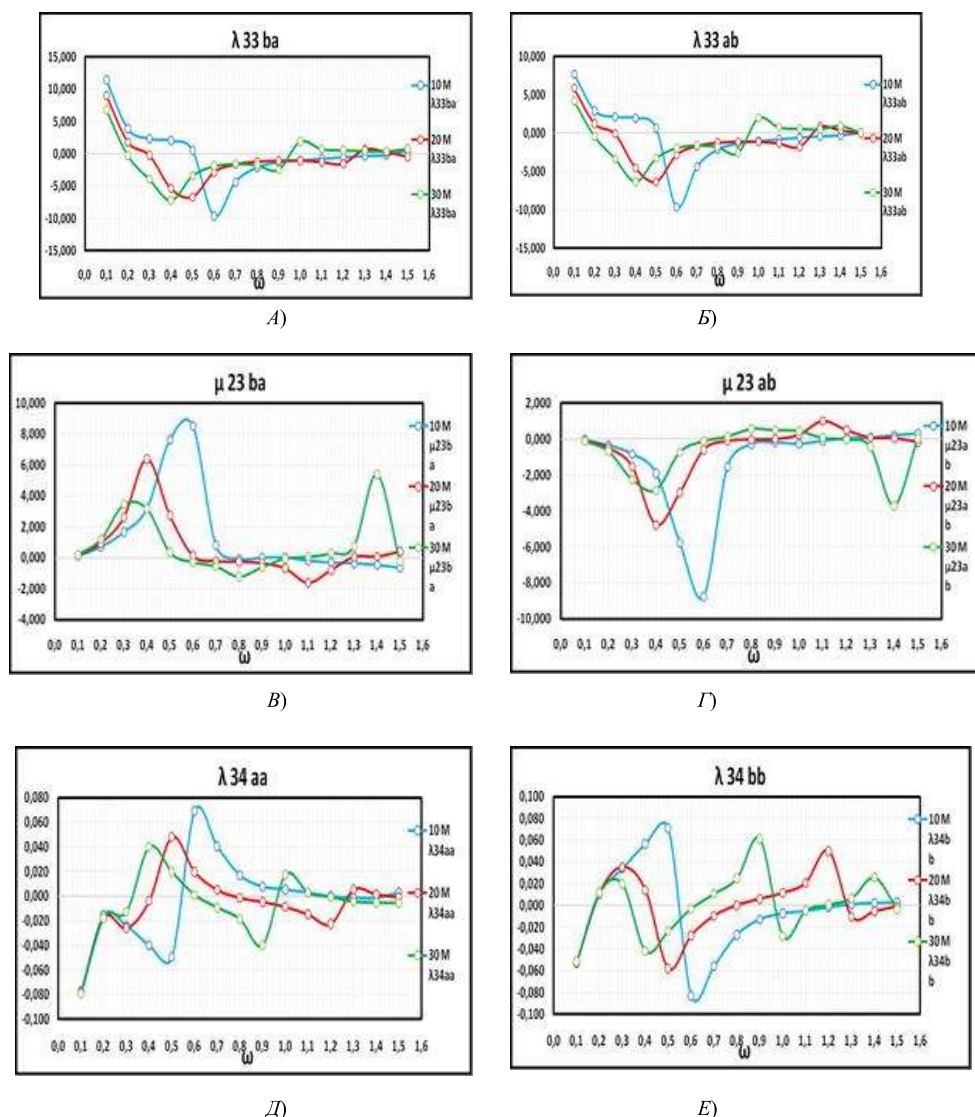


Рис. 6 Значения коэффициентов присоединенных масс и демпфирования при траверсном расположении сухогруза «Стахановец Котов» (А, В, Д) и буксира (Б, Г, Е) при глубине $h = 8$ м в зависимости от изменения расстояния между бортами ($d = 10, 20, 30$ м)

На рис. 7 приведены результаты расчетов коэффициентов присоединенных масс и демпфирования в зависимости от изменения глубины при фиксированном значении расстояния между судами.

Из приведенных результатов видно, что при некоторых значениях частот присоединенные массы и коэффициенты демпфирования имеют отрицательные значения. Подобные результаты вызваны не недостатками метода, а связаны с наличием стоячих волн между корпусами судов, которые приводят к изменению поля скоростей, а следовательно, и к изменению гидродинамических характеристик каждого судна.

Анализ полученных результатов показывает, что при уменьшении расстояния между судами происходит сдвиг максимальных значений коэффициентов присоединенных масс и демпфирования в зону

больших частот. Появляются такие коэффициенты как λ_{23} , μ_{23} , μ_{34} , которые отсутствуют при качке изолированного судна (рис. 5, 6). Значения данных коэффициентов, обусловленных взаимодействием двух судов, возрастают при уменьшении расстояния между бортами.

Уменьшение глубины при фиксированном расстоянии между судами приводит также к значительному увеличению всех коэффициентов присоединенных масс и демпфирования (рис. 7). Однако, сдвиг их максимальных значений происходит в область низких частот, в отличие от предыдущего случая изменения расстояния между судами.

С целью оценки совместного влияния изменения глубины и расстояния между бортами судов на рис. 8 – 9 приведены результаты расчетов некоторых коэффициентов присоединенных масс и демпфирования,

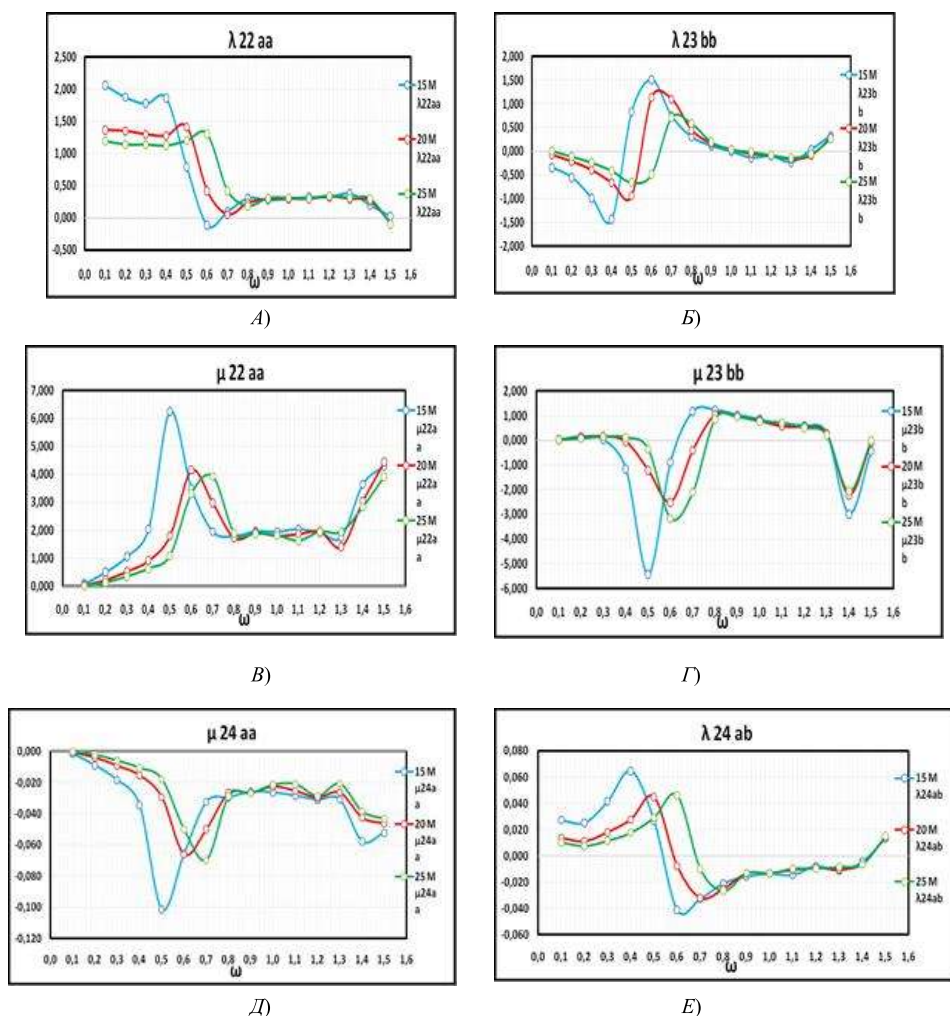


Рис. 7 Значения коэффициентов присоединенных масс и демпфирования при траверзном расположении лихтеровоза «Алексей Косыгин» (А, В, Д) и сухогруза «Новгород» (Б, Г, Е) при расстоянии между бортами $d = 15$ м в зависимости от изменения глубины ($h = 15, 20, 30$ м)

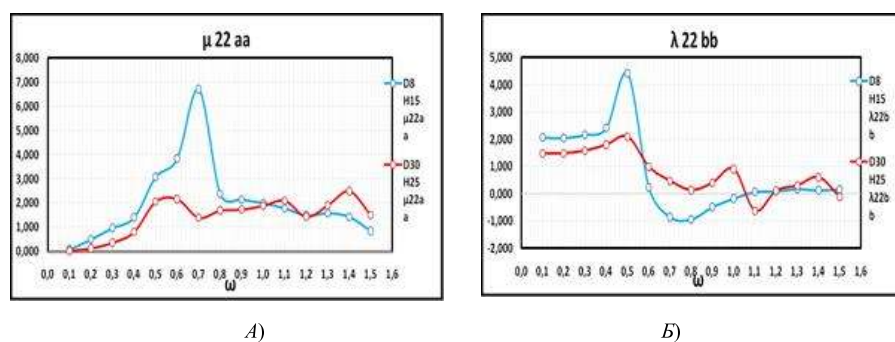


Рис. 8 Значения коэффициентов присоединенных масс (Б) и демпфирования (А) для судов «Алексей Косыгин» и «Новгород» при $d = 8$ м, $h = 15$ м и $d = 30$ м, $h = 25$ м

выполненные для минимальных из рассмотренных значений расстояния и глубины и максимальных.

Полученные результаты показывают многократное увеличение всех коэффициентов при одновременном уменьшении глубины фарватера и расстоя-

ния между судами. Так, коэффициент демпфирования μ ($\omega = 0,7$) для лихтеровоза «Алексей Косыгин» при сочетании минимальных значений d и h в 7 раз больше соответствующего коэффициента при максимальных значениях расстояния и

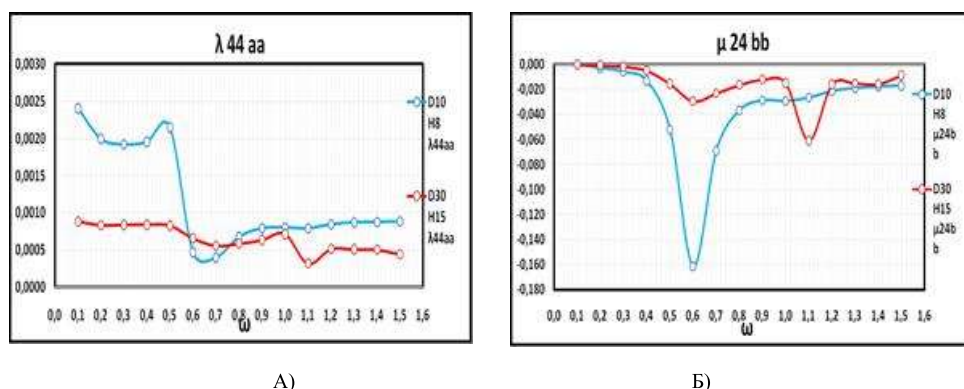


Рис. 9 Значения коэффициентов присоединенных масс (А) и демпфирования (Б) для судов «Стахановец Котов» и буксир при $d=10$ м, $h=8$ м и $d=30$ м, $h=15$ м

глубины (рис. 8). Аналогичные результаты получены и для пары сухогруз «Стахановец Котов» и буксир (рис. 9).

Полученные результаты говорят о необходимости дальнейшего изучения совместного влияния расстояния между судами при их совместной качке и ограниченной глубины фарватера на гидродинамические характеристики качки судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенова В.Ю., Аунг Мьо Тхант. Определение гидродинамических коэффициентов присоединенных масс и демпфирования при совместной качке двух судов. Морские интеллектуальные технологии, N4 (30), т.1, 2015, стр. 9-15
2. John F. On the motion of floating bodies. Comm.Pure and Appl. Math., 1950, v. 3, p. 45-101

3. Oortmerssen G. The motions of a ship in shallow water. Ocean Engineering, 1976, vol.3, n 4
4. Wehausen J.V., Laitone E.V. Surface waves. Encyclopedia of Physics. Berlin, Springer-Verlag, 1960, v.9, p. 446-778

REFERENCES

1. Semenova V.Yu., Aung M'o Tkhant. Determination of hydrodynamic factor of apparent mass and damping with joint motions of two ships. Morskie intellektual'nye tekhnologii [Marine intellectual technologies]. 2015, N4 (30), vol.1, pp. 9-15. (In Russian)
2. John F. On the motion of floating bodies. Comm.Pure and Appl. Math., 1950, v. 3, p. 45-101.
3. Oortmerssen G. The motions of a ship in shallow water. Ocean Engineering, 1976, vol.3, N. 4.
4. Wehausen J.V., Laitone E.V. Surface waves. Encyclopedia of Physics. Berlin, Springer-Verlag, 1960, v.9, pp. 446-778.



МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 614.841.22

ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПОНИЖЕННОЙ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ СУДОСТРОЕНИЯ

Н.И. Константинова, д-р техн. наук, проф., НИИ противопожарной обороны МЧС РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации стихийных бедствий (ФГБУ ВНИИПО МЧС РОССИИ), Балашиха

И.С. Семибратова, ФГБУ ВНИИПО МЧС РОССИИ, Балашиха

Н.А. Терешина, ФГБУ ВНИИПО МЧС РОССИИ, Балашиха

А.О. Шашков, канд. техн. наук, ООО ПФ «Кадотекс 2000», Москва, 84994808900,
e-mail: kadotex-shao@yandex.ru

В статье рассмотрены вопросы пожаробезопасного применения текстильных материалов (ТМ), используемых в качестве отделки интерьера на морских судах. Проведены исследования по оценке пожарной опасности различного рода ТМ, установлена их воспламеняемость и подверженность распространению пламени по поверхности. Показано, что одним из эффективных способов получения ТМ пониженной пожарной опасности без ухудшения основных эксплуатационных свойств является использование термостойких и (или) огнезащитных волокон или их комбинаций. Представлены результаты экспериментальных исследований по основным показателям пожарной опасности и характеристикам эксплуатационных свойств отечественных серийно производимых ТМ из смеси волокон для судостроения.

Ключевые слова: текстильные материалы (ТМ) пониженной пожарной опасности, распространение пламени по поверхности, дымообразование, воспламеняемость, выделение летучих токсичных продуктов термического разложения, ТМ соответствующие требованиям, регламентирующим их пожаробезопасное применение на морских судах

LOW FIRE HAZARD TEXTILE MATERIALS FOR SHIPBUILDING

N.I. Konstantinova, DSc, professor, FSEA Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (FGBU VNIPO EMERCOM of Russia), Moscow region, Balashikha, 84955249849, e-mail: firelab_vniipo@mail.ru

I.S. Semibratova, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia Moscow region, Balashikha

N.A. Tereshina, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia Moscow region, Balashikha

A.O. Shashkov, PhD, LLC PF "Kadoteks 2000", Moscow, 84994808900, e-mail: kadotex-shao@yandex.ru

The article considers the issues of fireproof textile materials (TM) application in their use as interior decoration onboard a ship. The study provided the evaluation of the fire hazard of different kinds of TM, researched their flammability and fire susceptibility of the surface,

revealing that one of the most effective methods of obtaining fireproof TMs not impacting their main exploitation properties is the consistent use of heat-resistant and (or) flame retarded fibers or their combinations. The results of experimental studies on the main fire hazard indicators and the characteristics of the exploitation properties of domestic mass-produced TM made of a fiber mix for shipbuilding are presented.

Keywords: *textile materials (TM), low fire hazard, surface spread flame, the smoke production, flammability, the emission of gas toxic products of thermal decomposition, TM compliant with the requirements regulating their fireproof application in ships*

Для интерьеров помещений морских и речных судов в достаточном количестве применяются предметы и изделия из текстильных материалов (ТМ), такие как мягкая мебель, шторы, занавеси, портьеры, постельные принадлежности, ковровые покрытия и различного рода элементы декора.

На стадии разработки проектной и конструкторской документации на изготовление и монтаж составляющих частей интерьера судов одним из важных вопросов является выбор ТМ, соответствующих существующим требованиям судостроения [1, 2].

Подверженность ТМ возникновению и распространению пламени по поверхности, дымообразованию и выделению летучих токсичных продуктов термического разложения определяет актуальность разработки материалов пониженной пожарной опасности, в том числе и для судостроения.

В настоящее время наблюдается достаточно большой объем поставок импортных декоративно-отделочных ТМ для судостроения.

Задача использования отечественных огнезащитных ТМ для судостроения в значительной степени осложнена тем, что практически отсутствует их промышленный выпуск. Это происходит в основном из-за недостаточной проработки вопросов эффективной огнезащиты ТМ и получения материалов с высокими эксплуатационными характеристиками и декоративными свойствами. Учитывая эти обстоятельства и политику в области импортозамещения, проводимую государством в настоящее время, все более актуальной задачей становится производство на базе мощностей предприятий отечественной промышленности ТМ пониженной пожарной опасности.

Требования пожарной безопасности к ТМ, применяемым на морских судах, изложены в Международном кодексе по применению процедур испытания на огнестойкость 2010 года (Кодекс ПИО 2010). - Резолюция MSC.307(88) от 3 декабря 2010 г [2]. Среди них:

- определение поверхностной воспламеняемости (часть 5);
- определение дымообразования и токсичности (часть 2);
- определение воспламеняемости штор, занавесей портьер (часть 7);
- определение воспламеняемости мягкой мебели (часть 8);
- определение воспламеняемости постельных принадлежностей (часть 9);

Основными критериями оценки воспламеняемости ТМ являются:

- легкость воспламенения, которая характеризуется временем с момента воздействия источника зажигания до устойчивого самостоятельного горения (тления);
- прогорание до кромки, возможность горящего каплепадения, возникновение вспышки поверхности, размеры обугленного участка.

Оценку дымообразования и токсичности продуктов горения производят согласно методике, изложенной в части 2 [2], соответственно, по оптической плотности дыма и по усредненным значениям максимальной концентрации газов, которые не должны превышать нормативные пределы.

Следует отметить, что выполнение требований по дымообразующей способности и выделению токсичных продуктов горения для декоративно-отделочных тканей по нормативам Морского Регистра необязательно, однако принимая во внимание, что целесообразно использовать наиболее пожаробезопасные материалы, при их выборе это обстоятельство лучше учитывать.

Требование пожарной безопасности к напольным текстильным покрытиям включает одновременно ограничение по поверхностному воспламенению, дымообразующей способности и токсичности продуктов горения. Как правило, нормативные значения указанных параметров таковы, что использование ковровых покрытий без проведения дополнительных мероприятий по огнезащите невозможно. Одним из способов достижения требуемых значений характеристик пожарной опасности без ухудшения основных эксплуатационных свойств является использование термостойких и (или) огнезащитных волокон или их комбинаций.

Нормативные требования характеристик медленного распространения пламени для покрытия настила морских судов согласно части 5 [2] следующие:

- критический поток при затухании, $CFE, кВт \cdot м^{-2} \geq 7,00$;
- теплота для устойчивого горения, $Q_{SB}, МДж \cdot м^{-2} \geq 0,25$
- общее тепловыделение, $Q_t, МДж \leq 2,00$;
- пиковая скорость тепловыделения. $Q_p, кВт \leq 10,00$;
- количество горящих капель - не более 10.

Таким образом, к изделиям и предметам из текстиля для применения в судостроении, в частности на морских судах, предъявляются достаточно жесткие комплексные требования пожаробезопасности, исключающие использование легковоспламеняемых материалов с высокой дымообразующей способностью и токсичностью продуктов горения.

ИЛ ФГБУ ВНИИПО МЧС России на протяжении ряда лет проводит испытания на пожарную опасность материалов и конструкций по установлению соответствия их требованиям Морского Регистра. Для этого институт располагает экспериментальной базой, а его специалисты проводят не только испытания, но и научную работу по обоснованию выбора и разработке наименее пожароопасных материалов. Многолетняя практика проведения экспериментальных работ по оценке параметров пожарной опасности ТМ позволила провести сравнительный анализ полученных данных и выявить перспективные направления по разработке ТМ пониженной горючести.

В табл. 1 представлены значения показателей пожарной опасности, оцененных согласно ГОСТ 12.1.044-89 [3] (коэффициент дымообразования ($D_{ср}$), показатель токсичности продуктов горения (HCL_{50}), индекс распространения пламени по поверхности (I) и ГОСТ Р 53294 [4] (воспламеняемость) ряда тканей из натуральных и синтетических волокон, наиболее часто используемых для изготовления декоративно-отделочных предметов и изделий.

Как следует из результатов экспериментальных исследований, представленные и достаточно широко используемые декоративно-отделочные ТМ без применения огнезащиты весьма пожароопасны – они легко воспламеняемы, обладают высокой дымообразующей способностью, опасны по токсичности продуктов горения и быстро распространяют пламя по поверхности.

В настоящее время одним из основных направлений создания огнезащищенных декоративно-

отделочных текстильных материалов является модифицирование натуральных или химических волокон замедлителями горения, которые обеспечивают снижение их горючести [5].

Для этого в основном применяется: поверхностная обработка текстильных материалов огнезащитными составами или использование текстильных материалов из химически модифицированных волокон.

Поверхностная огнезащитная обработка уже готовых материалов является более доступным методом – можно получать как ткани с огнезащитным эффектом, устойчивым к многократным водным обработкам, в частности стиркам, химчисткам, так и ткани с разовым огнезащитным эффектом. Однако, в некоторых случаях в значительной степени ухудшаются прочностные и санитарно-гигиенические показатели у огнезащищенных таким способом тканей.

Использование модифицированных термопластичных волокнообразующих полимеров (например, полиэфирных волокон) при строгом соблюдении технологии введения в расплав замедлителя горения, как правило, может обеспечить огнезащитный эффект, но во многих случаях затрудняет использование тканей на их основе в качестве обивки мягкой мебели и постельных принадлежностей из-за трудности обеспечения соответствия существующим требованиям [6].

Наиболее оптимальным и эффективным способом огнезащиты ТМ, лишенным указанных недостатков, является использование огнезащищенных волокон, в том числе, термостойких.

В этом направлении, в частности, успешно работает Производственная фирма «Кадотекс-2000», разрабатывая и производя новые виды ТМ пониженной горючести.

Выбор оптимальных соотношений волокон в композиции ТМ, как правило, начинается с этапа получения лабораторного образца материала и

Таблица 1

Результаты исследований параметров пожарной опасности ТМ

Состав ТМ	Назначение ТМ	ГОСТ 12.1.044-89			ГОСТ Р 53294
		$D_{ср}, м^2/кг$	$HCL_{50}, г/м^3$	I	Устойчивость к воспламенению
Шерсть 100%	Обивка мягкой мебели	570 (Д3)	37(Т3)	> 20	легковоспламеняемый
Хлопок 100%	Постельные принадлежности	980(Д3)	28(Т3)	> 20	легковоспламеняемый
Полиэфир 100%	Шторы, занавеси, портьеры	1100(Д3)	35(Т3)	> 20	легковоспламеняемый
Хлопок/полиэфир - (в соотношении 40:60)	Шторы, занавеси, портьеры, обивка мягкой мебели	950(Д3)	32(Т3)	> 20	легковоспламеняемый
Хлопок/полиэфир - (в соотношении 60:40)	Шторы, занавеси, портьеры, обивка мягкой мебели	1050(Д3)	33(Т3)	> 20	легковоспламеняемый

предварительной оценки его свойств. Далее проходит стадия изучения возможности изготовления выбранного ТМ на существующем технологическом оборудовании и одновременно производится корректировка состава композиции, после чего определяются основные эксплуатационные характеристики и показатели пожарной опасности опытного образца. При этом дизайн ТМ разрабатывается согласно требованиям конструкторских и проектных бюро Судостроения.

Если получен удовлетворительный результат, то выпускается опытно-промышленная партия продукции и проводятся расширенные комплексные исследования ее свойств. Завершается разработка серийным изготовлением материалов на производстве и их сертификацией на соответствие требованиям действующей нормативной документации.

При выпуске сертифицированной серийной продукции производится постоянный контроль каждой ее партии на соответствие требованиям нормативной документации.

В данной статье представлены результаты исследований по созданию текстильных материалов пониженной пожарной опасности, соответствующих в этой части требованиям морского регистра и вместе с тем, обладающими достаточно высокими эксплуатационными характеристиками - на основе пряжи из термостойких волокон (ТВ), огнезащищенных хлопчатобумажных (ОХБ), полиэфирных (ОПЭ), модакриловых (ОМВ), шерстяных (ОШВ), вискозных (ОВВ) и различных их комбинаций.

В табл. 2 и 3 представлены результаты испытаний ряда ТМ в том числе из смеси волокон отечественного производства при таком оптимальном

Таблица 2

Сравнительные результаты экспериментальных исследований на пожарную опасность огнезащищенных ТМ

Состав ТМ	Назначение	ГОСТ 12.1.044-89			Кодекс ППО 210, рез.МСС.307(88)
		Дср, м ² /кг	НCL ₅₀ , г/м ³	I	
Ткань декоративная трудновоспламеняемая (63% ТВ, 35% ОВ, 2% антистатических волокон)	Для драпировок, занавесей и других подвешенных тканевых изделий на морских судах и плавучих сооружениях	313	40,5	0	Соответствует Части 7
Ткань портьерная (интерьерная) из 100% ОХБ	Для обивки мебели, драпировок, занавесей и других подвешенных тканевых изделий, постельных принадлежностей на морских судах и плавучих сооружениях	470	33	17	Соответствует Части 7
Бязь из 100% ОХБ	Для обивки мебели, драпировок, занавесей и других подвешенных тканевых изделий, постельных принадлежностей на морских судах и плавучих сооружениях	485	35	16	Соответствует Части 7, 8
Ткань декоративно-обивочная (63% ТВ, 35% ОВ, (или 98% ТВ) 2% антистатических волокон)	Для обивки мебели на морских судах и плавучих сооружениях (изготовление обивки и чехлов)	429	52	15	Соответствует Части 8
Ткань декоративно-обивочная (98% ТВ, 2% антистатических волокон)	Для обивки мебели на морских судах и плавучих сооружениях (изготовление обивки и чехлов)	315	40	0	Соответствует Части 8
Ткань gobеленовая (80% ХБ и 20% ОПЭ)	Для обивки мебели, драпировок, занавесей и других подвешенных тканевых изделий, постельных принадлежностей на морских судах и плавучих сооружениях	570	37	24	Соответствует Части 8
Тик матрацный (100% ОХБ)	Для обивки мебели, драпировок, занавесей и других подвешенных тканевых изделий, постельных принадлежностей на морских судах и плавучих сооружениях	480	35	18	Соответствует Части 8, 9
Ткань декоративно-обивочная (50% ОМВ и 50 ПЭ)	Для использования на морских судах в качестве постельных принадлежностей (изготовление матрасов со съемными чехлами)	465	45	12	Соответствует Части 9
*Ковровые покрытия и изделия жаккардовые с ворсом (50% ОШВ и 50% капроновых волокон) на 100% хлопчатобумажно-джутовой тканевой основе	Для напольных покрытий, применяемых на морских судах и плавучих сооружениях	155	51	15	Соответствует Части 2, 5

*По результатам испытаний на поверхностную воспламеняемость критические параметры составили: CFE = 12,23 кВт·м⁻². Q_{SB} = 0,34 МДж·м⁻², Q_t = 2,00 МДж, Q_p кВт = 5,9, 5 горящих капель.

Таблица 3

Основные эксплуатационные характеристики огнезащищенных ТМ из смеси волокон

Наименование ткани	Ширина ткани, см ГОСТ 3811	Поверх. плотность, г/м ² ГОСТ3811	Разрывная нагрузка, Н, ГОСТ3811		Удлинение при разрыве, %, ГОСТ3811		Раздир. нагрузка, Н, ГОСТ3811		Стойкость ткани к истиранию, циклы, ГОСТ 18976	Воздухопроницаемость, дм ³ /м ² , ГОСТ 12088	Изменение линейных размеров после мокрых обработок, %, ГОСТ30157.0 ГОСТ30157.1	
			По основе	По утку	По основе	По утку	По основе	По утку			По основе	По утку
Ткань декоративная трудновоспламеняемая (63% ТВ, 35% ОВ, 2% антистатичных волокон)	152±2,0	Не менее 175	940	770	30	25	46	40	4400	50	1,8	2,6
Ткань портьерная (интерьерная) из 100% ОХБ	155±2,5	250-13	1050	340	13	25	37	39	2700	57	5,0	2,0
Бязь из 100% ОХБ	150±2,5	175-8	400	340	17	25	10	10	3100	380	5,0	2,0
Ткань декоративно-обивочная (63% ТВ, 35% ОВ, (или 98% ТВ) 2% антистатичных волокон)	152±2,5	Не менее 300	2070	1580	40	22	-	-	7600 По ГОСТ Р ИСО 12947-2-2011: 154000 циклов	90	2,5	3,5
Ткань декоративно-обивочная (98% ТВ, 2% антистатичных волокон)	152±2,5	Не менее 190	1290	1170	40	40	93	98	6000	100	2,5	2,0
Ткань гобеленовая (80% ХБ и 20% ОПЭ)	160±2,5	380-19	1540	1190	20	25	260	250	14300	100	6,0	3,0
Тик матрацный (100% ОХБ)	150±2,0	215-12	580	360	16	17	17	19	1600	290	6,0	3,0
Ткань декоративно-обивочная (50% ОМВ и 50 ПЭ)	152±2,5	Не менее 160	1500	600	25	25	19	17	4100	100	5,0	3,0

Продолжение табл. 3

Наименование ткани	Поверхностная плотность, г/м ² ГОСТ 18276.3	Прочность закрепления ворсового пучка, Н, ГОСТ 18276.1	Высота ворсового слоя, мм ГОСТ 18276.1	Стойкость ткани к истиранию ворсовой поверхности, циклы, ГОСТ 21530
*Ковровые покрытия и изделия жаккардовые с ворсом (50% ОШВ и 50% капроновых волокон) на 100% хлопчатобумажно-джутовой тканевой основе	Не менее 1850	3,9	8±2	3000

их соотношении, которое позволяет получать материалы с достаточно высокими эксплуатационными характеристиками и свойствами пониженной пожарной опасности.

Данные, представленные в табл. 2 и 3, были получены в испытательных лабораториях научно-исследовательских отраслевых институтов и сертификационных центрах, представленная текстильная продукция соответствует требованиям Морского Регистра.

В ходе проведения комплексных научных исследований изучались механизм и кинетика термоллиза огнезащищенных ТМ и ТМ из смеси волокон. Выявлены закономерности термоокис-

лительной деструкции и факторы, влияющие на процесс возникновения и распространения горения ТМ, позволившие установить особенности и критерии выбора оптимальных по содержанию и составу компонентов для их эффективной огнезащиты.

В том числе, получение ТМ пониженной пожарной опасности (табл. 2) было обосновано с помощью проведения термогравиметрического анализа (ТГА).

Анализ данных ТГА представленных тканей свидетельствует о значительном снижении максимальной скорости термоокислительного разложения и увеличении способности протекания процесса карбонизации, что приводит к снижению выде-

ляющихся газообразных токсичных продуктов пиролиза и дымообразования.

ВЫВОДЫ

Проведенные комплексные исследования позволили:

- осуществить выбор эффективной огнезащиты и контроля ее качества с помощью установления механизма действия различных компонентов, ингибирующих процессы термоллиза и горения ТМ;

- установить, что для получения трудновоспламеняемых материалов с пониженными дымообразующей способностью и токсичностью продуктов горения необходимо выбирать огнезамедлительные системы из компонентов, способствующих усилению процесса карбонизации полимера, из которого изготовлено волокно;

- показать возможность создания ТМ пониженной пожарной опасности на базе отечественного оборудования;

- разработать рецептуры отечественных тканей и материалов, соответствующие требованиям, регламентирующим их пожаробезопасное применение на морских судах и при этом обеспечивающим сохранение физико-механических и декоративных свойств в условиях эксплуатации, способных соперничать с импортными аналогами, применяемыми при декорировании (покрытия палуб внутренних помещений, занавеси, драпировки, обивочные материалы мягкой мебели, постельные принадлежности и т.д.) объектов морского транспорта. (Привлечение иностранных компаний к поставке ТМ создает трудности в планомерной работе по выпуску отечественных ТМ).

- применить разработанную текстильную продукцию не только в секторе судостроения, но и, например, на объектах подвижного состава РЖД и авиастроении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания (ПСВП), часть V «Материалы и сварка», Москва, 2008.
2. Международный кодекс по применению процедур испытания на огнестойкость 2010 года (кодекс ПИО 2010). International code for application of fire test procedures, 2010 (2010 FTP code). IMO resolution MSC.307(88)), ЦНИИМФ, СПб, 2011, 560с.
3. ГОСТ 12.1.044-89 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы определения».
4. ГОСТ Р 53294-2009 Материалы текстильные. Постельные принадлежности. Мягкие элементы мягкой мебели. Шторы. Занавеси. Методы испытаний на воспламеняемость.
5. Зубкова Н.С., Константинова Н.И. «Огнезащита текстильных материалов», М.: Институт информационных технологий, 2008 - 228 с.
6. Константинова Н.И. Проблемы защиты материалов из смеси волокон // Пожарная безопасность. – 2003. - № 2. - С.109-119.

REFERENCES

1. Pravila klassifikacii i postrojki sudov vnutrennego plavaniya (PSVP), chast' V "Materialy i svarka" [Rules for the classification and construction of ships of inner area of navigation (PSVP), part V, "Materials and welding"]. Moscow, 2008. (In Russian)
2. Mezhdunarodnyj kodeks po primeneniju procedur ispytaniya na ognestojkost' 2010 goda (kodeks PIO 2010). IMO resolution MSC.307(88) [International code for application of fire test procedures, 2010 (2010 FTP code). IMO resolution MSC.307(88)] CNIIMF, St. Petersburg, 2011, 560 p. (In Russian)
3. GOST 12.1.044-89 "Pozharovzryvoopasnost' veshhestv i materialov. Nomenklatura pokazatelej i metody opredelenija". [State Standard 12.1.044-89 "Occupational safety standards system. Fire and explosion hazard of substances and materials. Nomenclature of indices and methods of their determination"] Moscow, IPK Publ., 2000. (In Russian)
4. GOST R 53294-2009 Materialy tekstil'nye. Postel'nye prinadlezhnosti. Mjagkie jelementy mjagkoj mebeli. Shtory. Zanavesi. Metody ispytanij na vosplamenjaemost'. [State Standard of Russia 53294-2009 "Textile materials. Bedding articles. Upholstered furniture. Blinds. Curtains. Flammability test methods"] Moscow, Standartinform Publ., 2009. (In Russian)
5. Zubkova N.S., Konstantinova N.I. Ogneshhita tekstil'nyh materialov [The fire protection of textile materials] M.: Institut informacionnyh tehnologij, 2008, 228 p. (In Russian)
6. Konstantinova N.I. Problemy zashhity materialov iz smesi volokon [Problems of protection of materials from a mixture of fibers] Pozhamaja bezopasnost [Fire safety]. 2003. №2: pp. 109-119. (In Russian)

УДК 629.5.06

БЕЗАСБЕСТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ПРОКЛАДОК В СОЕДИНЕНИЯХ СУДОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Б.А. Горелик, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский Государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

В данной статье рассматривается решение проблемы замены асбестосодержащих на безасбестовые материалы для изготовления прокладок для уплотнения соединений судовых трубопроводов. Проведено сравнение свойств материалов прокладок, применяемых во фланцевых соединениях судовых трубопроводов. Приведены возможные варианты замены и сформулированы технические требования к материалам прокладок фланцевых соединений, которые позволяют произвести замену асбестосодержащих материалов на безасбестовые без уменьшения надежности судовых систем. Эти безасбестовые прокладки позволяют повысить экологическую чистоту трубопроводов в целом. Их технические характеристики также превышают асбестосодержащие, размеры соответствуют стандартам и концентричны отверстиям под крепежные болты.

Ключевые слова: судовые трубопроводные системы, фланцевые соединения, надежность трубопроводов, асбест, безасбестовые уплотнительные материалы

NON-ASBESTOS MATERIALS FOR SEALING GASKETS IN SHIP PIPELINES CONNECTIONS

B.A. Gorelik, DSc, professor, FSEI State Marine Technical University, St. Petersburg

The present article provides a solution to the problem of using non-asbestos instead of asbestos materials for making gaskets sealing the connections of ship pipelines. A comparison of the properties of the materials used in the flanged connections of ship pipelines has been made. The possible variants of replacing asbestos materials with non-asbestos ones not impacting the ship systems reliability have been given. These non-asbestos gaskets allow for the improvement of the pipelines ecological compatibility as a whole. Their technical characteristics also exceed those of asbestos-containing ones, the sizes meet the standards and are concentric with the holes for the fixing bolts.

Keywords: ship pipeline systems, flanged connections, pipelines reliability, asbestos, non-asbestos sealing materials

В судостроении для обеспечения герметичности соединений трубопроводов нашли широкое применение уплотнительные прокладки из различных неметаллических материалов. В Правилах Регистра до недавнего времени какие-либо ограничения и указания по материалам применяемых прокладок отсутствовали, за исключением требования о том, что в соединениях, связанных с наружной обшивкой прокладки не должны быть изготовлены «из материала, легко теряющего свои свойства при пожаре». Требование это связано с опасностью затопления отсеков и применяется к узлам установки донно-бортовой арматуры и переборочным стаканам в водонепроницаемых переборках. Между тем в МК СОЛАС появилось требование о запрете применения на судах материалов, содержащих асбест, который является одним из компонентов паронита, широко используемого на отечественных верфях в судовых трубопроводах. Отказ от применения паронита требует рассмотрения свойств альтернативных ему

материалов, представленных в настоящее время, и разработки дополнительных требований Регистра к таким материалам. Целью настоящей статьи является представление результатов такого анализа и предложений по корректировке Правил РС.

Надежность (то есть безотказная работа без нарушения герметичности) фланцевых и штуцерных соединений в трубопроводах во многом зависит от материала уплотнительной прокладки. Назначение прокладки во фланцевых соединениях заключается в обеспечении герметичности за счет заполнения уплотняющим материалом неровностей и дефектов уплотнительных поверхностей под действием давления от затянутых крепежных изделий. Заполнение неровностей и дефектов уплотнительных поверхностей происходит в результате деформации материала прокладки в упругой (для резины) или упруго-пластической (для паронита) области.

Допустимая область применения для различных материалов прокладок, согласно источникам [1, 2, 3] варьируется в пределах, указанных в табл. 1, где

Таблица 1
Материалы прокладок для соединений судовых трубопроводов

Материал	Максимальный параметр рабочей среды		Рабочая среда
	Давление, МПа	Температура, °С	
Паронит	6,4	-50÷400	Вода, пар, нефтепродукт, воздух, соли, щелочи
Резина	4,0	-45÷100	Вода морская и пресная, воздух
Фторопласт-4	10,0	-50÷150	Вода высокой чистоты, нефтепродукты, газы
Медь МЗ	30,0	0÷250	Пар, нефтепродукты, воздух, вода высокой чистоты
Сталь 05кп, 08кп	10,0	-50÷470	Пар, вода

указаны допустимая область применения прокладок из различных металлических и неметаллических материалов. Из свойств материалов, указанных в таблице, следует, что наиболее широкие пределы применения в судовых системах у паронита, и это при том, что изготовленные из него прокладки получают более дешевыми и технологичными по сравнению с прокладками, изготовленными из перечисленных материалов.

Резина, используемая как прокладочный материал, отличается стойкостью к действию жидких и газообразных сред. Эластичность резины, обусловленная специфическим строением макромолекул каучука, придает ей высокую стойкость к переменным деформациям, в том числе, и к вибрации, а также резким температурным колебаниям. Как прокладочный материал резина обладает высокой упругостью и плотно внедряется в уплотнительные поверхности соединяемых деталей - фланцев и колец, штуцеров и ниппелей. Наряду с высокой эластичностью резина (особенно бутадиен-нитрильная) обладает хорошей сопротивляемостью абразивному износу, превосходящей сопротивляемость действию органических газов, не набухает при транспортировании по трубопроводу светлых и темных нефтепродуктов, если они содержат не более 30% ароматических углеводородов.

Прокладки из резины отличает теплостойкость и возможность выдерживать температурное воздействие транспортируемой среды до +100 °С. Неопреновые резины обладают стойкостью к дизельному топливу, мазутам, сырой нефти, смазочным маслам, пресной и морской воде, фреону. Предел прочности резины составляет 24,5 МПа, относительное удлинение до 500 %, твердость по Шору - 55 единиц.

Резины на основе силиконового (кремнийорганического) каучука отличаются высокой химической стойкостью при более высоких температурах и упругостью - при пониженных температурах. Прочность таких резин достигает 70 МПа, относительное удлинение - 100 %, а твердость по Шору - 70-80 единиц.

Фторопласт-4 - (суспензионный политетрафторэтилен) - твердый продукт полимеризации тетрафторэтилена. Он эластичен и хладотекуч. Разлагается при температуре 415 °С, не поглощает воду, не набухает в растворителях, диэлектрик.

Прокладки из фторопласта-4 изготавливают точением. Они предназначены для эксплуатации в агрессивных средах, давление которых достигает 7-8 МПа, при температуре от -60 до +260 °С. Их отличает высокая износостойкость. Плотность фторопластовых прокладок составляет 2000 кг/м³, относительное удлинение при разрыве - 120÷160%, а коэффициент трения по стали - 0,14÷0,30. Прокладки из фторопласта хорошо работают в условиях высокого вакуума в среде углеводородных газов, сухого воздуха и различных растворителей. Они могут быть применены при транспортировании по трубопроводу кислот, щелочей. Фторопласт не взрывоопасен, не горюч и может использоваться и при низких температурах до -270 °С. Он обладает высокими гидрофобными и диэлектрическими свойствами, коррозионностоек.

Эти два вида неметаллических прокладок, рекомендованные отраслевыми нормативно-техническими документами, относят к не содержащим асбеста, который является вредным для здоровья человека.

Наибольшее применение в качестве уплотнительных элементов соединений судовых трубопроводов прокладки из паронита. Паронит представляет собой материал из асбестового волокна, каучука, минеральных наполнений и серы. Его получают методом прессования асбестового волокна с пропиткой резиновыми (каучуковыми) смесями с последующим добавлением наполнителей.

Одним из компонентов, содержащийся в пароните, как указано выше, является асбест (греческое - асбестос - неразрушимый). Это тонковолокнистый минерал из класса силикатов, состоящий из тончайших гибких волокон. Существует два одинаковых типа асбестов: серпентин-асбест (хризотил+асбест или белый асбест) и амфибол-асбест. Для изготовления уплотнительных элементов - прокладок - в судовых трубопроводах применяют хризотил-асбест.

Паронит не является экологически чистым элементом и оказывает при его производстве отрицательное воздействие на организм человека, а также усиливает коррозионное разрушение

металлических поверхностей фланцев, штуцеров и ниппелей, контактирующих с ним.

Особую угрозу для здоровья человека представляет хризотилвый асбест, вызывающий в процессе его добычи и переработки заболевания легких при вдыхании его мельчайших волокон. В конечном итоге это приводит к опухолям. Асбест у человека способствует развитию воспалительных процессов – «асбестозов» - и вреден, когда его вдыхают в виде мелкой пыли.

В настоящее время Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ), Международная организация труда, Международная ассоциация социальной безопасности, Всемирная торговая организация (ВТО) и ряд других выступают против применения асбестосодержащих материалов. Эта позиция подтверждается многочисленными исследованиями вредности этого материала для здоровья человека.

Негативное воздействие на здоровье человека оказывает асбест и при резке листов паронита на готовые уплотнительные прокладки для судовых трубопроводов. Такое же воздействие, но в меньшей степени, оказывает процесс разложения паронита при воздействии на него транспортируемых по трубопроводам горячих рабочих сред (пар, горячая вода), щелочных кислородосодержащих сред.

Все это послужило основанием предпринять практические меры по замене паронита на аналогичные по физико-механическим свойствам материалы, не содержащие асбеста, безасбестовые.

С начала XXI века начата кампания по замене асбеста на более безопасные материалы, т.е. безасбестовые. Деятельность в этом направлении начата после получения результатов всесторонних научных исследований канцерогенных веществ. Международное агентство по изучению возникновения раковых заболеваний отнесло асбест к первой, наиболее опасной, категории списка канцерогенов, вредно влияющих на здоровье человека, занятого его добычей или переработкой.

С целью эквивалентной замены асбестосодержащего паронита возможно использование целого ряда безасбестовых материалов, производимых как на зарубежных фирмах, так и на отечественных предприятиях.

Так Австрийская фирма R.Klinger взамен ранее применявшегося асбестосодержавшему Клингериту, производит новый безасбестовый материал Клингерсил. Это бесцветный материал, в состав которого входят синтетические волокна, пробка и бутадиен-нитрильный каучук. Его производят на основе минеральных арамидных волокон. Отличительной чертой Клингерсила является его высокое сопротивление давлению.

В настоящее время фирма реализует 16 марок листового материала, каждый из которых обладает

специфическими свойствами в зависимости от параметров транспортируемой по трубопроводу рабочей среды и ее химического состава. Также можно выбрать требуемую марку материала для транспортирования кислот, щелочей, хладагентов и т.п. Эти свойства присущи определенным маркам, в состав которых, в зависимости от назначения входят: синтетические волокна, пробковый материал, бутадиен-нитрильный каучук, минеральные арамидные и полиарамидные волокна и т.п.

Температура и давление рабочей среды не должны иметь максимальное значение одновременно. Возможность применения материала в зависимости от действующих значений этих параметров определяет с помощью диаграммы (рис. 1).

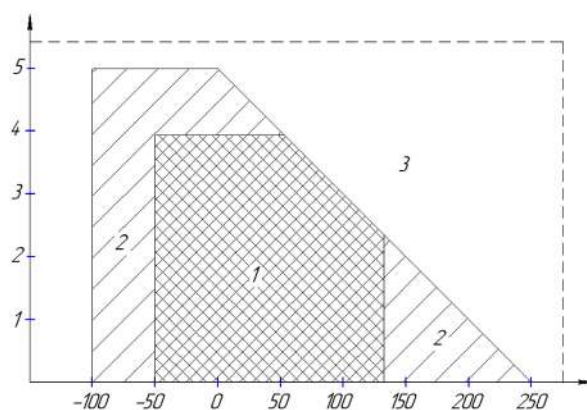


Рис. 1 Зависимость давления и температуры

Если параметры (давление и температура) рабочей среды находятся в зоне 1, то предварительное испытание материала не требуется. Если параметры рабочей среды находятся в зоне 2, то проведение испытаний рекомендуется. А если параметры рабочей среды находятся в зоне 3, то проведение испытаний обязательно. Испытания проводят по программе и методике изготовителя материала.

Компания Ильма (СПб) взамен асбестосодержащего паронита предлагает безасбестовый материал «Ильма» ФЛ-003 на основе терморасширительного графита. Его можно применять при температуре рабочих сред до 450 °С. Марка «Ильма-Экспресс» - это химостойкий материал, стоимость которого эквивалентна Клингерсилу. Прокладочный материал «Ильма-Экспресс» применим для транспортирования практически всех рабочих сред при давлении до 4 МПа и температуре до 250 °С (кратковременно) и 140 °С, при этом при транспортировании пара - 120 °С.

Другое российское предприятие – завод деталей трубопроводов «Реком» (СПб) изготавливает безасбестовые прокладки ПФ-37, Графлан-Пагф, в том числе и спирально навитые прокладки.

Безасбестовые прокладки ПФ-37 изготовлены из материалов на основе синтетического волокна. Их применяют для уплотнения трубопроводных соединений, подвергаемых воздействию давления, транспортируемой по трубопроводу рабочей среды, в том числе пресной и заборной воды, нефтепродуктов, газов и других рабочих сред.

При помощи этих безасбестовых прокладок достигается требуемая герметичность трубопроводов, по которым транспортируют гидравлические и моторные масла, щелочные смеси, фреон, аммиак.

Максимальное рабочее давление транспортируемой среды достигает 10 МПа, при температуре 250 °С – при длительном воздействии, и 400 °С – при кратковременном. Уплотнительные прокладки Графлекс-Пагф изготавливают из графитового армированного листа Графлекс. Армирование производится при помощи перфорированной фольги типа ГФ-Г из коррозионно-стойкой стали толщиной 0,1 мм. Толщина самих прокладок составляет от 1 до 5 мм и их применяют для уплотнения соединений, использующих фланцы, изготавливаемые по ГОСТ, ОСТ и нормам завода-изготовителя и по размерам фланцев, изготавливаемым по зарубежным стандартам AISI, DIN и др.

Прокладки ГРАФЛЕКС также применяют для уплотнения трубопроводов, по которым транспортируют пар, воду, нефтепродукты, растворители, растворы солей и щелочей при $pH = 1 \div 14$.

Как альтернатива прокладкам ПФ-37 и Графлекс на заводе уплотнительных материалов ЗАО «ВАТИ Пром» производится листовой безасбестовый материал и изготовленные из него прокладки для трубопроводных соединений. По физико-механическим характеристикам они полностью соответствуют асбестосодержащему парониту марок ПОН-Б и ПМБ.

Безасбестовый материал, помимо фирмы Клингер поставляет также фирма James Walker (JW) (Великобритания). Она также производит целый спектр безасбестовых материалов, таких как Сентинел, Центурион, Чайфтейн, Инка, Гилон. Все эти материалы обладают высокими техническими характеристиками и являются полными заменителями асбестосодержащих паронитов, указанных в ГОСТ 481-80 «Паронит и прокладки из него. Технические условия».

Безасбестовый материал Сентинел (Англия) состоит из армированного волокна, спрессованного с нитритной резиной, являющегося связующим веществом. Его можно применять при температуре до 400 °С.

Поставка Сентинела производится листами толщиной 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; и 2,0 мм. А их размеры, как правило, 1,5 × 1,0 м; 2,0 × 1,5 м. Фирма JW может производить поставку готовых к применению прокладок требуемых размеров.

На графике (рис. 2) приведена зависимость давления и напряжения от температуры, для Сентинела.

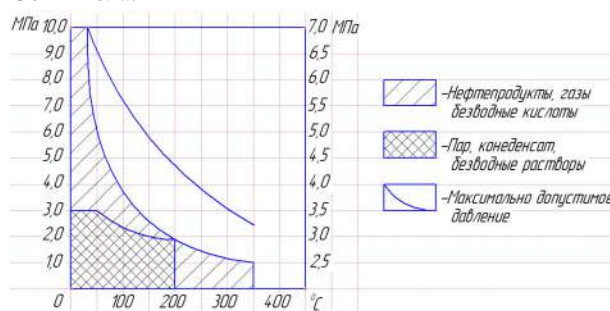


Рис. 2 Зависимость давления и напряжения от температуры для различных классов Сентинела

Зона, ограниченная малой трапецией, является зоной благоприятного использования Сентинела при изготовлении прокладок для уплотнения соединений судовых трубопроводов. Зона, ограниченная большой трапецией, является зоной возможного использования Сентинела.

Безасбестовые уплотнительные материалы Чайфтейн, Центурион и Инка, имеют сходные специфические характеристики.

Касательно зависимости основных параметров Сентинела, следует отметить, что с повышением давления транспортируемой среды резко снижается допустимая рабочая температура.

Основные технические характеристики отечественных и зарубежных асбестосодержащих и безасбестовых уплотнительных материалов для прокладок в соединения судовых трубопроводов приведены в табл. 2.

В соответствии с требованиями международных стандартов на протяжении всего жизненного цикла, начиная от входного контроля, должны быть учтены все технические характеристики и технологические меры по обеспечению эксплуатационной надежности трубопровода в целом и его уплотнительных элементов, в том числе прокладок.

По результатам НИР РС-13/2012 в Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов в том III, часть IV «Техническое наблюдение за изготовлением изделий» в раздел 8 «Системы и трубопроводы». Вводится новый раздел 8.9.

«8.9 УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТРУБОПРОВОДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ»

8.9.1 Для получения СТО на прокладочный материал или уплотнительный элемент разъемного трубопроводного соединения должны проверяться путем испытаний:

Таблица 2

Техническая характеристика уплотнительных материалов

Марка материала Техническая характеристика	асбестосодержащие		безасбестовые				
	отечественные	зарубежные	отечественные			зарубежные	
	Паронит по Гост 48 1	Клингерит	Пор-37	Графлекс	Ваги	Сентинел	Клингерсил
Температура, С	450	500	400	> 400	300	400	400
Давление, МПа	6,4	14,0	10,0	20,0	10,0	10,0	30,0
Шероховатость поверхности, мкм	0,8-1,6	1,25	1,25	0,63	0,63	0,63	0,63
Плотность, г/см ³	1,6-2,0	1,7	1,2-2,1	1,9	1,7-1,9	1,5	1,0-2,0
Восстанавливаемость, %	30	35	50	65	45	65	65
Увеличение толщины, %	8-10	8-9	5-10	4-8	5-9	3-5	5-10
Прочность, МПа	0,70	0,70	1,05	1,10	1,00	1,20	1,20
Сжимаемость, %	5-20	7-10	15-20	10-15	7-8	20	12-30

механические свойства материала при различных температурах;

стойкость материала к воздействию нефтепродуктов и других рабочих сред;

химический состав, на предмет отсутствия асбеста.

Допустимая область применения (зависимость допускаемого давления от температуры для различных сред) должна определяться по результатам испытаний и указываться в приложении к СТО».

Кроме того, в эти же Правила в том IV часть V «Техническое наблюдение за постройкой судов» в раздел 8 «Системы и трубопроводы» вводится новый пункт 8.2.1.10.

«8.2.1.10 При сборке и монтаже трубопроводов на судне не должны применяться материалы, содержащие асбест. При предъявлении монтажа трубопроводов должны быть представлены документы, подтверждающие отсутствие асбеста в материале уплотнительных прокладок разъемных соединений. Если материалом уплотнительного элемента является материал, не имеющий СТО (кроме меди или сплавов на ее основе, а также резины и фторопласта), то Регистр оставляет за собой право потребовать проведения химического анализа образца прокладочного материала. При этом применение уплотнительных прокладок из резины допускается в системах с температурой рабочей среды не более 100 °С, из фторопласта - не более 150 °С.»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В соответствии с унифицированной интерпретацией МАКО UI SC245 (Oct. 2011) Российским морским регистром судоходства внесены дополнения в Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов, запрещающие применение асбестосодержащих материалов, для уплотнительных элементов соединений трубопроводов.

2. Внесены предложения по корректировке нормативных документов Регистра по проверке качества прокладочного элемента путем испытаний на предмет отсутствия асбеста, а также проверке соответствия стойкости материала к воздействию рабочих сред, а также механических свойств материала при различных температурах.

3. Введение в Правила Регистра предлагаемых требований к материалам прокладок фланцевых соединений позволяет произвести замену асбестосодержащих материалов на безасбестовые без уменьшения надежности судовых систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелик Б.А. Судовые трубопроводные работы. Справочник. Л., Судостроение. 1984 г.
2. ГОСТ 481-80 Паронит и прокладки из него. Технические условия. М., Стандарт.
3. ОСТ 5Р.9326 Прокладки из неметаллических материалов для фланцевых соединений судовых трубопроводов.

4. Каталог фирмы Клингер. Великобритания, 1997 г.
5. Каталог фирмы Ильма, 2009 г.
6. James Walker. Sentinel Jointing. Non-asbestos compressed fibre sheets and gaskets.

REFERENCES

1. Gorelik B.A. Sudovye truboprovodnye raboty [Ship pipeline operations]. Reference book. Leningrad, Sudostroenie Publ. 1984.
2. GOST 481-80. Paronit i prokladki iz nego. Tekhnicheskie usloviya [State Standard 481-80. Rubberized asbestos fabric gasket. Technical requirements]. Moscow, Standart Publ. (In Russian)

3. OST 5R.9326 Prokladki iz nemetallicheskih materialov dlya flantsevykh soedineniy sudovykh truboprovodov [OST 5R.9326. Nonmetallic material gasket for ship pipelines flanged connections]. (In Russian)
4. Klinger catalog. Great Britain, 1997.
5. Ilma catalog. 2009.
6. James Walker. Gaskets&Jointing Guide. Issue 7.5, 2015 https://www.jameswalker.biz/ru/pdf_docs/12-gaskets-jointings-guide-issue-7-5
7. James Walker. Sentinel Jointing. Non-asbestos compressed fiber sheets and gaskets.

Ежегодный конкурс РС на лучшую дипломную работу

В 2016 году, в рамках укрепления сотрудничества в области подготовки квалифицированного инженерно-технического персонала и повышения престижа работы выпускников в морской индустрии, в очередной раз был проведен конкурс на лучшую дипломную работу среди студентов морских инженерных специальностей. По условиям конкурса выпускники 2016 года представляли свои квалификационные работы, тематически связанные с основными направлениями деятельности Регистра.



Как рассказал начальник научно-исследовательского отдела РС Максим Бойко, в этом году существенно расширился круг участников: Регистр направил приглашения во все ведущие морские вузы страны, а также университеты, осуществляющие инженерную подготовку специалистов по широкому спектру направлений, связанных с постройкой и эксплуатацией морской техники.

В итоге на конкурс было представлено 22 работы из Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского, Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, Дальневосточного федерального университета, Сибирского государственного университета водного транспорта и Омского института водного транспорта.

Победителями стали:

1. Архипов А.В. – «Экспресс-оценка параметров морского волнения по снимкам экрана судовой радиолокационной станции», Сибирский государственный университет водного транспорта
2. Ермолаев В.П. – «СЭУ ледокола с парогазовой установкой $N=55$ МВт», Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О.Макарова
3. Климов С.О. – «Переоборудование рыболовной шхуны в рейдовое судно с количеством пассажиров 12 человек», Дальневосточный федеральный университет
4. Моргун А.А. – «Проектирование руля, оптимального по условию поворотливости судна», Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова
5. Немцов С.В. – «Модернизация танкера проекта 00201Л за счет реконструкции грузовой системы и системы мойки танков», Омский институт водного транспорта филиал ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта»
6. Попович В.Ю. – «Использование нечеткой логики и генетических алгоритмов для оценки параметров расхождения судов», Государственный Морской Университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова
7. Постникова Т.А. – «Обоснование проектных характеристик плавучей опорной части и якорной системы удержания платформы типа Spar для Штокмановского месторождения», Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
8. Зин Мин Хтет – «Традиционный и пошагово-итерационный методы вычисления предельных моментов корпуса судна», Санкт-Петербургский государственный морской технический университет





МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 629.12:532.582.5.001.5

НЕОБХОДИМО ЛИ НОРМИРОВАТЬ МИНИМАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ МОЩНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ?

К.Е. Сазонов, д-р техн. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

В статье обсуждается вопрос о необходимости назначения минимальной мощности для транспортных судов ледового плавания. Отмечается, что современные Правила РМРС часто приводят к завышенным значениям уровня мощности особенно для крупнотоннажных судов. Предлагается осуществить разделение судов с ледовыми подкреплениями на две категории: суда, эксплуатирующиеся только под проводкой ледокола, суда, которые могут осуществлять самостоятельное плавание во льдах. Для указанных категорий предложены сценарии, для которых должна определяться мощность в соответствии с данными об их ледовом сопротивлении.

Ключевые слова: судно ледового плавания, мощность, сценарий, ледовое сопротивление, ледопроеходимость

NECESSITY OF SETTING THE MINIMUM POWER LEVEL REQUIREMENTS FOR ICE-GOING SHIPS

K.E. Sazonov, DSc, FSUE "Krylov State Research Centre", St. Petersburg

The paper discusses the necessity to specify the minimum power levels for ice-going merchant vessels. It is noted that the current RMRS rules often lead to excessive power level requirements, in particular for large-size vessels. It is suggested that ice-going ships should be grouped in two categories: ships operating with an icebreaker's assistance only and ships able to operate in ice-covered waters independently. Operating scenarios for said ship categories are suggested to determine the power requirements consistent with the ice resistance data.

Keywords: ice-going vessel, power, scenario, ice resistance, ice-going capability

ВВЕДЕНИЕ

Обычно считается, что нормирование минимального уровня мощности для транспортных судов ледового плавания служит некоторой гарантией их безопасности. При этом четкого ответа на вопрос какую безопасность судна при ледовых

плаваниях гарантирует минимальная мощность, судя по всему не существует. Весь опыт эксплуатации судов в полярных регионах показывает, что наиболее серьезные аварии происходят в экстремальных ледовых условиях, для которых выполнение требований по минимальному уровню мощности не позволяет избежать аварийной ситуации. Например, гибель т/х «Нина Сагайдак»

в 1983 г. во многом была определена его попаданием в «ледовую реку» [1]. Для противостояния таким стихийным явлениям минимальный уровень мощности бесполезен.

Вопрос о необходимости корректировки требований к минимальному уровню мощности транспортных судов ледового плавания обсуждается уже довольно давно [2]. До недавнего времени в Правилах РМРС [3] для определения уровня минимальной мощности использовалась формула:

$$P_{\min} = f_1 f_2 f_3 (f_4 \Delta + P_0), \quad (1)$$

где Δ – водоизмещение судна по летнюю грузовую ватерлинию; f_1, f_2, f_3, f_4, P_0 – коэффициенты, определяемые в соответствии с рекомендациями [3].

Использование формулы (1) часто приводит к завышению уровня мощности, особенно для крупнотоннажных судов, что негативно сказывается на экономических показателях проекта в целом. Сама же расчетная формула не соответствует современным подходам к назначению минимального уровня мощности. Так, в финско-шведских правилах реализован подход, основанный на определении ледового сопротивления судна [4]. Полученное с помощью расчетов или проведения модельных испытаний в ледовом бассейне ледовое сопротивление отождествляется с тягой движительного комплекса, что позволяет перейти к определению требуемой мощности с помощью расчетных формул типа:

$$N_{\min} = f_1 f_2 K_e \frac{(f_3 R_I)^{1.5}}{D}, \text{ кВт}, \quad (2)$$

здесь f_i – коэффициенты, учитывающие тип гребного винта, число движителей и наличие насадки;
 K_e – коэффициент, учитывающий характеристики движительного комплекса судна;
 R_I – ледовое сопротивление в кН;
 D – диаметр гребного винта, м.

Такой подход требует постулирования тех или иных сценариев взаимодействия судна со льдом, для которых должно определяться ледовое сопротивление и, соответственно, назначаться мощность главных механизмов. Фактически этот подход означает отказ от назначения минимального уровня мощности и замену его определением необходимого судну уровня мощности, который обеспечивает ему возможность работы в заданных условиях.

В новой редакции правил РМРС 2015 г. [5] для судов ледового класса **Ice2**, **Ice3** и **Arc4** формула (1) дополнена формулой (2), при этом входящее в нее ледовое сопротивление судна предлагается определять по финско-шведской методике для случая движения судна по набитому тертым льдом каналу [6]. Другие сценарии движения судов не рассматриваются. Для судов с ледовым классом выше **Arc4** предлагается по-прежнему применять формулу (1).

В данной работе автор предлагает набор сценариев, которые обеспечили бы возможность определения

необходимого уровня мощности транспортных судов ледового плавания. Предлагаемые сценарии отличаются от ранее сформулированных в работе [7]. Эти изменения связаны с попыткой повысить экономическую эффективность транспортных судов, эксплуатируемых в ледовых условиях.

РЕЖИМЫ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ ВО ЛЬДАХ

Существует два основных режима движения транспортного судна во льдах. Это движение под проводкой ледокола или ледоколов и самостоятельное плавание.

До недавнего времени движение транспортного судна под проводкой ледокола было основным режимом. Ледокол, ширина которого превышала ширину проводимого судна, прокладывал в ледяном покрове канал, покрытый мелкобитым льдом различной сплоченности, для движения проводимого судна. В настоящее время, в связи с появлением в полярных водах крупнотоннажных судов, этот способ становится все менее актуальным. Ширина современного крупнотоннажного судна существенно превышает ширину любого из существующих или строящихся ледоколов. Поэтому при движении такого судна по «узкому» каналу оно вынуждено доламывать его кромки корпусом. При этом разрушение льда происходит в районах перехода носового заострения в цилиндрическую вставку, которые имеют далеко не оптимальную для этого процесса геометрию. Поэтому при расширении ледяного канала крупнотоннажное судно имеет существенное ледовое сопротивление, которое может быть совсем не значительно меньше ледового сопротивления в неразрушенном ледяном поле.

Проводка крупнотоннажных судов сейчас в основном осуществляется двумя ледоколами, которые прокладывают в ледяном покрове широкий канал, достаточный для прохождения судна. При этом движение судна происходит в мелкобитых и крупнобитых льдах, заполняющих канал.

В настоящее время ведутся проработки ледокола лидера, имеющего ширину около 50 м, а также альтернативного многокорпусного ледокола, способного создать канал шириной более 60 м [8], реализация которых может позволить вернуться к традиционной тактике проводки. Однако до окончательной реализации этих проектов еще далеко.

Появление крупнотоннажных судов ледового плавания поставило вопрос о возможности их эксплуатации в режиме самостоятельного плавания. Для обеспечения этой возможности используется движение как носом, так и кормой вперед. Многие специалисты считают, что при движении кормой вперед крупнотоннажное судно может демонстрировать высокие

показатели ледовой ходкости, которые превышают аналогичные показатели при движении носом вперед [9]. Автор данной статьи не разделяет этого мнения [10], но к обсуждаемой теме это не имеет отношения. Важен сам факт возможности самостоятельного движения судна тем или иным способом во льдах.

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ СЦЕНАРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ МОЩНОСТИ

Для определения уровня мощности автор предлагает разделить все транспортные суда ледового плавания на две категории. К первой категории относятся суда, которые никогда не могут быть использованы для самостоятельного плавания в ледовых условиях. Вторая категория – это суда, которые могут осуществлять самостоятельное плавание во льдах. Разделение судов на категории может быть выполнено, например, по ледовому классу. В новой редакции Правил РМРС такое разделение уже в какой-то мере осуществлено.

СЦЕНАРИИ ДЛЯ СУДОВ ПЕРВОЙ КАТЕГОРИИ

Для таких судов основным режимом движения является плавание по каналу, проложенному одним или двумя ледоколами. При этом канал может быть «свежим» или «старым», набитым тертым льдом. В соответствии с принятым разделением судов на категории движение по набитому каналу осуществляется также под проводкой ледокола. Это общепринятая практика. Даже суда типа «Норильский никель», имеющие высокие показатели ледовой ходкости, используют услуги атомных ледоколов при движении по Енисейскому заливу для поддержания высоких эксплуатационных скоростей [11].

Для судов первой категории, по мнению автора, при определении уровня мощности необходимо рассматривать два основных сценария движения: движение по «свежему» и по набитому каналам. Мощность в соответствии с формулой (2) должна определяться на основании данных о ледовом сопротивлении судна в указанных условиях. Ледовое сопротивление может быть получено на основании данных модельного эксперимента в ледовом бассейне или расчетным путем. При использовании расчетных методов для случая движения по «свежему» каналу, проложенному одним ледоколом, можно рекомендовать формулу А.Я.Рывлина с учетом поправок для судов, имеющих угол входа ватерлинии более $45 - 50^\circ$, и влияния отношения ширины судна B_s к ширине проложенного канала B_{ch} [2]. Ранее выполненные расчеты [7] показывают, что в подавляющем большинстве случаев

ледовое сопротивление традиционного судна в набитом канале больше, чем при движении в «свежем» канале. Поэтому использование формулы (2) в новой редакции Правил выглядит обоснованным. Тем не менее, для крупнотоннажных судов, движущихся по узкому каналу ($0,8 > B_s/B_{ch} \geq 1$), может возникнуть ситуация, когда судно будет буксировать перед собой битый лед, постепенно набирая довольно значительное нагромождение. Движение через такое нагромождение в какой-то мере аналогично движению в набитом канале, но в этом случае характерные размеры обломков льда (2 – 20 м) будут существенно превышать характерный размер тертого льда (менее 2 м). Можно ожидать, что в этом случае ледовое сопротивление судна может возрасти. В настоящее время отсутствуют данные по сопротивлению для указанного сценария, в этом направлении необходимо проведение исследований.

В случае прокладки «свежего» канала двумя ледоколами расчет ледового сопротивления судна в крупнобитых льдах необходимо проводить в соответствии с методикой, изложенной в работе [12].

Как при проведении экспериментов в ледовом бассейне, так и при выполнении расчетов ледового сопротивления скорость движения судна по каналу должна приниматься максимально допустимой из условия обеспечения ледовой прочности судна. Это требование крайне важно, т. к. оно позволяет повысить экономическую эффективность транспортной системы. По мнению специалистов «Атомфлота» при транзитных рейсах в Арктике во льдах толщиной 1,5 – 2 м скорость каравана должна составлять 8 – 10 узлов.

При движении по набитому каналу расчет ледового сопротивления может быть осуществлен по формуле (2). Необходимо отметить, что существенным недостатком финско-шведской методики является отказ от учета скорости движения судна в набитом канале.

СЦЕНАРИЙ ДЛЯ СУДОВ ВТОРОЙ КАТЕГОРИИ

Суда этой категории могут совершать самостоятельные плавания во льдах. Ранее выполненные исследования [7] показали, что режим самостоятельного движения является наиболее энергоемким и, поэтому, он должен рассматриваться для назначения уровня мощности судна. В техническом задании на проектирование судна, относящегося ко второй категории, всегда указывается спецификационная величина: предельная ледопроездимость. Эта величина определяется заказчиком исходя из предполагаемых районов эксплуатации судна в режиме самостоятельного плавания. Именно предельная ледопроездимость должна браться за основу при назначении уровня мощности. По

результатам модельных испытаний или расчетов должно быть определено ледовое сопротивление судна, а затем определена требуемая мощность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью данной статьи является постановка дискуссионного вопроса о необходимости нормирования минимальной мощности для транспортных судов ледового плавания. По мнению автора, содержащиеся в настоящее время в Правилах регистра требования для судов с ледовым классом выше **Arc4** часто приводят к завышенным требованиям, особенно для крупнотоннажных судов ледового плавания, что негативно сказывается на экономических показателях судна.

Представляется целесообразным сохранить нормирование минимальной мощности только для судов с ледовым классом **Ice2** и **Ice3**. Вместо нормирования минимального уровня мощности остальных судов ледового плавания автор предлагает прямое определение необходимой мощности на основании данных о его ледовом сопротивлении, которые должны быть получены либо экспериментальным путем, либо на основании расчетов, согласованных с РМРС. Единственное исключение может представлять класс **Arc4**. Для этого класса все должно определяться требуемой ледопроходимостью судна. Если требуемая ледопроходимость мала, уровень минимальной мощности должен быть нормирован, если она высока, то уровень мощности следует определять на основе ледопроходимости. Более точное определение малости величины ледопроходимости требует дополнительных исследований.

В работе предложены варианты сценариев движения судна в ледовых условиях, для которых необходимо определение ледового сопротивления и, соответственно, мощности энергетической установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике. Под ред. д. т. н. Е.У.Миронова. ГНЦ РФ АНИИ, 2010, 320 с.
2. Сазонов К.Е. Теоретические основы плавания судов во льдах. СПб: ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, 2010, 274 с.
3. Правила классификации и постройки морских судов, т.2, НД № 2-020101-077, Российский морской регистр судоходства, СПб., 2014
4. Riska K. The background of the powering requirements in the Finnish – Swedish ice class rules. /Maritime Research Seminar'99, VVT Symposium 199, Espoo, Finland, 2000, p. 91-106.
5. Правила классификации и постройки морских судов, т.2, НД № 2-020101-084, Российский морской регистр судоходства, СПб., 2015
6. Ice class regulations 2010. "Finnish-Swedish ice rules 2010". 23/11/2010 TRAFI/31298/03.04.01.00/2010.

7. Бицуля А.В., Сазонов К.Е. Разработка расчетных формул для определения минимальной мощности главных механизмов судов ледового плавания. /Труды ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, 2007, вып. 34, с.22-42.
8. Добродеев А.А., Клементьева Н.Ю., Сазонов К.Е. Современные подходы к обеспечению навигации крупнотоннажных судов во льдах. /Транспорт Российской Федерации, 2015, № 4(59), с.26-29.
9. Цой Л.Г., Андрушин А.В., Штрек А.А. Обоснование основных параметров перспективных крупнотоннажных газозовозов для Арктики. /Проблемы Арктики и Антарктики, 2013, № 3(97), с. 46-56.
10. Сазонов К.Е. О ледовой ходкости и управляемости крупнотоннажных судов двойного действия в Арктике. /Проблемы Арктики и Антарктики, 2016, № 1(107), с. 50-60.
11. Смирнов А.А., Головинский С.А. Перспективы развития Северного морского пути (к 55-летию атомный ледокольный флот). /Арктика: экология и экономика, 2014, № 4(16), с.108-113.
12. Сазонов К.Е., Добродеев А.А. Метод расчета ледового сопротивления судна при его движении в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей. /Труды ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, 2011, вып.63(347), с.73-80.

REFERENCES

1. Dangerous ice phenomena for shipping in Arctic. Ed. D.Sc. E.U. Mironov. AARI, 2010, p.320. (In Russian)
2. Sazonov K.E. Theoretical basis for ship navigation in ice. St. Petersburg, Krylov Shipbuilding Research Institute, 2010, p.274. (In Russian)
3. Rules for classification and construction of sea-going ships, v.2, ND No. 2-020101-077. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2014. (In Russian)
4. Riska K. The background of the powering requirements in the Finnish – Swedish ice class rules. Maritime Research Seminar'99, VVT Symposium 199, Espoo, Finland, 2000, pp. 91-106.
5. Rules for classification and construction of sea-going ships, v.2, ND No. 2-020101-084. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2015. (In Russian)
6. Ice class regulations 2010. Finnish-Swedish ice rules 2010. 23/11/2010 TRAFI/31298/03.04.01.00/2010.
7. Bitsulya A.V., Sazonov K.E. Deriving of design equations to determine the minimum power level of propulsion machinery for ice-going vessels. Trudy TsNII im. akad. A.N.Krylova [Proc. of Krylov Shipbuilding Research Institute]. 2007, No. 34, pp. 22-42. (In Russian)
8. Dobrodeev A.A., Klementieva N.Yu., Sazonov K.E. Modern approaches to ensure navigation of large-size vessels in ice. Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of Russian Federation]. 2015, No. 4(59), pp.26-29. (In Russian)
9. Tsoy L.G., Andryushin A.V., Shtrek A.A. Substantiation of principal parameters of prospective large capacity LNG carriers for the Arctic. Problemy Arktiki i Antarktiki [Problems of Arctic and Antarctica]. 2013, No. 3(97), pp. 46-56. (In Russian)
10. Sazonov K.E. On propulsion and maneuvering performance of large-size double-acting vessels in Arctic waters. Problemy Arktiki i Antarktiki [Problems of Arctic and Antarctica]. 2016, No. 1(107), pp. 50-60. (In Russian)
11. Smirnov A. A., Golovinsky S. A. 55th Anniversary of the Russian Nuclear Icebreaker Fleet and Development of the Northern Sea Route. Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: ecology and economy]. 2014, No. 4(16), pp.108-113. (In Russian)
12. Sazonov K.E., Dobrodeev A.A. Method for estimation of ship ice resistance in water infested with small and medium floes. Trudy TsNII im. akad. A.N.Krylova [Proc. of Krylov Shipbuilding Research Institute]. 2011, No. 63(347), pp.73-80. (In Russian)



ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

УДК 629.12.066

БЕСПЕРЕБОЙНОЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ МОЩНЫХ СУДОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В.В. Романовский, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова», Санкт-Петербург, тел. +79117711041, e-mail: vromanovsky@mail.ru

В.Б. Мачульский, ФАУ "Российский морской регистр судоходства", Санкт-Петербург

В.Н. Куракин, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова», Санкт-Петербург

В статье рассмотрены схемные решения для обеспечения бесперебойного электроснабжения мощных потребителей плавучих буровых установок, газозовозов, ледоколов и других судов с единой электроэнергетической установкой. Использование распределенной сети постоянного тока позволяет обеспечить экономичное и эффективное электроснабжение мощных потребителей, однако для надежного и бесперебойного снабжения перспективным представляется кольцевая схема, показанная на примере электроснабжения плавучей буровой установки. Использование аварийного дизель-генератора, подключенного непосредственно к распределенным шинам постоянного тока, позволяет существенно сократить время восстановления напряжения подводимого к ответственным мощным потребителям.

Ключевые слова: судно, электроснабжение, бесперебойность

REGULAR SUPPLY OF HIGH POWER MARINE ELECTRIC CONSUMERS

V.V. Romanovsky, DSc, professor, FSEI Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, e-mail: vromanovsky@mail.ru, tel. +79117711041

V.B. Machulsky, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg

V.N. Kurakin, PhD, associate professor, FSEI Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg

The article considers the schematics aimed at ensuring the uninterrupted supply of powerful consumers of the floating drilling rigs, LNG carriers, icebreakers and other ships with an integrated power electrical plant. The use of distributed DC network allows us to provide economical and effective supply of powerful consumers, however, for the reliable and uninterrupted supply the ring scheme has shown much promise in the example of power supply of a floating drilling rig. The use of the emergency diesel generator directly connected to distributed DC buses can significantly reduce the recovery time of the voltage supplied to the responsible power consumers.

Keywords: ship, electrical installation, uninterrupted supply

Особенностью бесперебойного электроснабжения ответственных потребителей является необходимость схемного или агрегатного резервирования источников электроэнергии, установленных на судне или морском комплексе.

Технология грузовых операций танкеров, газозовов или бурения скважин в условиях моря имеет определенные отличия от подобных операций на суше. В связи с серьезными рисками и высоким уровнем ущерба в случае аварии предъявляются более жесткие требования к надежности оборудования и организации работы. Суда подвергаются перемещениям по вертикали и горизонтали, что негативно влияет на технологические процессы и требует применения систем компенсации вертикальных перемещений и позиционирования.

При процессе бурения плавучие установки и суда должны обеспечивать следующие основные функции: поддержание на весу колонны обсадных и буровых труб и проведение спускоподъемных операций; привод различных механизмов и в первую очередь вращение ведущей буровой трубы; циркуляцию бурового раствора. Установка оснащается средствами автоматизации, приборами контроля, связи, пожарной сигнализации.

Число дизель-генераторов, установленных на мощных электроходах, обычно составляет от четырех до шести штук, причем в различных эксплуатационных режимах обычно включено не менее двух, при оптимальной загрузке. На плабуровых установках используют 8 – 10 дизель-генераторов. В случае использования мощных

электростанций возможно качество первичных двигателей применять газовые турбины. Тогда баланс электрических нагрузок строится таким образом, что общее число установленных агрегатов составляет 3 – 4 штуки.

Если в ходе грузовых операций и других технологических работ (бурение, прокладка кабеля) происходит обесточивание (black-out), существенное значение имеет время восстановления питания.

Общая установленная мощность электродвигателей буровой установки составляет 10 – 15 МВт, количество основных индивидуальных приводов составляет от 7 до 15 штук. Причем одной из основных характеристик буровой установки, определяющих мощность и состав электроприводов, является грузоподъемность на крюке буровой вышки. Для электропривода, по сегодняшний день, применяются как двигатели постоянного, так и переменного тока. Их применение определяется во многом предпочтениями заказчика. Безусловно, в настоящее время доминирует применение электродвигателей переменного тока. Это связано с удобством эксплуатации и обеспечением взрывобезопасности.

Основным направлением построения систем электроснабжения мощных ответственных потребителей является система переменного тока с общей распределенной шиной постоянного тока питания инверторов индивидуальных приводов (рис. 1).

Шина постоянного тока имеет секционирование. Питание выпрямителей осуществляется от трехоб-

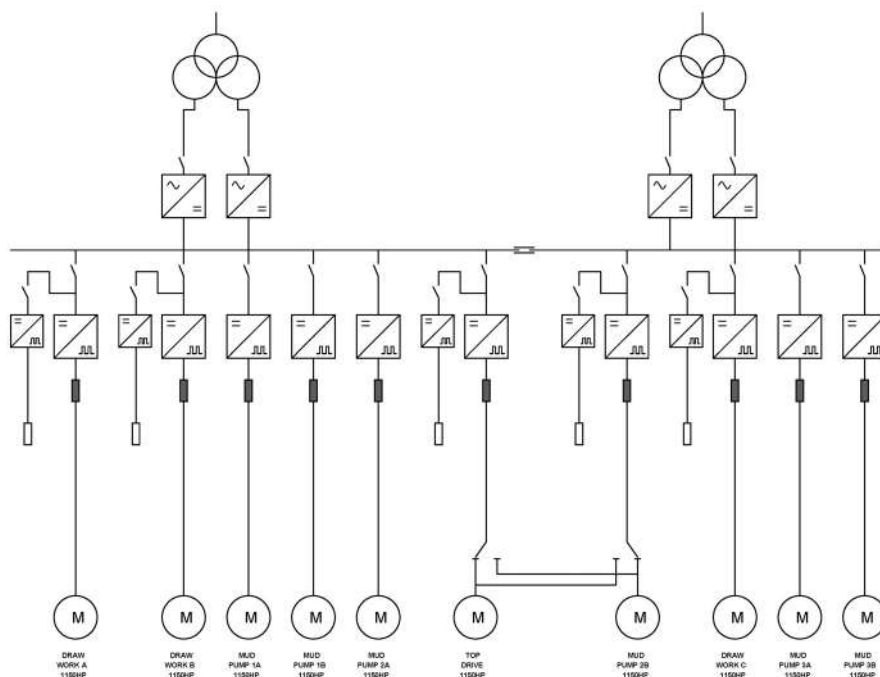


Рис. 1 Схема электроснабжения ПБУ

моточных трансформаторов. Управление двигателями переменного тока приводов производится автономными инверторами. Тормозные режимы для некоторых механизмов осуществляются при помощи сопротивлений с импульсным управлением.

При разработке системы распределения энергии и структуры системы электропривода учитываются различные аспекты обеспечения надежности. Поэтому представляется целесообразным применение для мощных и сложных буровых комплексов кольцевую систему шин постоянного тока (рис. 2). Здесь распределенные шины постоянного тока Л1, Л2 и Л3 образуют замкнутую систему и в случае обесточивания любого из источников электроэнергии позволяют обеспечить работу технологического процесса. Питание бурового комплекса осуществляется тремя четырехобмоточными трансформаторами. Каждый из этих трансформаторов осуществ-

ляет питание трех шестипульсных выпрямителей. Выход выпрямителей подключен на кольцевую шину постоянного тока.

Шестипульсные выпрямители, питаемые от одного (общего) трансформатора, могут быть подключены к одной или разным секциям кольцевой шины. Инверторы электродвигателей механизмов, которые имеют многодвигательный привод (верхний привод, буровая лебедка), подключаются к разным секциям кольцевой шины. В случае неисправности (аварии) на шине постоянного тока, данная схема позволяет точнее локализовать неисправный участок, уменьшить количество отключаемых механизмов, уменьшить ущерб от снижения работоспособности бурового комплекса.

Другой аспект, который требуется учитывать при разработке системы распределения энергии и структуры электропривода с целью обеспечения надеж-

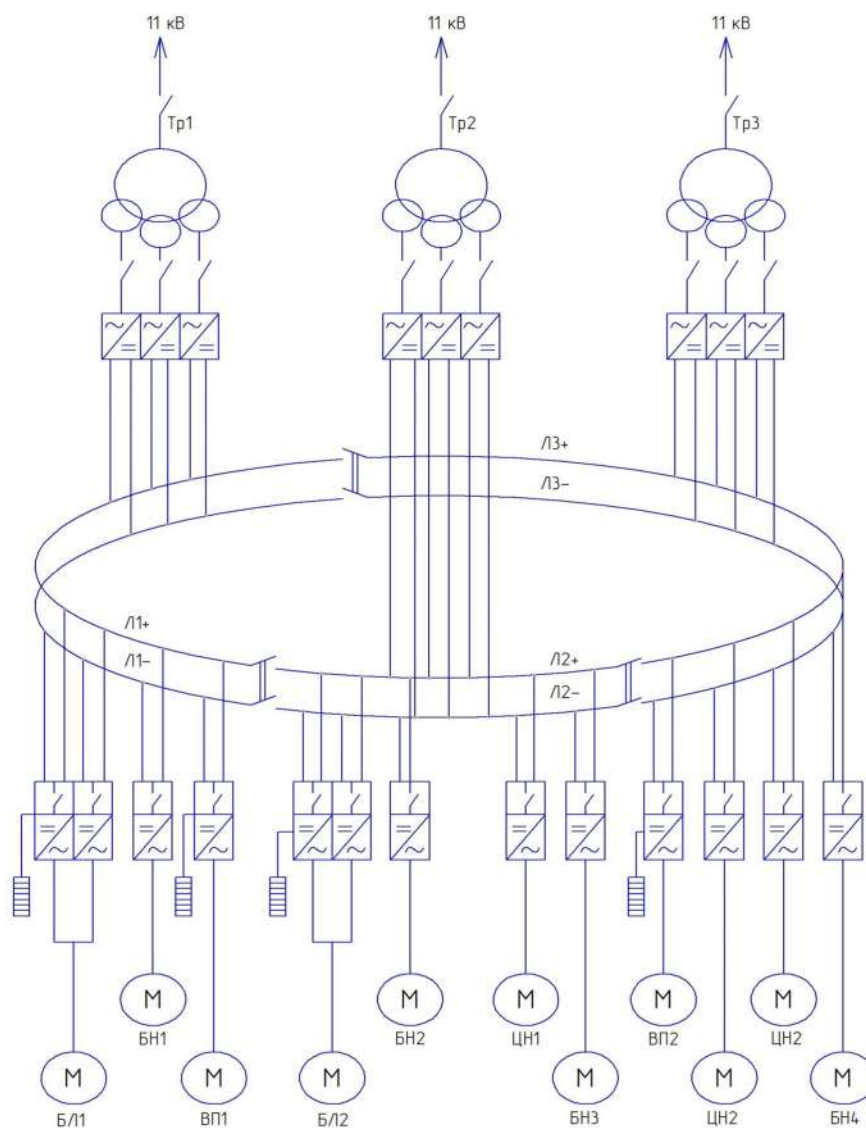


Рис. 2 Кольцевая схема электроснабжения

ности, связан с необходимостью минимизировать время перерыва в питании ответственных электроприводов.

Для сокращения времени запуска аварийных источников питания в настоящее время разрабатываются мероприятия, позволяющие в аварийных ситуациях обеспечить минимально необходимое электроснабжение механизмов с пониженными параметрами в целях предотвращения значительного ущерба. Причем по экспертной оценке минимально необходимая мощность для различных режимов работы мощных потребителей находится на уровне 2 – 2,5 МВт. В качестве резервного источника питания используется дизель-генератор. Единичная мощность электрических агрегатов на добычных платформах значительно превосходит единичную мощность таковых на буровых платформах. В результате, в ходе процесса бурения на добычной платформе, по условиям загрузки, зачастую включается лишь один газотурбинный агрегат.

В случае возникновения, в ходе технологических или буровых работ, ситуации «black-out» существенное значение имеет время восстановления питания. Повторный запуск или запуск другого турбоагрегата требует значительного времени (20 – 40) минут. Для запуска дизель-генератора требуется меньше времени (20 – 40) секунд.

С учетом перечисленных факторов, в настоящее время разрабатываются мероприятия, позволяющие в аварийных ситуациях обеспечить минимально необходимое электроснабжение для безопасности и работоспособности механизмов буровой установки с пониженными параметрами для предотвращения значительного ущерба.

Одним из схемных решений является включение резервного дизель-генератора, который подводит электроэнергию непосредственно к шине постоянного тока, снабжающей питанием инверторы электроприводов (рис. 3). При этом из схемы исключается большое число элементов (со значительной долей вероятности – неисправных в ситуации black-out), что повышает надежность всей системы электроснабжения. С целью уменьшения нелинейных искажений и более полного использования габаритной мощности резервного электрогенератора выпрямитель, через который подводится энергия на шину постоянного тока, построен на полностью управляемых тиристорах.

Система переменного тока также имеет общую шину постоянного тока для питания инверторов индивидуальных приводов. Шина постоянного тока имеет секционирование. Питание выпрямителей осуществляется от трехобмоточных трансформаторов. Выбор мощности трансформаторов проводится с учетом резервирования.

Расчет электрических нагрузок и определение необходимой мощности генераторов электростанций обычно проводится по методикам, разработанным применительно к судам.

В перспективе представляется целесообразным развернуть работы по совершенствованию методов расчета электрических нагрузок и определения необходимой мощности генераторов электростанций с учетом особенностей технологических процессов на морских платформах различного типа для совершенствования требований Правил Регистра в части обеспечения безаварийной работы морских буровых установок.

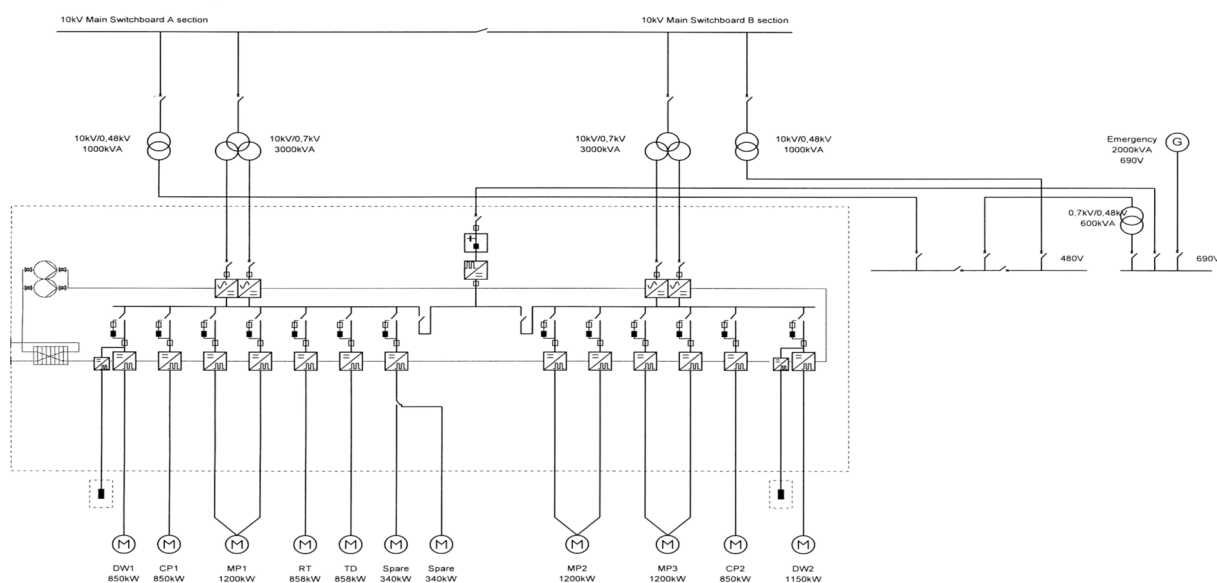


Рис. 3 Вариант схемы бесперебойного электроснабжения мощных потребителей

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов А.П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы. Изд. Судостроение, СПб., 2005 г., 518 с.
2. Романовский В.В., Куракин В.Н., Иванов В.С. Электрооборудование морских комплексов. Изд. ГУМРФ им. адм. С.О.Макарова, СПб., 2013 г., 241 с.
3. Романовский В.В. Гребные электрические установки для арктических ледоколов. Морской вестник, №4 (56), 2015 г., с.53-56.

REFERENCES

1. Baranov A.P. Sudovye avtomatizirovannye elektroenergeticheskie sistemy [Ships automatic electro energetic systems]. St. Petersburg, Sudostroenie Publ., 2005, 518 p. (In Russian)
2. Romanovskiy V.V., Kurakin V.N., Ivanov V.S. Elektrooborudovanie morskikh kompleksov [Electro systems of marine complex]. St. Petersburg, GUMRF, 2013, 241 p. (In Russian)
3. Romanovskiy V.V. Electro propulsion systems for arctic ice-breakers. Morskoy vestnik [Marine herald], N 4 (56), 2015, 53-56 pp. (In Russian)

Заседание секции «Электрическое оборудование и автоматизация судов» Научно-технического совета Российского морского регистра судоходства

В 2016 г. в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» состоялось заседание секции Научно-технического совета РС «Электрическое оборудование и автоматизация судов».

Заседание было приурочено к 130-летию ЛЭТИ - основанного в 1886 году первого в Европе высшего учебного заведения, специализированного в области электротехники. В ЛЭТИ работали такие выдающиеся ученые, как А.С. Попов, Г.О. Графтио, В.П. Вологдин, С.Я. Соколов, А.И. Берг, Ж.И. Алферов и многие другие. Выпускники и сотрудники университета внесли огромный вклад в развитие судостроительной промышленности. В 1942 г. при ЛЭТИ было создано Бюро научно-исследовательских работ Наркомата судостроительной промышленности, выполнявшее работы по переоборудованию и ремонту электрических устройств судового оборудования. В настоящее время ЛЭТИ является

одним из ведущих вузов в области подготовки специалистов по судовому электрооборудованию.

В рамках заседания секции «Электрическое оборудование и автоматизация судов» были представлены доклады:

«Новые источники электроэнергии единых корабельных систем» (д.т.н., проф. В.А. Одинаев и А.В. Акимиров, ВМПИ ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»)

«Чебоксарский Электроаппаратный завод. История предприятия. Развитие, изготовление и поставка судового электрооборудования» (С.А. Кан, директор представительства завода в Санкт-Петербурге)

«Опыт эксплуатации электроэнергетической системы и интегрированной системы управления техническими средствами самоподъемной буровой установки «Арктическая» (А.В. Григорьев, председатель секции, к.т.н., доцент).

В состав секции входят представители Научно-производственного центра «Электродвижение судов», Государственного университета морского и речного флота им. С.О. Макарова, АО «Гипрорыбфлот», ЛЭТИ, ФГУП «Атомфлот», ФГУП «Росморпорт», Санкт-Петербургского государственного морского технического университета, Союза промышленников и предпринимателей Санкт-Петербурга, концерна «НПО «Аврора», ЦКБ «ОСК-Айсберг», «Газпром флота», Военно-морской академии им. Н.Г. Кузнецова.

Проведение выездных секций направлено на укрепление взаимодействия с научными, проектными и производственными организациями судостроительной промышленности и на повышение эффективности научно-исследовательской политики РС.

По вопросам взаимодействия с секциями Научно-технического совета РС просим обращаться в научно-исследовательский отдел:

e-mail research.dept@rs-class.org

тел. +7 (812)605-05-21





РАДИОНАВИГАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 621.396

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ПЯТИ ПОКОЛЕНИЙ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИХ СПУТНИКОВЫХ СТАНЦИЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ МОРСКОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ ИНМАРСАТ

П.С. Дубчук, доцент, ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова», Санкт-Петербург,
тел. +79119853246

А.В. Припотнюк, ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова», Санкт-Петербург,
e-mail: apripotnyuk@mts.spb.su

Ю.М. Устинов, д-р техн. наук, проф., ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, e-mail: kaf_tsn@gumrf.ru

В статье рассматриваются этапы развития международной спутниковой системы связи ИНМАРСАТ в зависимости от поколения спутников связи. Приводятся основные сравнительные характеристики поколений, приводятся карты рабочих зон систем. В работе показано, что увеличение скорости обмена информацией связано с увеличением энергетики сигнала при использовании узких зональных лучей, указаны конкретные значения скоростей передачи для различных поколений. Перспективным направлением развития системы ИНМАРСАТ является изменение частотного диапазона, что в конечном итоге эквивалентно увеличению мощности сигнала и скорости обмена. В приводимой таблице сводятся основные характеристики поколений, прослеживаются тенденции развития. Показано, что использование новейших технологий в системе ИНМАРСАТ позволило решить проблему доступа на судах к сети Интернет и многократно увеличить скорости передачи/приема данных.

Ключевые слова: спутниковая система связи, ИНМАРСАТ, диапазон частот, зональные лучи, судовый терминал

EVOLUTION STUDY OF FIVE GENERATIONS OF TRANSCIVER SATELLITE STATIONS OF THE INTERNATIONAL MARITIME COMMUNICATION SYSTEM INMARSAT

P.S. Dubchuk, associate professor, FSEI Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, tel. +79119853246

A.V. Pripotnyuk, FSEI Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg,
e-mail: apripotnyuk@mts.spb.su

Yu.M. Ustinov, DSc, professor, FSEI Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, e-mail: kaf_tsn@gumrf.ru

The article considers stages of development of international satellite communications INMARSAT depending on the generation of the communication satellites. The basic comparative characteristics of the generations are provided, as well as the maps of the workzones systems. It is shown that the increase in the speed of information exchange is associated with an increase of the energy signal when using narrow zonal rays, the specific values of the transmission rates for different generations are indicated. Changing the frequency band,

ИНМАРСАТ-А, ИНМАРСАТ-В, ИНМАРСАТ-С, ИНМАРСАТ-М, ИНМАРСАТ-miniM, ИНМАРСАТ-D+, ИНМАРСАТ-miniC. Во всех вышеперечисленных терминалах скорость передачи данных «вверх» не превышала 9,6 кбит/с [2].

ТРЕТЬЕ ПОКОЛЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ СТАНЦИЙ

Четыре спутниковые станции третьего поколения ИНМАРСАТ-3 начали работать в 1998 г. Передатчики станций формировали не только глобальные, но и с помощью специальных антенн – широкие зональные лучи. Приемо-передающие антенны, формирующие широкие зональные лучи, имели высокий коэффициент направленного действия (КНД), поэтому передавали и принимали большие мощности сигналов, чем в глобальных лучах, обеспечивая в региональной зоне большие скорости при передаче/приеме данных.

На рис. 2 показаны глобальная и региональная рабочие зоны ИНМАРСАТ-3 и ИНМАРСАТ-4 (третьего и четвертого поколений спутниковых станций). Региональная зона отмечена темным цветом.

Из рис. 2 следует, что границы региональных зон ИНМАРСАТ-3 и ИНМАРСАТ-4 на севере практически совпадают с глобальной зоной, а на юге проходит по южной широте около 45°. На акватории Тихого и Атлантического океанов имеются два участка, отмеченные цифрами 1 и 2, которые не входят в региональную зону ИНМАРСАТ-3.

Начиная с третьего поколения спутниковых станций ИНМАРСАТ-3, с помощью широкополосных судовых терминалов на борту судов в пределах

региональной зоны появилась возможность работы в сети Интернет со скоростью передачи/приема данных не выше 128 кбит/с. В региональной зоне без ограничения могли работать широкополосные терминалы семейства Fleet: Fleet-33, Fleet-55, Fleet-77.

ЧЕТВЕРТОЕ ПОКОЛЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ СТАНЦИЙ

Четвертое поколение спутниковых станций системы связи ИНМАРСАТ-4 обеспечило расширение региональной рабочей зоны и дополнительную возможность работы в узких зональных лучах со скоростями передачи/приема выше 128 кбит/с. В узких зональных лучах могли работать терминалы: ИНМАРСАТ-M4 GAN, BGAN, FB-250, FB-500 [3].

Широкополосные судовые терминалы FB-250, FB-500 появились на рынке в 2009 г.

По сравнению с ИНМАРСАТ-3 в региональную зону ИНМАРСАТ-4 (см. рис. 2) дополнительно включены участки 1 и 2 акваторий Тихого и Атлантического океанов, ограниченные пунктиром. На рис. 2 региональная зона ИНМАРСАТ-4 представлена на фоне глобальной зоны четырех спутников. В действительности в систему ИНМАРСАТ-4 входят не четыре, а три геостационарных спутника, равномерно разнесенных по долготе.

Три геостационарных спутника ИНМАРСАТ-4 формируют не только 19 широких зональных лучей для создания региональной зоны. Для гарантированной работы широкополосных терминалов со скоростями передачи/приема данных выше 128 кбит/с передатчики на спутниках дополнительно формируют 228 узких зональных направленных лучей. С помощью этих лучей на поверхности Земли формируются

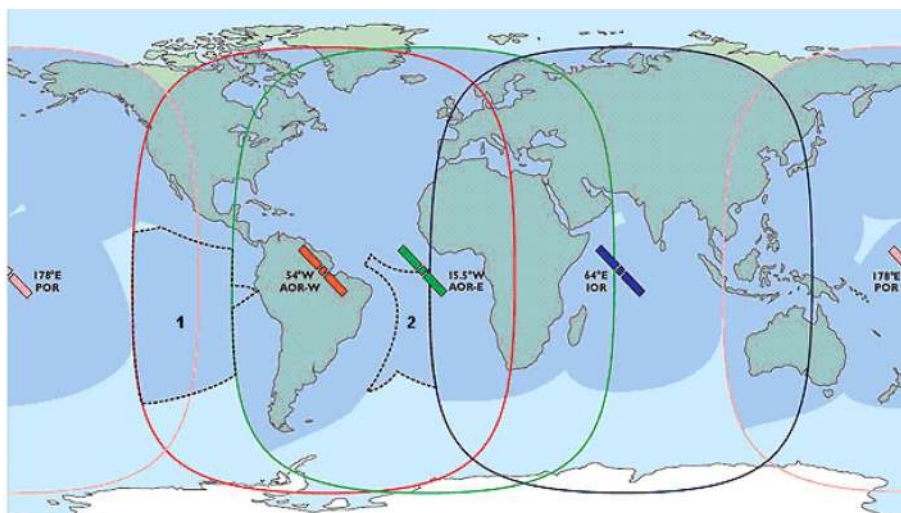


Рис. 2 Региональные и глобальные рабочие зоны ИНМАРСАТ-3 и ИНМАРСАТ-4

локальные пятна с высокой энергетикой диаметром около 800 км, в пределах которых возможна работа судовых терминалов со скоростью передачи/приема данных до 256/432 кбит/с. Такие скорости обеспечивает судовой широкополосный терминал FB-500.

На рис. 3 приведена карта, на которой представлены локальные пятна, формируемые спутниками ИНМАРСАТ-4.

Суда, выходящие на связь, по данным своих координат заказывают направленный узкий зональный луч на время сеанса связи для передачи/приема данных с большой скоростью или для работы в сети Интернет с большой скоростью скачивания данных. Напомним, что при работе в сети Интернет MPDS оплата судами производится лишь за объем передаваемой/принимаемой информации.

Линейные размеры прямо-передающей антенны судового терминала FB-500 составляют $63,5 \times 72,4$ см.

Площадь апертуры антенны

$$S = \frac{\lambda^2}{\Theta}$$

где λ (м) – длина волны;

Θ (рад²) – телесный угол антенны,

S (м²) – апертура антенны.

ПЯТОЕ ПОКОЛЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ СТАНЦИЙ

В 2014 г. начало работать пятое поколение спутниковых станций ИНМАРСАТ-5. Спутники работают в Ka диапазоне частот (при связи «вниз» диапазон частот 29,5...30,0 ГГц, при связи «вверх» – 19,7...20,2 ГГц). Длина волны $\sim 1,0...1,5$ см [4].

По сравнению с L диапазоном, который используется в первых четырех поколениях спутников ИНМАРСАТ, средние величины номиналов частот в диапазоне Ka увеличиваются в 21 раз. Это значит, что при одинаковой апертуре антенн телесный угол судовых терминалов уменьшается в $21^2 = 441$ раз, во столько же раз возрастает КНД антенн и, следовательно, излучаемые передатчиком мощности и скорости передачи данных.

Скорости передачи данных «вниз» в ИНМАРСАТ-5 будут 50 Мбит/с, «вверх» – 5 Мбит/с. Линейные размеры апертуры антенн судовых терминалов лежит в пределах 60...100 см.

Зона покрытия поверхности Земли тремя спутниками ИНМАРСАТ-5 по данным расчета представлена на рис. 4.

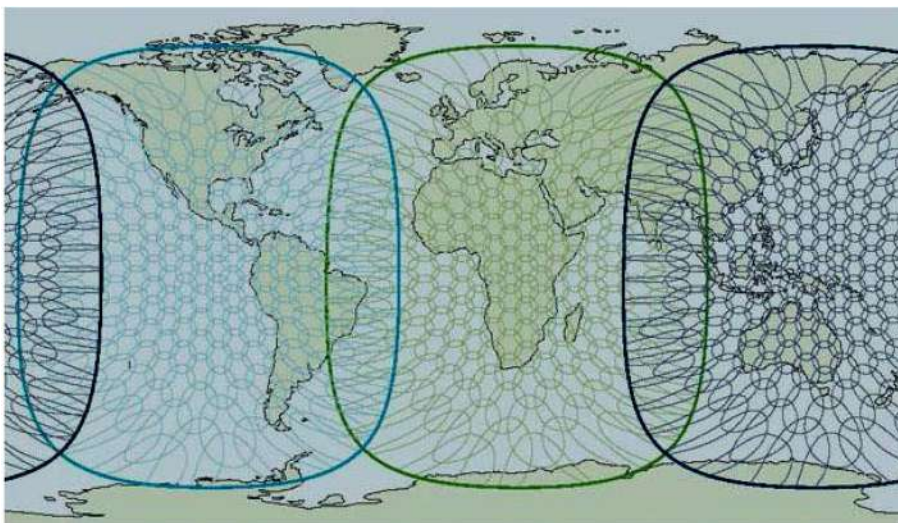


Рис. 3 Локальные пятна, формируемые направленными узкими зональными лучами спутниками ИНМАРСАТ-4

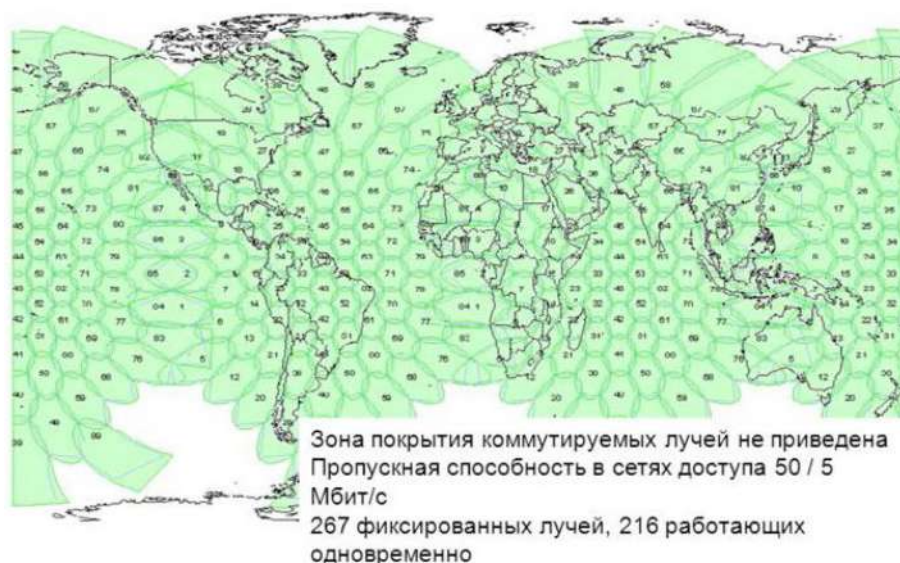


Рис. 4 Зона покрытия поверхности Земли тремя спутниками ИНМАРСАТ-5, работающими в Ка диапазоне частот

В представленной таблице приведены характеристики системы ИНМАРСАТ для пяти поколений ретрансляционных спутников.

Таблица

Характеристики спутников, рабочих зон, времени работы различных поколений системы ИНМАРСАТ

Наименование поколения спутников ИНМАРСАТ	Год запуска поколения спутников	Число спутников в орбит. группировке	Наименование диапазона частот связи	Вид рабочей зоны	Типы судовых терминалов, эксплуатируемых в рабочих зонах	Годы начала/конца эксплуатации терминала
ИНМАРСАТ-1	1982	4	L	Глобальная	ИНМАРСАТ-A ИНМАРСАТ-B ИНМАРСАТ-M ИНМАРСАТ-E ИНМАРСАТ-miniM ИНМАРСАТ-D+ ИНМАРСАТ-C ИНМАРСАТ-miniC	1982/2007 1999/2016 1993/2014 1996/2006 1997/2016 1998/2014 1991 2002
ИНМАРСАТ-2	1992	4	L	Глобальная	Те же, что и в ИНМАРСАТ-1	
ИНМАРСАТ-3	1998	4	L	Глобальная	Те же, что и в ИНМАРСАТ-2	
				Региональная	Fleet-33 Fleet-55 Fleet-77	2003 2003 2002
ИНМАРСАТ-4	2008	3	L	Глобальная	Те же, что и в ИНМАРСАТ-3	
				Региональная	Те же, что и в ИНМАРСАТ-3	
				Локальная	ИНМАРСАТ-M4 GAN BGAN FB-250 FB-500	1999/2015 2002 2009 2009
ИНМАРСАТ-5 (ИНМАРСАТ-GLOBAL XPRESS)	2014	3	K_a	Региональная	Типы терминалов не опубликованы	

По результатам эксплуатации спутниковой системы ИНМАРСАТ-5 будет принято решение о перспективности использования в дальнейшем Ка диапазона частот для судовой связи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Переход в пятом поколении спутниковых станций ИНМАРСАТ-5 с L на Ка диапазон частот связи позволил при одинаковых апертурах антенн увеличить скорости передачи/приема данных судовыми терминалами на два порядка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Судовая радиосвязь. Справочник по организации и радиооборудованию ГМССБ В.Ю.Резников, Ю.М.Устинов, А.А.Дуров и др. Под общей ред. Ю.М.Устинова. – СПб.: Судостроение. 2002. – 480 с.
2. Ильин А.А., Маринич А.Н., Припотнук А.В., Устинов Ю.М. Цифровые терминалы спутниковых систем связи. Справочное издание. Под общей ред. Устинова Ю.М. – СПб.: Деан, 2005. – 192 с
3. <http://www.furuno.ru/> Общий каталог продукции для прогулочных судов 2009 г. FURUNO.
4. <http://www.marsat.ru/>
5. Кулинич А.И., Маринич А.Н., Припотнук А.В., Устинов Ю.М. Основные направления модернизации морской ВЧ радиосвязи. Сборник НТС ПМРС № 35, 2012, С-П , с. 136-141.
6. Кулинич А.И., Маринич А.Н., Припотнук А.В., Устинов Ю.М. Мониторинг судов на северных широтах с помощью терминалов ИНМАРСАТ-С и ИНМАРСАТ-D+ путем использования модифицированной квазистационарной орбиты системы связи ИНМАРСАТ. Спутниковые технологии и бизнес, Москва декабрь 2013, стр 8-12
7. Маринич А.Н., Припотнук А.В., Устинов Ю.М. Передача и прием данных широкополосными терминалами Fleet77, FB250, FB500 в активированных зональных лучах ИНМАРСАТ-4. Спутники технологии и бизнес, Москва, май 2014, стр. 42-44.
8. Маринич А.Н., Припотнук А.В., Устинов Ю.М. Обзор мобильных спутниковых телефонов для персональной связи на море. «CONNECT» №12 2014, 80-83
9. Устинов Ю.М., Припотнук А.В., Кулинич А.И. Анализ современного состояния судовых средств связи и спасания //Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2016. – №. 2 (36). С. 166-174.
10. Кулинич А.И., Маринич А.Н., Устинов Ю.М. Простейшие судовые терминалы IsatData Pro и IsatPhone Pro для передачи данных и телефонии по системе Инмарсат // Морское образование: традиции, реалии и перспективы. материалы научно-практической конференции. С-Пб: ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова. 2015. С. 127-131.

REFERENCES

1. Reznikov V.Ju., Ustinov Ju.M., Durov A.A.. Sudovaja radiosvjaz'. Spravochnik po organizacii i radiooborudovaniju GMSSB. [Ship-radio communication. Radio equipment GMSSB reference book] Edited by Ju.M. Ustinov. St. Petersburg. Sudostroenie Publ. 2002. 480 p. (In Russian)
2. Il'in A.A., Marinich A.N., Pripotnjuk A.V., Ustinov Ju.M.. Cifrovye terminaly sputnikovyh sistem svjazi. Spravochnoe izdanie. [Digital satellite communication system terminal] Edited by Ustinov Ju.M. St. Petersburg. Dean Publ., 2005. 192 p. (In Russian)
3. Obshhij katalog produkcii dlja progulocnyh sudov. [General catalogue of products for cruise ships]. Available at: <http://www.furuno.ru/> 2009 g. FURUNO.
4. <http://www.marsat.ru/>
5. Kulnich A.I., Marinich A.N., Pripotnjuk A.V., Ustinov Ju.M.. Osnovnye napravlenija modernizacii morskoy VCh radiosvjazi. [Main directions of marine HF-radio communication modernization]. Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudokhodstva [Research Bulletin by Russian maritime register of shipping]. St. Petersburg, N 35, 2012, pp. 136-141. (In Russian)
6. Kulnich A.I. , Marinich A.N., Pripotnjuk A.V., Ustinov Ju.M.. Monitoring sudov na severnyh shirotah s pomoshh'ju terminalov INMARSAT-S i INMARSAT-D+ putjom ispol'zovanija modifirovannoj kvazistacionarnoj orbity sistemy svjazi INMARSAT [Ship monitoring at northern latitude with the help of INMARSAT-S and INMARSAT-D+ terminals with use of the quasi-stationary modification orbit of the communication system]. Sputnikovye tehnologii i biznes [Satellite technologies and business]. Moscow. December 2013, pp. 8-12. (In Russian)
7. Marinich A.N., Pripotnjuk A.V., Ustinov Ju.M.. Peredacha i priem dannyh širokopolosnymi terminalami Fleet77, FB250, FB500 v aktivirovannyh zonal'nyh luchah INMARSAT-4 [Data transmission and reception by the Fleet77, FB250, FB500 wide-band terminals in activated area rays]. Sputnikovye tehnologii i biznes [Satellite technologies and business]. Moscow. May 2014, pp. 42-44.
8. Marinich A.N., Pripotnjuk A.V., Ustinov Ju.M.. Obzor mobil'nyh sputnikovyh telefonov dlja personal'noj svjazi na more [Mobile satellite phones review for personal communication]. "CONNECT" Publ. N 12, 2014, pp. 80-83. (In Russian)
9. Ustinov Ju. M., Pripotnjuk A. V., Kulnich A. I. Analiz sovremen-nogo sostojanija sudovyh sredstv svjazi i spasanija [Up-to-date condition analysis of marine communication facilities and survival equipment]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova [Bulletin of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping]. 2016, N 2 (36), pp. 166-174. (In Russian)
10. Kulnich A.I., Marinich A.N., Ustinov Ju.M.. Prostejshie sudovye terminaly IsatData Pro i IsatPhone Pro dlja peredachi dannyh i telefonii po sisteme Inmarsat [Elementary ship terminals IsatData Pro and IsatPhone Pro for data transmission and telephony using the system Inmarsat]. Morskoe obrazovanie: tradicii, realii i perspektivy. Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii [Marine education: traditions, reality and perspectives. Proc. of theoretical and practical conference]. St. Petersburg. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2015, pp. 127-131. (In Russian)



НЕФТЕГАЗОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.64 (204.1)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ СВОБОДНЫХ ПРОЛЕТОВ МОРСКИХ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

А.С. Авдонкин, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,
Я.М. Любомиров, ФГУП «Крыловский государственный научный центр» Санкт-Петербург, Россия
Б.А. Ярцев, д.т.н, ФГУП «Крыловский государственный научный центр» Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты численного исследования влияния величин скоростей постоянного течения и волнового движения частиц жидкости, высоты регулярной волны, отстояния от морского дна и заглубления в траншею на значения максимально допустимой длины свободного пролета морского подводного трубопровода, выполненного с целью верификации используемых в действующих инженерных методиках эмпирических поправочных коэффициентов. Показано, что моделирование гидроупругого взаимодействия трубы и потока должно выполняться на основе совместного решения задач турбулентного обтекания жидкости вокруг трубопровода и упругого отклика конструкции. Установлено, что в случае приложения единичных воздействий на морской подводный трубопровод эмпирические методики достаточно надежно прогнозируют максимально допустимую длину свободного пролета, в то время как приложение совокупности двух или более воздействий сопровождается снижением точности прогноза.

Ключевые слова: морские подводные трубопроводы, свободные пролеты трубопроводов, воздействие течений и волнений, моделирование гидроупругого взаимодействия

COMPARATIVE ANALYSIS OF RELIABILITY METHODS FOR DETERMINATION OF THE MAXIMUM LENGTH OF FREE SPANS OF SUBSEA PIPELINES

A.S. Avdonkin, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg
Ya.M. Lyubomirov, FSUE "Krylov State Research Centre", St. Petersburg
B.A. Yartsev, DSc, FSUE "Krylov State Research Centre", St. Petersburg

The article presents the numerical analysis results of the influences of the constant current and liquid particles wave motion speed values, regular wave height, the distance from the sea bottom and the trench burying on the values of the maximum length of a subsea pipeline free span, made with the verification purpose of the empirical correcting factors used in the existing engineering methods. It is shown that the modeling of the hydroelastic interaction between a pipe and the flow must be carried out on the basis of the combined task solution of the turbulent liquid flow around a pipeline and the construction's elastic response. It's been found that under the condition of a single disturbance experienced by a subsea pipeline the empirical methods prove to reliably predict the maximum length of a free span, whereas a combination of two or more disturbing factors affects the prediction accuracy.

Keywords: subsea pipelines, pipeline free spans, the impact sea currents and waves, modeling hydroelastic interaction

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является верификация инженерных методик определения максимально допустимой длины свободного пролета морского подводного трубопровода $L_{\max}$, находящегося под воздействием гидродинамических нагрузок, порождаемых течением и волнением [1-5]. Здесь и в дальнейшем под $L_{\max}$ понимается пороговая длина свободного пролета трубы, превышение которой сопровождается возникновением автоколебаний. Верификация выполнялась путем сопоставления значений $L_{\max}$, найденных в соответствии с рекомендациями [1-5], с аналогичными величинами, полученными в результате численного моделирования гидроупругого взаимодействия подводного трубопровода с набегающим потоком жидкости.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В общем случае $L_{\max}$ является функцией нескольких переменных: $L_{\max} = L_{\max}(V, v, h, e, d, H)$, где V – скорость постоянного течения ($\partial V / \partial t = 0$), v – скорость движения частиц жидкости, индуцированная волнением на поверхности моря ($\partial v / \partial t \neq 0$); h – глубина залегания трубопровода; e – отстояние свободного пролета трубы от морского дна (дна траншеи), d – глубина траншеи относительно уровня морского дна; H – высота регулярной волны; t – время. В инженерных методиках влияние перечисленных факторов на величину свободного пролета трубы учитываются путем введения поправочных коэффициентов, определяемых из эксперимента. В отличие от эмпирического подхода численный эксперимент опирается на математическое моделирование физического процесса гидроупругого взаимодействия свободного пролета трубы и потока. Поэтому для численного исследования изменения функции $L_{\max}$ в зависимости от значений переменных V, v, h, e, d, H были выбраны задачи, позволяющие оценить влияние:

- отстояния находящейся под воздействием стационарного течения ($V = \text{const}$) трубы от морского дна (e) при $v = 0, h = \text{const}, d = 0, H = 0$;
- заглубления находящейся под воздействием стационарного течения ($V = \text{const}$) трубы в траншею (d) при $v = 0, h = \text{const}, e = \text{const}, H = 0$;
- изменения скорости движения частиц жидкости, индуцированной волнением на поверхности моря (v), вокруг залегающей на постоянной глубине трубы ($h = \text{const}$) и различной высоте регулярной волны (H) при $V = 0, e = \text{const}, d = \text{const}$;
- стационарного течения ($V = \text{const}$) и волнения

(v, H) при фиксированной глубине залегания трубы ($h = \text{const}$) и $e = \text{const}, d = \text{const}$.

2. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Численное моделирование гидроупругого взаимодействия трубы и потока обеспечивается с учетом связи гидродинамической и упругой задач. Характер этой связи определяется на основе методов математического моделирования, численно реализованных в пакете прикладных программ ANSYS.

Анализ реакции свободного пролета подводного трубопровода, находящегося под воздействием нагрузок, порождаемых течением и волнением, выполнялся на основе использования:

- моделей силового воздействия (FM), применяемых в случае доминирования в совокупности воздействий на свободный пролет гидродинамических сил, не приводящих к возникновению резонансных колебаний;
- моделей динамического отклика (RM), применяемых в случае возникновения поперечных колебаний свободного пролета подводного трубопровода, порождаемых резонансными явлениями из-за схода вихрей;
- численного моделирования гидроупругого взаимодействия (FSI), применяемого при рассмотрении ситуаций, требующих учета множества факторов, влияющих на упругий отклик свободного пролета подводного трубопровода.

Численное моделирование гидроупругого взаимодействия трубы и потока (FSI – Fluid Structure Iteration) основано на совместном решении задач турбулентного обтекания жидкости вокруг трубопровода с определением действующих сил и упругого отклика конструкции для учета обратного влияния на окружающий поток. Применение численного моделирования гидроупругого взаимодействия предполагает использование значительных вычислительных ресурсов, но дает более информативное описание отклика свободного пролета подводного трубопровода.

Численная модель учитывала геометрию свободного пролета, граничные условия и характер набегающего на свободный пролет трубы течения (рис. 1). В результате численного моделирования определялись параметры статического и динамического отклика конструкции. Динамический расчет поперечных колебаний трубопровода выполнялся путем решения нестационарной задачи, в качестве начальных значений которой использовались результаты решения статической задачи. Особое внимание уделялось выбору временного интервала моделирования с целью гарантированного достижения

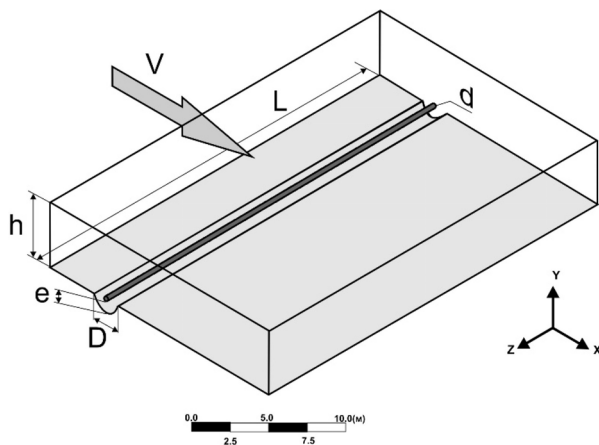


Рис. 1 Пример геометрии моделируемой области для численного моделирования, где: d – диаметр трубы, D – размер размыва, e – величина остояния трубы от морского дна (дна траншеи), h – глубина залегания трубопровода, V – скорость набегающего потока, L – длина свободного пролета.

установившегося динамического процесса по завершении всех переходных процессов. Внутреннее и внешнее давления считались статическими нагрузками. Нагрузки, порождаемые течением и волнением, рассматривались как динамические. Моделирование волновых процессов производилось путем задания нестационарных граничных условий на входящей и выходящей поверхностях, которые в первом приближении выполнялись на основе линейной теории волн. Считалось, что скорость течения постоянна и направлена по нормали к входящей поверхности расчетного объема. Моделирование обтекания трубопровода выполнялось на основе решения уравнений Рейнольдса с использованием соответствующей модели турбулентности. На поверхностях трубы и морского дна удовлетворялись условия прилипания потока. Влияние шероховатости поверхности трубы учитывалось моделью турбулентности.

В начальный момент времени t_0 решалась гидродинамическая задача нестационарного течения в прилегающей к подводному трубопроводу расчетной области. Из решения находилось распределение внешних сил по поверхности трубы, действующих на свободный пролет в момент времени t_0 . Полученное распределение сил передавалось на решение упругой задачи для определения напряженно-деформированного состояния свободного пролета трубы в момент времени t_0 . Из решения упругой задачи находились новые координаты поверхности трубопровода, используемые в качестве начальных значений для решения гидродинамической задачи. В процессе решения гидродинамической

задачи происходила деформация сетки, описывающей изменения гидродинамической расчетной области, соответствующей уточненной геометрии свободного пролета трубы. При этом формировалась новая расчетная область, реализуемая на следующем временном шаге t_1 . Данная процедура реализовывалась на всех последующих временных шагах решения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

При проведении численных исследований всех верификационных задач рассматривался прямолинейный участок свободного пролета подводного трубопровода, подвергающийся воздействию течения, направленного перпендикулярно его оси. Считалось, что начальные осевые усилия в трубе отсутствуют. Граничные условия на концах – защемление. Геометрия рассматриваемой пространственной задачи представлялась прямоугольной областью с заданием на входящей поверхности постоянной скорости течения ($V = \text{const}$). На выходящей поверхности выполнялись свободные граничные условия.

Верификация эмпирических поправочных коэффициентов, учитывающих влияние исследуемых факторов на величину L_{max} , осуществлялась путем анализа расхождений значений максимально допустимой длины свободного пролета, вычисленной по результатам численного моделирования гидроупругого взаимодействия трубы и потока, которые, в соответствии с рекомендациями [2, 4], вычислялись по формулам:

$$\Delta_{PMPC} = \left(\frac{L_{\text{ras}}^{\text{max}} - L_{PMPC}^{\text{max}}}{L_{\text{ras}}^{\text{max}}} \right) 100\%, \quad (1)$$

$$\Delta_{DNV} = \left(\frac{L_{\text{ras}}^{\text{max}} - L_{DNV}^{\text{max}}}{L_{\text{ras}}^{\text{max}}} \right) 100\%, \quad (2)$$

где Δ_{PMPC} – расхождения значений максимально допустимой длины свободного пролета, вычисленных по результатам численного моделирования гидроупругого взаимодействия трубы с потоком и в соответствии с рекомендациями [4];

Δ_{DNV} – расхождения значений максимально допустимой длины свободного пролета, вычисленных по результатам численного моделирования гидроупругого взаимодействия трубы с потоком и в соответствии с рекомендациями [2];

L_{PMPC}^{max} , L_{DNV}^{max} , $L_{\text{ras}}^{\text{max}}$ – соответственно максимальные длины свободного пролета, вычисленные в соответствии с рекомендациями [4], [2] и по результатам численного моделирования гидроупругого взаимодействия трубы и потока.

3.1. Сопоставление результатов расчета влияния величины отстояния от морского дна свободного пролета незаглубленной трубы на значения максимально допустимой длины приведено в табл. 1.

Таблица 1
Сопоставление результатов расчета влияния величины отстояния от морского дна свободного пролета незаглубленной трубы на значения максимально допустимой длины

e , м	L_{PMPS}^{max} , м	L_{DNIS}^{max} , м	L_{ras}^{max} , м	Δ_{PMPC} , %	Δ_{DNIS} , %
0,05	45,6	42,4	52	12,3	18,5
0,25	43,6	40,5	48	9,2	15,6
0,50	37,4	34,8	44	14,5	20,9

Анализ полученных результатов позволяет отметить, что, вне зависимости от использованного алгоритма расчета, увеличение величины e сопровождается уменьшением максимально допустимой длины свободного пролета трубопровода. Применение инженерных методик приводит к меньшим, по сравнению с получаемыми в процессе численного моделирования, значениям L_{max} . К наиболее консервативной оценке L_{max} приводит использование рекомендаций [2].

3.2. Сопоставление результатов расчета влияния заглубления находящейся под воздействием стационарного течения трубы в траншею $d - e$ на значения максимально допустимой длины L_{max} приведено в табл. 2.

Таблица 2
Сопоставление результатов расчета влияния заглубления находящейся под воздействием стационарного течения трубы в траншею на значения максимально допустимой длины

e , м	d , м	L_{PMPS}^{max} , м	L_{DNIS}^{max} , м	L_{ras}^{max} , м	Δ_{PMPC} , %	Δ_{DNIS} , %
0,75	0,75	52,4	48,7	50	4,8	2,6
0,70	0,95	58,7	44,5	55	6,7	19,1
1,2	0,95	47,8	44,5	44	3,8	1,1

При проведении расчетов максимальная глубина траншеи принималась равной $d_{max} = 0,95$ м. Варианты более глубокого погружения трубы в траншею не рассматривались, так как в процессе деформирования величина прогиба возрастала и труба приходила в соприкосновение со стенками траншеи, что приводило к аварийной остановке численного расчета.

Совместный анализ приведенных в табл. 2 результатов позволяет отметить незначительность расхождений значений максимально допустимой длины свободного пролета, вычисленных различными методами. Вместе с тем наиболее консервативная оценка L_{max} получена в соответствии с рекомендациями [2]. Длина свободного пролета заглубленного в траншею трубопровода несколько увеличивается по сравнению с незаглубленным трубопроводом. Это свидетельствует о сложном влиянии траншеи на характер обтекания трубы потоком воды, что иллюстрирует рис. 2.

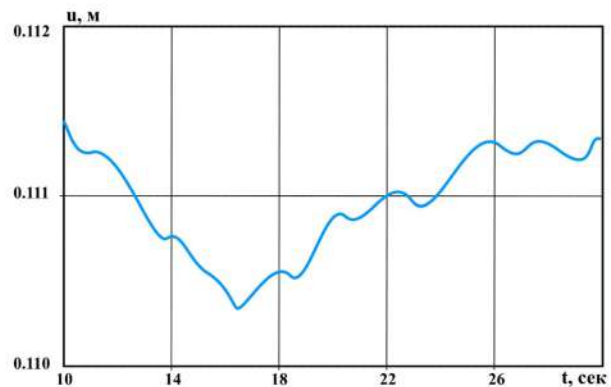


Рис. 2 Перемещения свободного пролета подводного трубопровода в траншею $e = 0,75$ м, $d = 0,75$ м при возникновении автоколебаний. Скорость постоянного придонного течения $V = 1$ м/с

3.3. Сопоставление результатов расчета скорости движения частиц жидкости, индуцированной волнением на поверхности моря v , вокруг залегающей на постоянной глубине трубы и различной высоте регулярной волны H приведено в табл. 3.

В табл. 3 используются следующие обозначения:

$\tilde{\Delta}_{PMPC} = \frac{(V_{ras} - V_{PMPC})}{V_{ras}} \times 100\%$ – расхождения значений скорости придонного течения, вычисленных по результатам численного моделирования гидроупругого взаимодействия трубы с потоком и в соответствии с рекомендациями [4];

V_{PMPC} , V_{ras} – соответственно скорости придонного течения, вычисленные в соответствии с рекомендациями [4] и по результатам численного моделирования гидроупругого взаимодействия трубы и потока.

Таблица 3
Сопоставление результатов расчета скорости движения частиц жидкости, индуцированной волнением на поверхности моря v , вокруг залегающей на постоянной глубине трубы и различной высоте регулярной волны H

H , м	V_{PMPC} , м/с	V_{ras} , м/с	Δ_{PMPC}
1	0,43	0,425	1,2
3	1,32	1,279	3,1
5	2,11	2,132	1,0

В процессе численного моделирования рассматривалось распространение регулярной волны, характеристики которой описываются линейной теорией. Основным верифицируемым параметром была величина скорости придонного течения V , зависящая от высоты волны на поверхности H . В соответствии с приведенными в [4] таблицами значений скорости придонного течения в зависи-

мости от глубины h , периода T и высоты H волны были приняты следующие исходные данные для проведения расчетов: $h = 10$ м, $T = 9$ с, $H = 1$ м, 3 м, 5 м.

Сопоставление приведенных в табл. 3 скоростей придонного течения V_{PMPC} и V_{ras} свидетельствует о прекрасном согласовании результатов численного моделирования волнового процесса в придонной области с результатами, полученными в соответствии с рекомендациями [4].

3.4. Сопоставление результатов совместного влияния стационарного течения и волнения при фиксированной глубине залегания трубы на значения максимально допустимой длины свободного пролета незаглубленной трубы приведено в табл. 4.

Таблица 4

Сопоставление результатов расчета совместного влияния стационарного течения и волнения на значения максимально допустимой длины свободного пролета незаглубленной трубы

e , м	d , м	L_{PMPS}^{max} , м	L_{DNIS}^{max} , м	L_{ras}^{max} , м	Δ_{PMPS} , %	Δ_{DNIS} , %
1,2	0,95	30,3	27,5	25	21,2	10,0

При проведении расчетов скорость постоянного течения принималась равной $V = 1$ м/с при следующих значениях параметров волнения на поверхности: высота волны $H = 5$ м, длина волны $\lambda = 91$ м, период волны $T = 9$ с, глубина моря $h = 10$ м. Придонная скорость движения частиц жидкости, индуцированная волнением на поверхности моря, составляла $v = 2,11$ м/с. Таким образом, суммарная скорость $V + v = 3,11$ м/с.

Геометрия расчетной области для данной задачи приведена на рис. 3.

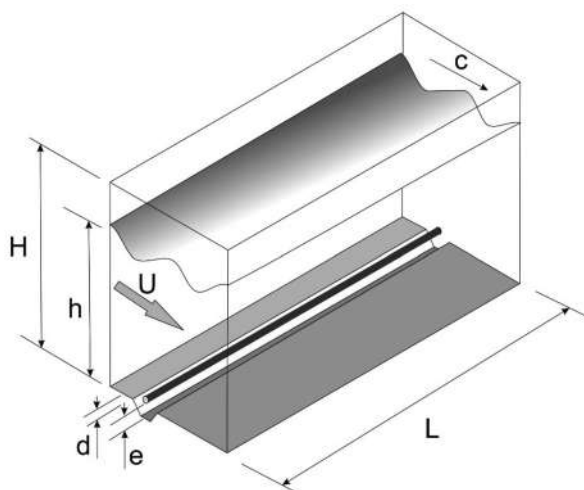
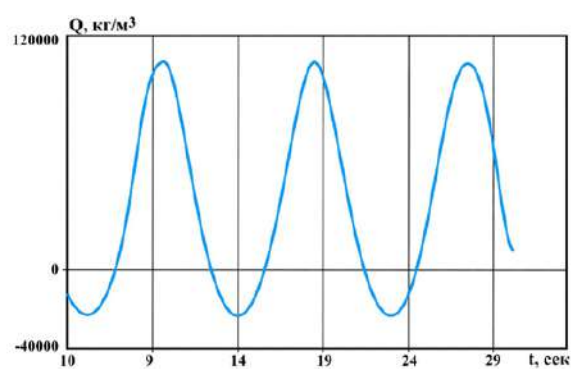


Рис. 3 Схема расчетной области. $H = 10$ м – высота расчетной области, $L = 25$ м – длина свободного пролета подводного трубопровода, $h = 10$ м – глубина залегания трубопровода от поверхности моря, c – скорость и направление движения волнения, $V = 1$ м/с – скорость и направление постоянного придонного течения, $d = 0,95$ м – глубина траншеи, $e = 1,2$ м – расстояние трубы от дна траншеи

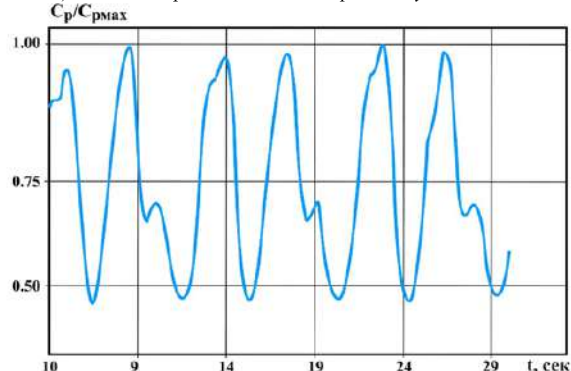
Сопоставление представленных в табл. 4 результатов позволяет отметить, что использование рекомендаций [2] для нахождения величин предпочтительнее использования рекомендаций [4], т. к. первые позволяют получать более консервативные оценки максимально допустимой длины свободного пролета морского подводного трубопровода. Однако даже длина свободного пролета, вычисленная в соответствии с рекомендациями [2], оказывается недостаточно малой по сравнению с длиной, определенной по результатам численного моделирования. Поэтому взаимодействие подводного трубопровода с набегающим потоком необходимо рассматривать более детально.

Переходя к более детальному исследованию совместного влияния стационарного течения и волнения на значения максимально допустимой длины свободного пролета трубопровода, предварительно отметим, что наличие свободной поверхности моря в расчетной области предполагает наличие в расчетной области двух фаз (вода и воздух). Таким образом, совокупное течение является двухфазным. Введение гипотезы об отсутствии перемешивания двух фаз позволяет предположить существование свободной поверхности на их границе, по которой распространяется регулярная волна.

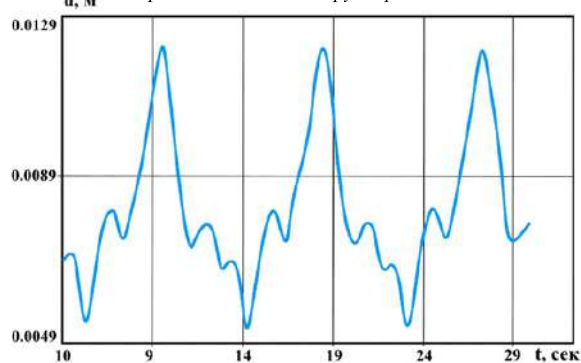
Результаты расчета приведены на рис. 4. Из анализа результатов, представленных на рис. 4а, следует, что на трубопровод набегают регулярный периодический поток, возбуждающий периодические колебания действующей на трубу подъемной силы (рис. 4б). Частота колебаний подъемной силы приблизительно в 2 раза выше частоты колебаний скорости набегающего потока. Это связано с тем, что индуцированное волнением направление движения частиц жидкости на поверхности моря носит знакопеременный характер. Кроме того, в области минимальных отрицательных скоростей наблюдаются пульсации подъемной силы, характерные для начальной стадии поперечных вибраций и порождающие сложный характер перемещений оси трубы (рис. 4в). Максимальные перемещения обусловлены волновыми процессами на поверхности, а более высокочастотные кратковременные колебания вызваны началом развития поперечных колебаний. Представленный сложный характер движения свободного пролета трубопровода, полученный в результате численного моделирования, объясняет предсказание более короткой длины свободного пролета по сравнению с длиной, получаемой по рекомендациям [2, 4].



а) Массовый расход на входе в расчетную область



б) Коэффициент подъемной силы, действующий на свободный пролет подводного трубопровода



в) Перемещения свободного пролета подводного трубопровода при возникновении автоколебаний

Рис. 4 Изменение динамических характеристик свободного пролета трубопровода во времени

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали, что в случае моновоздействия порожденных течением и волнением

нагрузок на морской подводный трубопровод рекомендованные правилами DNV и PMPC [2, 4] эмпирические методики позволяют достаточно надежно прогнозировать максимально допустимую длину свободного пролета. Однако ситуация существенно осложняется при приложении совокупности двух или более воздействий, поскольку автоколебания свободного пролета трубы относятся к существенно нелинейным процессам, для которых суперпозиция внешних воздействий несправедлива. Таким образом, необходимо дальнейшее проведение исследований по уточнению и развитию практических методов расчета свободных пролетов морских подводных трубопроводов, находящихся под воздействием совокупности нескольких воздействий, инициированных течением и волнением.

На основании проведенных исследований требования PMPC к величине допустимых свободных пролетов подводных трубопроводов [5] будут откорректированы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Recommended Practice DNV-RP-C205 «Environmental Conditions and Environmental Loads», 2010.
2. Recommended Practice DNV-RP-F105 Free Spanning Pipelines, 2006.
3. Recommended Practice DNV-RP-F109 On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines, 2010.
4. Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов, PMPC, 2016.
5. Руководство по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов, PMPC, 2016.

REFERENCES

1. Recommended Practice DNV-RP-C205 «Environmental Conditions and Environmental Loads». 2010.
2. Recommended Practice DNV-RP-F105 Free Spanning Pipelines. 2006.
3. Recommended Practice DNV-RP-F109 On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines. 2010.
4. Rules for the Classification and Construction of Subsea Pipelines. Russian maritime register of shipping, 2016. (In Russian)
5. Guidelines on Technical Supervision during Construction and Service of Subsea Pipelines. Russian maritime register of shipping, 2016. (In Russian)

УДК 62.529

ТУРЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УДЕРЖАНИЯ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ПЛАТФОРМ СУДОВОГО ТИПА ДЛЯ ЗАМЕРЗАЮЩИХ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ

Ю.А. Харченко, д-р. техн. наук., проф., Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, e-mail: doc.2004.8@yandex.ru;

Р.М. Тер-Саркисов, д-р. техн. наук., проф., ИПНГ РАН, Москва, e-mail: RUDOLF_ts@mail.ru

В.Н. Бартенов, ФАУ "Российский морской регистра судоходства", Санкт-Петербург, e-mail: bartenev.vn@rs-class.org

В статье рассматриваются турельные системы удержания морских плавучих нефтегазодобывающих платформ судового типа для обустройства шельфовых месторождений, в том числе в замерзающих акваториях. Подробно описан состав конструкции турельных систем удержания и функции каждого из их основных элементов. Сделан вывод о целесообразности применения ледостойких нефтегазодобывающих платформ судового типа с турельными системами удержания в замерзающих морских акваториях.

На основании анализа отечественных перспективных разработок и нормативных документов иностранных классификационных обществ предложены основные принципиальные положения технических требований к турельным системам удержания, которые могут быть включены в нормативные документы Российского морского регистра судоходства.

Ключевые слова: морские плавучие нефтегазодобывающие платформы судового типа, турель, вертлюг, якорная система удержания, нормативные требования

TURRET MOORING SYSTEMS OF SHIP-SHAPED FLOATING OIL AND GAS PRODUCTION UNITS FOR FREEZING OFFSHORE SEA AREAS

Yu.A. Kharchenko, DSc, professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, e-mail: doc.2004.8@yandex.ru

R.M. Ter-Sarkisov, DSc, professor, Oil and Gas Research Institute RAS (OGRI RAS), Moscow, e-mail: RUDOLF_ts@mail.ru

V.N. Bartenev, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: bartenev.vn@rs-class.org

The article considers turret containment systems for offshore floating oil and gas ship type platforms built for the development of offshore fields, including those in freezing offshore sea areas, giving the detailed description of the turret containment systems design and the function of its fundamental elements. The conclusion is made about the application expediency of ice-resistant ship-type oil and gas production platforms with turret containment systems in the freezing offshore sea areas.

Based on the analysis of the prospective development and the international classification societies' regulations the basic principle provisions of the technical requirements for the turret restraint systems are proposed that can be included in the normative documents of Russian Maritime Register of Shipping.

Keywords: offshore floating ship-shaped oil and gas production units, turret, swivel, anchor restraint system; regulatory requirements

Плавучие нефтегазодобывающие комплексы судового типа (ПНК СТ), по международной классификации FPSO (или FSO/FPU), являются самыми распространенными в мире типом плавучих технологических платформ, которые используются при обустройстве морских нефтегазовых месторождений. Широкие возможности применения FPSO как на мелководных, так и на глубоководных месторождениях обусловили разнообразие схем их якорных систем удержания (швартовки).

Якорная система удержания FPSO может быть выполнена в виде локальных блоков якорных растяжек - "Spread mooring system" (распределен-

ная система швартовки), размещенных побортно по оконечностям корпуса и относительно неподвижно раскрепляющих FPSO на месторождении с постоянной ориентацией в одном направлении, которое выбирается с учетом минимального ветрового и волнового воздействия на платформу. При этом продуктовые райзеры располагаются по бортам FPSO.

Такая схема якорной системы удержания отличается простотой своей конструкции и малыми затратами на установку FPSO на месторождении, но не обеспечивает безопасность FPSO в районах с сильными штормами и ветрами переменного

направления. В этом случае FPSO раскрепляются с помощью систем удержания башенного гравитационного или турельного типа.

Башенная система удержания гравитационного типа ("Tower Soft Yoke mooring system") не содержит якорной системы как таковой – сама "башня", закрепленная на грунте, является удерживающим FPSO элементом. В связи с тем, что высота основания (высота башни) такой системы ограничена, FPSO с такими системами удержания устанавливаются на месторождениях с глубинами моря, как правило, до 50 м.

Якорные системы удержания турельного типа, которые будут рассматриваться далее, могут быть как внешними, так и внутренними, размещаемыми внутри корпуса FPSO (рис. 1). Они позволяют устанавливать FPSO на глубинах от 30 м до 500 м.

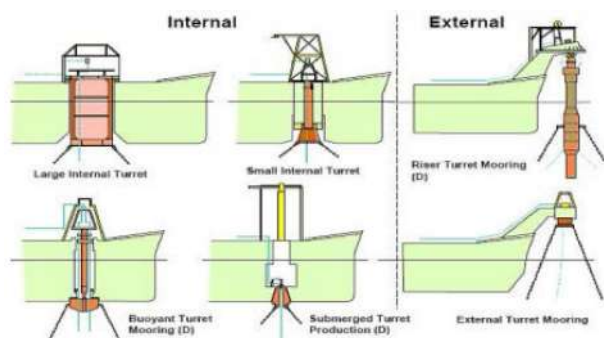


Рис. 1 Разновидности турельных якорных систем удержания

Благодаря турели FPSO может пассивно вращаться вокруг оси турели на 360° под воздействием сил ветра, волнения и течения, занимая такое положение, которое соответствует минимальной равнодействующей от этих сил, благодаря чему минимизируются нагрузки на якорную систему удержания, уменьшаются величины крена и дифферента FPSO, что благоприятно сказывается на работе технологического комплекса. При помощи винторулевого комплекса FPSO может занимать любое направление по отношению к ветру, течению или направлению волн, например, при отгрузке продукции на танкер тандемным способом, что существенно повышает безопасность этой часто выполняемой периодической операции.

С учетом того, что в российском секторе арктических и дальневосточных морей (Баренцево, Охотское) глубины не превышают 500 м, наибольший интерес при освоении месторождений в этих районах будут представлять именно внутренние отсоединяемые турельные системы удержания (ТСУ) – см. рис. 1, которые позволяют в случае сложной ледовой обстановки разъединять ПНК СТ с системой добычных райзеров. Поэтому рассмотрим

более подробно особенности их конструкции на примере проекта плавучего нефтегазодобывающего комплекса судового типа (ПНК СТ) для установки на Штокмановском месторождении в Баренцевом море с техническими характеристиками, указанными в табл. 1.

Таблица 1
Главные размеры и вместимость ПНК СТ
для Штокмановского месторождения

Длина	320 м
Ширина на уровне главной палубы	63 м
Высота борта	27 м
Осадка на уровне КВЛ	19 м
Водоизмещение при осадке 19 м	252771 т
Вместимость основных резервуаров:	
Хранилище конденсата	80137 м ³
Емкости водяного балласта	98200 м ³
Резервуары хранения МЭГ	33800 м ³
Резервуары дизтоплива	18600 м ³
Вес корпуса (без турели) в сухом состоянии с учетом веса жилой рубки, отгрузочного устройства, эвакуационного трапа, систем и оборудования корпуса, без учета веса технологического комплекса и его оборудования, размещаемого на палубе	92300 т
Вес технологического комплекса верхних строений	47646 т
Ледовый класс	Arc 5
Класс системы динамического позиционирования	DP-2
Климатическое исполнение	Winterization – 40

В состав конструкции турельной системы удержания (ТСУ) входят:

- турель;
- буй системы удержания райзеров (БСУР);
- кожух ТСУ;
- подшипники ТСУ;
- поворотный стол;
- конструкция обслуживания поворотного стола;
- ледовый пояс;
- вертлюжный блок;
- система удержания;
- якорные фундаменты.

В целом, турельная система удержания предназначена для выполнения следующих функций:

- подачи продукции пласта от подводного добычного комплекса (ПДК) к технологическому комплексу ПНК СТ;
- подачи продукции технологического комплекса ПНК СТ к морскому межпромысловому трубопроводу;
- передачи энергии, химических реагентов и сигналов управления подводными системами и системами безопасности.
- плановой и экстренной отстыковки платформы от райзеров, оптоволоконных кабелей, шлангокабелей и оттяжек якорной системы позиционирования (плановая отстыковка платформы не

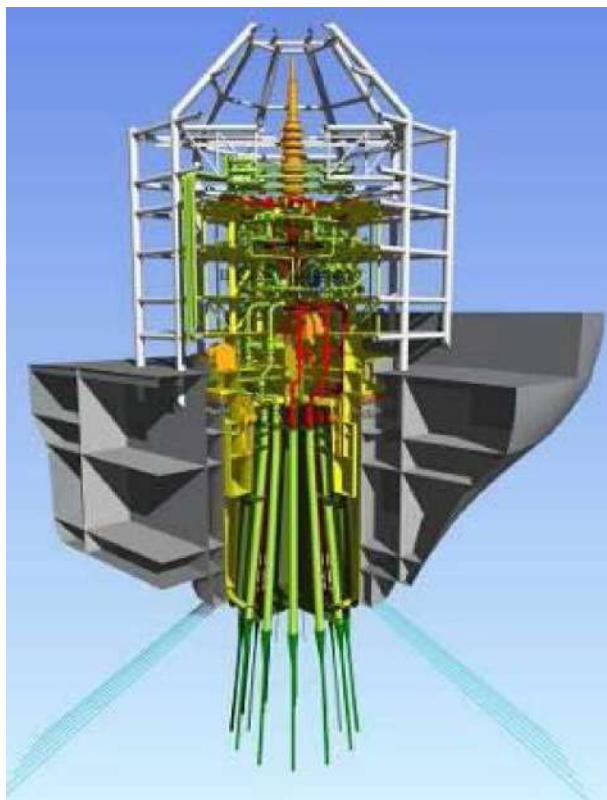


Рис. 2 Турель в сборе с отсоединяемым бум

должна превышать 6 часов, экстренная – не более 15 минут);

- последующего присоединения райзеров, оптоволоконных кабелей, шлангокабелей и оттяжек якорной системы к ПНК СТ;
- пассивного позиционирования ПНК СТ под воздействием внешних нагрузок;
- обеспечения подачи пластовой воды в поглощающий пласт для утилизации.

ТСУ располагается в диаметральной плоскости корпуса в носовой части корпуса платформы. Осевая линия ТСУ находится на расстоянии около 240 метров от кормового перпендикуляра. Такое расположение наиболее целесообразно с учетом изменения ориентации платформы под действием льдов и погодных условий и необходимости защиты райзеров, шлангокабелей и якорной системы от ледовых нагрузок.

Для обеспечения безопасности отсоединения платформы от якорной системы удержания применяется уникальное решение, предусматривающее контролируемое погружение БСУР под корпус перед отсоединением якорной системы от турели. Такое решение обеспечивает максимальное гидравлическое демпфирование резких смещений БСУР, возникающих во время отсоединения якорных оттяжек, а также исключает возможность динами-

ческого воздействия БСУР на турель и корпус, в условиях воздействия высоких горизонтальных нагрузок. Реализуемость вышеуказанной уникальной технической концепции подтверждена результатами выполненного математического моделирования, а также модельных испытаний в волновом бассейне.

Для защиты элементов ТСУ от воздействия ледовых образований в состав турели вводится элемент, называемый «ледовый пояс» и представляющий собой усиленную металлическую конструкцию, жестко связанную с корпусом платформы и защищающую элементы ТСУ по всему периметру от воздействия льда, попадающего под корпус.

Как уже отмечалось, возможны два режима отсоединения:

- плановое отсоединение, применяемое в тех случаях, когда при помощи ледового мониторинга выявляется приближение к ПНК СТ ледовых образований (торосов, айсбергов), взаимодействие с которыми может привести к аварийной ситуации на платформе, либо по причине других запланированных ранее операций.
- экстренное отсоединение, применяемое в тех случаях, когда ледовые нагрузки приводят к критическому смещению ПНК СТ от проектного положения.

Рассмотрим более подробно основные функции и технические решения, заложенные в перечисленные выше основные элементы турельной системы удержания.

1. Турель – стационарный элемент ТСУ, вокруг которого вращается корпус, соединяемый через БСУР и якорную систему удержания с морским дном. Предназначена для изменения ориентации платформы под воздействием внешних нагрузок (волновая, ветровая, ледовая, течения). Турель через подшипники (см. рис. 2) опирается на корпусные конструкции. На период проведения ремонтных работ турель оборудована запорным устройством, фиксирующим положение корпуса и препятствующим вращению ПНК СТ под воздействием внешних нагрузок (указанное устройство планируется задействовать, например, для замены элементов основного подшипника ТСУ).

В нижней части турели располагается система отсоединения, для разъединения потоков жидкостей, газов, электрических и оптических линий.

Конструкция турели располагает достаточной прочностью и жесткостью для передачи нагрузок от якорной системы на корпус.

На турели размещаются:

- соединители и запорное устройство БСУР;
- подшипники и запорное устройство турели;
- оборудование для подъема БСУР;
- быстроразъемные соединения для райзеров и шлангокабелей;

- оборудование для повторного натяжения якорных оттяжек;
- устройство крепления швартовной линии БСУР;
- трубопроводы и арматура;
- технические средства обеспечения эксплуатации и технического обслуживания.

2. Буй системы удержания райзеров (БСУР) или спайдерный буй – стационарный элемент турели, предназначенный для крепления райзеров и шлангокабелей. БСУР фиксируется к турели посредством запорного устройства и соединяется с якорной системой так называемой «якорной оттяжкой БСУР», проходящей между соединительным элементом БСУР и соединительным элементом турели – см. рис. 5. После отсоединения БСУР обеспечивает удержание якорных оттяжек, райзеров и шлангокабелей на глубине не менее 100 м ниже поверхности моря.

3. Кожух – поворотный элемент ТСУ, жестко сопряженный с корпусом и совершающий вращательные движения вместе с корпусом вокруг стационарной турели. Кожух представляет собой вертикальную цилиндрическую конструкцию, отделяющую турель от корпуса и служащую опорой для размещения подшипников и турели. Кожух имеет диаметр 23 м, располагается вокруг турели и является также водонепроницаемым барьером в примыкающие отсеки корпуса.

Нижняя часть кожуха входит в ледовый пояс, образуя единую конструкцию.

4. Подшипники ТСУ (см. рис. 3) – элемент ТСУ, обеспечивающий способность ориентации платформы относительно стационарных элементов турельной системы под воздействием внешних нагрузок. Подшипники также предназначены для распределения усилия передаваемого с корпуса на турель. Подшипники служат опорой для турели и обеспечивают требуемый коэффициент трения в системе турель-кожух для обеспечения ориентации платформы.

Предусмотрено три узла подшипников:

- вертикальный верхний подшипник – воспринимает все вертикальные нагрузки и вертикальные нагрузки, создаваемые опрокидывающим моментом.
- горизонтальный верхний подшипник – воспринимает горизонтальные нагрузки, создаваемые опрокидывающим моментом и вызываемые горизонтальными ускорениями нагрузки от поворотных столов и части турели.
- нижний подшипник – воспринимает горизонтальные нагрузки от якорной системы и вызываемые горизонтальным ускорением нагрузки от части турели.

Распределение нагрузок между горизонтальным верхним подшипником и нижним подшипником

определяется податливостью конструкции на участке между нижним и верхним подшипником. Нижний подшипник включается в работу при увеличении горизонтальной составляющей внешней нагрузки свыше 2500 т.

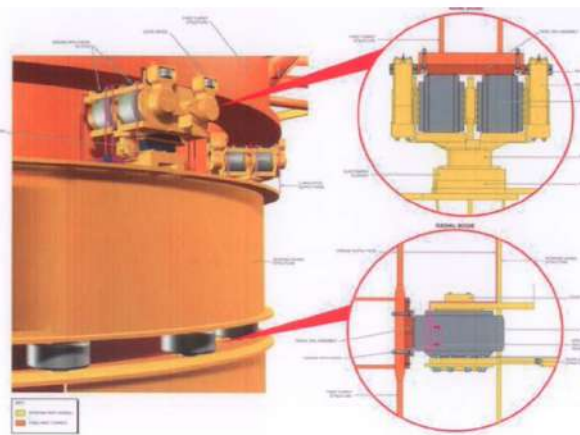


Рис. 3 Верхний вертикальный подшипник типа "boogie wheels" и горизонтальные радиальные роликовые подшипники ТСУ

5. Поворотный стол – стационарный элемент, расположенный над турелью и служащий для размещения основной части оборудования ТСУ, включая подъемное оборудование БСУР и вспомогательные лебедки для замены элементов якорной и райзерной систем. На поворотном столе также расположены трубопроводы и манифольды. Поворотный стол жестко соединен с турелью.

В данной конструкции ТСУ предусмотрено наличие поворотного стола, состоящего из пяти палуб. На верхней палубе расположен вертлюг, на четвертой палубе расположены манифольды и трубная обвязка для перераспределения потоков пластового продукта перед входом в вертлюжный блок.

На третьей палубе расположены камеры запуска и приема средств очистки и диагностики (СОД) для удаления накопившейся жидкости и примесей в добычных райзерах и внутрипромысловых трубопроводах. Обвязка предусматривает возможность использования СОД с возвратом через добычной райзер. В связи с использованием СОД предусмотрены соответствующие технические средства для отвода газов, дренажа и продувки. Предусмотрено оборудование одной камеры для пуска и одной камеры для приема СОД.

На второй палубе располагается вспомогательное оборудование систем ТСУ.

На первой палубе расположено основное и вспомогательное подъемное оборудование (лебедки) для подъема БСУР и замены райзеров, шлангокабелей и якорных оттяжек.

6. Конструкция обслуживания поворотного стола – поворотный элемент турели, жестко соединенный с корпусом, представляющий собой цилиндрическую конструкцию диаметром 25 метров и предназначенный для крепления ограждающих панелей турели, трубопроводов и лестничных шахт, обеспечивающих доступ к палубам поворотного стола. В составе конструкции обслуживания поворотного стола предусматриваются площадки для погрузки выгрузки оборудования. Для этого здесь размещается крановое оборудование для выполнения работ по обслуживанию ТСУ.

7. Ледовый пояс – элемент ТСУ, расположенный под килем и жестко соединенный с корпусом. Ледовый пояс предназначен для защиты турели и якорной системы удержания от воздействия льда.

8. Вертлюг (см. рис. 4) – элемент ТСУ состоящий как из стационарной, так и поворотной частей. Вертлюг предназначен для обеспечения передачи жидкостей, газов, электроэнергии и оптических сигналов между стационарными и поворотными элементами ТСУ.

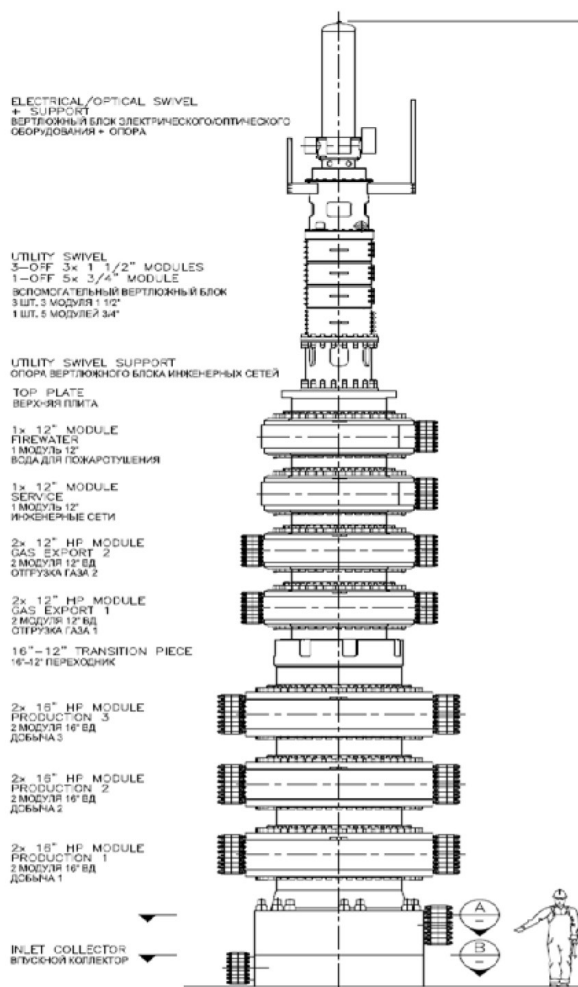


Рис. 4 Общий вид вертлюга

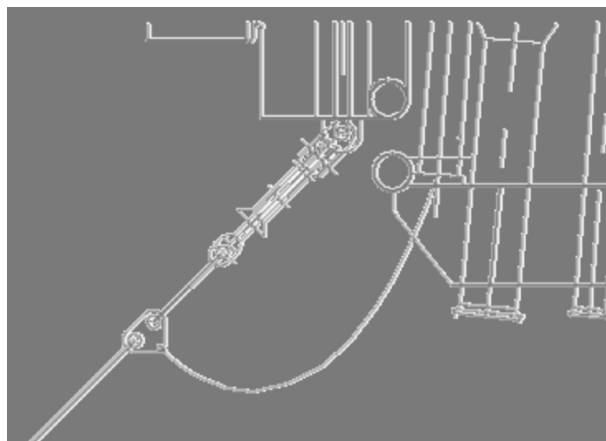


Рис. 5 Крепление якорной системы удержания с помощью дополнительной линии

Вертлюг имеет вертикальную модульную компоновку и состоит из 7 эксплуатационных модулей (3 модуля по 16 дюймов, и 4 модуля по 12 дюймов), а также блоков для обеспечения соединения инженерных сетей и электрических/оптических линий.

Конструкция эксплуатационных модулей обеспечивает возможность замены уплотнений на месте без необходимости демонтажа вертлюга. Блок формируется из опробованных на практике модулей, устанавливаемых на узле входного коллектора, который служит основанием вертлюга и монтируется на вертлюжной палубе поворотного стола. Модули вертлюга обеспечивают подсоединение трубопроводов, линий инженерных сетей и линий передачи электрических и оптических сигналов на стыке стационарной и вращающейся частей турели при неограниченном угле поворота платформы.

Пассивные приводы вертлюга устанавливаются между роторами каждого его отдельного модуля и конструкцией обслуживания поворотных столов с целью свести к минимуму напряжения на подводящие трубопроводы технологического комплекса.

9. Система удержания – стационарный элемент турельной системы, предназначенный для передачи внешней нагрузки на якорные фундаменты и формирования обратного усилия для удержания платформы в заданном положении при подсоединенном БСУР. Система удержания поддерживает БСУР в погруженном состоянии после отсоединения ПНК СТ на заданной глубине. Как уже отмечалось выше, в данной системе удержания применено уникальное решение крепления якорных оттяжек не к БСУР, а непосредственно к турели. БСУР соединяется с системой удержания посредством дополнительной оттяжки называемой «линия БСУР», которая в условиях нормальной эксплуатации не включена в работу системы удержания (см. рис. 4).

Таким образом, при отсоединении ПНК СТ на начальном этапе в процессе опускания БСУР, к нему крепятся только райзеры и шлангокабели, но не якорные оттяжки (которые остаются закрепленными на турели). На последнем этапе отсоединения все якорные оттяжки отсоединяются от турели и включаются в работу «линии БСУР», которые крепятся непосредственно к БСУР.

Данный проект системы удержания выполнен по схеме 4×6 , т. е. предусмотрено 4 пучка из 6 якорных оттяжек, что дает в совокупности 24 оттяжки. Каждая якорная оттяжка состоит из якорной цепи без распорок в нижней части и стального каната, оснащенного двумя элементами плавучести с плавучестью по 20 т. Якорные оттяжки оснащаются специальной системой контроля натяжения.

Якорная система создает возвращающее усилие 2500 т при отходе платформы на 45 – 49,5 м от расчетной позиции. При большем смещении платформы от расчетной позиции возвращающее усилие якорного крепления может возрасти до 5000 т на расстоянии 64 м в направлении пучка оттяжек и 74 м – в промежуточном направлении. При достижении такой нагрузки инициируется процедура экстренного отсоединения.

10. Якорные фундаменты – стационарный элемент системы удержания, предназначенный для восприятия всех результирующих нагрузок с последующей их передачей на якорные фундаменты, закрепленные в грунт.

Возможно использование нескольких типов якорных фундаментов. Окончательный выбор типа должен осуществляться на основании уточненных геологических данных в местах их предполагаемой установки.

Во время планового отсоединения, давление во всех промысловых трубопроводах сбрасывается с использованием вспомогательной системы. Продувочная арматура для сброса давления размещается на верхнем строении и обеспечивает отвод газа на факел. Промысловый трубопровод и райзер подключаются к вспомогательной системе путем открытия отсежного клапана, соединяющего коллектор турели и манифольд вспомогательной системы.

При экстренном отсоединении промысловые трубопроводы остаются под давлением, а сброс давления осуществляется только на участке между арматурой аварийного останова БСУР и арматурой останова турели. Для обеспечения быстрого сброса давления (расчетное время сброса давления 15 сек) предусмотрен сброс газообразных углеводородов на факел через ту же вспомогательную систему, что и при плановом отсоединении.

Вспомогательная система сброса давления также используется во время запуска СОД в подводные промысловые трубопроводы.

Утилизируемая вода под высоким давлением подается с технологического комплекса и закачивается в подводные скважины. Для этого вода перекачивается через отдельный канал во вспомогательной секции вертлюжного блока и далее через стыковочную плиту подается в шлангокабель. В состав блока стыковочной плиты входит быстро-разъемный соединитель небольшого диаметра для каждого шлангокабеля.

Для вентиляции внутри ограждающих конструкций турели предназначен выделенный агрегат ОВКВ, размещаемый на палубе поворотного стола.

Электрораспределительные системы турели подключаются к распределительной сети ПНК СТ через электрическую секцию вертлюжного блока (электрический вертлюг). Типичная потребляемая мощность во время подсоединения турели составляет 300 кВт для нагрузок оборудования на поворотных столах и 1,0 МВт для нагрузок оборудования на конструкции для обслуживания поворотных столов. В нормальном режиме работы потребляемая мощность оборудования турельной системы составляет около 70 кВт.

Рассмотренные выше технические решения в своем большинстве уже используются на действующих ПНК СТ в различных районах мирового океана. Отдельные новые технические решения, такие как крепления якорных оттяжек не к БСУР, а непосредственно к корпусу ТСУ, которые позволяют предотвратить демпфирующий удар БСУР в корпус при экстренном отсоединении в случае высоких горизонтальных нагрузок, были исследованы в ходе модельных испытаний в бассейне и должны быть дополнительно аттестованы в ходе испытаний элементов системы отсоединения/присоединения как без внешних нагрузок так и под максимальной проектной нагрузкой.

Исходя из вышеизложенного анализа конструкции турели для проекта освоения Штокмановского ГКМ с применением ПНК СТ, а также с учетом требований иностранного классификационного общества [7], могут быть предложены следующие основные принципиальные положения технических требований к этим устройствам, которые, по нашему мнению, должны быть включены в нормативные документы Российского морского регистра судоходства:

1. Область применений турелей

1.1 Турелями могут оснащаться как ПНК, специально спроектированные и построенные, так и ПНК, существенно переоборудованные из крупнотоннажных танкеров или балкеров.

1.2 При переоборудовании существенного характера судна в ПНК и размещении на нем турели необходимо учитывать обводы корпуса судна, его размеры, расположение центра

тяжести, волновые и ветровые нагрузки на корпус и надстройку судна, статические и динамические нагрузки на корпус, вызываемые устанавливаемым оборудованием, а также взаимодействием корпуса судна с заякоренной турелью.

1.3 Для улучшения маневренности ПНК турели следует размещать как можно ближе к носовой оконечности судна.

2. Типы турелей

2.1 На ПНК могут применяться два основных типа турелей в зависимости от расположения турели относительно корпуса ПНК: встроенные и внешние. Выбор типа и вида турели для ПНК должен быть обоснован в процессе проектирования.

2.2 Внешние турели ПНК могут быть как надводными, так и подводными.

2.3 Могут быть применены следующие виды встроенных турелей в зависимости от конструкции опорных подшипников и степени свободы маневрирования ПНК вокруг турели:

- встроенная пассивного вида;
- встроенная активного вида, позволяющая осуществлять вращение ПНК вокруг точки заякорения в активном режиме;
- коническая турель – подводный буй.

2.4 Для ПНК могут применяться две системы заякорения и функционирования турелей:

система фиксации турели через жесткие якорные связи (объединенная система);

система функционирования турели через заякоренный плавучий или заглубленный отдельно стоящий буй (разъединенная система).

3. Общие требования к турелям.

3.1 Турели всех типов должны обеспечивать:

- удержание ПНК на точке заякорения турели;
- способность вращения судна вокруг точки заякорения в диапазоне от ± 270 градусов (активный вид турели) или ± 360 градусов (пассивный вид турели) в зависимости от конструкции гибких соединений райзеров, опорных подшипников и якорных линий;

- транспортировку добытого пластового продукта от подводных манифольдов до технологической установки подготовки продукта на борту ПНК;

- передачу электрических, гидравлических, оптических и других сигналов управления и контроля.

3.2 Следует учитывать нагрузки, возникающие в системах турелей при эксплуатации, от:

- крутящего момента на вертлюге;
- главного верхнего опорного подшипника;
- нижних центрующих подшипников;
- монтажных и концевых соединений гибких райзеров;
- систем заякорения.

3.3 Главный опорный подшипник встроенной турели должен обеспечивать передачу осевых и радиальных нагрузок от турели на корпус судна, а рабочие подушки нижних подшипников – центрировать турель и обеспечивать передачу части нагрузок от турели на корпус судна.

3.4 Встроенная турель должна обеспечивать транспортировку пластового продукта через вертлюг, размещенный на палубе в верхней части турели; внешняя турель – через свободно перемещаемый гибкий плавучий шланг.

3.5 Для применения внешней турели необходимо проводить анализ климатических условий региона использования ПНК при обустройстве месторождений и выполнять инженерные изыскания, позволяющие назначать величину расчетных внешних воздействий на этот тип турелей.

3.6 Подводные внешние турели могут выполнять следующие функции:

- добычу и транспортировку пластового продукта на технологическую установку;
- отгрузку готового продукта.

3.7 Преимуществом системы внешних надводных турелей является отсутствие требований к внешним размерам турелей и соответственно возможность увеличения числа обслуживаемых скважин, рассматриваемых в проекте. Встроенные турели, как правило, могут иметь диаметр 4,0 – 20,0 м в зависимости от предполагаемого дебита добычных скважин.

4. Требования к проектированию турелей.

4.1 При проектировании турелей следует учитывать внешние нагрузки от:

- швартовных/якорных линий;
- райзеров;
- волн, течений и качки (килевой, бортовой);
- инерционных перемещений корпуса судна (вертикального и горизонтального изгибающих моментов, вертикальной и горизонтальной перерезающих сил);

- опорных подшипников;
- подсоединенных гибких трубопроводов;
- внутреннего давления в трубопроводах;
- температурных расширений.

4.2 В процессе проектирования следует выполнять расчетную проверку прочности конструкции турели методом структурного анализа с использованием метода конечных элементов. При этом допускаемые напряжения конструкции турели принимаются не более 0,7 предела текучести при нормальных условиях эксплуатации якорных линий.

4.3 Для штормовых условий эксплуатации якорных линий и при повреждении одной из них в расчетах достаточной прочности конструкции турели следует принимать допускаемые напряжения, равные 0,9 и 1,0 предела текучести соответственно.

4.4 В процессе расчетов прочности, указанных в 4.2 и 4.3, следует определять места размещения креплений якорных линий и поддерживающих их конструкций.

4.5 При проектировании следует предусматривать соответствие конструкции турели требованиям усталостной прочности, исходя из срока эксплуатации ПНК не менее 25 лет.

4.6 При идентификации рисков следует рассматривать компоненты и нагрузки, перечисленные в 4.1.

4.7 При анализе риска в процессе выполнения оценки безопасности следует исключать риски, которые могут возникать в связи с взаимодействием турели с точечными причалами и устройствами их заякорения.

5. Особенности взаимодействия турелей с корпусом ПНК.

5.1 Металлоконструкции корпуса ПНК в районе установки турели должны быть усилены с учетом статических и динамических знакопеременных нагрузок, действующих со стороны турели, на основании расчета местной прочности корпусных конструкций в районе установки турели.

5.2 Рекомендуются обеспечивать доступ в пространство между корпусом турели и корпусом ПНК для инспекции турели, средств ее крепления и корпусных конструкций ПНК.

5.3 Для заякорения турелей и бумов в основном могут использоваться якорные цепи, а для больших глубин – полимерные/композитные тросы. Техническое состояние тросов в процессе эксплуатации может быть проконтролировано на верхней палубе турели на барабанах якорных лебедок.

5.4 В целях предотвращения повреждения гибких райзеров якоря фиксируются на морском грунте комплектами с интервалом 120 градусов.

5.5 При динамических расчетах системы «турель-ПНК» наряду с учетом связей якорной системы (якорные цепи/тросы) следует учитывать наличие дополнительных связей в виде гибких райзеров.

5.6 Гибкие соединения райзера с бумом (для разъединенных систем) следует рассматривать при проектировании как единое целое с герметизирующими уплотнениями гибких райзеров.

5.7 Конические подводные турели-буи должны обеспечивать подсоединение снизу к компактному многоцелевому вертлюгу, далее – к грузовому манифольду, штатно установленным в шахте, имеющей открытый выход в подводную днищевую часть корпуса ПНК. По окончании работ с данным ПНК следует выполнить отшвартовку турели-буя в ожидании прихода на точку заякорения следующего ПНК данного класса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Технологические платформы судового типа (ПНК СТ) по сравнению с другими плавающими системами добычи обладают рядом важных преимуществ. Благодаря тому, что у ПНК СТ площадь палубы больше в 2-3 раза, чем у TLP или SPAR, на ней возможно размещение значительно большего количества технологического оборудования. Это позволяет повысить как качество обработки пластовой продукции, так и увеличить производительность добычного комплекса. Также, благодаря значительно большей площади ватерлинии, ПНК СТ имеет большую вместимость для хранения добытой продукции, чем какие-либо другие плавающие системы.

2. Одним из наиболее ответственных элементов ПНК СТ является турельная система удержания, которая по сути является ключевым компонентом в технологической цепочке «пласт – скважина – система сбора – система подготовки на морском месторождении», обеспечивая:

- удержание платформы на точке установки;
- подачу продукции скважин к технологическому комплексу на платформе;
- передачу сигналов управления и реагентов к подводному добычному комплексу;
- отсоединение платформы при необходимости ее отхода и обратное подсоединение.

3. Как видно, из представленных материалов, несмотря на сложность и многообразие выполняемых функций, современные конструкции ТСУ обладают высокой надежностью, технологичностью в изготовлении и являются объектом, готовым для промышленного внедрения. Другие элементы технологической цепочки, начиная от скважины до входа в ТСУ, и на самой платформе также являются объектами промышленной готовности. Поэтому при освоении морских нефтегазовых месторождений в первую очередь на акватории Баренцева и Охотского морей применение ПНК СТ позволит обустраивать морские месторождения с применением самых современных технологий их эксплуатации, обеспечивая при этом необходимый уровень надежности и безопасности в соответствии с требованиями российских и международных нормативных документов.

4. Исходя из анализа конструкции турели для проекта освоения Штокмановского ГКМ с применением ПНК СТ, а также с учетом требований иностранного классификационного общества [7], предложены основные принципиальные положения технических требований к этим устройствам, которые должны быть включены в нормативные документы Российского морского регистра судоходства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации, постройки и оборудования морских плавучих нефтегазодобывающих комплексов. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2011. – 162 с.
2. Wall M., Pugh H.R., Reay A., Krol J. «Failure modes, reliability and integrity of floating storage unit (FPSO, FSU) turret and swivel systems». Offshore Technology Report, 2001.
3. Deepwater petroleum exploration and production: a nontechnical guide / William L. Leffler, Richard Pattarozzi, Gordon Sterling. – 2nd ed., 2011.
4. Subrata K. Chakrabarti, Handbook of Offshore Engineering (2-volume set), Elsevier, 2005.
5. Ледяные образования морей западной Арктики: монография / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: АНИИ, 2006. – 272 с.
6. Бережной К.Г., Вербицкий С.В. Типы морских технологических платформ: их преимущества и недостатки / К.Г. Бережной, С.В. Вербицкий // научный журнал «Морские интеллектуальные технологии». – 2015. – №3(29), С. 33-46.
7. Guide for Building and Classing Floating Production Installations, American Bureau of Shipping, 2008, 580 p.
8. Г.В.Грудницкий, С.Г.Грудницкий, С.И.Егоров, Р.Мамутов, Морские нефтегазовые точечные причалы, ООО «Энержи Пресс», Москва, 2011, 367 стр.

REFERENCES

1. Rules for the Classification, Construction and Equipment of Floating Offshore Oil-and-Gas Production Units. Russian maritime register of shipping, 2011, 162 p. (In Russian)
2. Wall M., Pugh H.R., Reay A., Krol J. Failure modes, reliability and integrity of floating storage unit (FPSO, FSU) turret and swivel systems. Offshore Technology Report, 2001.
3. William L. Leffler, Richard Pattarozzi, Gordon Sterling. Deepwater petroleum exploration and production: a nontechnical guide. 2nd ed., 2011.
4. Subrata K. Chakrabarti. Handbook of Offshore Engineering. Elsevier, 2-volume set 2005.
5. Ledyanye obrazovaniya morey zapadnoy Arktiki: monografiya [Western Arctic sea ice formations: monograph]. Ed. G.K. Zubakin. St. Petersburg, AARI, 2016, 272 p. (In Russian)
6. Berezhnoy K.G., Verbitskiy S.V. Tipy morskikh tekhnologicheskikh platform: ikh preimushchestva i nedostatki [Types of marine technological platforms: advantage and drawbacks]. Morskie intellektual'nye tekhnologii [Marine intellectual technologies]. 2015, N 3(29), pp. 33-46. (In Russian)
7. Guide for Building and Classing Floating Production Installations, American Bureau of Shipping, 2008, 580 p.
8. G.V. Grudnitskiy, S.G. Grudnitskiy, S.I. Egorov, R. Mamutov. Morskie neftegazovye tochechnye prichaly [Marine oil-and-gas point berths]. Moscow, Lc. «Enerzhi Press» Publ., 2011, 367 p. (In Russian)

УДК: 629.5.062; 629.543

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРНЫХ ОПАСНОСТЕЙ УСТАНОВОК РЕГАЗИФИКАЦИИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА НА СУДАХ-ГАЗОВОЗАХ

В.К. Шурпьяк, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства» Россия, Санкт-Петербург, тел.: +7 (812) 314-39-85, факс: +7 (812) 314-10-87, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

А.А. Власов, ООО «ИНТАРИ», Россия, Санкт-Петербург, тел.: +7 (812) 677-07-43, факс: +7 (812) 677-04-14, e-mail: cng@intari.com

В статье приводятся сведения об установках регазификации СПГ на судах-газовозах и плавучих FSRU. Рассмотрены и описаны основные элементы системы регазификации с точки зрения характерных для них опасностей. Проанализированы состав установок, функциональное назначение ее элементов и термодинамические процессы. Сделана оценка необходимого для регазификации тепла и электроэнергии. В результате рассмотрения и оценки опасностей процесса регазификации выделено две специфические опасности для таких систем:

- утечка СПГ под высоким давлением с образованием облака;
- нарушение работы системы подогрева и испарения СПГ.

Предложены принципы минимизации риска утечки СПГ под высоким давлением, которые были учтены в проекте требований Правил Регистра к судам FSRU. Изложены основные положения проекта требований к установкам регазификации на газовозах, реализованные при переиздании Правил классификации и постройки судов для перевозки сжиженных газов наливом в 2016 году.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, суда-газовозы, терминалы СПГ, регазификация, опасности регазификации, разработка требований Регистра

SPECIFIC HAZARDS ANALYSIS OF THE LNG REGASIFICATION PLANTS ON GAS CARRIERS

V.K. Shurpyak, PhD, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, tel. +7 (812) 314-39-85, fax: +7 (812) 314-10-87, e-mail: shurpyak.vk@rs-class.org

A.A. Vlasov, INTARI Ltd., St. Petersburg, tel.: +7 (812) 677-07-43, fax: +7 (812) 677 -04-14, e-mail: cng@intari.com

The article provides information about the LNG regasification plants on ships, gas carriers and floating FSRU. The main elements of the regasification system are reviewed and described in terms of specific hazards. The regasification system components, functionality of its elements and typical thermodynamic processes are analyzed.

The estimation of heat and electricity input necessary for the regasification has been made. As a result of the review and assessment of special hazards of the regasification process two specific dangers have been highlighted:

- LNG leak under high pressure with the cloud formation;
- malfunction of the LNG heating and evaporation system.

The principles of minimizing the risk of LNG leakage at high pressure taken into account in the draft requirements of the Register Rules for FSRU vessels are discussed. The article presents the main points of the draft requirements for regasification plants, realized in the new edition of Rules for the Classification and Construction of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk in 2016.

Keywords: liquefied natural gas, gas carriers, LNG terminals, regasification, regasification associated hazards, development of the Register requirements

Одной из тенденций в развитии судов-газовозов в настоящее время стало стремление судовладельцев придать таким судам новую для них функцию: регазификация сжиженного природного газа (далее СПГ). Так как этот процесс является опасным и новым для судов с классом Регистра, в 2015 году было решено разработать специальные требования к таким системам, для чего необходимо было произвести анализ опасностей и их последствий. Итоги этой работы кратко изложены в настоящей статье.

Первым реализованным оффшорным терминалом, основным элементом которого является судно-газовоз с регазификационной установкой, стал проект Golden Gateway недалеко от побережья США, начавший работу в 2005 г. В настоящее время мировой флот судов-газовозов с регазификационной установкой, которые чаще называют судами FSRU (далее FSRU – Floating Storage Regasification Unit), насчитывает более 20 судов вместимостью до 260 тыс. м³ СПГ, способных регазифицировать до 34 млн. м³/сут и продолжает пополняться судами

новой постройки, а также судами, специально переоборудуемыми для этих целей. В постройке находится около 10 FSRU, а планируется к постройке 20 ÷ 30 FSRU в проектах по всему миру.

Основные преимущества FSRU, которые делают их привлекательными по сравнению со стационарными терминалами приема СПГ:

- мобильность, то есть в случае изменения экономической конъюнктуры судно может вернуться к эксплуатации как судно-газовоз;
- сроки организации плавучего регазификационного терминала СПГ намного короче, чем наземного приемного терминала, так как нет необходимости строить береговые хранилища СПГ;
- не требуется отчуждения больших дорогостоящих территорий в прибрежной черте;
- не требуется дноуглубительных работ и причала для приема судов СПГ;
- утилизация проекта по окончании требует гораздо меньших затрат.

К недостаткам FSRU можно отнести финансовые потери, связанные с выводом дорогостоящего самоходного судна из эксплуатации как транспортного судна на время использования его как регазификационного модуля. Кроме того, при хранении СПГ на судне испаряемость из грузовых танков в среднем в 2 раза больше, чем из береговых емкостей для хранения СПГ. Так по данным [1] коэффициент испарения BOG на FSRU составляет в сутки примерно 0,1% объема СПГ, по сравнению с 0,05% объема для берегового танка. Если на ходу судна испарившийся СПГ сжигается в пропульсивной установке, то на стоящем FSRU пары груза необходимо утилизировать - повторно сжижать или сжигать в специальном устройстве.

В настоящее время в ГУР рассматривается проектная документация судна с установкой для регазификации природного газа для РФ с совместным классом Российского Морского Регистра Судоходства и Регистра Ллойд. В конце 2015 года судно, предназначенное для перевозки или хранения 174 тыс. м³ СПГ было заложено на верфи Hyundai Heavy Industries (Корея). Судно будет иметь ледовый

класс Регистра **Arc4** и характеристики **ANTI-ICE** и **WINTERIZATION(-30)**. В качестве топлива для главной энергетической установки и установки регазификации используется СПГ. На рис. 1 показано судно аналогичного класса и назначения, построенное в 2015 году на этой же верфи, и блок регазификации этого судна.

Основным отличием судов FSRU от судов-газовозов СПГ обычно типа является наличие на них системы регазификации СПГ, системы приема СПГ с других судов, а также системы передачи регазифицированного газа на берег. В качестве плавучего приемного терминала может использоваться как судно новой постройки, так и судно-газовоз СПГ, прошедшее специальное дооборудование. Пример переоборудования танкера-газовоза в FSRU показан на рис. 2.

Что представляет из себя процесс регазификации? Недавно принятый ГОСТ Р 5.6400-2015 [2] определяет регазификацию как «процесс преобразования сжиженного природного газа из жидкого состояния в газообразное». Если исходить из этого определения, процесс регазификации происходит непрерывно в течение хранения СПГ, так как согласно определению ничем не отличается от простого испарения. По мнению авторов статьи, можно предложить более точное определение: регазификация – это процесс получения из СПГ газа с параметрами, необходимыми потребителям (на берегу или на судне). То есть это термодинамический процесс, начальной точкой которого является жидкий метан с температурой около –162 °С, а конечной точкой газ с температурой выше 0 °С при давлении, требующемся для потребителя. Потребителями газа на судне являются судовые дизели и котлы, работающие на газе, необходимое давление газового топлива для них составляет около 5 бар. На берегу потребителем может быть газораспределительная сеть, в которой требуется давление порядка 10 ÷ 30 бар, или магистральный трубопровод, в котором давление обычно 100 – 120 бар.

Возможные варианты процессов регазификации показаны на рис. 3, где представлена диаграмма



Рис. 1 Судно FSRU, построенное на верфи Hyundai Heavy Industries (Корея) в 2015 году и блок регазификации этого судна, установленный на правом борту в нос от надстройки



Рис. 2 Схема размещения дополнительных систем на судне-газовозе FSRU

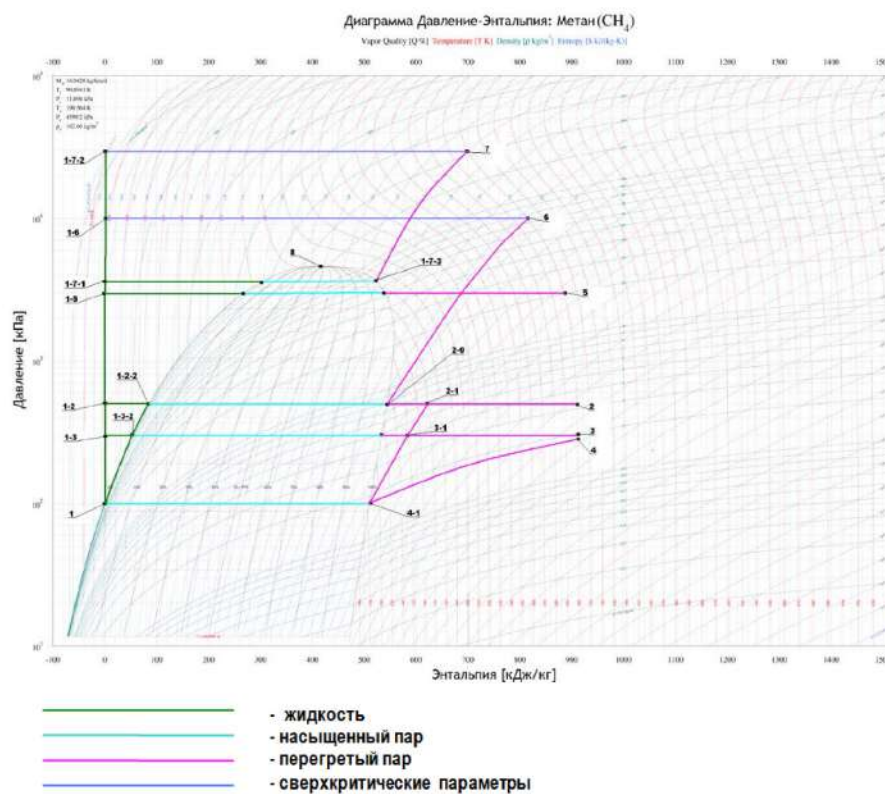


Рис. 3 Различные способы организации процесса регазификации на диаграмме «Давление - Энтальпия»

«Давление - Энтальпия» метана. По оси ординат (давление) на диаграмме применена логарифмическая шкала, по оси абсцисс для энтальпии применена обычная шкала. Критическая точка метана ($-82,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $4,67\text{ МПа}$) обозначена на диаграмме точкой 8. Различные фазовые состояния метана показаны разными цветами: зеленый – жидкость, голубой – насыщенный пар, розовый –

перегретый пар, синий – вещество при сверхкритических параметрах.

Таким образом, на диаграмме «Давление - Энтальпия» (i-p диаграмма) для метана (см. рис. 3):

- начальная точка процесса будет находится на линии насыщения при атмосферном давлении (кроме емкостей типа С, где начальная точка находится на линии насыщения при большем давлении);

- конечные точки будут располагаться на линии изотермы, соответствующей нормальному значению окружающего воздуха и определяться тем давлением, которое необходимо получить.

На рис. 3 приняты некоторые упрощения, которые приводят к незначительным неточностям и которыми, на наш взгляд, можно пренебречь на этапе выбора способа регазификации, но необходимо учитывать при определении необходимого количества теплоты и механической энергии при выборе оборудования.

Во-первых, процессы сжатия жидкости в насосе показаны вертикальными линиями, так как жидкость считаем несжимаемой, что не совсем верно, особенно при сверхкритических параметрах. На самом деле промежуточные точки 1-7-2 и 1-6 будут расположены на диаграмме несколько правее.

Во-вторых, процессы нагрева и испарения при постоянном давлении представлены горизонтальными линиями (изобары), то есть потерями давления на преодоление гидравлического сопротивления трубопроводов и теплообменных аппаратов пренебрегаем.

В-третьих, на рисунке процесс сжатия газа в компрессоре представлен как адиабатический, что, безусловно, не совсем верно, так как в любом компрессоре часть подводимой механической энергии затрачивается на нагрев рабочего тела и увеличение энтропии. Следовательно, наклон кривых, описывающих процессы сжатия в компрессоре, будет несколько больше в зависимости от КПД компрессора. На рис. 3 можно увидеть, что одних и тех же параметров газа, как правило, можно

достичь двумя способами: путем повышения давления с последующим нагревом для испарения и путем испарения с последующим сжатием паров. Оба способа регазификации требуют затрат тепла и механической энергии, поэтому способ регазификации выбирается исходя из минимизации затрат энергии, с учетом возможности наибольшего применения бросового (т.е. «бесплатного») тепла окружающей среды (забортной воды и воздуха). Однако, при всей заманчивости применения тепла окружающей среды, это не всегда возможно, не всегда надежно и не всегда технически реализуемо на судне.

Система регазификации груза для сжигания газа на судне построена с расчетом сжигания всего выкипевшего газа при поддержании установленного давления в танке. Обычно для танков мембранного типа регулятор давления в танке устанавливается в пределах 1,04 – 1,09 бар. Описанный процесс на рис. 3 показан линией 1/4-1/ 2-1/2, но фактически затраты энергии при этом начинаются с точки 4-1 (начало сжатия в компрессоре), так как процесс 1/4-1 – естественное испарение груза во время рейса.

На рис. 4 показаны два способа регазификации, применяемых на судах-газовозах для использования газа в качестве топлива: режим обычной подготовки топлива и режим форсированной регазификации. Во время морского перехода, пары груза сжигаются в судовых двигателях и котлах. Выкипевшие пары груза через паровой трубопровод (на рис. 4 показан голубым) подаются к компрессору низкой производительности и, после повышения в нем давления до приблизительно 5 бар, подаются в подогреватель газа

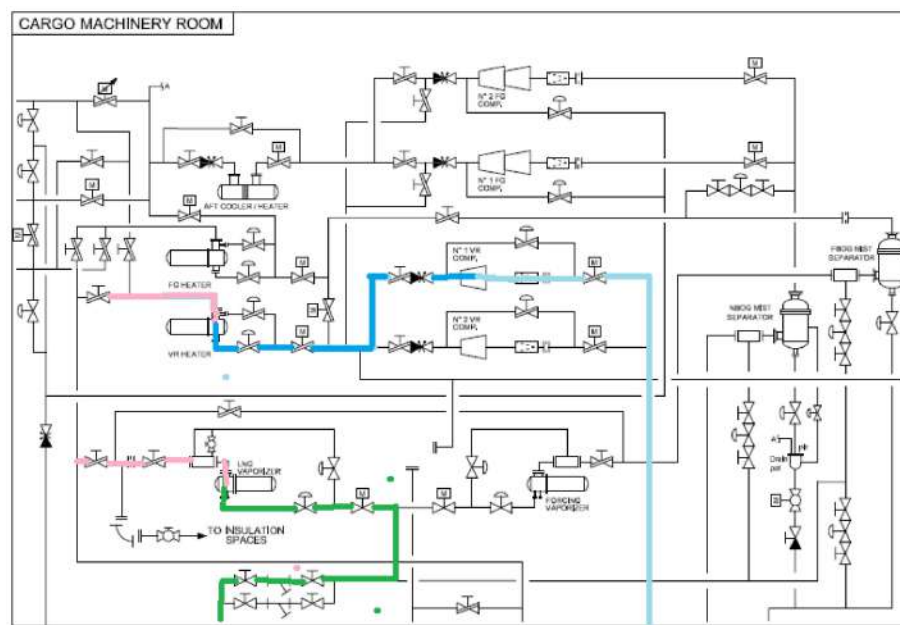


Рис. 4 Два способа регазификации, применяемые на судах-газовозах для использования газа в качестве топлива

(показан синим). Подогретый газ подается потребителям с температурой $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (показан розовым).

Если испарившегося груза недостаточно для получения необходимого количества газового топлива, то на судах-газовозах применяется режим форсированной регазификации, который предусматривает испарение жидкого СПГ в специальном теплообменном аппарате. СПГ в жидкой фазе берется из грузового танка погружным насосом, в котором давление повышается до необходимого для работы котла или двигателя (приблизительно 5 бар), подается по трубопроводу (на рис. 4 показан зеленым) к специальному теплообменному аппарату, где происходит испарение СПГ и нагрев газового топлива до необходимых $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$, после чего по трубопроводу (показан розовым) подается потребителям. Описанный процесс форсированной регазификации на рис. 3 показан линией 1/ 1-2/ 2, при этом конечная точка такая же, как в процессе 1/ 4-1/ 2-1/ 2. Далее газ от двух источников подается по общему трубопроводу (т.е. смешивается) на нагреватель-регулятор, после чего идет к потребителям в машинное отделение.

Если конечным потребителем на берегу является газораспределительная станция (ГРС), где давление газа до 1,2 МПа (точка 5 на диаграмме рис. 3), то реализовать процесс 1/1-5/5 с применением насоса и нагревателя не представляет сложностей. Несколько сложнее организовать аналогичный процесс при подаче газа в магистральный трубопровод, давление в котором может достигать 12 МПа (процесс 1/1-7-2/7).

Схема процесса регазификации с использованием заборной воды для нагрева и испарения СПГ с отгрузкой для береговых потребителей показана на рис. 5. На схеме голубым цветом показаны трубопроводы с СПГ, желтым – трубопроводы промежуточного теплоносителя (пропан,

водный раствор этиленгликоля или какая-либо другая жидкость с низкой температурой замерзания), красным – трубопроводы первичного теплоносителя (морская вода), зеленым показан пар и конденсат системы подогрева заборной воды. При этом в зависимости от температуры заборной воды контур заборной воды может эксплуатироваться как открытым (без подогрева), так и закрытым с подогревом паром от судового котла.

Несколько иначе организован этот же процесс на судах при использовании заборной воды для нагрева и испарения СПГ с отгрузкой для береговых потребителей, схема которого показана на рис. 5. На схеме голубым цветом показаны трубопроводы с СПГ, желтым – трубопроводы вторичного теплоносителя (пропан, водный раствор этиленгликоля или какая-либо другая жидкость с низкой температурой замерзания), красным – трубопроводы первичного теплоносителя (морская вода), зеленым пар и конденсат системы подогрева заборной воды. При этом в зависимости от температуры заборной воды контур заборной воды может эксплуатироваться как открытым (без подогрева), так и закрытым, с подогревом паром от судового котла.

Рассмотрим основные компоненты системы регазификации FSRU с точки зрения опасностей, характерных для них.

1. СИСТЕМЫ ПРИЕМА СПГ

В соответствии с имеющейся практикой, заполнение танков судна сжиженным природным газом может производиться с использованием обычного шлангового устройства с пирса или с

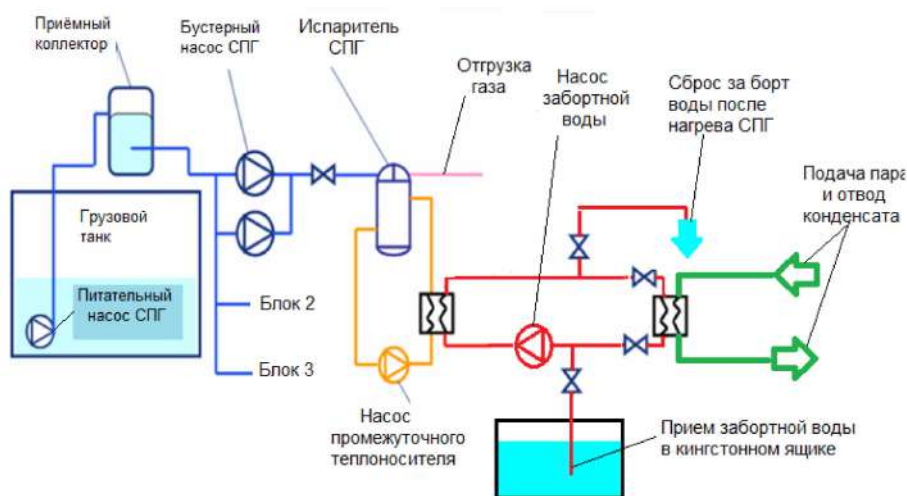


Рис. 5 Типовая принципиальная схема системы регазификации

другого судна-газовоза по схемам: «через пирс» или «борт к борту». В отличие от обычных судов-газовозов СПГ, на которых может быть предусмотрен только один вид приема СПГ, суда типа FSRU могут оборудоваться устройствами для приема СПГ обоими способами, что обеспечивает гибкость их использования.

На ряде судов FSRU, для погрузки СПГ на судно вместо грузовых шлангов применяются грузовые стендеры в виде шарнирных подвижных трубопроводов (articulated arm). Стендер – металлическое грузовое устройство, состоящее из шарнирно-сочлененных труб для присоединения их к судовой грузовой магистрали (к манифольду), которое используется для приема с судна жидких грузов (в случае FSRU – СПГ). Использование стендеров сокращает время приема СПГ с других судов и позволяет производить грузовые операции с большей интенсивностью. Если обычные суда-газовозы пользуются стендерами береговых терминалов, то на FSRU такие приемные устройства часто размещают на борту, что делает их частью грузовой системы судна. Пример размещения грузовых стендеров на борту FSRU Golar Freeze показан на рис. 6.

Таким образом, можно сделать вывод, что каких-либо специфических опасностей и особенностей у систем приема СПГ на судах FSRU по сравнению с газовозами нет. Но, поскольку до настоящего времени грузовые стендеры являлись частью грузового терминала, в Правилах Регистра отсутствуют требования по их испытаниям.



Рис. 6 Размещение грузовых стендеров на борту FSRU

2. СИСТЕМА ПОДАЧИ СПГ К УСТАНОВКЕ РЕГАЗИФИКАЦИИ

Система подачи СПГ к установке регазификации на судах FSRU состоит из:

- расположенного в грузовом танке погружного питательного насоса (обычно используется насос подачи газа в блок подготовки газового топлива или грузовой насос погружного типа);

- трубопровода СПГ (на рис. 5 показан синим цветом);

- приемного коллектора бустерного насоса повышения давления СПГ перед испарением. В приемном коллекторе (емкости СПГ) обычно давление 4-5 бар. Пример такой емкости (схема и внешний вид) показаны на рис. 7.

Кроме накопления СПГ на входе в насос повышения давления такая емкость выполняет функцию повторного сжижения паров груза из грузовых танков (BOG – Boil-off Gas) используя для сжатия паров груза компрессор подготовки газового топлива (на рис. 7 компрессор не показан).

Опасности, характерные для системы подачи СПГ к установке регазификации:

- разгерметизация и утечка СПГ в жидкой или газовой фазе;
- в случае пожара – повышение давления, срабатывание предохранительных устройств, разрыв в результате повышения давления.

Возможные причины реализации опасности – износ, внешнее воздействие, повышение давления выше расчетного, потеря механических свойств материала в результате нагрева.

Опасность характеризуется объемом СПГ в системе и в приемной емкости блока повышения давления. В нормальном рабочем состоянии давление определяется погружным насосом СПГ в грузовом танке и достигает 4-6 бар. Наиболее безопасным будет расположением оборудования на открытой палубе.

3. БЛОК ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Блок повышения давления в установке регазификации состоит из:

- одного или нескольких погружных бустерных центробежных многоступенчатых насосов с электрическим двигателем;
- герметичного корпуса насоса, который представляет из себя сосуд под давлением, наполненный СПГ.

Для повышения давления СПГ используются многоступенчатые центробежные погружные насосы. От обычного грузового насоса, бустерный насос отличается количеством ступеней и степенью повышения давления. Кроме того в отличие от грузового насоса, который находится в грузовом танке, бустерный насос помещен в специальную герметичную емкость, рассчитанную на давление всасывания насоса и связанную приемным коллектором. Таким образом под высоким давлением СПГ (до 100 - 120 бар) находится только патрубок, идущий от насоса к блоку испарения. Пример бустерного насоса показан на рис. 8.

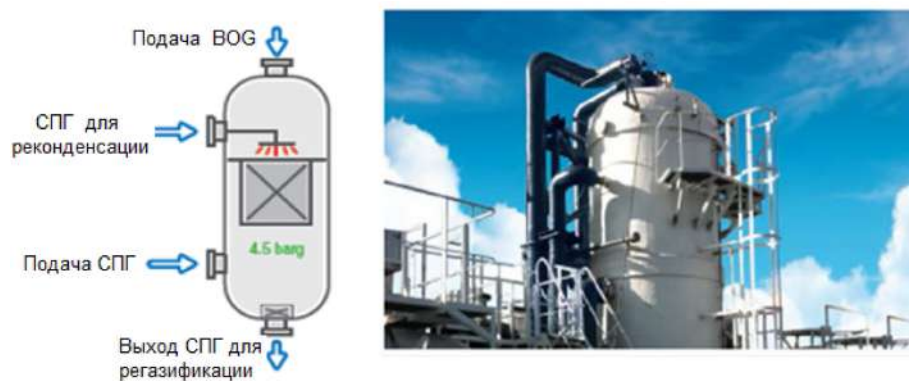
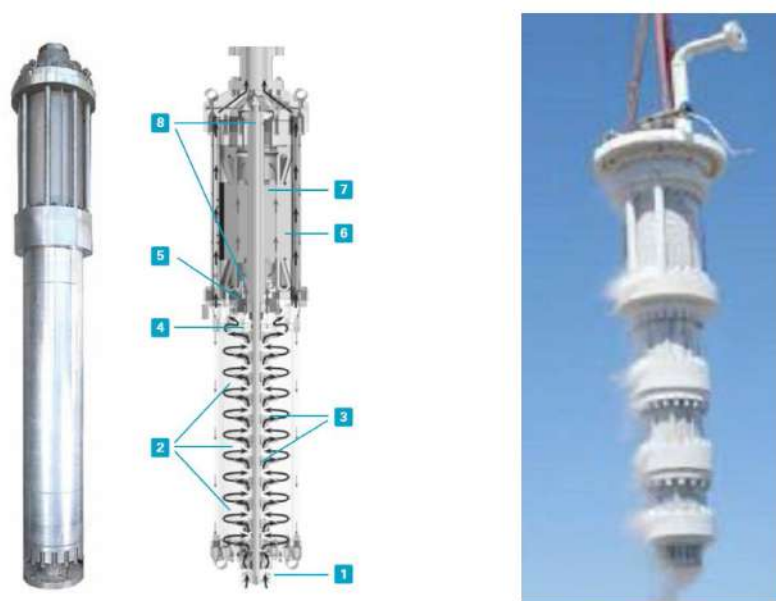


Рис. 7 Приемный коллектор СПГ с функцией конденсации паров груза (BOG)



Насос компании Atlas Copco JC Carter : 1 – приемный индуктор, 2 – диффузоры, 3 – рабочие колеса, 4 – вал насоса, 5 – устройство осевой разгрузки, 6 – электродвигатель, 7 – полый вал ротора электродвигателя, 8 – верхний и нижний шариковые подшипники



Рис. 8 Схема и внешний вид насоса повышения давления СПГ (вверху) и прочный корпус насоса повышения давления (внизу)

Помимо опасностей, указанных в предыдущем пункте, характерных для любого сосуда под давлением с СПГ, добавляется опасность протечек через сальники уплотнений насоса. Для ее исключения используются безсальниковые погружные насосы, помещенные в герметичные сосуды под давлением, электродвигатель которых погружен в СПГ, аналогично погружному насосу в грузовом танке. Таким образом, исключается опасность протечки СПГ через сальники и еще одна опасность: электродвигатель как источник воспламенения.

С точки зрения безопасности блок повышения давления представляет собой наполненный СПГ сосуд под давлением, причем рабочим давлением является давление всасывания насоса, которое равно давлению в приемной емкости СПГ ($4 \div 6$ бар). Высокому давлению СПГ, создаваемому бустерным насосом, подвержен только выходной патрубок и трубопровод от блока повышения давления к блоку испарения. При разгерметизации при высоком давлении из такого трубопровода может произойти распыление СПГ в виде мелких капель с интенсивным испарением и образованием газового облака.

4. БЛОК ИСПАРЕНИЯ

Блок испарения предназначен для испарения и нагрева СПГ, сжатого в блоке повышения давления до давления, приблизительно равному давлению отгрузки. Представляет собой сосуд под давлением и теплообменный аппарат одновременно. В качестве теплоносителя может быть использована морская вода, так и другие теплоносители – пар, водный раствор этиленгликоля, пропан-бутановая смесь и другие теплоносители, а также их сочетание, в нескольких ступенях, что определяет разнообразие типов блоков испарения. Для блоков испарения характерны все опасности, присущие сосудам под давлением с СПГ, например описанного выше приемного коллектора, применимы к блоку испаре-

ния. При этом необходимо учитывать, что в блоках испарения давление СПГ гораздо выше (может быть до $100 \div 120$ бар на выходе) и перегрев жидкого СПГ в испарителе значительно выше. То есть при разгерметизации и, как следствие, падении давления до атмосферного будет происходить мгновенное испарение с выбросом в атмосферу большей части СПГ, находящегося в блоке испарения.

Другой характерной для блока испарения опасностью является возможная утечка газа в греющую среду системы теплоносителя. При этом дальнейшие связанные опасности зависят от теплоносителя, устройства системы подачи теплоносителя и размещения на судне элементов системы.

5. СИСТЕМЫ ПЕРВИЧНОГО И ВТОРИЧНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Описанные процессы регазификации являются достаточно энергозатратными. Оценить затраты теплоты и механической работы можно используя уравнение первого закона термодинамики, согласно которому подведенная теплота будет равна разнице энтальпии конечного и начального состояний газа за вычетом совершенной механической работы (работы изменения объема):

$$q = i_2 - i_1 - \int_{P_1}^{P_2} v dp \approx i_2 - i_1 - (v_2 P_2 - v_1 P_1) \quad (1)$$

где i_1 и i_2 – энтальпии в начальной и конечной точке процесса;
 p_1 и p_2 – давление в начальной и конечной точке процесса;
 v_1 и v_2 – удельный объем газа в начальной и конечной точке процесса.

С помощью уравнения (1) и диаграммы «Давление - Энтальпия» на рис. 3 авторами была произведена оценка необходимой тепловой и механической энергии. Оценка необходимой механической энергии для регазификации дает следующие результаты: для регазификации одного килограмма СПГ потребуется около 60 КДж механической работы. Но это теоретические затраты энергии, а реальные, с учетом КПД насосов

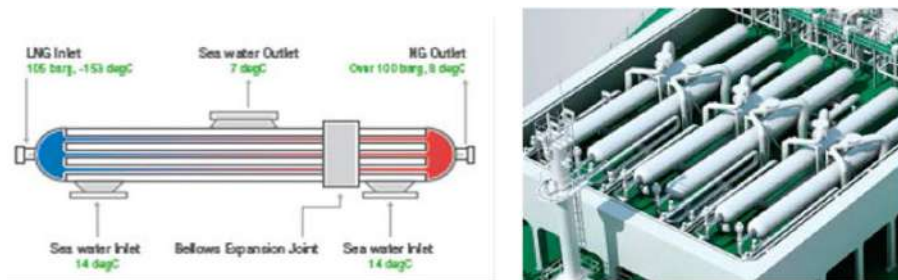


Рис. 8 Кожухотрубный нагреватель СПГ высокого давления. В качестве теплоносителя может быть использован жидкий пропан, раствор этиленгликоля или заборная вода с паровым подогревом

и судовых дизельгенераторов, значительно больше: цифра возрастает до $200 \div 230$ КДж на один килограмм СПГ. Если отнести эту энергию к теплоте сгорания метана, то получается, что для повышения давления СПГ при регазификации необходимо израсходовать не менее 0,5% перевозимого груза для выработки на судне необходимой для этой энергии.

Оценка необходимой теплоты для регазификации дает следующие результаты: затрачивается от 700 до 900 КДж тепловой энергии, то есть, если не использовать тепло окружающей среды, то не менее 1,5 % перевозимого груза должно быть потрачено на регазификацию. Эта оценка примерно совпадает с оценкой, сделанной в работе [1]. Во избежание таких существенных затрат используют подвод тепла от заборной воды, но при этом возникают дополнительные опасности, для нейтрализации которых систему приходится выполнять двухконтурной.

Прежде всего, возникает опасность замерзания воды, поэтому система подвода тепла обычно выполняется двухконтурной. В качестве первичного теплоносителя используется заборная вода, а в контуре промежуточного теплоносителя используется жидкость с более низкой температурой замерзания, как это показано на рис. 5. Однако полностью исключить замерзание промежуточного теплоносителя можно только используя жидкость с температурой замерзания ниже температуры СПГ (-162 °C). Этому требованию не удовлетворяют традиционные широко распространенные антифризы на основе спиртов: минимальная температура кристаллизации 67% водного раствора этиленгликоля -68 °C, этиловый спирт имеет температуру замерзания -117 °C, метиловый спирт $-97,6$ °C. Среди фреонов подходящей температурой плавления обладают тетрафторметан (фреон R-14) -184 °C, трифторхлорметан (фреон R-13) -181 °C и трифторбромметан (фреон R-13B1) -175 °C, но применение фреонов R-13B1 и R-13 запрещено на судах, так как они являются озоноразрушающими веществами. Фреон R-14 неудобен, так как имеет очень низкую температуру кипения (-128 °C) и при нормальной температуре для сохранения в жидком состоянии требует очень высокого давления (порядка 15 МПа). Несколько более низкой температурой замерзания обладают углеводороды: бутан -140 °C, изобутан (R600a) -160 °C, но полностью исключить опасность замерзания теплоносителя позволяет только применение пропана с температурой замерзания -187 °C.

Кроме замерзания теплоносителя появляется опасность утечки газа в систему теплоносителя, и если теплоноситель циркулирует за пределы грузовой зоны, то появляется возможность проникновения метана или пропана в закрытое помещение. Так, например, на судне FSRU, строящемся в классе

Регистра предусмотрены режимы работы системы (на рис. 5 показано зеленым) в двух режимах:

- по открытому циклу, когда регазификация СПГ происходит за счет теплообмена в испарителе с заборной водой. При этом заборная вода охлаждается на 7 °C, что означает, что при температуре заборной воды ниже $7,2$ °C регазификация СПГ по открытому циклу производиться не может;

- по замкнутому циклу, когда регазификация СПГ происходит за счет теплообмена в испарителе с циркулирующей по замкнутому контуру водой, нагреваемой паром, получаемым в специально предусмотренном для этого котле.

Для исключения опасности попадания углеводородных газов (пропана или метана) в машинное отделение вместе с водой в грузовой зоне устанавливается расширительная цистерна со свободной поверхностью воды и газоанализатором в свободном объеме.

6. СИСТЕМА ОТГРУЗКИ ГАЗА НА БЕРЕГ

Отгрузка газа с FSRU на берег может осуществляться через установленные на пирсе или на судне устройства HP articulated gas offloading arm, которое представляет из себя описанный нами ранее стендер, состоящий из шарнирно-сочлененных труб. Но в отличие от стендеров, которые используются для приема жидких грузов в системе отгрузки давление газа значительно выше. Другой способ отгрузки, применяемый на удаленных от берега FSRU - передача газа через буй типа STL или «турель» и далее на берег по подводному трубопроводу. Принципиальным отличием по сравнению с судами-газовозами является высокое давление. Но такая опасность характерна для любого трубопровода под высоким давлением и поэтому рассматривать ее как специфическую для FSRU было бы неверно.

Рассмотрев все элементы установки регазификации, можно подвести некоторые итоги по определению характерных для FSRU опасностей. В работе [4] на основе статистики аварий на судах-газовозах при составлении проекта требований РС к судам, использующим газ в качестве топлива, было сделано заключение, что наибольшую опасность по тяжести последствий и вероятности реализации составляет объемный взрыв газа в результате утечки в замкнутом объеме при наличии источника воспламенения. Для установок регазификации на судах FSRU эта опасность не так актуальна, так как оборудование, используемое для регазификации, расположено на открытой палубе и попадание газов в закрытые помещения маловероятно.

Более актуальны прочие опасности, связанные с утечкой газа на открытых частях, значительно

усиливающиеся в связи с появлением оборудования под высоким давлением СПГ. В результате рассмотрения и оценки специфических для систем регазификации опасностей можно выделить две:

- утечка СПГ под высоким давлением;
- нарушение работы системы подогрева и испарения СПГ.

Первая из них - утечка СПГ под давлением ведет к практически мгновенному испарению большого количества СПГ с образованием газо-аэрозольного облака. Далее, в случае появления источника воспламенения, происходит образование «огненного шара» и мощный взрыв. В результате возможно возникновение неприемлемой аварии с катастрофическими последствиями.

Вторая характерная опасность - нарушение работы системы подогрева и испарения СПГ может привести к временной остановке отгрузки и сбросу некоторого количества газа в атмосферу, что можно рассматривать не как аварию, а как происшествие в связи с тем, что метан легче воздуха и практически мгновенно улетучится, не успев образовать взрывоопасную смесь.

Определив специфические для судов FSRU опасности можно предложить принципы минимизации риска утечки СПГ под высоким давлением, которые были учтены в проекте требований Правил Регистра к системам регазификации:

1. Необходимо стремиться к возможному уменьшению объема СПГ под давлением.

2. СПГ под давлением может находиться в системе регазификации только при проведении отгрузки. В противном случае должен осуществляться слив СПГ в грузовые танки.

3. Необходима специальная защита от разбрызгивания в случае разгерметизации СПГ под давлением более 1 МПа.

4. Трубопровод СПГ от бустерного насоса до нагревателя под давлением более 2 МПа рекомендуется выполнять с двойными стенками и отводом газа из межтрубного пространства в безопасное место.

На основе анализа опасностей, а также изучения требований действующих нормативных документов Классификационных Обществ [5, 6, 7] был сформирован проект предложений по корректировке Правил классификации и постройки газовозов. Проект требований к установкам регазификации на газовозах был принят и реализован при переиздании Правил в 2016 году. Основные положения включены:

- В часть I «Классификация» вводится новый пункт 4.2.6 о том, что если на судне-газовозе предусмотрена установка для регазификации, то к

основному классу судна добавляется знак **RGU (Regasification Unit)**.

- В части V «Противопожарная защита» вводятся дополнительные требования к системам водораспыления и порошкового пожаротушения для таких судов.

- В части VI «Системы и трубопроводы» вводится новый раздел «Система регазификации».

- В части VII «Электрическое оборудование» даются дополнительные указания по определению размеров опасных зон на таких судах.

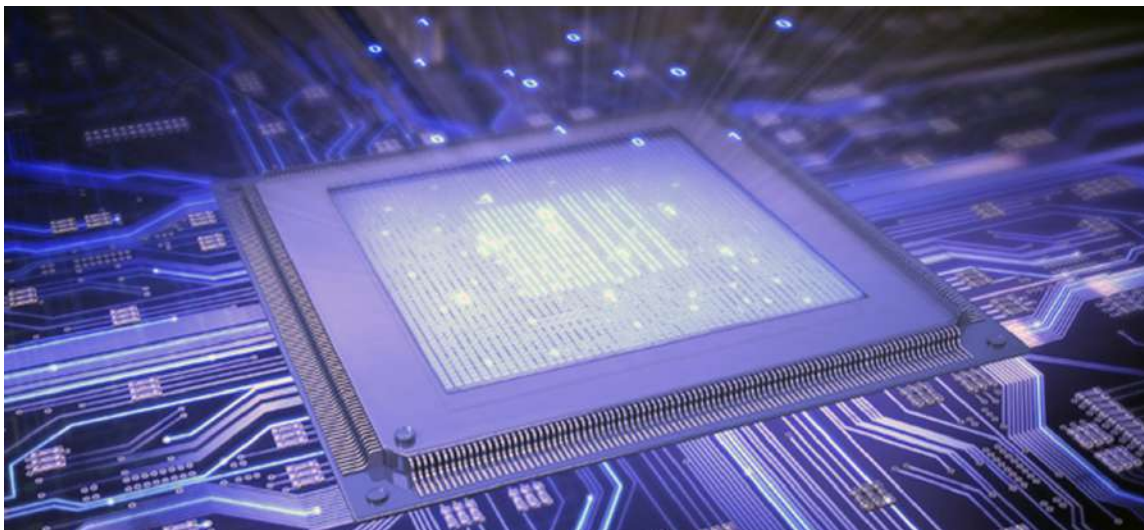
- В части VIII «Контрольно-измерительные устройства» раздел 6 «Устройства обнаружения газа» дополняется требованиями по наличию детекторов газа непрерывного действия для контроля в районе установки регазификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mokhtab S. Handbook of Liquefied Natural Gas. — 1st Edition / S. Mokhtab, J. Y. Mak, J. V. Valappil, D. A. Wood. — Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2014. — 589 p.
2. ГОСТ Р 56400-2015 Нефтяная и газовая промышленность. Проектирование и эксплуатация морских терминалов сжиженного природного газа. Общие требования.
3. Блинков А.Н., Власов А.А., Шурпак В.К. Анализ способов применения газового топлива в судовых энергетических установках //Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. — Вып. 34.— 2011.- с. 177 – 197.
4. ABS Rules for building and classing steel vessels, 2014.
5. Bureau Veritas (BV). Note for the Classification of Offshore Floating Gas Units. Tentative Rules. NR 542 R01. Dec. 2010.
6. Det Norske Veritas (DNV). RULES FOR CLASSIFICATION OF SHIPS PART 6 CHAPTER 30, Regasification. Det Norske Veritas. Høvik, Norway, January 2013.

REFERENCES

1. S. Mokhtab, J. Y. Mak, J. V. Valappil, D. A. Wood. Handbook of Liquefied Natural Gas. 1st Edition. Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2014, 589 p.
2. GOST R 56400-2015 Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Proektirovanie i ekspluatatsiya morskikh terminalov szhizhennogo prirodnogo gaza. Obshchie trebovaniya [State Standard 56400-2015 Petroleum and natural gas industries. Design and operation of offshore terminals of liquefied natural gas. General requirements]. (In Russian)
3. A.N. Blinkov, A.A. Vlasov, V.K. Shurpyak. Review of Gas Fuel Application for Marine Propulsion Plants. Nauchno-tekhnicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva [Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping]. no. 34, 2011, pp. 177 – 197. (In Russian)
4. ABS Rules for building and classing steel vessels, 2014.
5. Bureau Veritas (BV). Note for the Classification of Offshore Floating Gas Units. Tentative Rules. NR 542 R01. Dec. 2010.
6. Det Norske Veritas (DNV). Rules for Classification of Ships. Part 6, chapter 30, Regasification. Det Norske Veritas. Høvik, Norway, January 2013.



ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.7

ПЛАЗОВО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА АПЛ 4-ГО ПОКОЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D МОДЕЛИ

М.М. Корзин, АО «ПО «Севмаш», Северодвинск, тел. +79021953201

М.Н. Паргаменко, АО «ПО «Севмаш», Северодвинск, тел. +79062846276

Р.Ю. Кирпичников, АО «ПО «Севмаш», Северодвинск, тел. +79062825925

На проекте АПЛ 4-го поколения проектант впервые в практике ЦКБ передал 3D-модели корпусных конструкций на завод-изготовитель для плазово-технологической подготовки производства.

За три года специалисты ПКБ «Севмаш», на базе 3D моделирования с использованием собственного программного обеспечения, разработали плазово-технологическую документацию АПЛ 4-го поколения, в том числе конструкций: носовой оконечности, надстройки, ограждения рубки, кормовых стабилизаторов, изделий МСЧ.

Перечень разработанной документации включает в себя: эскизы деталей, информация для изготовления необходимой плазовой гибочной оснастки, контуровочные эскизы, информация для изготовления лекал сборочных постелей.

Передача документации в корпусообрабатывающий цех осуществлялась в бумажном виде и в электронном виде по корпоративной сети предприятия. В настоящее время в опытно-штатном режиме для минимизации бумажного документооборота эскизы деталей передаются только в электронном виде.

В результате проделанной работы были решены следующие задачи:

- автоматизация разработки и формирования ПТД по информации моделей;
- автоматизация технологической разработки деталей чертежа;
- разработано ПТД на конструкции для обеспечения испытаний;
- подготовлена графическая информация для технологического процесса формирования конструкций ограждения рубки на стапеле;
- по данным фактических отклонений осей изделия 24 определено реальное положение вырезов под волнорезные щиты, даны предложения проектанту по доработке корпусных конструкций.

В результате выпуск ПТД на основе информации 3D моделей с использованием собственного программного обеспечения в 2011-2014г. позволил:

- сократить длительность плазово-технологической подготовки производства;
- повысить качество разработки РКД и ПТД;
- согласовать конструкции на этапе моделирования;
- исключить большое количество подгоночных работ при сборке;
- разгрузить ПЛАЗ и технологическую службу корпусообрабатывающего цеха для выпуска ПТД по заказам других проектов АПЛ 4-го поколения.

Ключевые слова: 3D-моделирование, подготовка производства, плазово-технологическая документация, автоматизированный выпуск документации

LOFTING PRE-PRODUCTION OF 4TH GENERATION NPS USING 3D MODELS

M.M. Korzin, JSC "PO "Sevmash", Severodvinsk, tel. +79021953201

M.N. Pargamenko, JSC "PO "Sevmash", Severodvinsk, tel. +79062846276

R.Yu. Kirpichnikov, JSC "PO "Sevmash", Severodvinsk, tel. +79062825925

In the draft of the 4th generation NPS the designer submitted a 3D-model of the hull structures to the factory for lofting preproduction for the first time in the practice of the CDB.

In the three years, the experts of the CDB "Sevmash" developed the lofting documentation for the submarine of the 4th generation, on the basis of 3D modeling using proprietary software and including the designs of bow, superstructure, fence cuttings, feed stabilizers and NFM products. The list of the developed documentation includes: the details sketches, the information necessary for the production of offset table bending tooling, contouring sketches, information for making assembly beds patterns.

The documentation was transferred to the steel-plant both in hard copy and electronically via the corporate network. Currently, to minimize paperwork, the sketches of the details are transmitted electronically only, in the pilot normal mode 110

As a result of this work the following tasks have been accomplished:

- automation of the development and formation of the PDD according to the models;
- automation of the technological development of parts of the drawing;
- PDD developed on a design for testing;
- Graphical information prepared for the process of fencing felling structures formation on the stocks;
- according to the actual misalignment of Article 24 the real position of the wavebreaker shield cutouts was determined, and the proposals on the finalization of the hull structures were made to the designer.

The release of the PDD based on the information of 3D models using our own software (2011-2014) allowed:

- to reduce the duration of lofting preproduction;
- to improve the quality of the development of the design documentation and PDD;
- to come to construction agreements at the modeling stage;
- to considerably reduce the adjustment work during assembly;
- to reduce the workload of the Plaza and the technological service department for the production of steel-PDD on the commissions of other 4th generation submarine projects.

Keywords: 3D-modeling, preproduction, design documentation, automated documentation release

В практику выполнения проектных работ в ведущих конструкторских бюро для заказов подводного кораблестроения уже давно входят системы 3-х мерного компьютерного моделирования заказов.

На проекте АПЛ 4-го поколения АО «СПМБМ «Малахит» впервые в практике ЦКБ передал 3D-модели части корпусных конструкций на завод-изготовитель для плазово-технологической подготовки производства (ПТПП).

По решению Генерального директора разработка плазовой документации с использованием 3D моделей была передана в ПКБ.

От проектанта было получено 102 модели корпусных конструкций и изделий МСЧ, из которых 22 было с гарантией соответствия чертежу, и 80 моделей в справочном режиме. Модели доводились до рабочего состояния специалистами ПКБ «Севмаш» в соответствии с чертежами. Большое количество моделей разрабатывалась непосредственно сектором 223, а именно 19 моделей корпусных конструкций, 55 фундаментов, 49 щитов и откидных листов, 37 моделей оснастки.

Использование 3D моделей в разработке конструкторско-технологической документации позволяет оптимальным образом организовать автоматизированную плазово-технологическую подготовку производства.

Широкая автоматизация плазовых работ и максимально возможное исключение ручных операций при разработке эскизов деталей позволяет избежать большого количества ошибок и ненужных корректировок.

За три года специалисты ПКБ «Севмаш», в количестве 10-12 человек, на базе 3D-моделирования с использованием собственного программного обеспечения, разработали плазово-технологическую документацию (ПТД) АПЛ 4-го поколения, в том числе конструкций: носовой оконечности (рис. 1), надстройки, ограждения ВУ (рис. 2), кормовых стабилизаторов, изделий МСЧ (щиты и откидные листы) (рис. 3). Так же разработаны 3D модели и выпущена рабочая документация на постели для наформовки стеклопластиковых обтекателей.

Перечень разработанной документации включает в себя:

- эскизы деталей с технологической информацией: сборочные припуска, учет зазора, информация по зачисткам, разделкам кромок в соответствии с узлами сварки, указанными в чертеже (рис. 4);
- информацию для изготовления необходимой плазовой гибочной оснастки (шаблонов и каркасов), (рис. 5, 6);
- контуровочные эскизы по заявкам сборочных и стапельных цехов, (рис. 7);



ПРОБЛЕМЫ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА

УДК: 656.61.086:004.942

ПЕРИОДИЧНОСТЬ КОНТРОЛЯ ФУНКЦИИ ГОТОВНОСТИ К ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЙ У СУДОВОГО СПЕЦИАЛИСТА

И.И. Зива, аспирант, ФГБОУ ВПО «Мурманский Государственный Технический Университет», Мурманск

В.А. Ершов, аспирант, ФГБОУ ВПО «Мурманский Государственный Технический Университет», Мурманск.

В.И. Меньшиков, докт. техн. наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Мурманский Государственный Технический Университет», Мурманск.

В работе рассматривается функционирование ненадежного судового специалиста при мгновенном обнаружении принятия им «неработающего» решения. Однако в сложных организационно-технических системах несения судовой вахты принятие «неработающего» решения одним из субъектов человеческого элемента сразу обнаружить невозможно. Поэтому в целях обнаружения «неработающего» решения и повышения уровня безопасности эксплуатации можно использовать различные методы контроля и самоконтроля. Кроме того, в статье изучаются причины, способствующие появлению «неработающих» решений и рассматривается практически важная ситуация: моделирование функции готовности судового специалиста, оценивающее вероятность принятия такого решения.

Применительно к организационно-техническим системам несения вахты предложены выражения, определяющие периодичность оперативного контроля функции готовности судовых специалистов к выбору «неработающих» или ошибочных решений, в предположении, что эти решения идентифицируются и нейтрализуются в случайные моменты времени.

Ключевые слова: система несения вахты, периодичность, контроль функции готовности, решения

PERIODICITY OF THE FUNCTION CONTROL OF A SHIP SPECIALIST'S READINESS TO MAKE DECISIONS

I.I. Ziva, postgraduate student, Murmansk State Technical University, Murmansk

V.A. Yershov, postgraduate student, Murmansk State Technical University, Murmansk

V.I. Menshikov, DSc, professor, Murmansk State Technical University, Murmansk

The present article examines the functioning of an unreliable ship specialist whose faulty decision has been instantly detected. In the complicated organizational and technical circumstances of ship watchkeeping it is often impossible to instantly detect a faulty decision by the human element. Therefore various control and self-control methods can be used for faulty decisions detection and maintenance safety improvement. Moreover, the reasons for making such decisions and the practically relevant situation of a ship specialist's readiness function modeling assessing the probability of making such a decision are herein researched.

Concerning the organizational and technical systems of watchkeeping the expressions defining the periodicity of ship specialist's readiness function control for making faulty "non-working" decisions are given under the surmise that said decisions are detected and neutralized randomly.

Keywords: the system of watchkeeping, the frequency control function of readiness, readiness function control, faulty decision

ВВЕДЕНИЕ

При формировании методик контроля [1] и самоконтроля принятия судовым специалистом неработающих решений важным является обнаружение таких решений в определенные моменты времени, например, кратные некоторому числу T , которое следует назвать периодом контроля деятельности субъекта. При этом решение задачи выбора числа T можно осуществить, привлекая с этой целью критерий максимум функции готовности [1], за время несения вахты и учитывая, что при вычислении величины функции готовности $k_T(t)$, необходимо исходить из случайности времени появления такого решения у судового специалиста.

1. ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Для решения поставленной задачи далее будем считать, что время работы судового специалиста в организационно-технической системе несения вахты без выбора неработающих решений является независимой случайной величиной ξ_i с общей функцией распределения $F_\xi(x) = P\{\xi < x\}$. Времена обнаружения неработающих решений в процессе контроля или самоконтроля η_i также независимы, одинаково распределены с функцией распределения $G_\eta(x) = P\{\eta < x\}$. Пусть далее время идентификации класса решений, в течение которого судоводитель находится в состоянии неопределенности, равно θ , а общее время работы организационно-технической системы несения вахты равно t . В рамках принятых допущений и учитывая результаты работы [1] функцию готовности субъекта несущего вахту можно определить так $k_T(t) = k_T(t)/t$, где $k_T(t)$ – среднее время функционирования субъекта, принимающего работающие решения за время от 0 до t , или $k_T(t) = M\tau_t$. Кроме того, для простоты записей будем считать, что время идентификации θ включается в период контроля последовательности принятия решений. Тогда максимизация величины $k_T(t)$ или, что то же самое, величины $k_T(t)$ по переменной T и является целью данного исследования.

Решение задачи выбора оптимальной величины $T_{\text{опт}}$ будем осуществлять, учитывая тот факт, что момент

$$\chi = ([\xi / T] + 1)T + \eta$$

является моментом регенерации для процесса восстановления деятельности судового специалиста после идентификации неработающего решения [2]. Тогда по формуле полной вероятности [3] можно найти

$$\begin{aligned} k_T(t) &= M\tau_t = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} M\tau_t | \xi_1 = x, \eta_1 = y, t \leq x dF_\xi(x) dG_\eta(y) = \\ &= \iint M\tau_t | \xi_1 = x, \eta_1 = y dF_\xi(x) dG_\eta(y) + \\ &+ \iint_{([x/T] + 1)T + y \geq t} M\tau_t | \xi_1 = x, \eta_1 = y dF_\xi(x) dG_\eta(y) + \\ &\iint_{([x/T] + 1)T + y < t} M\tau_t | \xi_1 = x, \eta_1 = y dF_\xi(x) dG_\eta(y) = J_1 + J_2 + J_3, \end{aligned} \quad (1)$$

где ξ_1 – время принятия первого «неработающего» решения судовым специалистом в организационно-технической системе несения вахты,
 η_1 – время первой идентификации «неработающего» решения и его нейтрализации в организационно-технической системе несения вахты.

В составленном выражении (1) первый интеграл равен

$$J_1 = \iint_{t \leq x} (t - [t/T]\theta) dF_\xi(x) dG_\eta(y), \quad (2)$$

так как в случае, когда время первого принятия «неработающего» решения больше t , время принятия работающих решений равно $(t - [t/T]\theta)$, поскольку время, затрачиваемое на контрольные профилактики, равно $[t/T]\theta$, где $[t/T]$ – целая часть x .

Рассмотрим теперь второе слагаемое выражения (1). Поскольку случай $x < t$, $t \leq ([x/T] + 1)T + y$ означает, что неработающее решение было принято до момента времени t , а обнаружено и нейтрализовано лишь в момент времени $t \leq ([x/T] + 1)T + y$, то потери времени на контрольные профилактические мероприятия должны составлять по-прежнему величину, равную $[t/T]\theta$.

Время же, затраченное на обнаружение «неработающего» решения, будет равно $\psi(x) = (x - [x/T]T - T + \theta)$ и, следовательно, можно записать так

$$J_2 = \iint_{([x/T] + 1)T + y > t} (x - [x/T]\theta - \psi(x)) dF_\xi(x) dG_\eta(y), \quad (3)$$

Наконец, в варианте $(x - [x/T]T + y) < t$ неработающее решение было обнаружено и нейтрализовано ранее времени t , в момент $(x - [x/T]T + y)$, после чего процесс выбора решений начался заново. Время, в течение которого судоводитель принимает работающие решения до выбора «неработающего» решения, составляет, как и ранее, величину $(x - [x/T]\theta - \psi(x))$, а по нейтрализации неработающего решения определяется снова через функцию готовности $k_T(t)$:

$$\begin{aligned} J_3 &= \iint_{0 < ([x/T] + 1)T + y < t} (x - [x/T]\theta - \psi(x)) dF_\xi(x) dG_\eta(y) + \\ &+ \iint_{0 < ([x/T] + 1)T + y < t} k_T(t - [x/T]T - y) dF_\xi(x) dG_\eta(y), \end{aligned} \quad (4)$$

где $k_T(t - ([x/T] + 1)T + y) = M\tau(t - ([x/T] + 1)T - y)$ — среднее время работы судового специалиста с работающими решениями после первой идентификации «неработающего» решения.

Если суммировать выражения (2) – (3), то можно окончательно получить уравнение вида:

$$k_T(t) = f_T(t) + \iint_{0 < ([x/T] + 1)T - y < t} k_T(t - [x/T] + 1)T - y) dF_\xi(x) dG_\eta(y), \quad (5)$$

где

$$f_T(t) = \int_0^t (x - [x/T]\theta - \psi(x)) dF_\xi(x) + \int_0^t (t - [x/T]\theta) dF_\xi(x),$$

$$\psi(x) = (x - [x/T]T - T + \theta),$$

$$x = \max(x, 0)$$

Уравнение (5) относится к числу «хорошо» известных интегральных уравнений типа Вольтерра второго рода. Известно, что решение этого уравнения существует и является единственным в классе непрерывных по времени t функций на любом интервале [4]. Кроме того, функция $k_T(t)$ удовлетворяет системе неравенств:

$$\max_{t \in [0, T]} |k_T(t)| \leq T/(1 - F_\xi(T)G_\eta(T - t)), \quad (6)$$

$$\max_{t \in [0, T]} |k'_T(t)| \leq 1/(1 - F_\xi(T)G_\eta(T - t)), \quad (7)$$

где величину $k'_T(t)$ следует понимать как правую производную функции готовности $k_T(t)$.

Если далее использовать введенную ранее величину $\chi = ([\xi/T] + 1)T + \eta$, то уравнение (5) можно переписать в более простом виде

$$k_T(t) = f_T(t) + \int_0^t k_T(t - z) dH_\chi(z),$$

где $H_\chi(z) = P\{\chi < z\}$ – функция распределения случайной величины.

Используя преобразование Лапласа – Стильеса

$$k_T(s) = \int_0^\infty \exp(-st) dk_T(t),$$

$$f_T(s) = \int_0^\infty \exp(-st) df_T(t),$$

$$H(s) = \int_0^\infty \exp(-st) dH_\chi(t),$$

можно записать

$$k_T(s) = f_T(s) + k_T(s)H(s)$$

или

$$k_T(s) = f_T(s)/(1 - H(s)).$$

Если функцию $H(s)$ выразить через функции распределения и $G_\chi(x)$ и вычислить математическое ожидание величины $\exp(-s [\xi/T] T)$, то с помощью обратного преобразования Лапласа – Стильеса можно получить решение уравнения (5) в замкнутом виде и далее оценить величину $T_{\text{опт}}$. Однако можно использовать и более простой приближенный подход к выбору зависимости для оценки $T_{\text{опт}}$.

2. ПРИБЛИЖЕННОЕ РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Для приближенного решения поставленной задачи введем вполне естественные предположения. Так будем считать, что время работы организационно-технической системы несения вахты T достаточно велико, а время контрольной профилактики последовательности принятия решений θ мало. Тогда $\psi(x) \approx 0$ и выражение для функции $f_T(t)$ записывается так

$$f_T(t) = M\{(\xi - [\xi/T]\theta) \wedge (t - [t/T]\theta)\},$$

где $x \wedge y = \min(x, y)$.

Предел функции $f_T(t)$ при $t \rightarrow \infty$ существует и равен

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f_T(t) = M(\xi - [\xi/T]\theta)$$

Тогда по Тауберовой теореме можно найти

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (k_T(t)/t) = \lim_{s \rightarrow 0} s k_T(s) = \lim_{t \rightarrow \infty} f_T(t) / (\lim_{s \rightarrow 0} (1 - H(s))/s) =$$

$$= M(\xi - [\xi/T]\theta) / M\chi = M(\xi - [\xi/T]\theta) / [M([\xi/T] + 1)T + M\chi].$$

Рассмотрим два случая приближенной оценки величины $T_{\text{опт}}$. В первом случае принимаем, что ξ имеет экспоненциальное распределение с параметром λ , а величина η имеет произвольное распределение, причем $M\eta = \alpha$. Тогда

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (k_T(t)/T) = \frac{\{1/\lambda - \theta/(1 - \exp(-\lambda T))\}}{\{T/(1 - \exp(-\lambda T)) + T + \alpha\}}.$$

Максимизируя полученное выражение по T , получаем

$$T_{\text{опт}} = [2\theta(\alpha + 1/\lambda)]^{1/2}. \quad (8)$$

Рассмотрим второй случай приближенной оценки величины $T_{\text{опт}}$. Во втором случае можно предположить, что ξ имеет относительно монотонное распределение вида

$$F_\xi(x) = \int_0^\infty \exp(-\lambda x) dA(\lambda),$$

где $A(\lambda)$ – некоторая функция распределения.

Для монотонного распределения $F_\xi(x)$ оптимальный период контроля функции готовности судового специалиста определяется так

$$T_{\text{опт}} = [2\theta(M\xi + M\eta)]^{1/2}. \quad (9)$$

Таким образом, используя выражения (8) или (9), можно реализовывать профилактические контрольные мероприятия, позволяющие оценивать состояние судового специалиста при выборе «неработающих» решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сложных организационно-технических системах несения судовой вахты выбор «неработающего» или ошибочного решения одним из субъектов «человеческого элемента» сразу обнаружить невозможно. Поэтому для снижения вероятности выбора «неработающего» или ошибочного решения и, в конечном итоге, повышения уровня безопасной эксплуатации судна необходимо использовать как методы контроля, так и методы самоконтроля.

Для осуществления контрольных мероприятий за качеством принимаемых решений предлагается оптимальный период оценки величины, функции готовности судового специалиста, используя который можно проводить профилактические мероприятия, снижающие вероятность возникновения ошибок, связанных с «человеческим элементом», при управлении состоянием безопасности судовождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марковский И. Н. Функциональная готовность «человеческого элемента» при восприятии навигационной информации от экспертных систем / Марковский И. Н., Позняков С. И., Меньшиков В. И. // Рыбное хозяйство. 2013. - № 6, С. 93 - 95.
2. Кокс, Д., Смит, В. Теория восстановления. М.: Советское радио, 1967.
3. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 2. – М.: Мир, - 1976. – 435 с.
4. Колмогоров, А. Н., Фомин, С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1968.

REFERENCES

1. Markovskij I. N., Poznyakov S. I., Men'shikov V. I. Funkcional'naya gotovnost' "chelovecheskogo e'lementa" pri vospriyatii navigaci-onnoj informacii ot e'kspertnykh system [Functional readiness of the "human element" in the perception of navigational information from expert systems]. Rybnoe khozajstvo [Fishery]. 2013, N 6, pp. 93 - 95. (In Russian).
2. Koks, D., Smit, V. Teoriya vosstanovleniya [Theory of recovery]. Moscow, Soviet radio, 1967. (In Russian)
3. Feller, V. Vvedenie v teoriyu veroyatnostej i ee prilozheniya [Introduction to probability theory and its applications]. Moscow, Mir Publ., vol. 2, 1976, 435 p. (In Russian)
4. Kolmogorov, A. N., Fomin, S. V. E'lementy teorii funkcij i funkcional'nogo analiza [Elements of functions and functional analysis theory]. Moscow, Nauka Publ., 1968. (In Russian)

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. 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. *Neirofiziolgia* [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 MGТУ "Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem"* [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., Mullagalina 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, Mashinostroyeniye 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_farmatsevticheskaja_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 kolichstva 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 незначущих 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 Microsoft Equation 3.0 (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.

6. РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ СТАТЕЙ

6.1 Текст статьи в электронном виде и в твердой копии следует направлять непосредственно в научно-

исследовательский отдел Главного управления Регистра на имя главного редактора журнала. Статья может быть представлена на соответствующей секции Научно-технического совета Регистра и передана ученым секретарем секции в научно-исследовательский отдел вместе с заключением о возможности опубликования.

6.2 Рецензирование статьи осуществляет Редакционная коллегия журнала с привлечением специалистов соответствующих секций Научно-технического совета. По результатам рецензирования статья может быть принята, отклонена или направлена автору на доработку.

6.3 Материалы, не утвержденные Редакционной коллегией к размещению в журнале, возвращаются автору с объяснением причины отказа в публикации.

6.4 Журнал осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих тематике журнала, 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 редакции журнала в течение 5 лет.

6.5 Редакция журнала обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию 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://kmtip.ru/>
<http://www.efg-berlin.de/>
<http://maritimeforum.net/>
<http://korabley.net/>
<http://demoweb.hermosoft.com/efos/>

Российский морской регистр судоходства
Журнал
«Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства»
вып. 44/45

Редакционная коллегия журнала

Ответственные за выпуск: *А.В. Зухарь, М.Р. Маркушина*
Редактор *А.В. Спиленко*
Компьютерная верстка *С.С. Лазарева*
Дизайн концепции *М.В. Батракова*

Подписано в печать 02.12.16. Формат 60 × 84/8
Усл. печ. л.: 15,5. Уч.-изд.л.: 15,2. Тираж 500

Российский морской регистр судоходства
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8
www.rs-class.org/ru/