



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

КОНТЕЙНЕРЫ И КОНТЕЙНЕРНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ
ОБОЗРЕНИЕ 6

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РАБОТЫ ГРУЗОВОГО ТЕРМИНАЛА 19

РАЗВИТИЕ ТРЕБОВАНИЙ РС
К СВАРКЕ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ СТАЛИ ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ 64



№ 54/55
ИЮНЬ
2019

Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 54/55, 2019

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

Учредитель-издатель

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

Главный редактор

М.С. Бойко

E-mail: boyko.ms@rs-class.org

ISSN 2223-7097

Редакционная коллегия

В.И. Евенко – председатель, заместитель генерального директора, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

М.С. Бойко – к.т.н., заместитель председателя, главный редактор журнала, 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., доцент, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
А.А. Иванченко – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания и автоматизации судовых энергетических установок, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
А.В. Ильин – д.т.н., доцент, заместитель генерального директора по научной работе, НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ Прометей»

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

А.В. Марченко – д.т.н., проф., Свальбардский международный университет (UNIS)

В.Н. Половинкин – д.т.н., проф., научный руководитель, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

А.А. Родионов – д.т.н., проф., заведующий кафедрой строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

К.В. Рождественский – д.т.н., проф., проректор в области международного сотрудничества и образования, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

А.Е. Сазонов – д.т.н., проф., член-корр. РАН, ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова

О.Я. Тимофеев – д.т.н., проф., заместитель генерального директора, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

В.Н. Тряскин – д.т.н., проф., заведующий кафедрой конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

Подписка на журнал может быть оформлена по каталогу «Прессинформ». Подписной индекс 87730.

Электронная версия журнала доступна по адресу: www.rs-class.org.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования www.elibrary.ru, Реферативный журнал и фонд научно-технической литературы ВИНТИ РАН, международную базу данных периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory.

Журнал зарегистрирован Министерством связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-64086 от 25 декабря 2015 г.

Решением Президиума ВАК журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» включен в перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук <http://perechen.vak2.ed.gov.ru/>

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

© Российский морской регистр судоходства, 2019

Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, № 54/55, 2019

Scientific and technical periodical has been published since 1916.

The Founder and the Publisher

Russian Maritime Register of Shipping (RS)

Editor-in-Chief

Maxim Boyko

E-mail: boyko.ms@rs-class.org

ISSN 2223-7097

Editorial board

Vladimir Evenko – Deputy Director General, Chairman of Editorial Board, RS

Maxim Boyko – Candidate of Technical Science, Deputy Chairman of Editorial Board, Editor-in-Chief of Research Bulletin by RS, Head of Research Department, RS

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

Andrey Grigoriev – Candidate of Technical Science, Admiral Alexander Ivanchenko – Doctor of Technical Science, professor, Head of Internal Combustion Engines and Automation of Marine Power Plants Department, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Alexey Ilin – Doctor of Technical Science, associate professor, Deputy General Director and Head of Research and Production Complex, NRC "Kurchatov Institute", CRISM "Prometey"

Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
Mikhail Kuteynikov – Doctor of Technical Science, Head of Hull Department, RS

Aleksey Marchenko – Doctor of Technical Science, professor, University Centre in Svalbard, Norway

Valery Polovinkin – Doctor of Technical Science, professor, Research Manager, Krylov State Research Centre

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

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

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

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

Vladimir Tryaskin - Doctor of Technical Science, professor, St. Petersburg State Marine Technical University

Subscription index is 87730 in Pressinform catalog.

On-line version of the journal is available on website: www.rs-class.org.

The journal is included in Russian index of scientific citing www.elibrary.ru, VINITI RAS Scientific and Technical Literature Collection, Ulrich's Periodicals Directory international database.

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media. Registration Certificate ПИ № ФС77-64086 of 25.12.2015.

The journal is included into the List of Supreme Attestation Commission of leading peer-reviewed scientific magazines and editions, in which basic scientific results of doctoral and post-doctoral theses (in application for the scientific degrees of Doctor and Candidate of Science) shall be published <http://perechen.vak2.ed.gov.ru/>

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

© Russian Maritime Register of Shipping, 2019

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

№ 54/55

RESEARCH BULLETIN BY RUSSIAN MARITIME REGISTER OF SHIPPING

Журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства» публикует результаты научных исследований по широкому спектру вопросов безопасности мореплавания судов и морских объектов, охраны человеческой жизни на море, сохранности грузов, экологической безопасности, обзорные материалы и информацию о существенных изменениях действующих правил и руководств Регистра. Журнал предназначен для широкого круга специалистов, связанных с вопросами безопасности человеческой жизни на море, охраны окружающей среды, проектирования и строительства судов и средств освоения шельфа. Также журнал будет интересен студентам и курсантам профильных технических образовательных учреждений.

Регистр выражает признательность авторам статей и приглашает ученых и специалистов к публикациям научных работ в журнале.

Журнал распространяется на специализированных отраслевых мероприятиях, конференциях и выставках.

Журнал входит в Перечень ВАК по следующим группам научных специальностей:

- 05.08.01 – Теория корабля и строительная механика
- 05.08.03 – Проектирование и конструкция судов
- 05.08.05 – Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)
- 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов
- 05.22.19 – Эксплуатация водного транспорта, судовождение

Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping is a periodical covering a wide range of questions in the areas of shipbuilding and shipping, offshore development facilities, up-to-date maritime technology, environmental protection and maritime safety. New research results and scientific developments in the area of shipbuilding, are introduced in our journal.

The journal is intended for specialists of shipbuilding and ship repair companies, design engineering bureaus, research institutes, professors and postgraduate students of marine universities.

Russian Maritime Register of Shipping expresses appreciation to the authors and invites scientists and specialists to submit articles for publication in the journal.

The journal is distributed at trade events, conferences and exhibitions.

The Research Bulletin is included in the list of Supreme Attestation Commission with the following nomenclature of specialties:

- 05.08.01 – Theory of the ship and ship structural mechanics
- 05.08.03 – Ship energetics and its components (main and auxiliary)
- 05.16.01 – Metal science and thermal treatment of metals and alloys
- 05.22.19 – Operation of water transport, navigation

Санкт-Петербург
2019

ОБРАЩЕНИЕ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА РС

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Представляем Вам новый выпуск журнала «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», выход которого традиционно приурочен ко Дню работников морского и речного флота.

Выполнение прикладных научных исследований – один из основных аспектов, обеспечивающих развитие нормативных документов Регистра. В 2019 году по заказу Регистра реализуется ряд научно-исследовательских работ по наиболее перспективным и востребованным у пользователей услуг Регистра направлениям. В частности, подписан договор на разработку проекта Руководства по оценке напряженно-деформированного состояния судовых корпусных конструкций на основе метода конечных элементов. Метод конечных элементов при проектировании конструкций судов сегодня прочно вошел в число стандартных инструментов, применяемых в деятельности проектных организаций. Поэтому разработка нормативного документа Регистра, содержащего рекомендации по практическим аспектам применения метода, будет содействовать его единообразному применению среди организаций, выполняющих разработку проектов современных судов в соответствии с нормативными документами Регистра.

Также в 2019 году по заказу Регистра выполняется работа, посвященная совершенствованию требований к нормам вибрации судовых механизмов, а также совершенствованию требований к освидетельствованию винто-рулевых колонок. Анализ и систематизация опыта применения таких колонок на судах, а также анализ и сопоставление требований международных и отечественных стандартов позволят обеспечить пользователей нормативных документов Регистра новыми требованиями, соответствующими современному уровню развития технологии изготовления и эксплуатации винто-рулевых колонок. По направлению, связанному с развитием и совершенствованием требований к электрооборудованию судов, выполняется научно-исследовательская работа по созданию проекта требований Регистра к комбинированным (гибридным) пропульсивным установкам с обратимыми системами электродвижения.

Кроме того, в 2019 году началась научно-исследовательская работа по созданию проекта требований Регистра к автономным (безэкипажным) судам, включая требования к электрическому оборудованию, автоматизации, радио- и навигационному оборудованию таких судов.

Выше указана лишь часть широкого спектра выполняемых по заказу Регистра научно-исследовательских работ. Полная информация о содержании Плана научно-исследовательских работ представлена на официальном сайте Регистра, а промежуточные и окончательные результаты работ обсуждаются на заседаниях секций Научно-технического совета, публикуются в виде статей в журнале.

Для обеспечения оперативной обратной связи с пользователями услуг и нормативных документов Регистром регулярно проводятся тематические конференции и семинары. Например, в феврале 2019 года Регистром проведена традиционная конференция «Контейнеры и контейнерные перевозки. Актуальные вопросы, идеи, решения», на которой широкий круг представителей отрасли – проектных организаций, изготовителей оборудования, материалов и комплектующих, эксплуатирующих компаний и научных институтов – имел возможность обменяться опытом и обсудить актуальные проблемы контейнерных перевозок. В мае 2019 года Регистром проведена конференция «Правила Регистра для судов ледового класса. Изменения и перспективы развития». Учитывая, что в настоящий момент ледовый флот имеет ключевое значение при решении таких стратегических для экономики страны задач, как развитие шельфовых проектов в Арктике и судоходства по Северному морскому пути, конференция позволила в открытом диалоге с пользователями Правил РС получить отклик по их применению при постройке и эксплуатации судов ледового класса и наметить направления дальнейшего развития требований РС в соответствии с современными запросами рынка.

Помимо представления технически обоснованных предложений по развитию нормативных документов и состава услуг Регистра на конференциях, для них всегда имеется возможность быть опубликованными в виде статей в журнале «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства». Широкая география авторов и читателей, возможность бесплатной публикации и двухэтапное рецензирование поступающих статей позволяет изданию представлять работы по всем основным направлениям развития нормативной базы, поднять и обсудить наиболее острые и актуальные технические вопросы, связанные с проектированием и эксплуатацией современной морской техники.

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

ОБРАЩЕНИЕ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Представляем новый выпуск нашего журнала «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства». При формировании состава выпусков Редакционная коллегия стремится обеспечить в журнале как можно более широкий охват направлений, связанных с проектированием и эксплуатацией современной морской техники. Поэтому особо следует отметить возвращение в текущем выпуске в состав журнала двух рубрик: «Проблемы человеческого фактора» и «Экономика и управление на морском транспорте». В первой из указанных рубрик опубликована статья, которая посвящена системным вопросам подготовки инженеров морских специальностей, вопросам обеспечения конкурентоспособности выпускников отечественных морских вузов на современном рынке труда. Учитывая, что выход данного выпуска журнала приурочен ко Дню работников морского и речного флота, Редакционная коллегия посчитала необходимым в очередной раз обратить внимание читателей на важный аспект подготовки кадров для морской отрасли, который оказывает непосредственное влияние на безопасность человеческой жизни на море. В рубрике «Экономика и управление на морском транспорте» представлена статья, посвященная применению метода имитационного моделирования для оценки пропускной способности морского порта с учетом его работы в составе транспортной цепи «морской транспорт–порт–железнодорожный транспорт».

Также традиционно в состав выпуска включены статьи, подготовленные на основании выполненных по заказу Регистра научно-исследовательских работ. В рубрике «Материалы и сварка» представлена статья, выполненная на основе завершенной в 2018 году научно-исследовательской работе, посвященной совершенствованию требований к сварочным материалам и технологическим процессам сварки конструкций из высокопрочной стали, работающих в условиях низких температур. Совершенствование требований к судам ледового плавания – приоритетное направление научных исследований Регистра, что обусловлено требованиями рынка, однако оно не является единственным и не ограничивает широкий спектр задач, решение которых необходимо для обеспечения Регистра современной и конкурентоспособной нормативной базой. В рубрике «Прочность судов и плавучих сооружений», в частности, опубликована статья, посвященная совершенствованию требований Регистра к конструкции высокоскоростных судов. В рубрике «Информационные технологии» представлены статья с результатами научно-исследовательской работы по созданию и тестированию программного обеспечения Регистра, необходимого для выполнения проверочных расчетов в соответствии с Общими правилами МАКО по конструкции и прочности нефтеналивных и навалочных судов.

От лица Редакционной коллегии выражаю благодарность авторам статей настоящего выпуска журнала и приглашаю заинтересованных авторов к сотрудничеству. Публикация статей в журнале осуществляется на бесплатной основе, при условии прохождения направленными статьями всех этапов рецензирования, предусмотренных современными требованиями к научным публикациям.

М.С. Бойко

Главный редактор, к.т.н.

ФАУ «Российский морской регистр судоходства»



СОДЕРЖАНИЕ

<i>Пальников К.Г.</i> Обращение Генерального директора РС	2
<i>K.G. Palnikov</i> RS Director General address	
<i>Бойко М.С.</i> Обращение главного редактора	3
<i>M.S. Boyko</i> Editor-in-Chief address	
ОБОЗРЕНИЕ: <i>Контейнеры и контейнерные перевозки</i>	6
NEWSROOM: <i>Containers and container shipping</i>	
БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	
MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION	
<i>Добродеев А.А., Сазонов К.Е.</i> Определение безопасной дистанции проводки крупнотоннажных судов во льдах	8
<i>A.A. Dobrodeev, K.E. Sazonov</i> Determination of the safe distance for heavy-tonnage ships escorting in ice	
ОБОЗРЕНИЕ: <i>Правила Регистра для судов ледовых классов</i>	16
NEWSROOM: <i>RS rules for ice class ships</i>	
ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ	
SEA TRANSPORT ECONOMICS AND MANAGEMENT	
<i>Кузнецов А.Л., Семенов А.Д., Валькова С.С.</i> Имитационное моделирование как инструмент оценки влияния вместимости склада морского порта на качество обработки наземного транспорта	19
<i>A.L. Kuznetsov, A.D. Semenov, S.S. Valkova</i> Simulation tool for evaluation of influence of seaport warehouse capacity on inland transport service quality	
МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ	
SEAWORTHINESS	
<i>Пеплин Ф.С., Чекмарев Д.Т., Охотин К.А., Шабаров В.В.</i> Остойчивость судов на воздушной подушке с гибким ограждением баллонетного типа на эксплуатационных режимах	31
<i>F.S. Peplin, D.T. Chekmarev, K.A. Okhotin, V.V. Shabarov</i> Stability of amphibious air cushion vehicles with ballonet type board seals in operational conditions	
<i>Глушков С.В., Мажирин И.А.</i> Упрощенная математическая модель движения судна с активными средствами управления и оценка ее адекватности	39
<i>S.V. Glushkov, I.A. Mazhirin</i> Simplified mathematical modelling of ships with active control elements movement and its accuracy measurement	

ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ **STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES**

Крыжжевич Г.Б. Гидродинамическое демпфирование колебаний глиссирующих судов и оценка нагрузок на их конструкции. 49

G.B. Kryzhevich Hydrodynamic damping of planing boats vibration and evaluation of loads on structures

МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА **MATERIALS AND WELDING**

Иванов М.А., Тиньгаев А.К., Ильин И.А. Совершенствование требований РС к сопротивлению образованию холодных трещин сварных соединений судокорпусных конструкций из высокопрочных сталей. 64

M.A. Ivanov, A.K. Tingaev, I.A. Ilyin Improvement of RS requirements for the cold cracks resistance in welded joints of ship hull high-strength steel structures

Кулешов И.И., Чернаткин И.И. Влияние технологических режимов лазерного упрочнения на количество остаточного аустенита в зоне лазерного воздействия. 78

I.I. Kuleshov, I.I. Chernatkin Impact of laser hardening technological regimes on the amount of residual austenite in the laser exposure zone

Дектярев А.В., Гришин П.Р., Пчелинцев А.В., Морозов В.Н. Опыт применения 3D-печати в судовом машиностроении на примере ремонта системы судовой пожарной автоматики. 87

A.V. Dektyarev, P.R. Grishin, A.V. Pchelintsev, V.N. Morozov Application of 3D printing in marine engineering as exemplified by ship fire automatics system repair

МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ **MECHANICAL INSTALLATIONS AND PROPULSION**

Дорохов А.Ф., Каргин С.А. Судовые дизели с замкнутым газовыхлопом и анализ термодинамического цикла. 96

A.F. Dorokhov, S.A. Kargin Marine diesels with closed gas exhaust and thermodynamic cycle analysis

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **INFORMATION TECHNOLOGY**

Тряскин В.Н., Рюмин С.Н., Кутейников М.А. Автоматизированная система "ATLAS". Назначение и структура. Методические основы. Результаты опытной эксплуатации. 106

V.N. Tryaskin, S.N. Ryumin, M.A. Kuteynikov The ATLAS software. Objective and architecture. Methodological basis. Test results

ПРОБЛЕМЫ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА **HUMAN ELEMENT**

Костылев И.И., Орлова Е.Г., Олейников Б.И., Тугушев Р.У. Риски в системе подготовки инженеров морских специальностей высшими образовательными учреждениями. 128

I.I. Kostylev, E.G. Orlova, B.I. Oleynikov, R.U. Tugushev Risks in the system of seafarers' education in higher education institutions

ОБОЗРЕНИЕ: *Безэкипажное судоходство* 136
NEWSROOM: *Autonomous shipping*

ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ 138

ОБОЗРЕНИЕ

КОНТЕЙНЕРЫ И КОНТЕЙНЕРНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ

20 – 21 февраля в Санкт-Петербурге состоялась конференция «Контейнеры и контейнерные перевозки. Актуальные вопросы, идеи, решения», организованная Российским морским регистром судоходства (РС, Регистр).



Приветственное слово Генерального директора РС
К.Г. Пальникова

Выступая на открытии, генеральный директор РС Константин Геннадьевич Пальников отметил, что конференция Регистра по контейнерам проводится раз в два года, и с каждым разом ее аудитория растет. В этом году профессиональный форум объединил представителей 95 организаций контейнерного бизнеса. На конференции представители отрасли – проектные организации, изготовителей оборудования, материалов и комплектующих, эксплуатирующие компании и научные институты – имеют возможность обменяться опытом и обсудить актуальные проблемы контейнерных перевозок. Такой открытый диалог помогает продвигать инициативы, внедрять новые технологии и находить совместные решения по развитию транспортной логистики и отрасли в целом.

Ряд компаний представил на конференции свои новые разработки. В частности, специалисты компании «КОТТА контейнер» рассказали о новой технологии перевалки насыпных грузов, в рамках которой создан инновационный контейнер с возможностью нижней выгрузки, способный выполнять функции вагона, склада и грейфера. Представители промышленной группы «Безопасные технологии» представили транспортно-заправочные комплексы для космической отрасли, включающие контейнеры-цистерны для транспортировки компонентов ракетного топлива. Компания ICT (Innovative Container Technology) презентовала 20-футовые контейнеры стандарта ИСО для перевозки тарно-штучных, жидких и сыпучих грузов, универсальная конструкция которых позволяет быстро переходить от одного типа груза к другому.

Компания Eurotainer выступила с обзором участников мирового рынка танк-контейнеров, основное производство которых сегодня сосредоточено в Китае: 83 % приходится на компании CIMC, Nantong Tank Containers, Singamas и CXIC Group. Представитель крупнейшей из них – CIMC, доля которой от общего числа мирового производства составляет 56 %, присутствовал на мероприятии. Регистр работает со всеми крупными китайскими производителями, а также с российскими компаниями, эксплуатирующими такое оборудование. В рамках форума прошел круглый стол, посвященный вопросам эксплуатации контейнеров производства КНР на территории Российской Федерации.

Развитие рынка танк-контейнеров и вопросы импортозамещения в этом сегменте стала темой доклада компании UNICON 1520, специализирующейся на организации транспортных услуг и мультимодальной логистике наливных, в том числе опасных грузов. Представитель компании «Инфотек-Балтика М», парк танк-контейнеров которой составляет 20 % от общего числа такого оборудования, работающего России, рассказал об опыте двухлетней опытной эксплуатации контейнера-цистерны из полимерных композиционных материалов (ПКМ), созданного Концерном «Уралвагонзавод» в сотрудничестве со Сколковским институтом науки и технологий при

участии Регистра. По его словам, контейнер показал себя надежным, простым в эксплуатации и в ремонте, подтвердил ряд прогнозируемых преимуществ по сравнению со стальными аналогами. Несмотря на то, что такое оборудование востребовано на рынке перевозки опасных грузов, его применение в международных морских перевозках не допускается из-за отсутствия необходимых международных требований. Для решения этого вопроса от имени Российской Федерации в экспертную комиссию ООН направлена нота о включении соответствующих требований в типовые правила ООН, а затем – в нормативные документы ИМО. Рассмотрение документа в ООН пройдет в рамках TDG 55 в конце июня – начале июля.

Представитель Сколковского института науки и технологий рассказал, что применение ПКМ сегодня актуально не только для создания сосудов контейнеров-цистерн, но и при изготовлении запорной арматуры для таких контейнеров, так как стальная арматура имеет очень короткий срок службы (в среднем один год) и постоянно требует замены или ремонта. Однако применение и производство в России арматуры из ПКМ ограничено отсутствием необходимой нормативной базы и расчетно-экспериментального обоснования для нее. Решить эту задачу позволит разработанная Сколковским институтом науки и технологий в рамках Национальной технологической инициативы экспериментально-цифровая платформа сертификации, с помощью которой возможно создавать цифровые модели материалов и изделий, прогнозировать их состояние и вероятность отказов с учетом всех возможных технологических дефектов, предполагаемых эксплуатационных повреждений и факторов воздействия окружающей среды.

Большое внимание на конференции было уделено офшорным контейнерам, так как развитие нефтегазовых проектов на шельфе привело к активному росту этого сегмента – только за прошедший год объем технического наблюдения Регистра за такими контейнерами в эксплуатации увеличился в 2,5 раза и продолжает расти. Такие контейнеры существенно отличаются от контейнеров ИСО серии 1 – имеют большую прочность, усиленную раму, эксплуатируются в более сложных условиях (перегрузка выполняется в открытом море), не стандартизированы по массе и размерам, поэтому Правила перевозки грузов в контейнерном транспорте на них не распространяются. К ним применяются требования циркуляра MSC/Circ. 860, стандарты серии EN 12079, а также вступившие в силу в 2018 году стандарты серии ISO 10855, разработанные при участии Регистра. Однако для их безопасной эксплуатации была подчеркнута необходимость разработки национальной нормативной базы, которая содержала бы, в частности, методики определения оптимального крепления таких контейнеров на судне с учетом расчетов остойчивости, критериев качки и т.д.



Доклад начальника отдела по техническому наблюдению за контейнерами РС А.В. Фетисова

Как отметили участники конференции, отсутствие необходимой нормативной базы, а также несоответствие национальных и международных требований – осязаемый сдерживающий фактор развития контейнерной отрасли в РФ в целом. В качестве одного из возможных решений, например, в отношении контейнеров, подпадающих под требования Международной конвенции по безопасным контейнерам (КБК), Таможенной конвенции, касающейся контейнеров (КТК), Международного кодекса морской перевозки опасных грузов (МК МПОГ), было предложено рассмотреть вопрос о прямом применении требований соответствующих стандартов ИСО.

В фокусе внимания специалистов на форуме также были вопросы безопасной транспортировки и предупреждения потерь контейнеров в море, проблемы развития рынка рефрижераторных контейнеров, внедрение цифровой составляющей в организацию схем управления контейнерными перевозками. Подробно с материалами конференции можно ознакомиться на сайте РС.



БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 629.123:532.583.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ДИСТАНЦИИ ПРОВОДКИ КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ ВО ЛЬДАХ

А.А. Добродеев, канд. техн. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, e-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru

К.Е. Сазонов, д-р техн. наук, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, e-mail: kirsaz@rambler.ru

В представленной статье рассмотрены различные подходы к определению безопасной дистанции проводки крупнотоннажного судна ледоколом. Масштабное использование в арктических морях крупнотоннажных судов ставит целый ряд новых проблем, которые требуют незамедлительного решения, т.к. от этого во многом зависит облик вновь создаваемых транспортных систем для вывоза углеводородов из районов Крайнего Севера. Одной из таких проблем является обеспечение безопасности ледового плавания крупнотоннажных судов при использовании различных сценариев проводки. Результаты проведенных исследований показывают, что наиболее точную оценку безопасной дистанции дает модельный эксперимент в ледовом опытовом бассейне. Это объясняется тем, что физическое моделирование позволяет учесть особенности движения судна в канале. Авторами статьи проведен ряд экспериментов и рассмотрены различные варианты поведения крупнотоннажного судна при движении в канале. На основе полученных результатов предложен метод расчета ледового сопротивления крупнотоннажного судна при движении в канале. Результаты расчетов по предложенному методу позволяют проводить оценку безопасной дистанции в соответствии с методическими рекомендациями РС.

Ключевые слова: крупнотоннажное судно, ледокол, ледовый канал, проводка судов, модельный эксперимент, ледовый опытовый бассейн

DETERMINATION OF THE SAFE DISTANCE FOR HEAVY-TONNAGE SHIPS ESCORTING IN ICE

A.A. Dobrodeev, PhD, Krylov State Research Centre, St. Petersburg,
e-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru

K.E. Sazonov, DSc, Krylov State Research Centre, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: kirsaz@rambler.ru

The article considers different approaches to determine the safe distance in ice for heavy-tonnage ship escorting by an icebreaker. Large-scale use of heavy-tonnage vessels in Arctic seas rises a variety of new challenges, calling for immediate solution, as they have impact on the development of new marine transport systems for the export of

hydrocarbons from the Arctic. The safety of heavy-tonnage ship navigation in ice conditions when deploying different escorting scenarios is one such issue. The research results demonstrate that the most accurate estimation of the safe distance in ice is produced by model tests in ice tank. It can be explained by the fact that physical modelling makes it possible to determine the specifics of a ship moving in the ice channel. The authors lead a series of experiments and consider different options for a heavy-tonnage ship behavior in the ice channel. Based on the findings the method of ice resistance calculation for a heavy-tonnage ship moving in the ice channel is proposed. The calculation results by the proposed method allow for an assessment of the safe distance in ice in accordance with the RS Methodical Recommendations.

Keywords: heavy-tonnage ship, icebreaker, ice channel, ship escorting in ice, model test, ice tank

ВВЕДЕНИЕ

Соблюдение безопасной дистанции проводки судов ледоколами во льдах является одним из основных требований, обеспечивающих безопасность мореплавания в этих природных условиях [1, 2]. Для обычных судов, ширина которых меньше ширины проводящего их ледокола, а соответственно и ширины ледового канала, вопрос о назначении безопасной дистанции и скорости движения хорошо изучен. Российский морской регистр судоходства (РС) выпустил «Методические рекомендации по выполнению расчета допустимых режимов движения судна во льдах» [3 – 5], в которых описан алгоритм определения безопасных дистанций при проводке ледоколом судов.

Современный этап освоения Арктики характеризуется все более широким использованием крупнотоннажных судов ледового плавания, главные размерения которых существенно превышают размерения ранее эксплуатируемых судов и всех ледоколов. Эксплуатация таких судов в ледовых условиях ставит перед судостроителями и судоходными компаниями целый ряд новых сложных вопросов, некоторые из которых были рассмотрены в работах [6 – 8]. Дополнительные трудности в обеспечении безопасности мореплавания возникают при учете современных требований к достижению повышенных скоростей до 10 – 12 узлов крупнотоннажными судами, перевозящими СПГ, при движении во льдах [9].

Математическая модель, изложенная в методических рекомендациях РС [3], теоретически может быть использована для определения безопасной дистанции и для крупнотоннажных судов. Но, при этом, ледовое сопротивление таких судов должно определяться с учетом особенностей их движения во льдах. Рассмотрению этих вопросов посвящена данная работа, в которой описаны как экспериментальные, так и теоретические методы определения ледового сопротивления и безопасной дистанции.

1. ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ ВО ЛЬДАХ

В данной работе рассматривается только один сценарий движения крупнотоннажного судна во льдах – движение по ледяному каналу, проложенному лидирующим ледоколом. Другие сценарии рассмотрены в работе [8].

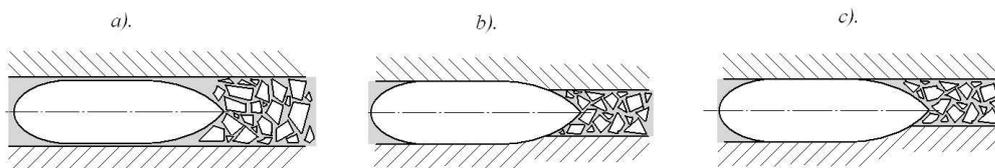


Рис. 1 Варианты движения крупнотоннажного судна по ледяному каналу:
 $a - B_c \geq B_s$; b – симметричный случай; c – несимметричный случай

Существует два варианта реализации указанного сценария движения (рис. 1). Первый, когда ширина канала B_c больше или равна ширине крупнотоннажного судна B_s . Этот случай формально не отличается от традиционной проводки обычного судна в канале за ледоколом. Основное отличие движения крупнотоннажного судна по такому каналу заключается в том, что ширина канала практически совпадает с шириной судна. При этом кромки канала оказывают существенное влияние на величину сопротивления битого льда в канале движению судна. Наибольший интерес представляет сопротивление льда в канале, проложенном в достаточно толстых льдах толщиной более 1,5 м. Это объясняется тем, что в практике мореплавания проводка традиционных транспортных судов ледового плавания ледоколом обычно осуществляется в более тонких льдах.

Способ учета влияния стенок канала на ледовое сопротивление предложен в работе [10]. Однако сравнение результатов модельного эксперимента с данными расчетов по этому методу дали значительные расхождения, что обусловило поиск других расчетных формул [11]. Наилучшие совпадения дала формула, структура которой основана на методе расчета, предложенным В. А. Зуевым [12]. Эта формула записывается следующим образом [11]:

$$R_{BI} = \frac{0,63 \cdot \rho_l g B_s h_l^2}{(B_c/B_s)^{3/4}} \cdot (0,13 \frac{B_s}{h_l} + 1,3Fn_h + 0,5Fn_h^2) \cdot s^2 \cdot (2-s) \quad (1)$$

$$1 - (0,17 - 0,58\beta + 0,66\beta^2),$$

где s – сплоченность льда в канале, $s \in [0 \text{ до } 1]$ (например, 0,1 соответствует 1 баллу сплоченности);
 h_l – толщина мелкобитого льда, м;
 ρ_l – плотность льда, кг/м³;

$Fn_h = V/\sqrt{gh_l}$ – число Фруда, вычисленное по толщине льда;

$\beta = \arctan[\frac{\tan\phi}{\sin\alpha}]$ – угол развала бортов, измеряемый от вертикальной оси, рад;

α_0 – угол входа ватерлинии, рад. В случае рассмотрения бульбообразной формы корпуса угол наклона форштевня ϕ следует принимать равным 90 градусам.



Рис. 2 Проводка танкера «Пропонтис» атомным ледоколом типа «Таймыр» [13]

Второй вариант рассматриваемого сценария движения реализуется, когда ширина крупнотоннажного судна больше, чем ширина канала (рис.1b и 1c). В этом случае крупнотоннажное судно взаимодействует не только с битым льдом в канале, но и вынуждено разрушать своими бортами его

кромки. Недавно было установлено, что движение крупнотоннажного судна по такому «узкому» каналу может осуществляться двумя способами: симметричным и несимметричным [13, 14]. При симметричном движении крупнотоннажное судно располагается таким образом, чтобы его диаметральной плоскостью совпадает с центральной осью ледового канала. При несимметричном движении крупнотоннажное судно располагается в канале таким образом, что один из его бортов трется о кромку ледяного канала, а другой борт ее разрушает, увеличивая тем самым ширину канала за собой (рис. 2). При симметричном и несимметричном движении крупнотоннажного судна по «узкому» каналу его сопротивление будет складываться из двух основных составляющих. Это сопротивление битого льда в канале и сопротивление, связанное с доламыванием кромок канала одним или двумя бортами в зависимости от того, каким образом судно располагается в нем. Эти составляющие сопротивления должны быть учтены при определении безопасной дистанции. Ледовое сопротивление может быть определено как экспериментальным, так и расчетным путем. Рассмотрим эти возможности более подробно.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДХОД

Экспериментальные методы обладают тем достоинством, что автоматически в процессе проведения эксперимента позволяют учесть все особенности формы корпуса крупнотоннажного судна, влияющие на характер его взаимодействия со льдом. В ледовом бассейне Крыловского государственного научного центра разработана специальная методика [16] определения дистанции торможения крупнотоннажного судна при проводке его ледоколом. Особенностью предложенной методики является то, что ледяной канал в ледовом бассейне формируется с помощью самоходной модели лидирующего ледокола, которая изготовлена в одном масштабе с моделью крупнотоннажного судна. Характеристики ее подбираются в соответствии с прогнозируемой скоростью движения ледокола в выбранных ледовых условиях. Затем, в созданном таким образом ледяном канале, проводятся самоходные испытания модели по торможению крупнотоннажного судна, в ходе которых измеряется дистанция торможения. В качестве режимов работы движительного комплекса судна используются следующие маневры: «Стоп» – движение модели, имеющей заданную скорость, с выключенными движителями; «Реверс» – движение модели, имеющей заданную скорость, с движителями, работающими в обратную сторону; «Выход из канала» – перекладка органа управления на один из бортов и другие. Описанная выше процедура применима для определения дистанции торможения не только в сплошных ровных льдах, но и в любых других ледовых условиях, например, в наслоенных льдах, торосистых образованиях, битых льдах и т.п.

На рис. 3 приведены результаты модельных испытаний по определению дистанции торможения крупнотоннажного судна, аналогичного по основным характеристикам современным танкерам-газовозам типа «Ямал Макс». Испытания проводились в ледяном канале, сформированном моделью перспективного ледокола «Лидер» при движении во льду толщиной 1,5 м. В рассмотренном случае, ширина канала, который образуется за ледоколом, в среднем больше на 5 – 7 % ширины выбранного крупнотоннажного судна.

Результаты проведенных исследований позволили получить несколько зависимостей: длины выбега судна от момента начала перекладки ВРК, с целью выполнения маневра «Реверс», до полной остановки и, соответственно, времени, необходимого для полной остановки в зависимости от скорости движения танкера-газовоза в канале за ледоколом. На рис. 3 в качестве примера продемонстрировано, что при скорости движения судна типа «Ямал Макс» в канале за ледоколом «Лидер» во льду толщиной 1,5 м на скорости 12,0 узлов для полной остановки ему понадобится дистанция 900 м и более 3 минут времени. Необходимо отметить, что в расчет также заложено время, необходимое на поворот ВРК на 180 градусов после принятия команды капитана начать экстренное торможение, которое составляет 72 с. Это время соответствует расчетной скорости поворота для системы Azipod VI с 1 насосом: 2,5 градуса/с при плавании в открытом море и ледовых операциях.

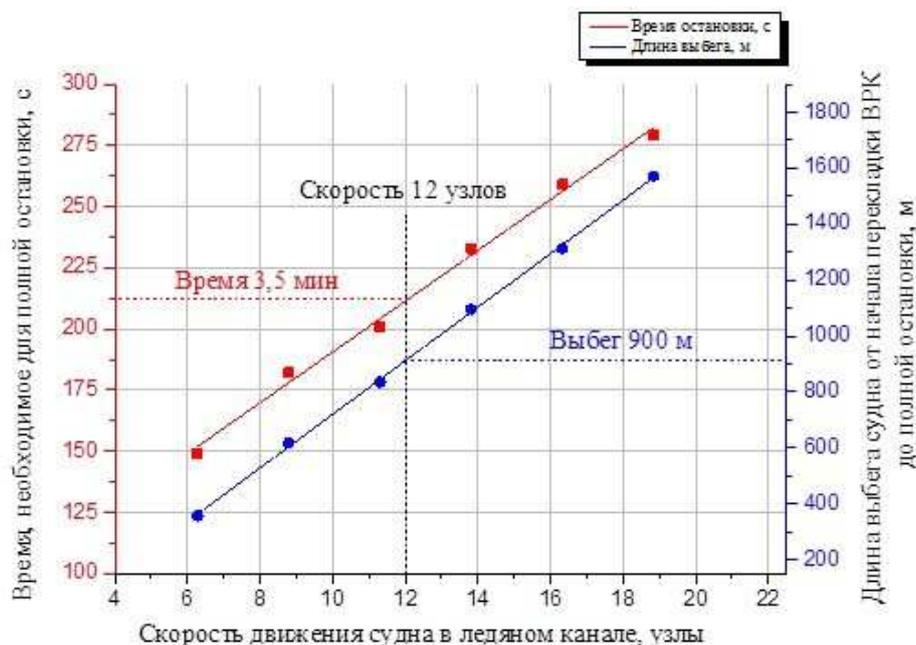


Рис. 3 Результаты экспериментальных исследований применения реверса крупнотоннажным судном для остановки в ледяном канале

3. РАСЧЕТНЫЙ ПОДХОД

Предлагаемый метод теоретического определения ледового сопротивления крупнотоннажного судна в «узком» канале может быть использован для расчета дистанции его торможения во льдах в соответствии с Методическими рекомендациями [3].

Для расчетного определения ледового сопротивления можно использовать простые математические модели: метод расчета ледового сопротивления судна Б.П. Ионова [17] и коэффициенты Ю.А. Шиманского [18]. При использовании метода Б.П. Ионова для случая симметричного движения судна относительно оси ледяного канала для расчета ледового сопротивления R_{LS} строится новый корпус, ширина которого уменьшена на величину ширины канала. Угол притыкания носовой ветви действующей ватерлинии к диаметральной плоскости определяется углом наклона реальной ватерлинии в точке ее касания с кромкой канала, а функции, зависящие от углов наклона теоретических шпангоутов, вычисляются на участке от точки контакта борта с кромкой канала до места расположения максимальной ширины корпуса. Соответствующие поправки вносятся в значения длины носовой оконечности судна. При несимметричном расположении судна относительно оси канала по описанной выше процедуре рассчитывается сопротивление только того борта, который разрушает кромку канала, при этом результат расчета необходимо уменьшить в два раза, учитывая, что второй борт взаимодействует только с мелкобитым льдом в канале. При выполнении расчетов в формулу Б.П. Ионова необходимо внести некоторые коррективы. Хорошо известно, что при прокладке канала ледоколом в ледяном покрове образуется система кольцевых и радиальных трещин, причем выламывание обломка льда корпусом обычно происходит по ближайшей к корпусу кольцевой трещине [19]. Таким образом, корпус крупнотоннажного судна разрушает кромки канала, которые имеют повышенную трещиноватость по сравнению с неразрушенным ледяным покровом. Для учета этого обстоятельства в расчетах рекомендуется принимать уменьшенные в 1,2 – 2,0 раза значения прочности льда на изгиб. Похожим образом учет особенности ломки льда выполнен А.Я. Рывлиным и Д.Е. Хейсиным при

разработке расчетного метода определения зоны допустимых скоростей движения транспортного судна во льдах [20]. Ими предложен численный коэффициент в формуле для расчета суммарного контактного усилия, действующего на конструкции борта, при разрушении льда за счет изгиба. Это позволит несколько снизить ледовое сопротивление. Возможная ошибка, которая может возникать в определении сопротивления, будет совершаться в безопасную сторону, т.к. при снижении сопротивления безопасная дистанция увеличивается.

Метод Б.П. Ионова позволяет рассчитать только ледовое сопротивление судна. Для определения значения величины боковой силы, которая необходима для определения силы трения, действующей на неразрушающий кромку канала борт судна при несимметричном движении судна, можно использовать один из коэффициентов Шиманского. Расчет ледового сопротивления судна R_{IS}^* при несимметричном положении выполнялся по следующей формуле:

$$R_{IS}^* = \frac{R_{ml}}{2} (1 + f_{ld} \eta_{m2}), \quad (2)$$

где R_{ml} – ледовое сопротивление борта судна, разрушающего кромку каналу корпуса;
 f_{ld} – коэффициент трения льда об обшивку корпуса судна;
 η_{m2} – коэффициент ледорезности, определенный для участка борта, разрушающего кромку.

Помимо сопротивления, связанного с разрушением кромок канала, крупнотоннажное судно будет испытывать еще сопротивление битого льда в канале. Для расчета этого сопротивления формула (1) должна быть преобразована. Во-первых, сплоченность льда в этом случае можно принять равной $s = 0,8$, что соответствует верхней границе сплоченности льда в канале за ледоколом. Во-вторых, положить $B_c / (B_s = 1)$. Это допущение основано на том, что в анализируемой расчетной схеме ширина корпуса судна всегда больше, чем ширина ледового канала. Суть расчетной схемы сводится к использованию различных методов оценки составляющих ледового сопротивления от битого и ровного льда. Расчеты составляющей ледового сопротивления от взаимодействия с битым льдом выполняются с использованием модифицированной формулы В.А. Зуева только для той части корпуса, что с ним взаимодействует. Поэтому, в-третьих, дополнительно введено понятие «эффективная ширина канала», которое применяется для рассматриваемого авторами второго расчетного сценария, когда ширина корпуса судна больше ширины канала. Эффективная ширина B_e определяет ту часть корпуса, которая взаимодействует с битым льдом в канале и не участвует в разрушении кромок канала. Для симметричного случая эффективная ширина корпуса (часть ширины корпуса судна, которая взаимодействует с битым льдом) задается следующим соотношением $B_e = B_c$. Тогда расчетная формула может быть записана в следующем виде:

$$R_{IB} = \frac{0,484 \cdot \rho_l g B_c h_l^2 (0,13 \frac{B_e}{h_l} + 1,3 F n_h + 0,5 F n_h^2)}{1 - (0,17 - 0,58\beta + 0,66\beta^2)}. \quad (3)$$

Для несимметричного случая эффективную ширину корпуса необходимо рассматривать состоящей из двух слагаемых $B_e = B_s/2 + (B_c - B_s)/2$. Разбиение эффективной ширины на два слагаемых обусловлено тем, что формулы (1) и (3) записаны для симметричного взаимодействия корпуса со льдом. Для расчета несимметричного взаимодействия, в первом приближении, можно предположить, что сила сопротивления корпуса состоит из двух слагаемых: половины силы сопротивления при движении корпуса шириной B_c и половины сопротивления при движении корпуса шириной $2(B_c - B_s)/2$. Тогда сопротивление от битого льда может быть рассчитано по формуле:

$$R_B^* = \frac{0,242 \cdot \rho_l g h_l^2}{1 - (0,17 - 0,58\beta + 0,66\beta^2)} \times \\ \times [B_s (0,13 \frac{B_s}{h_l} + 1,3 F n_h + 0,5 F n_h^2) + (2B_c - B_s) (0,13 \frac{2B_c - B_s}{h_l} + 1,3 F n_h + 0,5 F n_h^2)]. \quad (4)$$

Общее сопротивление крупнотоннажного судна R_I , движущегося в «узком» канале будет задаваться следующей формулой:

$$\text{в симметричном случае } R_I = R_{IS} + R_{IB}; \quad (5)$$

$$\text{в несимметричном случае } R_I^* = R_{IS}^* + R_{IB}^*. \quad (6)$$

Определенное таким образом ледовое сопротивление крупнотоннажного судна может быть приведено к виду, который необходим для использования в Методических рекомендациях [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что движение крупнотоннажных судов в канале за лидирующим ледоколом имеет свои отличительные особенности, которые необходимо учитывать при определении безопасной дистанции проводки. Наиболее полное определение безопасной дистанции может быть осуществлено при проведении самоходных испытаний моделей в ледовом бассейне. Однако такой подход не всегда возможен. Оценку безопасной дистанции проводки можно выполнить расчетным путем на основании Методических рекомендаций РС [3]. Для выполнения этой оценки необходимо рассчитать ледовое сопротивление крупнотоннажного судна с учетом специфики его движения во льдах. В работе предложен достаточно простой метод расчета, который позволяет выполнить эту оценку.

Исследование выполнено на средства гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20162).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арикайнен А.И., Чубаков К.Н. Азбука ледового плавания. М.: Транспорт, 1987, 224 с.
2. Смирнов А.П., Майнагашев Б.С., Голохвастов В.А., Соколов Б.М. Безопасность плавания во льдах. – М.: Транспорт, 1993, 335 с.
3. Методические рекомендации по выполнению расчета допустимых режимов движения судна во льдах, СПб., Российский морской регистр судоходства, 2012, 18 с.
4. Тряскин В.Н., Дидковский А.В., Кутейников М.А., Грубов Д.А., Андрюшин А.В. Рекомендации по структуре свидетельства о безопасности судна ледового плавания и нормативно-методических указаний РС для его разработки. Научно-технический сборник Российского морского Регистра судоходства. Вып. 32, СПб., 2009 - с. 10–22.
5. Тряскин В.Н., Якимов В.В., Кутейников М.А. Апробация требований нормативно-методических указаний российского морского регистра судоходства для разработки «Информации о безопасности судна ледового плавания». Труды ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова, СПб., 2010, выпуск 55 – с. 21–30
6. Пустошный А.В., Сазонов К.Е. Задачи судостроительной науки на современном этапе освоения Арктики./Вестник Российской Академии наук, т.85, № 7, 2015, с. 593–597.
7. Добродеев А.А., Клементьева Н.Ю., Сазонов К.Е. Современные подходы к обеспечению навигации крупнотоннажных судов во льдах // Транспорт Российской Федерации, № 4(59), 2015. С. 29–32.
8. Сазонов К.Е., Добродеев А.А. Ледовая ходкость крупнотоннажных судов. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2017, 122 с.
9. Пустошный А.В., Сазонов К.Е. Проблемы, связанные с увеличением скорости круглогодичной работы крупнотоннажных транспортных судов в Арктике. // Арктика: экология и экономика 2017, № 3 (27), с.103-110.
10. Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я. Сопротивление льда движению судна. – Л.: Судостроение, 1968, 238 с.
11. Dobrodeev A.A. Refinement of approaches to estimation of ship ice resistance in ice channel based on data from physical model experiments // Proceedings of the 37th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering, OMAE17, June 17-22, 2018, Madrid, Spain, OMAE2018-77396.
12. Зуев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях. Л.: Судостроение, 1986, 207 с.
13. Добродеев А.А., Клементьева Н.Ю., Сазонов К.Е. Несимметричное движение крупнотоннажных судов в «узком» канале /Проблемы Арктики и Антарктики, 2018, т.64, № 2, с. 200-207.
14. Dobrodeev A.A., Klementyeva N.Y., Sazonov K.E. 2018. Large ship motion mechanics in "narrow" ice channel. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 193 012017

15. Рукша В.В., Белкин М. С., Смирнов А. А., Арутюнян В. Г. Структура и динамика грузоперевозок по Северному морскому пути: история, настоящее и перспективы. // Арктика: экология и экономика 2015, № 4 (20), с.104-110.
16. Сазонов К.Е., Добродеев А.А., Кильдеев Р.И., Латушко А.И. Способ определения в ледовом бассейне дистанции торможения крупнотоннажного судна при проводке его ледоколом. Патент на изобретение RUS 2669158
17. Ионов Б.П., Грамузов Е.М. Ледовая ходкость судов. – СПб., Судостроение, 2001, 512 с.; 2-е изд. СПб., «Судостроение», 2013, 504 с.
18. Каштелян В.И., Рывлин А.Я., Фаддеев О.В., Ягодкин В.Я. Ледоколы. Л.: Судостроение, 1972, 286 с.
19. Зуев В.А., Грамузов Е.М., Двойченко Ю.А. Разрушение ледяного покрова. Горьков. политехн. ин-т, Горький, 1989, 89 с.
20. Рывлин А.Я., Хейсин Д.Е. Испытания судов во льдах. – Л.: Судостроение, 1980, 208 с.

REFERENCES

1. Arikaynen A.I., Chubakov K.N. Azbuka ledovogo plavaniya [An ABC of ice navigation]. Moscow, Transport, 1987, 224 p. (in Russ.)
2. Smirnov A.P., Maynagashev B.S., Golokhvastov V.A., Sokolov B.M. Bezopasnost plavaniya vo ldakh [The safety of ice navigation]. Moscow, Transport, 1993, 335 p. (in Russ.)
3. Metodicheskiye rekomendatsii po vypolneniyu rascheta dopustimyykh rezhimov dvizheniya sudna vo ldakh [The Methodological Recommendations of Acceptable Operating Range Calculations for Ship Moving in Ice, St.Petersburg., Russian Maritime Register of Shipping, 2012, 18p. (in Russ.)
4. Tryaskin V.N., Didkovskiy A.V., Kuteynikov M.A., Grubov D.A., Andryushin A.V. Rekomendatsii po strukture svidetelstva o bezopasnosti sudna ledovogo plavaniya i normativno-metodicheskikh ukazaniy RS dlya ego razrabotki [Recommendations on Structure of Ice Ship Safety Certificate and RS Methodological Instructive Regulations on its Development]. Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiyskogo morskogo Registra sudokhodstva [Scientific Research Bulletin]. Issue 32, St. Petersburg, 2009 pp. 10-22 (in Russ.)
5. Tryaskin V.N., Yakimov V.V., Kuteynikov M.A. Aprobatsiya trebovaniy normativno-metodicheskikh ukazaniy rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva dlya razrabotki «Informatsii o bezopasnosti sudna ledovogo plavaniya» [Validation of Requirements in Regulatory Directions of Russian Maritime Register of Shipping for Development of "Information on Ice-Going Ship Safety"]. Trudy CNII im. akad. A.N.Krylova [Proceedings of CNII named after academician A.N. Krylov], St. Petersburg, 2010, Issue 55, 2010, pp. 21-30 (in Russ.)
6. Pustoshnyy A.V., Sazonov K.E. Zadachi sudostroitelnoy nauki na sovremennom etape osvoineniya Arktiki [Challenges to shipbuilding science on the actual stage of Arctic development]. Vestnik Rossiyskoy Akademii nauk [The bulletin of Russian Academy of Sciences], Volume 85, Issue 7, 2015, pp. 593-597. (in Russ.)
7. Dobrodeev A.A., Klement'yeva N.Yu., Sazonov K.E. Sovremennyye podkhody k obespecheniyu navigatsii krupnotonnazhnykh sudov vo ldakh [The modern approaches to maintain the ice performance of heavy-tonnage vessels]. Transport Rossiyskoy Federatsii [The transport of Russian Federation], Issue 4(59), 2015. pp. 29-32. (in Russ.)
8. Sazonov K.E., Dobrodeev A.A. Ledovaya khodkost krupnotonnazhnykh sudov [Ice performance of heavy-tonnage vessels]. St.Petersburg, FGUP "Krylovskiy gosudarstvennyy nauchnyy tsentr" [Krylov State Research Centre], 2017, 122 p. (in Russ.)
9. Pustoshnyy A.V., Sazonov K.E. Problemy, svyazannyye s uvelicheniyem skorosti kruglogodichnoy raboty krupnotonnazhnykh transportnykh sudov v Arktike [Issues Related to Raising the Speeds of Heavy-Tonnage Cargo Vessels during Year-Round Arctic Operations]. Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic. Ecology and economics], 2017, Issue 3 (27), pp. 103-110. (in Russ.)
10. Kashtelyan V.I., Poznyak I.I., Ryvlin A.Ya. Soprotivleniye lda dvizheniyu sudna [Ship ice resistance]. Sudostroenie [Shipbuilding], Leningrad, 1968, 238 pp. (in Russ.)
11. Dobrodeev A.A. Refinement of approaches to estimation of ship ice resistance in ice channel based on data from physical model experiments // Proceedings of the 37th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering, OMAE17, June 17-22, 2018, Madrid, Spain, OMAE2018-77396.
12. Zuev V.A. Sredstva prodleniya navigatsii na vnutrennikh vodnykh putyakh [Means for extending inland water navigation period]. Leningrad, Sudostroyeniye [Shipbuilding], 1986, 207 p. (in Russ.)
13. Dobrodeev A.A., Klementyeva N.Yu., Sazonov K.E. Nesimmetrichnoye dvizheniye krupnotonnazhnykh sudov v "uzkom" kanale [A skewed movement of large-size ships in "narrow" ice channel.]. Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic problems], 2018, Volume 64, Issue 2, pp. 200-207. (in Russ.)
14. Dobrodeev A.A., Klementyeva N.Y., Sazonov K.E. 2018. Large ship motion mechanics in "narrow" ice channel. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 193 012017
15. Ruksha V.V., Belkin M.S., Smirnov A.A., Arutyunyan V.G. Struktura i dinamika gruzoperevozok po Severnomu morskому puti: istoriya, nastoyashcheye i perspektivy [Structure and Dynamics of Cargo Shipments via the Northern Sea Route: Past, Present and Future]. Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic. Ecology and economics], 2015, Issue 4 (20), pp. 104-110. (in Russ.)
16. Sazonov K.E., Dobrodeev A.A., Kildeev R.I., Latushko A.I. Sposob opredeleniya v ledovom bassejne distantsii tormozheniya krupnotonnazhnogo sudna pri provodke ego ledokolom [Method to determine the braking distance of heavy-tonnage vessel in the case of icebreaking escorting in ice tank]. Patent na izobreteniyе [Patent on invention], RUS 2669158. (in Russ.)

17. Ionov B.P., Gramuzov E.M. Ledovaya khodkost sudov [Propulsion Performance of Vessels in Ice]. St. Petersburg: Sudostroenie [Shipbuilding], 2001, 512 p. (in Russ.)
18. Kashtelyan V.I., Ryvlin A.Ya., Faddeev O.V., Yagodkin V.Ya. Ledokoly [Icebreakers]. Leningrad: Sudostroyeniye [Shipbuilding], 1972, 286 p. (in Russ.)
19. Zuev V.A., Gramuzov E.M., Dvoychenko Yu.A. Razrusheniye ledyanogo pokrova [Destruction of Ice Sheet]. Gorkov. politekhn. in-t [Politechnical University in Gorkiy], Gorkiy, 1989, 89 p. (in Russ.)
20. Ryvlin A.Ya., Kheysin D.E. Ispytaniya sudov vo ldakh [Ship ice trials]. Leningrad: Sudostroyeniye [Shipbuilding], 1980, 208 p. (in Russ.)

ОБОЗРЕНИЕ: ПРАВИЛА РЕГИСТРА ДЛЯ СУДОВ ЛЕДОВОГО КЛАССА

27 мая 2019 года в Главном управлении Российского морского регистра судоходства (РС, Регистр) состоялась конференция «Правила Регистра для судов ледового класса. Изменения и перспективы развития», организованная Регистром.

Выступая с приветственным словом, заместитель генерального директора РС Сергей Анатольевич Куликов отметил, что в настоящий момент ледовый флот имеет ключевое значение при решении таких стратегических для экономики страны задач, как развитие шельфовых проектов в Арктике и судоходства по Северному морскому пути. Конференция Регистра была организована для того, чтобы в открытом диалоге с пользователями Правил РС получить отклик по их применению при постройке и эксплуатации судов ледового класса и наметить направления дальнейшего развития требований РС в соответствии с современными запросами рынка.

Как рассказал начальник управления планирования и маркетинга Георгий Николаевич Бедрик, Регистр является лидером в отношении ледового флота: из более 4400 судов под его техническим наблюдением около 3000 составляют суда ледового класса, включая 47 ледоколов. Более 500 судов имеют ледовый класс **Arc4** и выше. На класс Регистра сегодня активно строятся атомоходы, арктические газовозы, танкеры и суда обеспечения, при проектировании которых реализованы инновационные инженерные решения. При этом Регистр стремится быть для представителей отрасли не столько инспектирующей организацией, сколько полноценным помощником.

С обзором изменений в правилах Регистра выступил начальник управления классификации Сергей Александрович Шишкин. В частности, в 2019 году они коснутся отдельного указания ледового класса для корпуса и механической установки, уточнят максимальную осадку судна ледового класса в пресной воде и формулы для определения параметров ледовой нагрузки на корпус судна, обводы которого выходят за пределы, установленные Правилами. Также будут пересмотрены требования к конструктивному оформлению бульбообразной носовой оконечности судов ледовых классов **Arc4**, **Arc5**, **Arc6**, **Arc7**.



Доклад начальника управления классификации РС
С.А. Шишкина

Особое внимание С.А. Шишкин уделил судам «двойного действия», так как эта концепция в настоящий момент является актуальной при проектировании ледового флота. В ближайшее время весь комплекс требований к таким судам будет внедрен в виде новой главы в часть XVII Правил классификации и постройки морских судов. Нововведения затронут назначение районов ледовых усилений, форму корпуса носовой и кормовой оконечностей, определение ледовых нагрузок на кормовой район, а также конструкцию кормовой

оконечности, скега и блоков винторулевых колонок (ВРК). При этом сохранена привычная для пользователей Правил схема деления на районы ледовых усилений и набор формул, который традиционно применяется в Правилах Регистра.

Регистр продолжает стремиться к тому, чтобы символ класса РС в максимальной степени отражал специфические технические особенности судна – за последние три года в общей сложности в Правила РС включено более 20 новых знаков класса и дополнительных словесных характеристик, в том числе в отношении судов ледового класса. Полный перечень знаков класса и словесных характеристик приведен в справочнике «Дополнительные знаки и словесные характеристики в символе класса Российского морского регистра судоходства».



Доклад начальника отдела технологий морской транспортировки и хранения СПГ Регистра
М.С. Бойко

Одним из перспективных направлений в сегменте ледового флота Регистра сегодня являются арктические газовозы. Максим Сергеевич Бойко, начальник отдела технологий морской транспортировки и хранения сжиженного природного газа (СПГ) рассказал об особенностях проектирования таких судов, требованиях к грузовым емкостям и изготовлению материалов и изделий, а также предприятиям, выполняющим испытания на непроницаемость мембранных систем в эксплуатации. Кроме того, он информировал об опыте взаимодействия в этой сфере с компанией Gaztransport & Technigaz (GTT), с которой РС активно развивает сотрудничество с 2010 года.

Об актуальных изменениях в Правилах классификационных освидетельствований судов в эксплуатации и в Руководстве по техническому наблюдению за судами в эксплуатации сообщил начальник отдела судов в эксплуатации Александр Васильевич Суворов.



Доклад начальника отдела судов в эксплуатации РС
А.В. Суворова

В частности, в Правилах уточнены положения о порядке присвоения или изменения ледовых классов судов в эксплуатации, о применении нормативов износов конструкций ледовых усилений, в том числе для судов, переходящих в класс РС из классов обществ-членов МАКО. С учетом проведенной научно-исследовательской работы изменены требования к периодичности освидетельствования подводной части ледоколов и судов арктических и полярных классов.



Обсуждение докладов участниками конференции

В настоящий момент Регистр активно применяет специализированное программное обеспечение, которое позволяет инспекторам и клиентам РС с помощью внешнего модуля параллельно вести работу с документацией и отслеживать всю последовательность выставления замечаний в режиме онлайн. Например, хорошо зарекомендовали себя программный комплекс "VOLNA", который используется в процессе освидетельствования судов в эксплуатации, программный комплекс «Проекты судов», в котором осуществляется рассмотрение проектной документации, и другие. Кроме того, ведется разработка нового цифрового продукта, который даст возможность клиентам РС на этапе проектирования полностью выполнять набор корпуса по Правилам Регистра для судов всех типов, в том числе подпадающих под требования Общих правил МАКО.

С презентациями выступлений можно ознакомиться на сайте РС.



ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

УДК 656.613.1

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВМЕСТИМОСТИ СКЛАДА МОРСКОГО ПОРТА НА КАЧЕСТВО ОБРАБОТКИ НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА

А.Л. Кузнецов, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, e-mail: thunder1950@yandex.ru

А.Д. Семенов, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, e-mail: asemyonov054@gmail.com

С.С. Валькова, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Санкт-Петербург, e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

Коммерческую привлекательность терминала определяют различные характеристики, но главной из них является его пропускная способность. Несоответствие пропускной способности порта существующему спросу приводит к утрате доли грузопотока, в то время как именно объем грузопотока позволяет получить эффект масштабной экономии, тем самым обеспечивая устойчивость рыночной позиции терминала. С другой стороны, избыточные мощности увеличивают капитальные затраты, которые не окупаются недостаточным грузопотоком. Пропускная способность порта определяется производительностью слабейшего звена в технологической цепи грузообработки, что требует тщательного анализа как технических характеристик отдельных элементов терминала, так и изучения их взаимного влияния. Целью этого анализа является нахождение баланса между различными ресурсами, оптимального в смысле совокупных затрат. В статье исследуется одна из главных проблем такого рода, проблема взаимодействия морского порта и наземного (железнодорожного) транспорта. Ограниченная вместимость склада в случае задержки прихода в порт судна может привести к появлению очередей на железнодорожных подходах к порту. В случае раннего прибытия судна в порт недостаточное количество груза на складе может приводить к недогрузке судна. В качестве инструмента для получения качественных и количественных оценок этих процессов авторами предлагается использовать имитационное моделирование. Обсуждаемая имитационная модель позволяет получить зависимости длины очереди ожидающих разгрузки поездов на подходах к порту от вместимости склада и производительности железнодорожного грузового фронта.

Ключевые слова: имитационное моделирование, дискретно-событийное моделирование, морской порт, железнодорожный транспорт, вместимость склада

SIMULATION TOOL FOR EVALUATION OF INFLUENCE OF SEAPORT WAREHOUSE CAPACITY ON INLAND TRANSPORT SERVICE QUALITY

A.L. Kuznetsov, DSc, professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, e-mail: thunder1950@yandex.ru

A.D. Semenov, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, e-mail: asemyonov054@gmail.com

S.S. Valkova, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

Different characteristics of a terminal define its commercial attractiveness, but the most important one is its throughput capacity. The difference between demand and the terminal's throughput can lead to the decrease in its cargo flow while cargo flow allows a company to have an effect from economies of scale and to keep its market share. At the same time, surplus of productive capacity increases capital revenue, which cannot be recovered by a small cargo flow. The throughput capacity of a port is defined by the productivity of the weakest element in the technological chain of cargo handling. And this requires precise analysis of technical characteristics of the terminal's elements and their mutual influence. The paper considers one of the crucial problems of the kind – the problem of seaport and inland transport interaction. The limited capacity of a warehouse and the productivity of railroad service may lead to railroad transport queues on the way to the terminal in case of a ship's delay, also causing a possible underload of a ship should it arrive earlier as there may be not enough cargo in the warehouse. The authors suggest simulation modelling as a tool to get qualitative and quantitative evaluations of the processes. The suggested model helps reveal the dependence of length of trains' queues on the warehouse capacity and productivity of handling operations on railroad transport service.

Keywords: *simulation, discrete-event modelling, seaport, railroad transport, warehouse capacity*

ВВЕДЕНИЕ

Современные условия конкуренции грузовых терминалов требуют особого внимания к анализу и диагностике пропускной способности терминала. Несоответствие уровня оказываемых услуг существующему спросу приведет к потере коммерческой привлекательности компании, и, следовательно, к уходу грузопотока на конкурирующие терминалы [1]. Недостаточная пропускная способность отдельных элементов терминала (в частности, железнодорожного или морского грузового фронта) вызовет рост очереди транспортных средств на подходах к порту.

Кроме того, развитие терминала, как правило, сопровождается увеличением грузопотока, требует тщательной оценки его производственной мощности и пропускной способности [2]. Если терминал планирует увеличить поступление грузов, следует оценить соответствие производительности обработки железнодорожных составов, вместимости склада и соответствующему росту грузопотока через морской грузовой фронт [3, 4].

В последнее время для решения подобных проблем все чаще используется компьютерное моделирование исследуемого процесса [5]. Использование моделей позволяет оценить существующую ситуацию и спрогнозировать показатели эффективности при изменении входных данных (объема, структуры, неравномерности грузопотока и т.д.), а также определить ключевые параметры, изменение которых приведет к достижению желаемого результата [6].

Одним из важнейших аспектов операционной работы морского порта является взаимодействие его технологических звеньев с внешним железнодорожным транспортом [7 – 11]. В данной работе предлагается простая и эффективная модель этого взаимодействия. В ней рассматривается экспортный грузопоток, вывозимый через морской порт, что предполагает поступление груза железнодорожным транспортом и убытие его морем. Использование предлагаемой модели позволяет получить качественные и количественные зависимости между входными и выходными параметрами модели. Создание аналогичной модели для импортного направления не вызывает сложности и потому в данной работе не описывается. Несмотря на то, что в качестве грузопотока

выбраны контейнеры, это не исключает применение предлагаемой модели для произвольного вида груза.

1. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Предположим, для наглядности, что в порт по четным дням прибывает два стандартных железнодорожных контейнерных поезда вместимостью $V_r = 120$ TEU каждый, и по нечетным – один поезд. Таким образом, каждые сутки на терминал из тыловых территорий поступает в среднем $(2 \cdot 120 + 120) / 2 = 180$ TEU. За 24 дня в порту будет накоплен объем $180 \cdot 24 = 4320$ TEU, составляющий полную экспортную судовую партию контейнеровоза класса «Панамакс», который с этим интервалом и будут заходить в порт, т. е. вместимость судна составит $V_s = 4320$ TEU. Эпюры изменения объема хранения контейнеров на экспортном складе для этого простейшего (полностью регулярного) случая приведены на рис. 1.

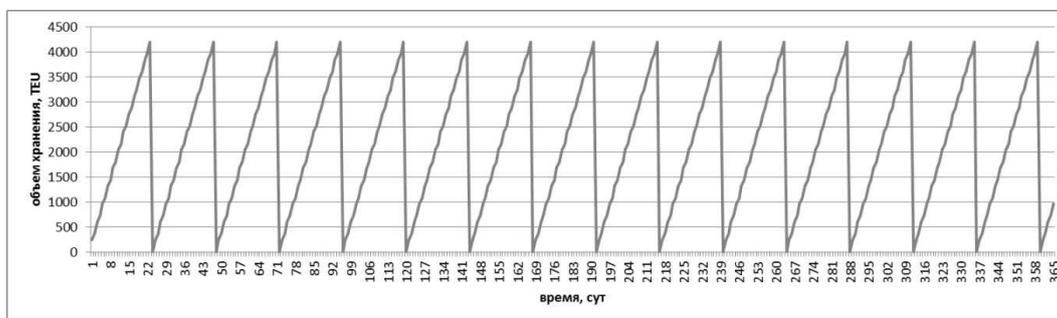


Рис. 1 Изменение объема складирования при регулярном расписании движения

Как видно из рис. 1, требуемый объем склада для этого случая составляет величину 4320 TEU (или 4200 TEU, если считать, что прибывший на терминал по железной дороге груз не попадает на склад, а грузится на судно по прямому варианту).

Предположим также, что приход судна в порт задержится, например, на 10 сут. За этот срок приходящие по расписанию поезда завезут в порт из тыла еще 1800 TEU, и общее количество хранимого на складе терминала груза увеличится до 6120 TEU. Опоздавшее судно сможет вывезти из порта лишь 4320 TEU, и на складе останется излишек в 1800 TEU.

Если следующее судно придет по расписанию, то за остающийся интервал (уменьшившийся на 10 сут вследствие опоздания) на терминал будет завезено меньшее количество груза, однако с учетом имеющегося остатка судовая партия будет сформирована полностью (рис. 2).

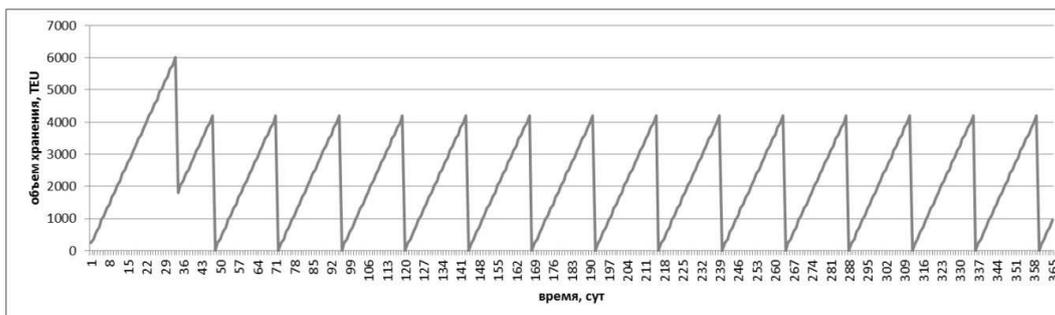


Рис. 2 Изменение объема складирования при опоздании судна

Иной характер процессов будет при наличии ограничения на объем складирования груза. В этом случае после заполнения склада обработка прибывающих на терминал поездов оказывается невозможной. Как следствие, эти поезда будут накапливаться на железнодорожных подходах к порту.

Предположим, не теряя общности, что максимальный объем хранения груза на складе ограничен судовой партией, т. е. составляет 4320 TEU. Как было показано выше, при регулярном характере движения судов и железнодорожных составов этого объема достаточно для обработки грузопотока без образования каких-либо проблем (рис. 1).

Если пришедшее на терминал судно задержится, то переполнение склада не позволит разгружать прибывающие в порт железнодорожные составы, которые будут формировать возрастающую очередь. Возможность принять на терминале состав из очереди появится лишь тогда, когда морские суда вывезут с него груз – в данном случае, для этого будет достаточно одного судна. Поезда из очереди будут приниматься на терминал в количестве, обусловленном пропускной способностью железнодорожного грузового фронта (в нашем случае 240 TEU в сутки), формируя судовую партию для следующего судна.

Если следующее судно придет в порт до момента накопления партии, оно покинет порт недогруженным.

Для того, чтобы создать модель этого процесса, примем следующие обозначения величин, которые характеризуют операции рассматриваемого терминала в произвольные сутки k :

- $i[k]$ – объем прибытия грузов по железной дороге;
- $q[k]$ – объем очереди в ожидании обслуживания;
- $p[k]$ – объем обслуживания поездов на терминале;
- P – производительность терминала при обработке железнодорожных платформ;
- $e[k]$ – объем складирования груза на терминале;
- E – вместимость склада;
- $V[k]$ – вместимость прибывшего за грузом судна;
- $o[k]$ – вывоз грузов с терминала морем.

Исследуемый терминал представляет собой некоторый абстрактный дискретный автомат [12, 13], реакция выходов которого на входные сигналы в момент времени k зависит от его внутреннего состояния, в которое он перешел в предыдущий момент времени $k-1$.

Логика работы модели, т. е. реакция выходных потоков на входные потоки, зависит не только от последних, но и от меняющегося состояния склада терминала. Эти изменения оцениваются на каждом шаге интервала моделирования, соответствующим в данном случае одним суткам k . В этих обозначениях логика изменения состояния модели и реакция на входные потоки описывается приведенным ниже псевдокодом.

1. На терминал поступает объем $i[k]$ грузов по железной дороге.
 2. Со склада может быть вывезено $V[k]$ груза морем.
 3. $p[k] :=$ ЕСЛИ $e[k-1] = E$ ТО 0 ИНАЧЕ
ЕСЛИ $i[k] + q[k-1] > P$ ТО P ИНАЧЕ $i[k] + q[k-1]$
 4. $q[k] :=$ ЕСЛИ $e[k-1] = E$ ТО $i[k] + q[k-1]$ ИНАЧЕ $i[k] + q[k-1] - p[k]$
 5. $e[k] :=$ ЕСЛИ $e[k-1] + p[k] - V[k] > E$ ТО E
ИНАЧЕ $\max(e[k-1] + p[k] - V[k]; 0)$
 6. $o[k] :=$ ЕСЛИ $e[k-1] + p[k] - V[k] > V[k]$ ТО $V[k]$ ИНАЧЕ $e[k-1] + p[k]$
- На рис. 3 представлена соответствующая этому алгоритму блок-схема.

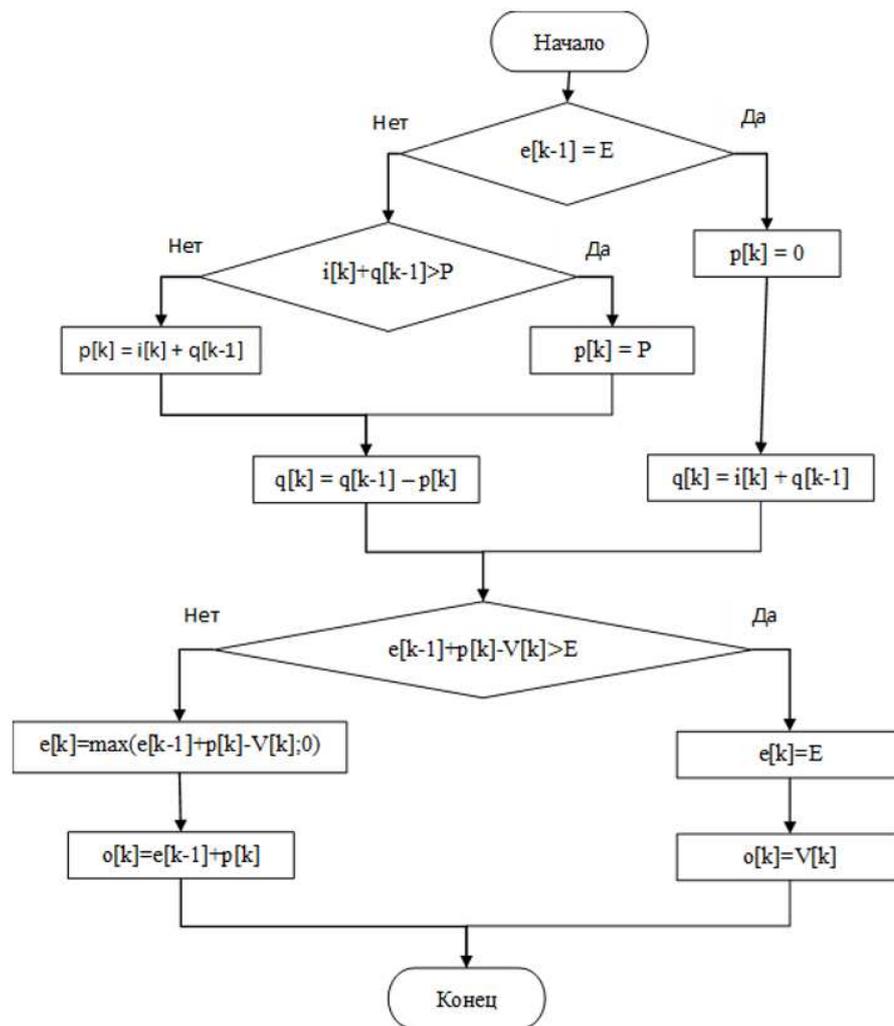


Рис. 3 Алгоритм выполнения шага модели

Из рассмотренного выше примера (рис. 2) видно, что наибольшее влияние на возникновение сингулярных ситуаций оказывает неравномерность прибытия судов, поскольку каждый судозаход связан с необходимостью отгрузки значительных объемов в короткие интервалы времени. Для установления связи неравномерности движения судов с появлением очереди железнодорожного подвижного состава на подходах к порту в исследовании используется специальный генератор судозаходов с управляемыми параметрами. Этот генератор позволяет моделировать движение судов с заданным разбросом вместимости и интервалов судозаходов, характеризующееся различной формы организации (линейной и трамповой). Основная идея построения такого генератора описывается ниже.

Пусть терминал обрабатывает экспортный грузопоток Q , который завозится в порт железнодорожным транспортом и вывозится морским. Часть грузопотока q_1 обеспечивается линейными, другая часть q_t трамповыми судами, $Q = q_1 + q_t$.

Судозаходы линейных судов генерируются на основании недельного графика, описываемого бинарной матрицей $A = |a_{ij}|$, где i – индекс типа судна и j – индекс дня недели. Элемент $a_{ij} = 1$, если судно заходит в j -й день недели (табл. 1). Заданные вместимости судов и количество судозаходов в неделю для каждого из них позволяет определить суммарный недельный и, следовательно, годовой грузопоток линейного судоходства q_1 . При этом принимается, что суда данного типа прибывают без отклонения от графика. Пример задания графика движения линейных судов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Матрица задания графика движения линейных судов

Тип судна	Вместимость	Расписание						
		пн	вт	ср	чт	пт	сб	вс
СК-8000	8000		1			1		
СК-4000	4000			1				1

При генерации судозаходов трамповых судов, следуя традициям проектирования и, в частности, подходу, указанному в нормах технологического проектирования морских портов [14], грузопоток q_i разделяется на доли α_i , каждая из которых обслуживается судами вместимостью V_i . В этом случае количество судов, необходимых для обслуживания данного грузопотока составит $N_i = (q_i \cdot \alpha_i) / V_i$, что позволяет определить среднее значение (математическое ожидание) интервала судозаходов для каждого типа судов $T_i = 365 / N_i$.

Генерация судозаходов трамповых судов осуществляется методом обратной функции [15]. В качестве функции распределения судозаходов принимается закон распределения Эрланга, который так же называется гамма-распределением с целочисленными параметрами [16]. Данная функция имеет следующий вид:

$$f(x) = \frac{\lambda \cdot (\lambda \cdot k)^{n-1}}{(n-1)!} \cdot e^{-\lambda k},$$

где λ – интенсивность поступления заявок (судов): $\lambda = N_i / 365 = 1 / T_i$;
 n – порядок функции Эрланга;
 k – временной интервал (индекс k в модели выше).

В зависимости от порядка функции Эрланга график плотности распределения принимает различный вид (рис. 4).

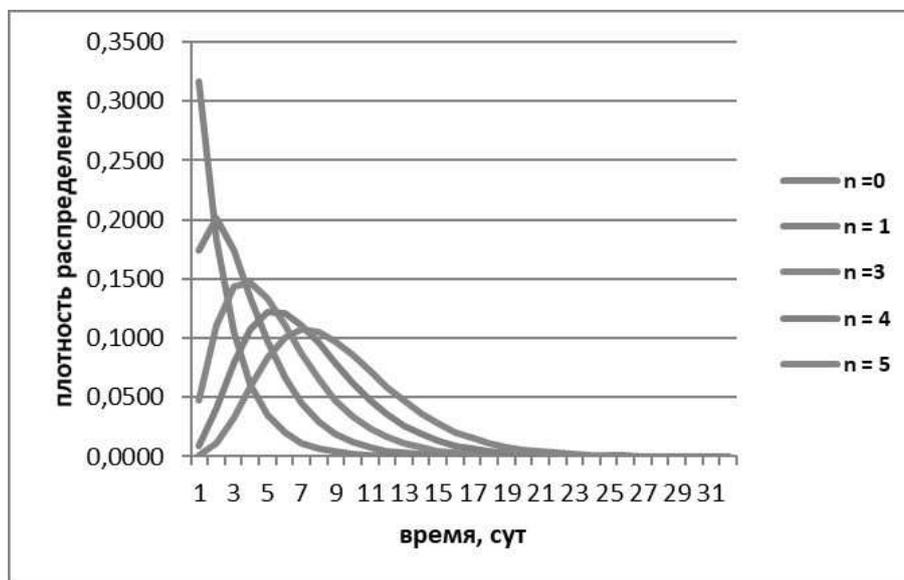


Рис. 4 Плотности распределения вероятностей интервалов между судозаходами при различных порядках функции Эрланга

Как видно из рис. 4, чем выше порядок функции, тем ближе к среднему группируются интервалы прибытия. Соответствующие интегральные характеристики распределения Эрланга различных порядков приведены на рис. 5.

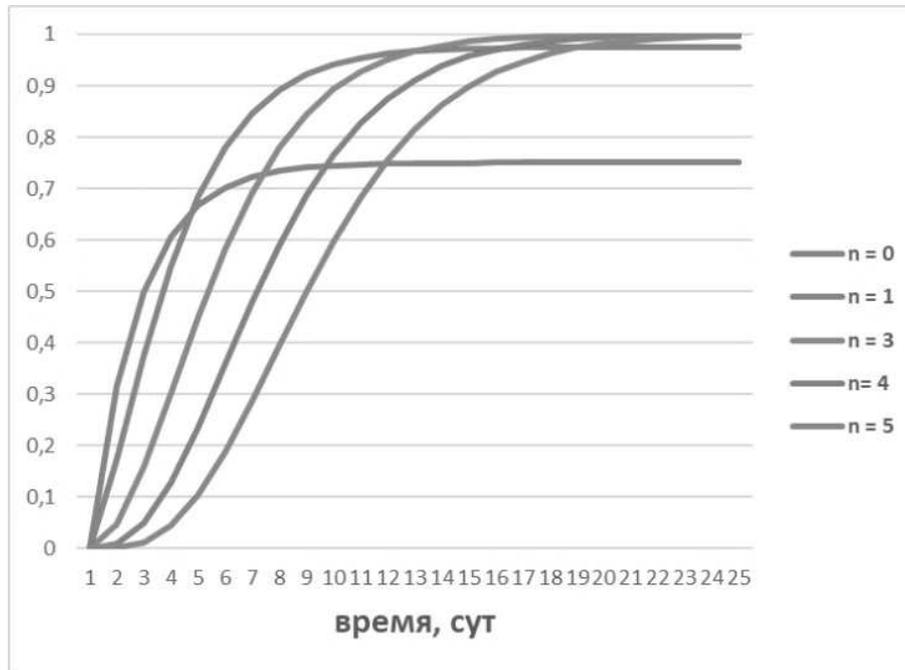


Рис. 5 Интегральные функции распределения при различных порядках функции Эрланга

Проецируя равномерно распределенные на интервале от 0 до 1 случайные числа на значения интегральных функций распределения, можно найти их прообразы (рис. 5), т. е. соответствующим образом распределенные интервалы между прибытием судов каждого типа.

В данном исследовании отклонения расписания движения линейных судов не рассматриваются, и генерируются лишь судозаходы трамповых судов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование процесса грузообработки на терминале с учетом случайного характера прибытия судов позволяет получить представление о возникновении и динамике очереди железнодорожных составов, а также оценить загрузенность покидающих порт судов. На рис. 6 и 7 представлены графики изменения очереди поездов и загрузки судов (вместимостью 5000 TEU) в одном эксперименте.

В дискретную модель также внесены разбросы загрузки поездов и колебания производительности их обработки. На рис. 8 представлены гистограммы распределения вероятностей появления очередей различной длины и загрузенности судов, полученные в результате моделирования работы терминала в течение года.

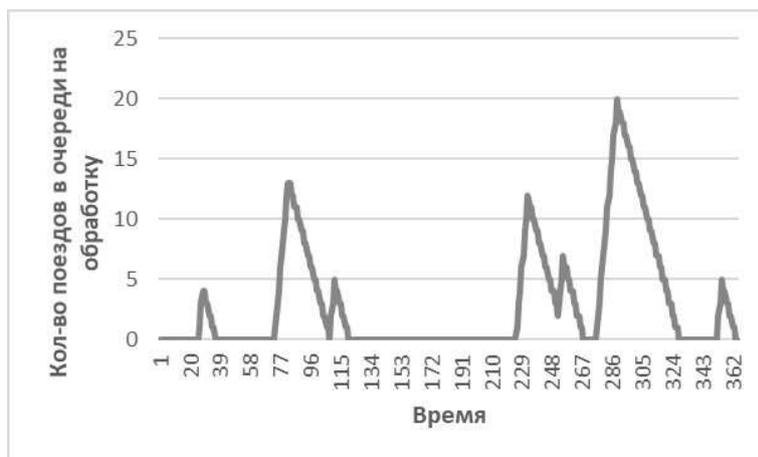


Рис. 6 Изменение очереди у ЖГФ в одном эксперименте

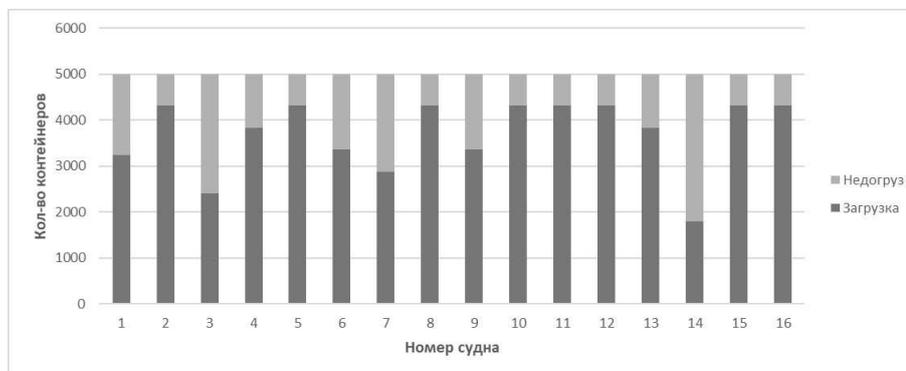


Рис. 7 Диаграмма загрузки судов в одном эксперименте



а)

б)

Рис. 8 Гистограммы распределения вероятностей:
а – количества поездов в очереди; б – загрузки судов

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Выходными оцениваемыми параметрами модели служат средние значения длины очереди и средняя загрузка судна. Основным изменяемым параметром в данном исследовании выбран максимальный размер склада. На рис. 9 представлена зависимость средней очереди поездов от вместимости склада, на рис. 10 – зависимость загрузки судна от производительности обработки поездов.

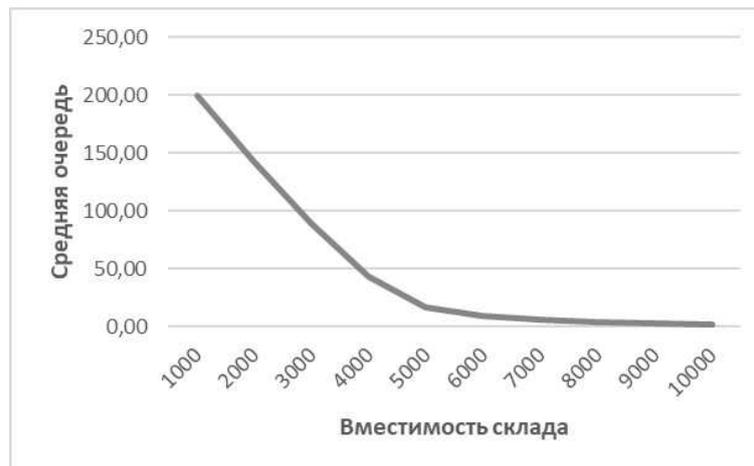


Рис. 9 Зависимость очереди поездов у ЖГФ от вместимости склада

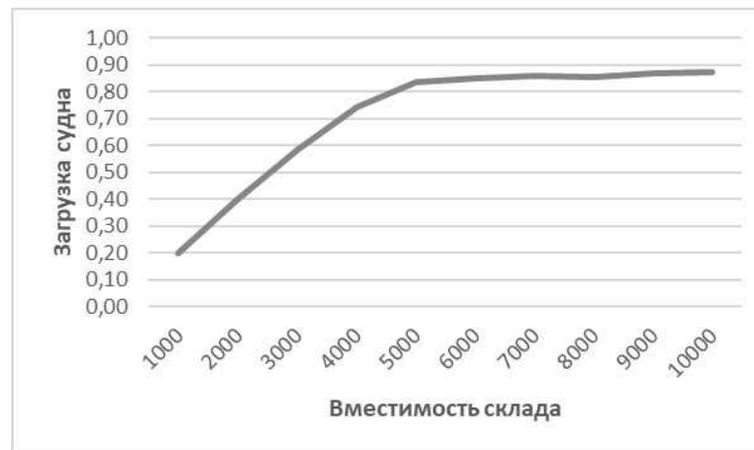


Рис. 10 Зависимость загрузки судна от вместимости склада

Кроме того, еще одним управляемым параметром может служить производительность обработки поезда. На рис. 11 и 12 представлены зависимости средней длины очереди и загрузки судна от данного параметра.

Таким образом, использование предложенной модели позволяет оценить коммерческую привлекательность существующего или проектируемого терминала и на основании этой оценки принять решение о необходимости увеличения производительности обработки поездов или об увеличении вместимости склада.

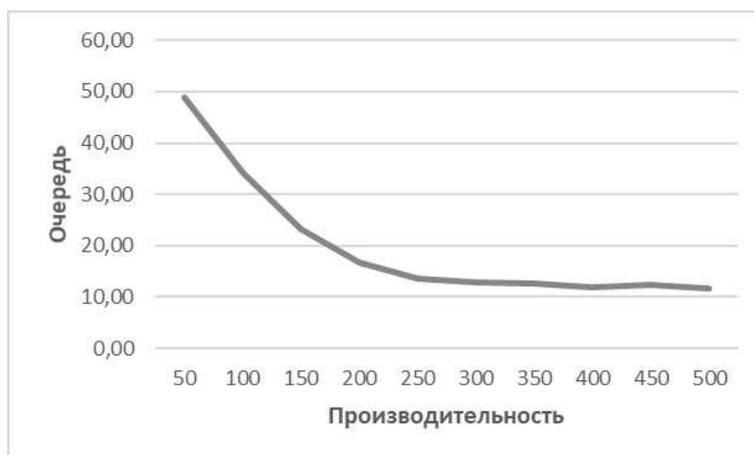


Рис. 11 Зависимость очереди поездов у ЖГФ от производительности обработки поезда

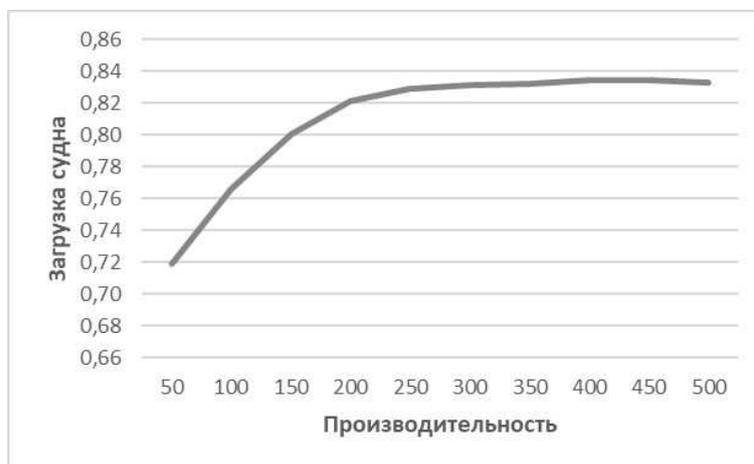


Рис. 12 Зависимость загрузки судна от производительности обработки железнодорожного транспорта

ВЫВОДЫ

В работе описана модель процесса обработки на терминале экспортной партии, поступающей в порт железнодорожным и вывозимой морским транспортом.

Показано, как модель может быть использована для анализа пропускной способности терминала для экспортного направления грузопотока.

Описан способ генерации судозаходов с учетом различных форм судоходства и вместимости судов, который учитывает не только случайный характер интервалов между судозаходами, но и различные формы организации судоходства.

Изложена методика использования предложенной модели для установления зависимости длины очереди железнодорожного подвижного состава и загрузки судов от вместимости склада и производительности обработки железнодорожного транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муравьев Д.С., Мишкурлов П.Н., Рахмангулов А.Н. Использование имитационного моделирования для оценки перерабатывающей способности морских портов и обоснования необходимости сооружения «Сухого» порта //СПТКР. 2013. №4. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-imitatsionnogo-modelirovaniya-dlya-otsenki-pererabatyvayushey-sposobnosti-morskih-portov-i-obosnovaniya-neobkhodimosti](https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-imitatsionnogo-modelirovaniya-dlya-otsenki-pererabatyvayushey-sposobnosti-morskih-portov-i-obosnovaniya-neobkhodimosti-sooruzheniya-sukhogo-porta) (дата обращения: 19.01.2019)
2. Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Щербакова-Слюсаренко В.Н., Погодин В.А. Холистический подход к проектированию, созданию, управлению работой и развитием наземных контейнерных терминалов //Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2017. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/holisticheskiy-podhod-k-proektirovaniyu-sozdaniyu-upravleniyu-rabotoy-i-razvitiem-nazemnykh-konteynernykh-terminalov> (дата обращения: 21.01.2019).
3. Король Р.Г., Балалаев А.С. Имитационное моделирование системы «Железнодорожная станция морской порт» на примере Владивостокского транспортного узла // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2015. №3 (31). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-sistemy-zheleznodorozhnaya-stantsiya-morskoj-port-na-primere-vladivostokskogo-transportnogo-uzla> (дата обращения: 19.01.2019).
4. Ханова А.А., Григорьева И.О. Имитационная модель грузового порта. Использование технологии имитационного моделирования для оценки качества логистического обслуживания грузового порта // Вестник АГТУ. 2008. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-gruzovogo-porta-ispolzovanie-tehnologii-imitatsionnogo-modelirovaniya-dlya-otsenki-kachestva-logisticheskogo> (дата обращения: 19.01.2019).
5. Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Ткаченко А.С., Попов Г.Б. Имитационное моделирование как инструмент расчета наземных контейнерных терминалов // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2018. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-kak-instrument-rascheta-nazemnykh-konteynernykh-terminalov> (дата обращения: 21.01.2019).
6. Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Погодин В.А., Щербакова-Слюсаренко В.Н. Роль имитационного моделирования в технологическом проектировании и оценке параметров грузовых терминалов//Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2017. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-imitatsionnogo-modelirovaniya-v-tehnologicheskom-proektirovanii-i-otsenke-parametrov-gruzovykh-terminalov> (дата обращения: 21.01.2019).
7. Соколов А.А., Соловьев А.А. Основы взаимодействия железнодорожного и водного (морского) транспорта (на примере Мурманского транспортного узла) //Вестник МГТУ. 2015. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovy-vzaimodeystviya-zheleznodorozhnogo-i-vodnogo-morskogo-transporta-na-primere-murmanskogo-transportnogo-uzla> (дата обращения: 19.01.2019).
8. Heilig L., Voß S. Inter-terminal transportation: an annotated bibliography and research agenda //Flexible Services and Manufacturing Journal. – 2017. – Vol. 29. – №. 1. – Pp. 35–63.
9. Tierney K., Voß S., Stahlbock R. A mathematical model of interterminal transportation //European Journal of Operational Research. – 2014. – Vol. 235. – №. 2. – Pp. 448–460.
10. Moller D.P.F. Introduction to transportation analysis, modeling and simulation. – Springer London Limited, 2016.
11. Xie Y., Song D.P. Optimal planning for container prestaging, discharging, and loading processes at seaport rail terminals with uncertainty //Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2018. – Vol. 119. – Pp. 88–109.
12. Mealy, George H. (1955). A Method for Synthesizing Sequential Circuits. Bell System Technical Journal, pp. 1045–1079. URL: <https://archive.org/details/bstj34-5-1045/page/n15> (дата обращения: 21.01.19)
13. Кузнецов А.Л. Теоретико-множественная модель для расчета операционных ресурсов контейнерного терминала/ А.Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, В.Н. Щербакова-Слюсаренко//Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1094–1103.
14. СП 350.1326000.2018 Нормы технологического проектирования морских портов. Дата введения 2018-09-01. URL: <http://docs.cntd.ru/document/550965467> (дата обращения: 21.01.2019)
15. Devroye L. Non-Uniform Random Variate Generation. New York: Springer-Verlag – 1986, p. 843. URL: <http://www.eirene.de/Devroye.pdf> (дата обращения: 23.01.2019)
16. Shortle J. F. et al. Fundamentals of queueing theory. – John Wiley & Sons, 2018. – Vol. 399.

REFERENCES

1. Muraviev D.S., Mishakurov P.N., Rahmangulov A.N. Ispolzovanie imitatsionnogo modelirovaniya dlya otsenki pererabatyvayushey sposobnosti morskikh portov i obosnovaniya neobkhodimosti sooruzheniya "sukhogo" porta [Using simulation process for evaluating the ability of seaports and necessary facilities study "dry" port]. Modern problems of Russian transport complex. 2013. №4 Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-imitatsionnogo-modelirovaniya-dlya-otsenki-pererabatyvayushey-sposobnosti-morskih-portov-i-obosnovaniya-neobkhodimosti> (accessed: 19.01.2019). (In Russian)
2. Kuznetsov A.L., Kirichenko A.V., Shcherbakova-Slyusarenko V.N., Pogodin V.A. Kholistichesky podhod k proektirovaniyu, sozdaniyu, upravleniyu rabotoy I razvitiem nazemnykh konteynernykh terminalov [The holistic approach for the design, creation, management of the operation and development of ground container terminals]. Vestnik ASTU. Series: Maritime

- technique and technology. 2017. №1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/holisticheskiy-podhod-k-proektirovaniyu-sozdaniyu-upravleniyu-rabotoy-i-razvitiem-nazemnyh-konteynernyh-terminalov> (accessed: 21.01.2019). (In Russian)
3. Korol R.G., Balalaev A.S. Imitatsionnoye modelirovanie sistemy "Zheleznodorozhnaya stantsiya morskoy port" na primere Vladivostokskogo transportnogo uzla [The simulation modeling system "Railway station – seaport" Vladivostok transport hub]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2015. №3 (31). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-sistemy-zheleznodorozhnaya-stantsiya-morskoy-port-na-primere-vladivostokskogo-transportnogo-uzla> (accessed: 19.01.2019). (In Russian)
 4. Khanova A.A., Grigorieva O.L. Imitatsionnaya model gruzovogo porta. Ispolzovaniye tekhnologii imitatsionnogo modelirovaniya dlya otsenki kachestva logisticheskogo obsluzhivaniya gruzovogo porta [An imitation model of a cargo port. The use of the technology of imitation modelling for estimation of cargo port logistic service quality]. Vestnik ASTU. 2008. №1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-gruzovogo-porta-ispolzovanie-tehnologii-imitatsionnogo-modelirovaniya-dlya-otsenki-kachestva-logisticheskogo> (accessed: 19.01.2019). (In Russian)
 5. Kuznetsov A.L., Kirichenko A.V., Tkachenko A.S., Popov G.B. Imitatsionnoye modelirovaniye kak instrument rascheta nazemnykh konteynernykh terminalov [Simulation modelling as a dry cargo terminals' calculation tool]. Vestnik ASTU. Series: Maritime technique and technology. 2018. № 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-kak-instrument-rascheta-nazemnyh-konteynernyh-terminalov> (accessed: 21.01.2019). (In Russian)
 6. Kuznetsov A.L., Kirichenko A.V., Pogodin V.A., Shcherbakova-Slyusarenko V.N. Rol imitatsionnogo modelirovaniya v tekhnologicheskoy proektirovaniy I otsenke parametrov gruzovykh terminalov [Importance of simulation modelling for technological design and evaluating parameters of cargo terminals]. Vestnik ASTU. Series: Maritime technique and technology. 2017. № 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-imitatsionnogo-modelirovaniya-v-tehnologicheskoy-proektirovaniy-i-otsenke-parametrov-gruzovykh-terminalov> (accessed: 21.01.2019). (In Russian)
 7. Sokolov A.A., Solovyov A.A. Osnovy vzaimodeystviya zheleznodorozhnogo i vodnogo (morskogo) transporta (na primere Murmanskogo transportnogo uzla) [Interaction of railway and marine transport (Murmansk Transport Hub)]. Vestnik MSTU. 2015. № 1. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovy-vzaimodeystviya-zheleznodorozhnogo-i-vodnogo-morskogo-transporta-na-primere-murmanskogo-transportnogo-uzla> (accessed: 19.01.2019). (In Russian)
 8. Heilig L., Voß S. Interterminal transportation: an annotated bibliography and research agenda. Flexible Services and Manufacturing Journal, 2017, vol. 29, №. 1, pp. 35–63.
 9. Tierney K., Voß S., Stahlbock R. A mathematical model of interterminal transportation. European Journal of Operational Research, 2014, vol. 235, №. 2, pp. 448–460.
 10. Moller D.P.F. Introduction to transportation analysis, modeling and simulation. Springer London Limited, 2016.
 11. Xie Y., Song D.P. Optimal planning for container prestaging, discharging, and loading processes at seaport rail terminals with uncertainty Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2018, vol. 119, pp. 88–109.
 12. Mealy, George H. (1955). A Method for Synthesizing Sequential Circuits. Bell System Technical Journal, pp. 1045–1079. URL: <https://archive.org/details/bstj34-5-1045/page/n15> (accessed: 21.01.19).
 13. Kuznetsov A.L., Semenov A.D., Shcherbakova-Slyusarenko V.N. Teoretiko-mnozhestvennaya model dlya rascheta operatsionnykh resursov konteynernogo terminala [Set theory model for the assessment of the container terminal's operational resources]. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova, № 10.5(2018), pp. 1094–1103.
 14. SP 350.1326000.2018 Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov (2018-09-01) [SP 350.1326000.2018 Standards of seaports technological design]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/550965467> (accessed: 21.01.2019)
 15. Devroye L. Non-Uniform Random Variate Generation. New York: Springer-Verlag – 1986, p. 843. URL: <http://www.eirene.de/Devroye.pdf> (accessed: 23.01.2019)
 16. Shortle J.F. et al. Fundamentals of queueing theory. John Wiley & Sons, 2018, vol. 399.



МОРЕХОДНЫЕ КАЧЕСТВА СУДОВ

ОУДК 629.123

ОСТОЙЧИВОСТЬ СУДОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ С ГИБКИМ ОГРАЖДЕНИЕМ БАЛЛОНЕТНОГО ТИПА НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ

Ф.С. Пеплин, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (ННГУ), Нижний Новгород, e-mail: f-peplin@yandex.ru

Д.Т. Чекмарев, д-р физ.-мат. наук, ННГУ, Нижний Новгород, e-mail: 4ekm@mm.unn.ru

К.А. Охотин, ООО СК «АЭРОХОД», Нижний Новгород, e-mail: ohotin-kirill@yandex.ru

В.В. Шабаров, канд. техн. наук, ООО СК «АЭРОХОД», Нижний Новгород, e-mail: isadymacar@yandex.ru

Объектом исследования является судно на воздушной подушке (СВП), гибкое ограждение (ГО) которого выполнено в виде замкнутых пневмооболочек – баллонетов. Целью работы является создание методики расчета устойчивости судов такого типа на эксплуатационных режимах. Физическая постановка рассматриваемой задачи состоит в определении зависимости восстанавливающего момента от угла крена. Математически данная задача сводится к численному решению системы дифференциальных уравнений, описывающих вертикальное движение центра тяжести судна и изменение массы воздуха в каждой секции воздушной подушки. Уравнения решаются численно, с использованием полу-явного метода Эйлера. Для корректного описания динамики воздушной подушки необходим учет деформации водной поверхности. В настоящей статье предложен способ описания деформации свободной поверхности, основанный на аппроксимации результатов самостоятельных гидродинамических расчетов. Результаты расчетов по данной методике сопоставлены с результатами натурных испытаний.

Ключевые слова: судно на воздушной подушке, баллонет, устойчивость, скеговое судно на воздушной подушке, амфибийность, воздушная подушка, математическое моделирование, кривая статической устойчивости

STABILITY OF AMPHIBIOUS AIR CUSHION VEHICLES WITH BALLONET TYPE BOARD SEALS IN OPERATIONAL CONDITIONS

F.S. Peplin, Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, e-mail: f-peplin@yandex.ru

D.T. Chekmarev, DSc, Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, e-mail: 4ekm@mm.unn.ru

K.A. Okhotin, Shipbuilding Company AEROHOD Ltd., Nizhny Novgorod, e-mail: ohotin-kirill@yandex.ru

V.V. Shabarov, PhD, Shipbuilding Company AEROHOD Ltd., Nizhny Novgorod, e-mail: isadymacar@yandex.ru

The object of the present study is an amphibious air cushion vehicle with pneumatic balloons as a board seal. The paper presents the method of calculating curves of static stability for such ships. The method takes into account the impact of an air cushion upon a hull. The proposed method determines the righting moment for a given angle of heel. Mathematically, the problem is formulated as follows: it is necessary to solve the equation of vertical motion of the ship's center of gravity and equations of air mass balance for each air cushion section. The numerical solution technique is semi-implicit Euler method. For accurate simulation of air cushion dynamics it is necessary to take into account deformations of a free surface under a ship's hull. One of the ways of performing the simulation is by using approximations of a series of numerical fluid dynamics simulations. The proposed method has been validated against the results of full scale testing.

Keywords: *air cushion vehicle, ballonnet, stability, surface effect ship, amphibious vehicle, air cushion, mathematical modeling, curve of static stability*

ВВЕДЕНИЕ

Объектом настоящего исследования является судно на воздушной подушке (СВП), гибкое ограждение (ГО) которого состоит из пары пневмобаллонов, расположенных один над другим (см. рис. 1 – 2). Центральный баллонет используется для продольного секционирования ВП, которое позволяет улучшить управляемость судном и мореходные характеристики при движении на косых курсах к волне. Применяется также поперечное секционирование ВП, обеспечивающее продольную устойчивость хода на ВП на высоких скоростях.

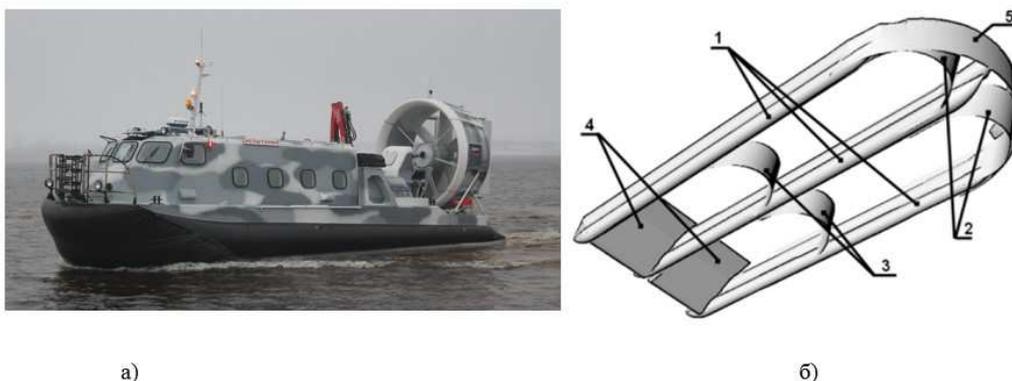


Рис. 1:

а) АСВП с ГО баллонетного типа проекта А20 (водоизмещение 5 – 7 тонн); б) Вариант схемы гибкого ограждения амфибийного СВП с ГО баллонетного типа: 1 – баллонеты, 2, 3, 4 – носовое, промежуточное и кормовое ограждения соответственно, 5 – брызгоулавливатель

Суда такого типа в последние десятилетия получили большое распространение в России. Они совмещают в себе управляемость, ходкость, остойчивость и устойчивость на курсе скеговых СВП с амфибийными качествами классических СВП. Под классическими СВП понимаются СВП с классическим юбочным ограждением (Гепард, Нептун, Ирбис).

В соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства [1, 2], остойчивость СВП должна проверяться в эксплуатационном режиме либо расчетным методом, либо экспериментальным. По требованиям Российского Речного Регистра [3], характеристики остойчивости необходимо подтвердить одновременно и расчетом, и экспериментом. Расчетными случаями являются: действие бокового ветра, циркуляция, продольное и поперечное зарывание в воду, резонансная бортовая качка. Также «должно быть показано расчетом или экспериментом, что в переходных режимах [...] судно после возмущения, вызвавшего вертикальную, килевую или бортовую качки или любую их комбинацию, возвращается в первоначальное состояние без возникновения автоколебаний» [4].

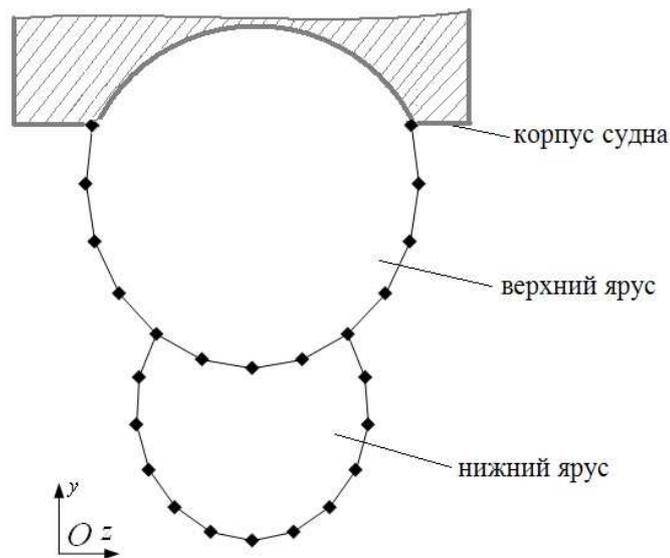


Рис. 2 Поперечное сечение центрального баллонета

Применение технологий вычислительного эксперимента (математического моделирования) позволяет снизить временные и финансовые затраты на отработку аэрогидродинамической компоновки, в том числе для удовлетворения требований остойчивости. Кроме того, в физическом модельном эксперименте проблематично обеспечить одновременное равенство всех критериев подобия (чисел Рейнольдса, Эйлера, Фруда, Коши, Вебера и пр.) для модели и для натуре.

Отметим два существенных обстоятельства, отличающих расчет остойчивости СВП с гибким ограждением баллонетного типа на эксплуатационных режимах от расчета водоизмещающего судна:

1. на корпус СВП действует сила от избыточного давления в области ВП, которая составляет до 90 % веса судна;
2. под действием избыточного давления водная поверхность деформируется, что влечет изменение замкнутых областей баллонетов.

Существующие подходы к расчетной оценке характеристик остойчивости СВП в режиме парения основаны, как правило, на понятии начальной остойчивости [5, 6]. Полуэмпирический алгоритм приближенного расчета кривых статической остойчивости приведен в [6]. В [6] восстанавливающий момент при накренивании СВП формируется только за счет гидростатических сил на накренившем скелете. Используется упрощенная модель воздушной подушки, в соответствии с которой давление воздуха в зоне ВП считается неизменным, расходы втекающего и вытекающего воздуха в любой момент одинаковы, сила тяжести судна уравновешивается давлением в ВП. Такой приближенный подход не позволяет учесть ряд особенностей гидродинамики СВП, и, в первую очередь, влияние числа Фруда на остойчивость. Также в [6] принципиально невозможно учесть такие компоновочные особенности несущего комплекса СВП, как продольное и поперечное секционирование ВП.

В настоящей статье представлен метод определения кривых статической остойчивости, полученный при самых общих предположениях. Данная методика используется в СК «АЭРОХОД» при проектировании СВП с ГО баллонетного типа, однако она может быть применена и для судов с жесткими скелетами.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для построения кривой статической остойчивости необходимо провести серию вычислительных экспериментов, в каждом из которых для фиксированного угла крена вычисляется соответствующий ему восстанавливающий момент. Восстанавливающий момент создается за счет разницы нормальных сил в секциях ВП по левому и правому бортам, а также гидростатических сил на погруженных частях баллонетов.

Для каждого фиксированного угла крена выполняется следующая процедура. Предварительно накрененное судно совершает вертикальные колебания до тех пор, пока сумма действующих на него сил не станет равной нулю. Остальные поступательные и все угловые скорости равны нулю. На корпус судна действуют следующие силы:

1. силы F_i , действующие на корпус судна со стороны i -ой секции воздушной подушки, вычисляемые по формуле

$$F_i = S_i p_i$$

где S_i – площадь секции ВП, м²;
 p_i – давление в секции ВП, Па;

2. сила Архимеда F_{Arch} :

$$F_{Arch} = \rho \cdot g \cdot V,$$

где ρ – плотность воды, кг/м³;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 V – объем погруженной части баллонетов, м³;

3. сила тяжести.

Когда сумма указанных сил и вертикальная скорость судна станут равными нулю, судно займет положение равновесия. Соответствующий этому положению момент и есть искомый восстанавливающий момент.

Задача определения восстанавливающего момента накрененного судна сводится к поиску стационарных решений системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^n p_i S_i + \rho g V_{ГО} \right) - g \quad (1)$$

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{n p_{atm}}{W_i} (Q_i^{in} - Q_i^{out} - Q_i^{int} - \frac{dW_i}{dt}), \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (2)$$

где y – вертикальная координата центра тяжести, м;
 m – масса судна, кг;
 t – время, с;
 p_i – давление в i -ой секции ВП, Па;
 S_i – площадь i -ой секции ВП, м²;
 ρ – плотность воды, кг/м³;
 $V_{ГО}$ – объем погруженной части баллонетов, м³;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 p_{atm} – атмосферное давление, Па;
 Q_i^{in} – объемный расход нагнетателей i -ой секции ВП, м³/с;
 Q_i^{out} – объемный расход воздуха, истекающего из i -ой секции ВП в окружающую среду, м³/с;
 Q_i^{int} – объемный расход воздуха, перетекающего из i -ой секции ВП в соседние, м³/с;
 W_i – объем i -ой секции ВП, м³;
 n – показатель политропы, равный 1,4 для адиабатического процесса;
 s – количество секций ВП.

Уравнения (2) является формулировкой закона изменения массы воздуха в ВП. При выводе (2) сделано предположение, что процесс истечения воздуха адиабатический, а избыточные плотности и давления малы по сравнению со своими стандартными атмосферными значениями.

Начальные условия для уравнений (1) и (2) имеют вид:

$$y(0) = y_0, \frac{dy}{dt}(0) = v_0, p_i(0) = p_i^0, i = 1, 2, \dots, s.$$

Начальную остойчивость судна характеризует метacentрическая высота, определяемая по аналогии с водоизмещающими судами в соответствии с формулой (3) [5]:

$$m_x^\theta = \frac{1}{GW} \left. \frac{\partial M_x}{\partial \theta} \right|_{\theta=0}, \quad (3)$$

где G – вес судна, Н;
 W – ширина воздушной подушки, м.

2. РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НАКРЕНЕННОГО СУДНА

Совместное решение уравнений (1), (2) осуществляется с применением полу-явного метода Эйлера [7]:

$$v_{n+1} = v_n + \left[\frac{1}{m} \left(\sum_{i=1}^n p_i^n S_i + \rho g V^n \right) - g \right] \Delta t$$

$$y_{n+1} = y_n + v_{n+1} \Delta t$$

$$p_i^n = p_i^{n-1} + \frac{n p_{atm}}{W_i} (Q_{i,n}^{in} - Q_{i,n}^{out} - Q_{i,n}^{int} - \frac{\Delta W_i^n}{\Delta t}) \Delta t, i = 1, 2, \dots, s,$$

где индексы $n-1$, n и $n+1$ обозначают принадлежность величины к предыдущему, текущему или следующему шагу по времени соответственно.

При известном давлении расход вентилятора может быть найден из расходно-напорной характеристики:

$$p_i(Q, k) = (A Q_i^{in^2} + B Q_i^{in} k^{1/3} + C k^{2/3}), \quad (4)$$

где k – отношение текущей передаваемой на вентилятор мощности к максимальной;
 A, B, C – константы.

Зависимость (4) является аппроксимацией серии вычислительных или натурных экспериментов. При фиксированном значении давления в секции ВП формула (4) представляет собой квадратное уравнение относительно расхода, разрешая которое можно получить два действительных положительных значения расхода. Для выбора одного значения расхода из двух возможных необходимо руководствоваться информацией о том, при каком значении зазора под гибким ограждением судна получена каждая точка расходно-напорной характеристики. В случае, если уравнение (4) не имеет действительных решений при данном значении давления в ВП, то расход будет отрицательным:

$$Q_i^{in} = \sqrt{\frac{2(p_i - p_i^{\max})}{\rho}} S,$$

где p_i^{\max} – точка максимума расходно-напорной характеристики (4), Па;
 S – площадь выходного отверстия нагнетателя, м².

Характер деформации водной поверхности под действием избыточного давления в воздушной подушке может быть исследован путем проведения серии гидродинамических расчетов для различных значений числа Эйлера $Eu = 2p/(\rho v^2)$. Здесь введены обозначения: V – скорость движения судна, p – среднее давление в ВП, ρ – плотность воздуха в стандартных условиях.

Полученные по результатам моделирования поверхности затем аппроксимируются, например, с помощью рядов Фурье, и могут быть использованы при определении замывов баллонетов.

Деформированную форму свободной поверхности во всем диапазоне чисел Эйлера достаточно определить лишь один раз. Полученные поверхности в безразмерной форме можно затем использовать для всех судов с таким же удлинением ВП. Более подробная информация об определении деформаций водной поверхности содержится в работах [8 – 10].

С целью стабилизации решения в расчет вводится демпфирующее давление в виде (5):

$$\Delta p_i = a \left(\frac{S_{gap}^i}{S_i} \right)^b (-v_i Q_i^{in} S_i + 0,5 v_i^2), \quad i=1; 2; \dots; s, \quad (5)$$

где a, b – константы,
 S_{gap}^i – интегральная площадь зазора,
 v_i – скорость центра давления i -ой секции.

Значение Δp_i в формуле (5) получено как разность реально действующего давления и давления, вычисленного в соответствии с законом изменения массы по формуле (2). Значение констант a, b определяется в результате серии аэродинамических расчетов по методике [11].

Поиск замытых участков баллонетов осуществляется путем отслеживания водной поверхности в каждом поперечном сечении баллонета (см. рис. 2). Объем погруженной части гибкого ограждения судна $V_{ГО}$ вычисляется интегрированием замытых площадей в каждом сечении по длине баллонета.

3. АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ

Представленная методика была применена для построения диаграмм статической и динамической остойчивости двух СВП с ГО баллонетного типа, спроектированных и построенных ООО СК «АЭРОХОД», водоизмещением 6 и 18 тонн. Результаты расчетов представлены на рис. 3. Безразмерная метацентрическая высота, определенная по формуле (3), для судна проекта А20 составляет 2,14, для судна проекта А25 – 2,9.

Непосредственная опытная проверка полученных результатов затруднена практическим отсутствием в настоящий момент надежных методик и датчиков, позволяющих достоверно определять угол крена скоростного судна. Поэтому валидация предложенной методики проведена косвенно, путем сравнения скорости движения судна проекта А20 с креном и без крена.

Рассматривается движение судна проекта А20ПС водоизмещением 6 тонн. Момент крена $M_{x \text{ крен}} = 4000$ Н·м обеспечивается перемещением пассажиров на один борт. При расчетах вместо уравнения (1) использовались шесть уравнений динамики вращательного и поступательного движения, а деформированная форма свободной поверхности рассматривалась как функция не только давления в ВП, но и скорости судна.

Падение скорости по результатам эксперимента составило 21 %, по результатам численного моделирования – 18 %. Таким образом, можно заключить, что предложенная математическая модель достаточно точно описывает динамику движения накрененного судна.

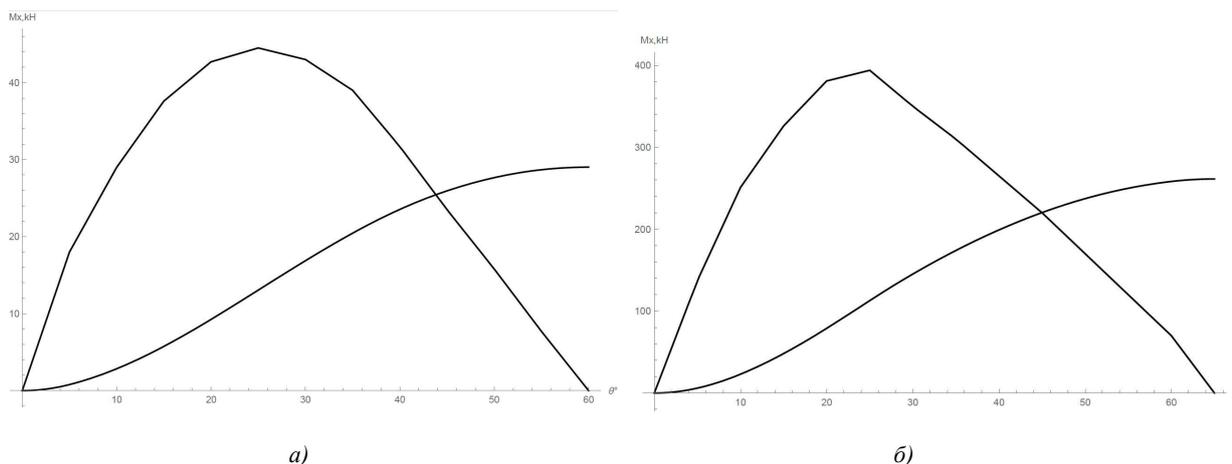


Рис. 3 Диаграммы статической и динамической остойчивости на эксплуатационном режиме:
а) судно проекта А20; б) судно проекта А25

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная выше методика расчета остойчивости судов на воздушной подушке с гибким ограждением баллонетного типа на эксплуатационном режиме движения позволяет получать диаграммы статической остойчивости путем численного решения дифференциального уравнения вертикального движения судна и дифференциального уравнения изменения массы воздуха в зоне ВП.

Разработанная методика внедрена в практику проектирования ООО СК «АЭРОХОД» для оценки остойчивости СВП на эксплуатационном режиме. Сравнение результатов моделирования с результатами натурных испытаний судна проекта А20 показывают, что разработанная методика удовлетворительно описывает динамику накрененного судна.

Диаграммы статической и динамической остойчивости позволяют определять углы крена для заданных кренящих моментов. Значения кренящих моментов, соответствующие различным расчетным случаям, регламентируются руководящими документами [1] – [4].

Описанный подход может быть обобщен для моделирования динамических явлений, влияющих на остойчивость судна (таких, как курсовая неустойчивость, зарывание, бортовая резонансная качка, брочинг). При этом необходимо принять во внимание следующее:

1. высокая скорость движения СВП и практически нулевая осадка вызывают значительную силу сопротивления воздуха. Таким образом, необходимо учитывать силу лобового сопротивления и боковые аэродинамические характеристики, зависящие от угла скольжения.

2. в режиме движения на скоростях $F_r > 0,4$, наряду с силой Архимеда, на баллонеты или жесткие скеги действует значительная гидродинамическая сила. Если $F_r > 1,0$, то гидродинамическая сила превышает силу Архимеда. Экспериментальному определению зависимости характеристик остойчивости СВП скегового типа от скорости хода посвящена работа [12].

3. Должна быть учтена зависимость деформированной формы свободной поверхности не только от давления в ВП (числа Эйлера), но и от скорости (числа Фруда).

Основные положения более общей модели, пригодной для описания динамических явлений, изложены в работе [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Часть IV. Остойчивость. Российский морской регистр судоходства. СПб, 2018.
2. Правила классификации и постройки высокоскоростных судов. СПб, 2018.
3. Правила классификации и постройки судов (ПКПС). Российский Речной Регистр. Москва, 2015.
4. Правила обеспечения безопасности судов с динамическими принципами поддержания. Регистр СССР, 1990.
5. Демешко Г.Ф. Проектирование судов. Амфибийные СВП: Учебник. В 2-х кн. Кн. 2. – СПб: Судостроение, 1992. – 329 с.
6. Смирнов С.А. Суда на воздушной подушке скегового типа. – Л.: Судостроение, 1983. – 216 с.
7. Niiranen, Jouko: Fast and accurate symmetric Euler algorithm for electromechanical simulations. Proceedings of the Electrimacs'99, Sept. 14-16, 1999 Lisboa, Portugal, vol. 1, pp. 71 – 78.
8. Bayraktar Ersan D., Beji S. Numerical simulation of waves generated by a moving pressure patch. Ocean Engineering, 2013, vol. 59, pp. 231 – 239.
9. Sahin Iskender, Hyman M. C.. Simulation of three-dimensional finite-depth wave phenomenon for moving pressure distributions. Ocean Engineering, 2001, vol. 28, pp. 1621 – 1630.
10. Maki K. J., Broglia R., Doctors L.J., Di Mascio A.. Nonlinear wave resistance of a two-dimensional pressure patch moving on a free surface. Ocean Engineering, 2012, vol. 39, pp. 62 – 71.
11. Шабаров В.В., Чекмарев Д.Т., Туманин А.В., Пеплин Ф.С. Определение демпфирующих сил, возникающих при вертикальных колебаниях судна на воздушной подушке на крейсерском режиме движения. Вестник ВГАВТ, 2018, № 55, с. 73 – 82.
12. Богданов А.И., Иванов Е.А. Испытания пассажирского СВП «Зарница» по определению влияния скорости хода на поперечную остойчивость – В сб. «Мореходные качества судов» Труды ЦНИИМФ, 1977, вып. 221, с. 116 – 120.
13. Eremeyev V., Peplin F., Tumanin A. Mathematical Model of Dynamics of Air Cushion Vehicle with Ballonet Type Skirt on Water. Procedia Engineering, 2017, vol. 206, pp. 354 – 359.

REFERENCES

1. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Chast' IV. Ostoychivost' [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part IV. Stability]. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva [Russian Maritime Register of Shipping]. St. Petersburg, 2018.
2. Pravila klassifikatsii i postroyki vysokoskorostnykh sudov [Rules for the Classification and Construction of High-Speed Craft]. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva [Russian Maritime Register of Shipping]. St. Petersburg, 2018.
3. Pravila klassifikatsii i postroyki sudov (PKPS) [Rules for the Classification and Construction of Ships]. Rossiyskiy Rechnoy Registr [Russian River Register]. Moscow, 2015.
4. Pravila obespecheniya bezopasnosti sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya [Rules for Providing Safety for Ships with Dynamical Support]. Registr SSSR, 1990.
5. Demeshko G.F. Proektirovanie sudov. Amfibiynye SVP: Uchebnik. V 2-kh kn. Kn. 2 [Design of Ships. Amphibious air cushion vehicles: textbook. Vol. 2]. St. Petersburg, Sudostroenie, 1992, 329 p.
6. Smirnov S.A.. Suda na vozdushnoy podushke skegovogo tipa [Surface effect ships]. Leningrad, Sudostroenie, 1983, 216 p.
7. Niiranen, Jouko: Fast and accurate symmetric Euler algorithm for electromechanical simulations. Proceedings of the Electrimacs'99, Sept. 14-16, 1999 Lisboa, Portugal, vol. 1, pp. 71 – 78.
8. Bayraktar Ersan D., Beji S. Numerical simulation of waves generated by a moving pressure patch. Ocean Engineering. 2013, vol. 59, pp. 231 – 239.
9. Sahin Iskender, Hyman M.C.. Simulation of three-dimensional finite-depth wave phenomenon for moving pressure distributions. Ocean Engineering. 2001, vol. 28, pp. 1621 – 1630.
10. Maki K.J., Broglia R., Lawrence J. Doctors, Andrea Di Mascio. Nonlinear wave resistance of a two-dimensional pressure patch moving on a free surface. Ocean Engineering. 2012, vol. 39, pp. 62 – 71.
11. Shabarov V.V., Chekmarev D.T., Tumanin A.V., Peplin F.S. Opredelenie dempfiruyushchikh sil, voznikayushchikh pri vertikalnykh kolebaniyakh sudna na vozdushnoy podushke na kreyserskom rezhime dvizheniya [Determination of Damping Forces of Air Cushion Vehicles in Vertical Motion]. Vestnik VGAVT. 2018, № 55, pp. 73 – 82.
12. Bogdanov A.I., Ivanov E.A. Ispytaniya passazhirskogo SVP «Zarnitsa» po opredeleniyu vliyaniya skorosti khoda na poperechnuyu ostoychivost' [The Experimental Determination of the transversal stability characteristics of the Passenger Surface Effect Ship "Zarnitsa" for different operational speeds] – V sb. «Morekhodnye kachestva sudov» Trudy TsNIIMF. 1977, vyp. 221, pp. 116 – 120.
13. Eremeyev V., Peplin F., Tumanin A. Mathematical Model of Dynamics of Air Cushion Vehicle with Ballonet Type Skirt on Water. Procedia Engineering. 2017, vol. 206, pp. 354 – 359.

УДК 517.977+656.61.052

УПРОЩЕННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СУДНА С АКТИВНЫМИ СРЕДСТВАМИ УПРАВЛЕНИЯ И ОЦЕНКА ЕЕ АДЕКВАТНОСТИ

С.В. Глушков, д-р техн. наук, профессор, Морской государственный университет
им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток, e-mail: glushkov@msun.ru

И.А. Мажирин, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток,
e-mail: iliamazhirin@gmail.com

В статье представлен упрощенный способ моделирования движения судов с активными средствами управления. Основой выбранного способа моделирования стала методика, представленная в стандарте IEC 62065. Упрощение заключается в том, что вместо расчета гидро- и аэродинамики судна, используются значения, полученные при ходовых испытаниях, и значения анализа маневра «Циркуляция». Недостатками оригинальной модели из стандарта являются методика расчета, направленная только на суда со стандартными движительно-рулевыми комплексами (под стандартным понимается комплекс: упорный винт – руль), а также отсутствие учета ветрового воздействия. Устранение данных недостатков являются целью работы, результаты которой представлены в данной статье. Кроме того, на примере характеристик реального судна приведены графики моделирования движения и анализ погрешностей, полученных при моделировании циркуляции относительно графика с документацией судна.

Ключевые слова: математическая модель движения судна, движительно-рулевой комплекс, динамическое позиционирование

SIMPLIFIED MATHEMATICAL MODELLING OF SHIPS WITH ACTIVE CONTROL ELEMENTS MOVEMENT AND ITS ACCURACY MEASUREMENT

S.V. Glushkov, DSc, professor, Admiral G.I. Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok,
e-mail: glushkov@msun.ru

I.A. Mazhirin, Admiral G.I. Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok, e mail: iliamazhirin@gmail.com

The article presents a simplified modelling method for the movement of ships with active control elements. The selected technique is based on the movement modelling method of movement from IEC 62065 standard. Modelling is simplified by substituting the calculations of ship hull hydro- and aerodynamics with the values from ship trials and analysis of the Turning Circle Manoeuvre. Disadvantages of the method described in the standard are as follows: calculation of the ship's movement only with traditional propulsion and steering complex (which includes propeller and rudder), and neglecting the action of wind. Elimination of these disadvantages is the purpose of the performed research, whose results are presented in the article. Moreover, the diagram is presented based on the simulation of ship movement using the characteristics of a real ship, supplemented with the accuracy calculation.

Keywords: mathematical model of the ship movement, propulsion and steering complex, dynamic positioning

ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование активно используется различными областями наук для предсказания поведения проектируемых объектов на этапе их разработки. Моделирование движения судна используется судостроителями для предсказания поведения проектируемого объекта в воде до его постройки, различными разработчиками алгоритмов для первичной настройки систем автоматического управления (САУ) перед установкой, а также для получения возможности использовать предупреждающее

воздействие в самом алгоритме. В первом случае над проектами как правило работают мощные КБ с возможностью испытывать проектируемые модели в уменьшенных масштабах в ротационных установках, аэродинамических трубах и т.д. При разработке алгоритмов управления, в случае компаний – производителей систем, используются гидродинамические и аэродинамические коэффициенты, предоставляемые судостроительным заводом. Однако в случае разработки этих же алгоритмов у таких групп разработчиков как студенты, свободные соискатели научных степеней, аспиранты и др. встает вопрос о выборе математической модели. Из общедоступных источников по-прежнему остаются лишь отечественные учебники по теории устройства судна с методиками расчета написанных в 60 – 80-х годах [1 – 5]. Но в виду того, что технологии строительства судов, конструкции судов и их ДРК сильно изменились с тех времен, теоретические чертежи, номограммы и графики для расчета гидро- и аэродинамических коэффициентов уже не подходят, по итогу эти модели дают расчеты с большой погрешностью или вовсе являются неверными.

Стандарт ИЕС 62065 предоставляет методику разработки, способы тестирования и нормативные требования к результатам испытаний для следящих систем. В конце стандарта приведена математическая модель движения судна [6]. В результате анализа данной модели выявлены как ее неоспоримые плюсы, так и недостатки. К достоинствам можно отнести следующие качества:

1. все значения, используемые в ММДС, можно получить на практике или из графиков ходовых испытаний;

2. при расчете скоростей нет необходимости моделировать гидродинамику судна.

Недостатки модели:

1. изначально предназначена для судна со стандартным ДРК;

2. не учитывает влияние ветра;

3. движение судна моделируется плоско-параллельным.

Математическая модель состоит из блоков: модель управления тягой двигателя, модель управления рулевым устройством, блоков расчета ускорений по трем осям движения, блоки внешних воздействий (волнение и течение), блока интегрирования параметров. Блок-схема ММДС с указанными связями между блоками приведена на рис. 1.

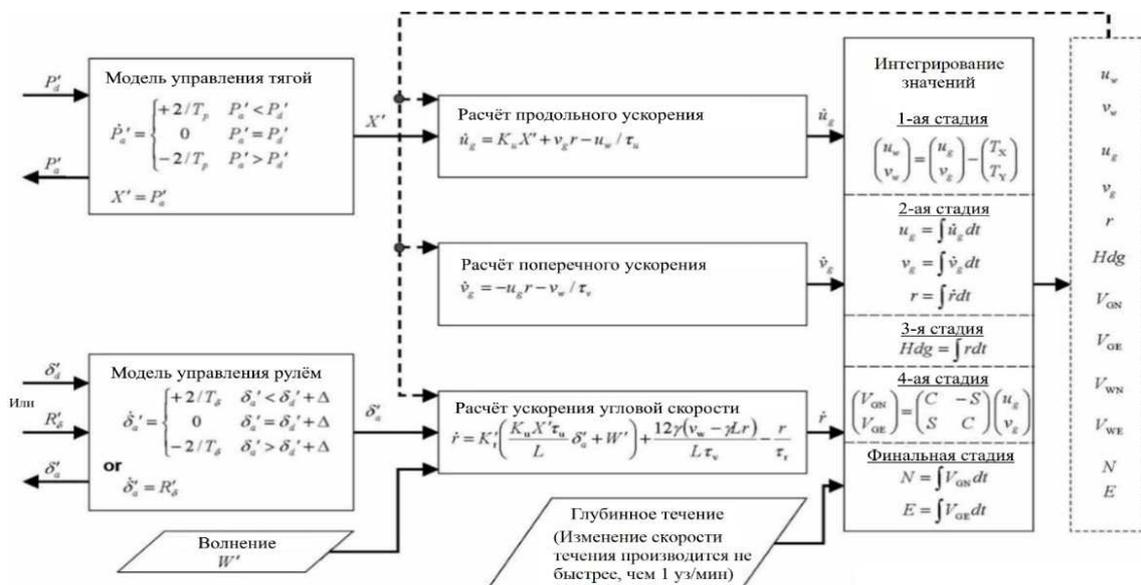


Рис. 1 Блок-схема ММДС по стандарту ИЕС 62065

Если говорить о преимуществах, то можно однозначно отметить простоту расчетов, связанной с ненужностью учета гидро- и аэродинамики судна в моделировании. В случае же с недостатками самым весомым является негибкость модели для судов с конструкцией ДРК отличной от стандартной. Но, проанализировав работу действующих СДП от известных производителей [4, 7, 8], можно сделать вывод, что применение динамического позиционирования возможно лишь с применением подруливающих устройств (ПУ). Кроме того, из-за отсутствия учета влияния ветра на движение судна моделирование невозможно провести во всех условиях реальной эксплуатации. Необходимо пренебречь тем, что ММДС плоскопараллельна, так как это один из способов упрощения расчетов и стоит иметь в виду, что моделирование будет проводиться с некоторой погрешностью.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МОДЕЛИ ПОД ВЫБРАННЫЙ ТИП СУДНА

В качестве моделируемого объекта выступает судно снабжения с типичной конструкцией ДРК, имеющее две винто-рулевых колонки (ВРК) по типу «азипод» и носовое подруливающее устройство. Параметры судна, используемые в расчетах, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики судна, используемые в расчетах

u_{max} , уз.	v_{max} , уз.	l_a , м	l_b , м	b , м	$P_{1,2}$, кВт	P_3 , кВт	T_p , с	$R_{\delta 1}$, 1°/с	$R_{\delta 2}$, 1°/с
16,75	4	42	26	4,7	6500	2600	8	4,5	9

Примечание: $R_{\delta 1}$ – скорость разворота азипода при работе с одним гидравлическим приводом; $R_{\delta 2}$ – скорость разворота азипода при работе с двумя гидравлическими приводами.

Блок-схема ММДС принимает конечный вид, приведенный на рис. 2 (где индексы: 1 – левый азипод; 2 – правый азипод; 3 – носовое подруливающее устройство; d – значение уставки; a – текущее значение; g – относительно земли; w – относительно воды; обозначения: P – значение мощности, потребляемое элементом управления; δ – значение угла перекаладки азипода; u – скорость продольного движения; v – скорость поперечного движения; r – угловая скорость; X' – нормированное значение тяги,

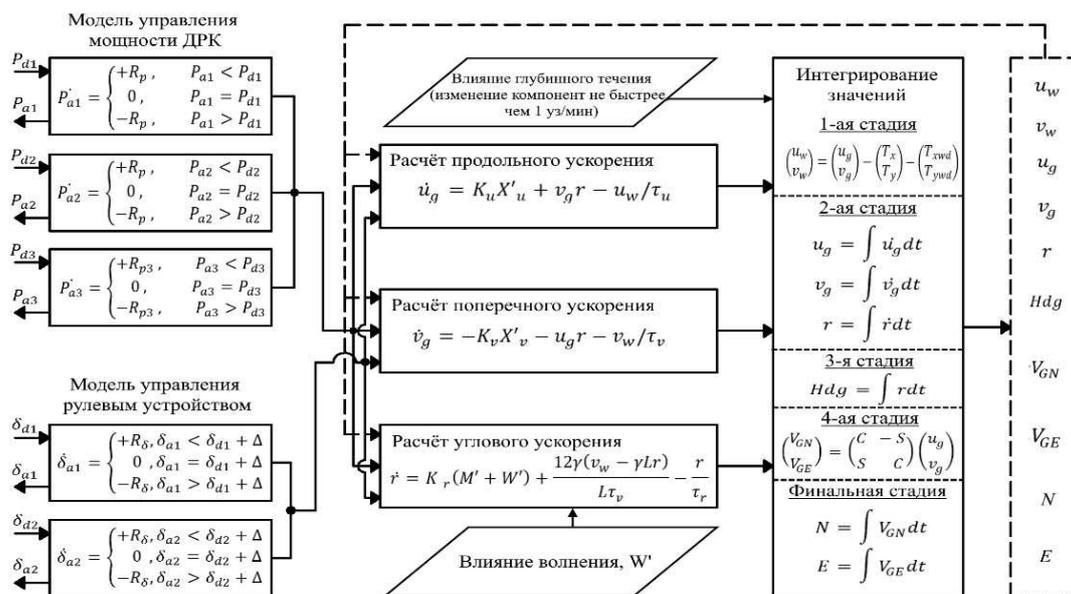


Рис. 2 Блок-схема измененной ММДС

обеспечиваемое ДРК; K – скоростной коэффициент; M' – нормированное значение момента, обеспечиваемое ДРК; γ – коэффициент стабильности (отношение расстояния центра давления боковых сил к длине судна); W – нормированное значение момента, создаваемое волнением; T – значение компоненты скорости влияния глубинного течения и ветрового воздействия; τ – временная константа; Hdg – значение курса судна; N, E – значение координат судна относительно севера и востока соответственно).

В новой блок-схеме добавлены два блока управления тягой, а также один блок управления рулевым устройством, также изменился подход нормирования величин. Сделано это по ряду причин.

На рис. 3 представлено схематичное изображение судна, элементов управления, а также создаваемых ими сил и моментов: индексы: 1 – левый аzipод; 2 – правый аzipод; 3 – носовое подруливающее устройство (НПУ); a – текущее значение; u – продольное направление движения; v – поперечное направление движения; обозначения: P – значение мощности, прилагаемое элементом управления; δ – значение угла перекладки аzipода; ЦТ – центр тяжести; ДП – диаметрральная плоскость; l_a – расстояние НПУ от центра тяжести; l_b – продольное расстояние ВРК от центра тяжести; b – поперечное расстояние ВРК от центра тяжести; M – момент, создаваемый i -ым элементом управления.

Чтобы избежать расчета элемента ДРК, необходимо получить нормированное значение тяги. Получение нормированного значения тяги, как в стандарте IEC 62065, приведено в формуле (1).

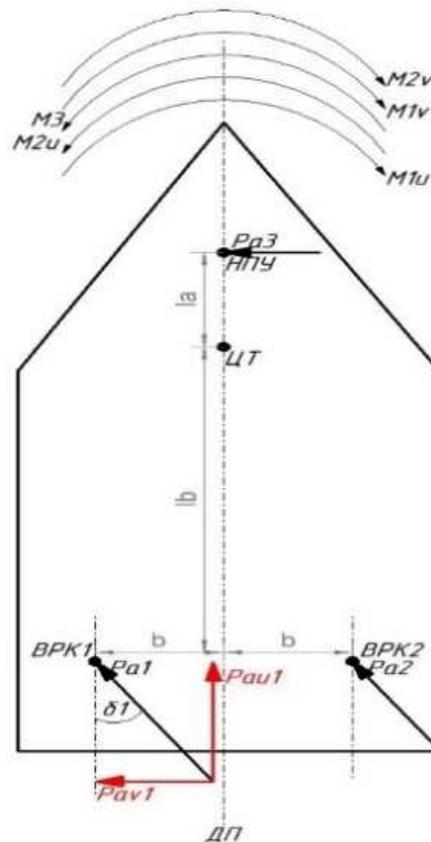


Рис. 3 Схематичное изображение судна

$$P_a/P_{\max} = X_a/X_{\max} = X', \quad (1)$$

где P_a – текущая мощность, передаваемая на винт;
 X_a – текущая тяга, создаваемая винтом;
 X' – нормированное значение тяги.

Как видно из этой формулы, значение получается делением текущего значения мощности на максимальное. Так как принцип работы ДРК выбранного судна отличается от того, что приведен в стандарте, необходимо при расчете учитывать максимальные мощности в зависимости от направления их воздействия для движения судна.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ РАСЧЕТОВ УСКОРЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ СУДНА

Продольное движение

Расчет тяги для продольного движения представлен в формуле (2). Стоит отметить, что максимальная тяга будет создаваться при угле разворота ВРК в 0° . Для получения значения нормированной тяги необходимо разделить сумму проекций на ДП текущих мощностей на максимальную, создаваемой ВРК.

$$P_{\max u} = P_1 + P_2 \quad (2)$$

$$P_{ai} = P_{ai} \cos \delta_{ai}$$

$$X'_u = \frac{\sum_{i=1}^2 P_{aii}}{P_{\max u}} = \frac{\sum_{i=1}^2 P_{ai} \cos \delta_{ai}}{P_{\max u}},$$

где $P_{\max u}$ – максимальная мощность для продольного движения;
 X'_u – нормированное значение тяги продольного движения;
 P_{ai} – текущее значение мощности продольного движения (проекция на ДП).

Расчет продольного ускорения остался прежним и представлен в формуле (3).

$$\dot{u}_g = K_u X'_u + v_g r - u_w / \tau_u \quad (3)$$

Вращательное движение

В стандарте используется нормированное значение момента, создаваемого рулем в струе винта с максимальным значением при перекладке в 35° . Данный способ не подходит для ДРК с активными элементами управления, но при использовании принципа получения нормированных значений тяги, приведенных выше, а также знаний теоретической механики, схемы судна и расположения ДРК на рис. 3, можно получить нормированный вращательный момент.

Пусть ЦТ является центром вращения, находится в ДП и расчет создаваемых моментов ведется относительно него. Кроме того, необходимо определить условие максимального вращательного момента. Для данного судна в документации по его эксплуатации [9] предусмотрена максимальная скорость разворота, представленная в табл. 2.

Таблица 2

Маневренные характеристики моделируемого судна

Элемент управления	Мощность	Скорость поворота при нулевой скорости хода
НПУ	2200 кВт	1,7°/с
НПУ + азипод 90°	2200 + 6500 кВт	4,8°/с

Если создается вращательный момент больше указанного в таблице, то образуется крен, который ухудшает управление судна. Исходя из этого, в формуле (4) представлено условие получения максимального вращательного момента.

$$M_{\max} = (P_1 + P_2)l_b + P_3l_a, \quad (4)$$

при $P_1 + P_2 = 6500$ кВт и $P_3 = 2200$ кВт,

где M_{\max} – максимальный вращательный момент, создаваемый ДРК;
 l_a – расстояние носового ПУ от ЦТ;
 l_b – расстояние азиподов от ЦТ.

Для того, чтобы учесть пропорциональность воздействия на движение судна i -ым элементом управления, мощность умножается на отстояние элемента управления от ЦТ и берется проекция воздействия на ту или иную плоскость. Важно учесть момент, создаваемый ВРК из-за отстояния от ДП, а также что расчет ведется в правой координатной системе, следовательно, данный момент у левого ВРК будет положительным, а у правого – отрицательным. В случае, когда тяга и направления обоих ВРК равны, данные моменты взаимокompенсируются. Расчет текущего вращательного значения и его нормированного значения приведен в формуле (5).

$$\sum_{i=1}^3 M_{ai} = (\sum_{i=1}^2 P_{ai} \sin \delta_{ai}) l_b + (P_{a1} \cos \delta_{a1} - P_{a2} \cos \delta_{a2}) b - P_{a3} l_a, \quad (5)$$

$$M' = \sum_{i=1}^3 M_{ai} / M_{\max},$$

где M_{\max} – максимальный вращательный момент, создаваемый ДРК;
 M_{ai} – текущий момент, создаваемый i -ым элементом управления;
 M' – нормированное значение момента, создаваемое ДРК;
 b – расстояние азипода от ДП.

В конечном итоге, способ расчета углового ускорения представлен формулой (6).

$$\dot{r} = K_r(M' + W') + \frac{I_2 \gamma (v_w - \gamma L r)}{L \tau_v} - \frac{r}{\tau_r}. \quad (6)$$

Поперечное движение

В наибольшей степени был изменен расчет поперечного движения, в виду того, что элементы активного управления безусловно оказывают влияние на ЦТ, это необходимо учитывать в расчете. Из этого следует, что в поперечном направлении будет создаваться некоторая тяга, а для ее нормирования необходимо определить условия создания максимальной тяги.

В концепции данной модели в поперечном движении максимальной тягой принято считать значение тяги при движении судна лагом с максимальной скоростью. Для получения такого движения судном необходимо выполнить следующее условие:

$$M' = \frac{\sum_{i=1}^3 M_{ai}}{M_{\max}} = 0. \quad (7)$$

Тогда максимальная мощность для движения судна лагом будет получена при:

$$P_3 l_a = (\sum_{i=1}^2 P_{ai} \sin 90^\circ) l_b;$$

$$P_{ai} = P_3 l_a / 2 l_b;$$

$$P_{\max v} = P_3 + 2 P_3 l_a / 2 l_b = P_3 (1 + \varepsilon),$$

где ε – отношение расстояния НПУ до ЦТ к расстоянию ВРК до ЦТ;
 $P_{\max v}$ – максимальная мощность для поперечного движения.

Так как элементы ДРК находятся на расстоянии от ЦТ, то при отсутствии компенсации вращательных моментов, силы, формируемые азиподами и НПУ, будут создавать вращение, а не поперечное смещение ЦТ. Чтобы решить эту проблему, необходимо связать расчет поперечной тяги с расчетом вращательного момента. Это решение представлено в формуле (9).

$$X'_v = \frac{\sum_{i=1}^2 P_{ai} \sin \delta_{ai} + P_{a3}}{P_{\max v}} - k_p M',$$

$$k_p = P_{\sum m} / P_{\max v}$$

где X'_v – нормированное значение тяги поперечного движения;
 P_{ai} – текущее значение мощности;
 $P_{\sum m}$ – суммарная мощность ДРК при развороте на месте с максимальной угловой скоростью;
 k_p – коэффициент пропорциональности мощностей.

Смысл данной формулы состоит в следующем: при создании условия для поперечного движения часть уравнения $k_p M'$ равняется нулю, соответственно вся прилагаемая мощность воздействует на ЦТ и перемещает его в поперечном направлении. При создании условий для поворота на месте вычитаемые части уравнения сравниваются и на выходе дают ноль, означающий отсутствие воздействия сил для поперечного смещения ЦТ. Коэффициент пропорциональности мощностей необходим для выравнивания значений суммарной относительной тяги и значения относительного момента при условии разворота на месте.

Чтобы из нормированного коэффициента тяги получить значение компоненты ускорения, создаваемой элементами управления, необходимо ввести коэффициент тяги K_v , аналогичный тому, что используется при расчете продольного движения. Более подробно о получении значения этого коэффициента в следующем подразделе.

В результате конечная формула расчета поперечного ускорения имеет вид:

$$\dot{v}_g = -K_v X'_v - u_g r - v_w / \tau_v.$$

Определение коэффициентов и констант

Расчеты скоростных коэффициентов изменились после ввода новых воздействий ДРК на судно для данной модели и изменения расчета угловой скорости. Способ расчета коэффициентов для новой модели представлен формулами (11)

$$K_u = u_{\max} / \tau_u,$$

$$K_v = v_{\max} / \tau_v,$$

$$K_r = r_{\max} / \tau_r,$$

где u_{\max} – максимальная продольная скорость, равная максимальной скорости движения судна вперед (табл. 1);
 v_{\max} – максимальная поперечная скорость, равная максимальной скорости движения судна лагом под 90° (табл. 1);
 r_{\max} – максимальная угловая скорость, равная максимальной скорости разворота судна на месте (табл. 2).

Значения максимальных скоростей получаются из документации с ходовых испытаний судна или опытным путем, замеряя ту или иную скорость движения при выполнении условий ее реализации.

Значения временных констант ускорений τ_u , τ_v , τ_r отражают плавность набора той или иной скорости. Подбор параметров возможен либо из анализа графиков отдельных скоростей судна или построением таковых при их отсутствии, либо возможен подбор значений при анализе графика маневра «Циркуляция».

При моделировании движения, описанного в этой статье, принято, что ЦТ совпадает с центром вращения. Следовательно, коэффициент стабильности γ равен нулю. Для более точного описания движения для данного коэффициента необходимо написать функцию, описывающую его параметр в зависимости от видов движения судна.

Введение ветрового воздействия

Ветровое воздействие предлагается вводить подобным образом тому, как вводится воздействие течения на корпус. Для получения компоненты ветрового воздействия необходимо найти проекцию скорости ветра относительно плоскостей судна и умножить на аэродинамический коэффициент. значение коэффициента можно определить опытным путем, замеряя снос судна при разных скоростях судна.

Расчет воздействия течения и ветра представлен формулами (12):

$$T_{Nwd} = U_{wd} \cos \gamma_{wd},$$

$$T_{Ewd} = U_{wd} \sin \gamma_{wd},$$

$$\begin{pmatrix} T_{xwd} \\ T_{ywd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C & S \\ -S & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{Nwd} K_{wdu} \\ T_{Ewd} K_{wdv} \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} u_w \\ v_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_g \\ v_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{xwd} \\ T_{ywd} \end{pmatrix},$$

где u_w и v_w – продольная и поперечная составляющая скорости судна относительно сил, действующих на судно;

C и S – косинус и синус текущего курса судна;

T_N и T_E – компоненты скорости глубинного течения в северном и восточном направлении;

T_Y и T_X – компоненты скорости глубинного течения в координатной системе, привязанной к судну;

U_{wd} – скорость ветра;

T_{Nwd} и T_{Ewd} – компоненты скорости ветра в северном и восточном направлении;

T_{Ywd} и T_{Xwd} – компоненты скорости влияния ветра на судно;

K_{wdu} и K_{wdv} – коэффициенты пропорциональности ветрового воздействия для продольного и поперечного движения соответственно.

Данный метод уступает более полномасштабному моделированию действия ветра на корпус, но для сохранения концепции простоты модели был принят именно этот вариант.

Моделирование движения

Используя данную методику расчета и данные судна, указанные в табл. 1 и 2, были получены графики движения судна, приведенные на рис. 4, а также составлена табл. 3 с результатами измерений параметров выдвига, смещения и диаметра маневра «Циркуляция». Для определения адекватности модели проведены сравнения параметров в контрольных точках (разворот судна на 90 и 270 градусов) выбранного маневра с расчетом погрешности относительно этих же параметров, приведенных в документации.

Таблица 3

Параметры настройки модели и ее выходные значения

Погрешность	τ_u , с	τ_v , с	τ_r , с	γ , о.е.	Δ_S , %	Δ_U , %	Δ_T , %
	121	7,8	0,17	0	20,4		
	Диаметр, м	Выдвиг, м		Смещение, м			
	154	185		62,3			
δ , %	10,8	26,5		24			
	u_{90} , уз.	u_{270} , уз.	t_{90} , с	t_{270} , с	Δ_Σ , %		
	8,61	2,34	25,9	76,7	11,3		
δ , %	12,2	1,65	3,6	9,57			

Примечание. u_{90} , u_{270} – значения параметров продольной скорости в момент разворота судна на 90 и 270°; t_{90} , t_{270} – время, затраченное судном для разворота на 90 и 270°; δ – относительная погрешность по выбранному параметру; Δ_S , Δ_U , Δ_T – среднестатистическая погрешность по расстоянию, скорости, времени соответственно; Δ_Σ – среднестатистическая погрешность по всем параметрам.

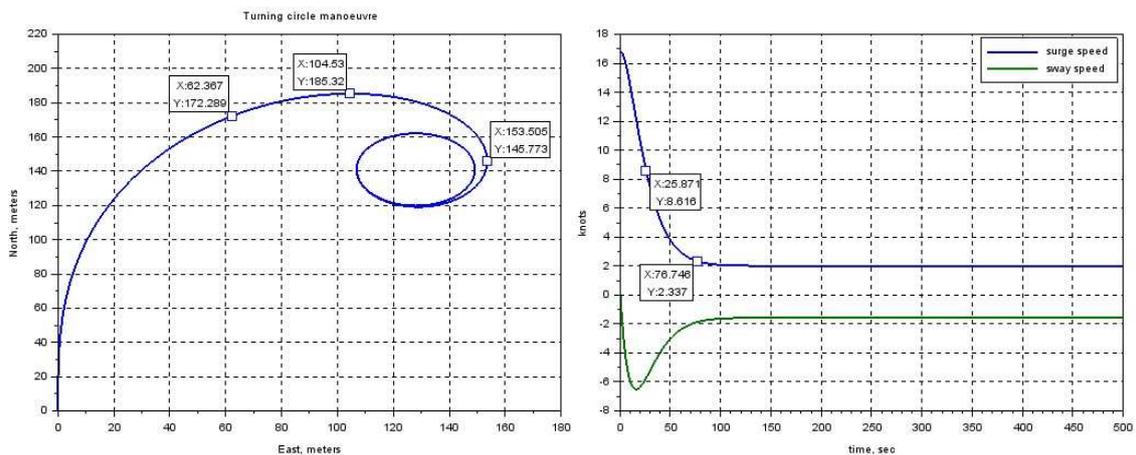


Рис. 4 Графики установившейся циркуляции и скоростей движения судна

РАСЧЕТНАЯ ЗАГРУЗКА; ОСАДКА КОРМОЙ 7.50 м, ОСАДКА НОСОМ 7.50 м
НА ПОЛНОЙ СКОРОСТИ ВПЕРЕД, управление штурвалом; угол Азипод - 35°

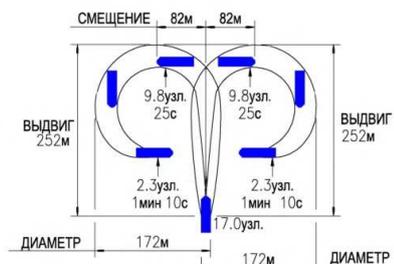


Рис. 5 График циркуляции предполагаемого судна с ходовых испытаний

Моделирование проводилось в текстовом редакторе SciNotes программного пакета SciLab 6.0.0.

ВЫВОДЫ

Методика преобразования, представленная в статье, дает возможность упрощенно получать движение для объектов любой формы корпуса и типа ДРК. В качестве примера было смоделировано движение по циркуляции судна снабжения. Отталкиваясь от полученных значений при моделировании, можно заметить, что суммарная погрешность по всем параметрам составила 11,3 %. Наибольшая погрешность получена относительно параметров расстояний, развиваемых судном во время циркуляции – 20,4 %. По остальным параметрам средняя погрешность оказалась в районе 6 – 7 %. На появление погрешности могли сказаться следующие факторы:

- не учтено появления отстояния центра боковых сил (ЦБС) от ЦТ (коэффициент $\gamma = 0$);
- плоско-параллельность и линейность модели;
- возможные погрешности измерений во время ходовых испытаний.

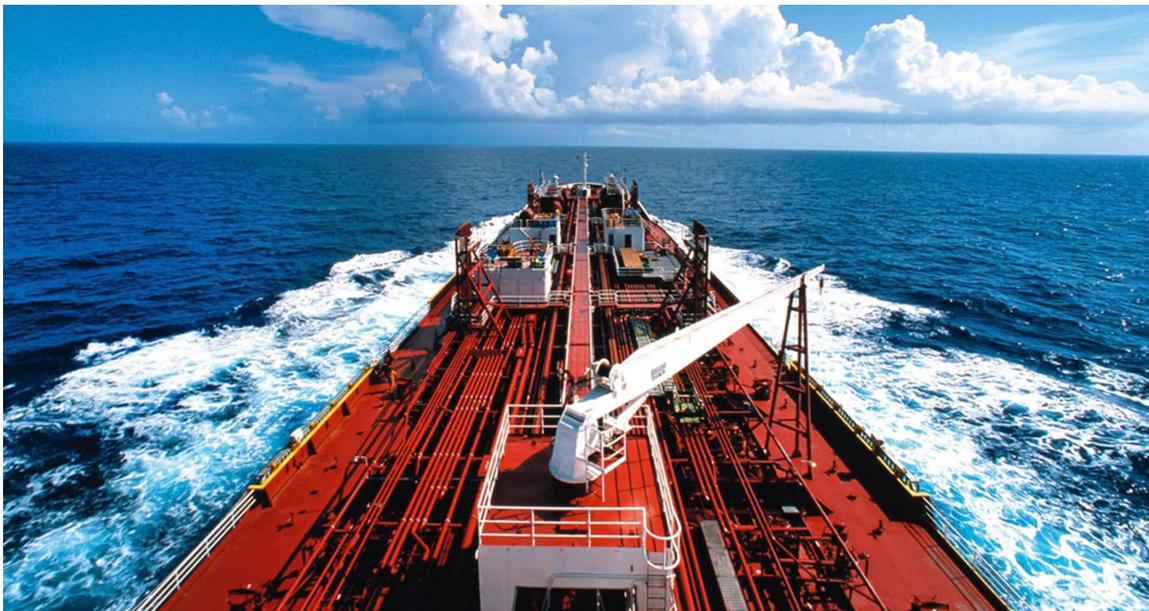
Все эти факторы в какой-то мере сказываются на точности модели. В первом случае необходимо наблюдение за моделируемым объектом для создания функции, описывающей положение ЦБС. В остальных же случаях необходимо заранее полагать, что упрощенная модель не может выдавать такую же точность, что и подробная модель с четким гидро- и аэродинамическим описанием объекта. Задача данной ММДС с определенной точностью имитировать движение выбранного объекта, избегая сложные расчетов гидро- и аэродинамики, с чем данная модель абсолютно справляется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимова Н.И. Расчет параметров движения одновинтового судна при торможении гребным винтом – Л., Труды НТО СП, 1974, вып. 221, – 38-39 с.
2. Войткуновский Я.И. Справочник по теории корабля. Т. 3. /Под ред. Я.И. Войткуновского. – Л.: Судостроение, 1984 – 542 с.
3. Гофман А.Д. Двигательно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник –Л.: Судостроение, 1988. – 360 с.
4. Шостак В.П. Динамическое позиционирование плавучих объектов: монография / В.П. Шостак. ЧИКАГО, МЕГАТРОН, 2010 – 130 с.
5. Турбал. В.К., Шпаков В.С., Штумпф В.М. Проектирование обводов и движителей морских транспортных судов – Л., Судостроение, 1983 – 304 с.
6. International Standard, Maritime navigation and radio communication equipment and systems – Track control systems – Operational and performance requirements, methods of testing and required test results, IEC 62065, Edition 2.0, 2014 – 75-87 p.
7. Operation Manual, NAVIS NavDP 4000, NAVIS ENGINEERING, 2015 – 208p.
8. User Manual, Rolls-Royce Icon(TM) Dynamic Positioning System Class 2 Rolls-Royce plc, 2007 – 958 p.;

REFERENCES

1. Anisimova N.I. Raschet parametrov dvizheniya odnovintovogo sudna pri tormozhenii grebnym vintom [Calculation of parameters of the single-screw vessel movement when braking by the rowing screw] – L., Work NTO of the joint venture, 1974, the issue 221, – 38-39 p.
2. Voytkunovskiy Y.I. Spravochnik po teorii korablya. T. 3. [Reference book on the theory of the ship. T. 3.]/ Under the editorship of Y.I. Voytkunovskiy. – L.: Shipbuilding, 1984 – 542 p.
3. Hoffman A.D. Dvizhitelno-rulevoy kompleks i manevrirovaniye sudna. Spravochnik. [Propulsion and steering complex and maneuvering of the vessel. The reference book] – L.: Shipbuilding, 1988. – 360 p.
4. Shostak V.P. Dinamicheskoye pozitsionirovaniye plavuchikh obyektov: monografiya [Dynamic positioning of floating objects: A monograph] / V.P. Shostak. CHICAGO, MEGATRON, 2010 – 130 p.
5. Turball. V.K., Shpakov V.S., Shtumpf V.M. Proektirovaniye obvodov i dvizhiteley morskikh sudov [Designing of hull lines and propulsions unit of sea transport vessels] – L., Shipbuilding, 1983 – 304 p.
6. International Standard, Maritime navigation and radio communication equipment and systems – Track control systems – Operational and performance requirements, methods of testing and required test results, IEC 62065, Edition 2.0, 2014 – 75 – 87 p.
7. Operation Manual, NAVIS NavDP 4000, NAVIS ENGINEERING, 2015 – 208 p.
8. User Manual, Rolls-Royce Icon(TM) Dynamic Positioning System Class 2 Rolls-Royce plc, 2007 – 958 p.



ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 534.13/629.5.021

ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ГЛИССИРУЮЩИХ СУДОВ И ОЦЕНКА НАГРУЗОК НА ИХ КОНСТРУКЦИИ

Г.Б. Крыжевич, д-р техн. наук, профессор, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, тел.: +7 (812)-415-46-74, e-mail: G_Kryzhevich@ksrc.ru

Настоящая работа выполнена с целью формулировки основных положений современных подходов к оценке гидродинамических сил сопротивления колебаниям скоростных судов (переходного режима движения и глиссирующих), оказывающих решающее влияние на точность расчета нагрузок, обоснования упрощенных зависимостей для расчета внешних сил, полученных на базе расчетных исследований с использованием этих положений; оценки достоверности таких зависимостей на основе сопоставления их с экспериментальными данными и с аналогичными зависимостями, приведенными в правилах ведущих зарубежных классификационных обществ. Результаты работы могут быть использованы в практике проектирования глиссирующих судов для расчета вынужденной вибрации судов с учетом гидродинамического демпфирования колебаний и для быстрой оценки нагрузок, определяющих общую и местную прочность корпуса в условиях морского волнения.

Ключевые слова: высокоскоростные суда, глиссирующие суда, внешние силы, методы определения нагрузок, вибрация, сопротивление колебаниям, гидродинамическое демпфирование, нормативные требования к оценке нагрузок

HYDRODYNAMIC DAMPING OF PLANING BOATS VIBRATION AND EVALUATION OF LOADS ON STRUCTURES

G.B. Kryzhevich, DSc, professor, Krylov State Research Center, St. Petersburg, tel.: +7 (812)-415-46-74, e-mail: G_Kryzhevich@ksrc.ru

The paper formulates main proposals and modern approaches to evaluation of hydrodynamic resistance forces to vibration of fast vessels (planing boats and semi-displacement vessels). Those are critical for accuracy of loads calculation, validation of simplified formulas for calculation of external forces obtained based on numerical studies,

evaluation of reliability of such formulas based on their comparison with their experimental values and with similar formulas given in rules of leading foreign classification societies. The results of the research could be used for design of planing boats, for analysis of forced vibration of ships with account of hydrodynamic damping of vibration, as well as for quick estimation of loads determining general and local hull strength in sea conditions.

Keywords: *high speed craft, planing boats, external forces, load evaluation methods, vibration resistance, hydrodynamic damping, normative requirements for loads evaluation*

ВВЕДЕНИЕ

Ключевым и наиболее сложным вопросом обеспечения прочности глиссирующих судов является оценка внешних сил. Этому вопросу уделялось большое внимание в предвоенное время (в конце 30-х – начале 40-х годов) при проектировании глиссирующих катеров, которое велось в конструкторских бюро с участием ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского. В военное время в работах приняло участие ЦНИИ-45 (ныне Крыловский государственный научный центр). В 1946 г. вышла в свет работа Ю.А. Шиманского «Расчет прочности глиссирующих катеров» [1], обобщившая опыт создания катеров в предвоенное и военное время. В значительной мере в разработке Ю.А. Шиманского нашли отражение подходы, принятые при проектировании гидросамолетов. В авиационной практике было принято оценивать нагрузки по максимальным значениям ускорений (перегрузок), возникающих в наиболее опасных ситуациях. Такая практика оценки внешних сил была распространена на глиссирующие суда. Перегрузки определялись по результатам испытаний объекта-прототипа или модели судна. Нагрузки на корпус находились как результат воздействия внешних усилий, приложенных в рассматриваемый момент времени. Предполагалось, что точность оценки нагрузок зависит только от достоверности оценки максимальных значений перегрузок и от характера распределения внешних усилий по длине судна в наиболее опасной ситуации. При этом игнорировалось влияние на нагрузки таких факторов и явлений как упругость корпуса, периодичность силовых воздействий на него, возможность появления резонансных эффектов, диссипация энергии при колебаниях, параметрический характер качки и вибрации судна, обусловленный большой изменчивостью в течение одного цикла колебаний присоединенных масс жидкости и демпфирующих сил.

К 1954 году был накоплен определенный опыт эксплуатации катеров и появились результаты измерений параметров прочности конструкций в морских условиях, позволившие в рамках расчетной схемы Ю.А. Шиманского [1] создать усовершенствованную методику оценки внешних сил и прочности глиссирующих катеров (ее авторы М.К. Смирнова, В.Н. Серов). Попытки улучшить эту методику, не выходя за рамки этой крайне простой схемы оценки нагрузок, ориентированной на использование экспериментальных данных, предпринимались и В.К. Ивчином.

В дальнейшем неоднократно в течение нескольких десятков лет безуспешно делались шаги по отходу от использования исходных данных для расчета, найденных в модельном или натурном эксперименте, и по созданию чисто расчетного способа оценки нагрузок с помощью математического моделирования. При этом, несмотря на развитость методов расчета гидродинамических сил при глиссировании судов и быстром входе их отдельных частей в воду [2 – 7], как правило, расчетные значения нагрузок многократно (иногда в десятки и сотни раз) превосходили величины, регистрируемые при проведении натуральных и модельных экспериментов. Это обстоятельство побудило уделить изучению гидродинамического сопротивления качке и вибрации скоростных судов, оказывающего решающее влияние на амплитуды качки, скорости соударений судовых конструкций с морскими волнами, а также на амплитуды общей вибрации, вызванной таким соударениями. В результате выяснилось [7 – 14], что точность вычисления гидродинамических сил сопротивления колебаниям скоростных судов (переходного режима движения и глиссирующих) в конечном итоге предопределяет точность оценки внешних сил, используемых при расчетах общей и местной прочности их корпусов.

Величины нагрузок, действующих на скоростные суда, определяют их материалоемкость и комфортабельность и, в конечном итоге, показатели экономической эффективности. Поэтому достоверность и точность определения нагрузок крайне актуальны при разработке инженерных методов расчета, содержащихся в нормативно-технических документах Российского морского регистра судоходства [20, 21]. Публикации, посвященные вопросам достоверности и точности оценки нагрузок, изложенных в этих документах, практически отсутствуют. Поэтому целями настоящей работы являются:

- формулировка основных положений современных подходов к оценке гидродинамических сил сопротивления колебаниям скоростных судов (переходного режима движения и глиссирующих), оказывающих решающее влияние на точность расчета нагрузок;
- обоснование основных расчетных зависимостей для внешних сил, полученных на базе использования этих положений;
- оценка достоверности таких зависимостей на основе сопоставления их с аналогичными зависимостями, приведенными в правилах ведущих зарубежных классификационных обществ.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОЛЕБАНИЯМ СКОРОСТНЫХ И ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СУДОВ

На основе результатов опытных и теоретических исследований [7 – 19] установлено, что с ростом скорости движения судна увеличиваются гидродинамические силы, создающие сопротивление его вибрации. Сопротивление воды упругим колебаниям корпуса судна существенно зависит не только от его скорости движения и номера тона колебаний, но и от геометрической формы и, в частности, от формы кормовой оконечности. При заостренной носовой части тела и транцевой форме оконечности наблюдается одна из важнейших разновидностей интенсивного гидродинамического демпфирования, обусловленная «стеканием» импульсов с оконечности [7, 8]. Такой тип демпфирования колебаний судна продольным потоком жидкости в дальнейшем будем называть основным или «транцевым». Другой важный тип демпфирования вибрации представлен действием на движущееся судно гидродинамических сил, связанных с волнообразованием и вихреобразованием в пограничном слое [18]. Эту разновидность демпфирования будем называть дополнительным демпфированием колебаний продольным потоком жидкости или, коротко, – дополнительным «продольным» демпфированием.

Практически значимым оказывается еще один тип демпфирования [18]. Вибрационные перемещения поперечных сечений тела в вертикальной плоскости связаны с поперечным обтеканием этих сечений жидкостью. Поскольку жидкость обладает вязкими свойствами, при таком обтекании появляются гидродинамические силы, обусловленные трением воды о твердые стенки и формированием мелкодисперсных вихрей. При наличии на поверхности тела выступов (например, в виде скуловых образований у глиссирующих судов и скуловых килей на судах переходного режима движения) образуются дискретные вихри, значительно увеличивающие силы сопротивления вибрации. Этот тип сопротивления будем условно называть демпфированием поперечным потоком или просто «поперечным» демпфированием.

Из перечисленных типов гидродинамического сопротивления вибрации в настоящее время достаточно хорошо описанным транцевое демпфирование [7, 14]. Поэтому в настоящей работе подробно освещается два вопроса:

- получение сравнительной оценки влияния дополнительного продольного и поперечного демпфирования вибрации (по сравнению с конструкционным демпфированием) с помощью численных методов гидродинамики;
- анализ влияния основных факторов на показатели дополнительного продольного и поперечного демпфирования вибрации и разработка приближенного способа определения этих показателей для глиссирующих судов.

2. ПОКАЗАТЕЛИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ

Для установления вида этих показателей рассмотрим изгибные колебания в вертикальной плоскости непризматической балки, движущейся по поверхности жидкости. Учитывая число N низших форм колебаний, представим вибрационные перемещения $w(x,y,t)$ в виде ряда

$$w(x,t) = \sum_{n=1}^N a_n(t) f_n(x),$$

где $a_n(t)$ и $f_n(x)$ – обобщенные координаты и собственные формы колебаний балки.

Рассматриваемые главные колебания балки с обобщенными координатами $a_n(t)$ описываются следующими уравнениями движения [18, 19]:

$$\ddot{a}_i + 2n_i \dot{a}_i + \lambda_i^2 a_i = P_i / M_i,$$

где $M_i = \int_{(L)} m(x) f_i^2(x) dx$; $n_i = \sum_{j=1}^4 n_{ij}$; $2n_{i1} = \frac{1}{\omega M_i} \int_{(L)} \gamma(x) m(x) \lambda_i^2 f_i^2(x) dx$;

$$2n_{i2} = \frac{\mu_{\text{тр}} v}{M_i} f_i^2(x_{\text{тр}}); \quad (1)$$

$$2n_{i3} = \frac{1}{M_i} \int_{(L)} \beta(x) f_i^2(x) dx; \quad (2)$$

$$2n_{i4} = \frac{1}{M_i} \int_{(L)} c_n(x) f_i^2(x) dx; \quad (3)$$

$$P_i(t) = \int_{(L)} F(x,t) f_i(x) dx;$$

$$\beta = r(x)/v;$$

r – сила сопротивления воды движению удлиненного тела, приходящаяся на единицу его длины; v – скорость поступательного движения; λ_i – собственная частота колебаний балки; $m(x)$ – суммарная погонная масса балки и присоединенной воды; γ – коэффициент внутренних потерь в балке; $F(x,t)$ – погонная внешняя нагрузка на балку; $\mu_{\text{тр}}$ – погонная присоединенная масса жидкости в транцевом сечении тела; $x_{\text{тр}}$ – абсцисса транцевого сечения тела; $c_n(x)$ – гидродинамический коэффициент, равный отношению погонной силы вязкостной природы, возникающей при вертикальном движении поперечного сечения тела, к скорости этого движения.

Указанный выше коэффициент n_{i2} является характеристикой транцевого демпфирования. Он легко вычисляется с помощью формулы (1). Для определения коэффициентов n_{i3} и n_{i4} , являющихся показателями демпфирования вибрации продольным и поперечным потоками, целесообразно воспользоваться численными методами гидродинамики.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕМПФИРОВАНИЯ

При выполнении сравнительной оценки влияния демпфирования вибрации продольным и поперечным потоками на первом этапе вычислений решались пространственные задачи стационарного внешнего обтекания тел с судовыми обводами (судов переходного режима движения и глиссирующих судов). На основе полученных численных решений, включавших интегрирование уравнений

Рейнольдса (с учетом режима обтекания судна) и применение вычислительных RANS-методов (программного комплекса STAR-CCM+) определялись гидродинамические давления, вызванные ходом судна, и соответствующие им погонные усилия, приходящиеся на единицу длины корпуса, а затем с помощью численного интегрирования, сопровождавшегося разбиением судна на двадцать теоретических шпаций, по формулам (2 – 3) определялись коэффициенты n_{i3} и n_{i4} .

При решении пространственной задачи обтекания судна в программном комплексе ANSYS построение конечно-элементной сетки проводилось в программе ANSYS Workbench. На рис. 1 показаны конечно-элементная сетка по корпусу судна и расчетная область жидкости с граничными условиями. На смоченной поверхности судна приняты граничные условия прилипания частиц жидкости. В плоскости симметрии принято отсутствие нормальных к ней составляющих скоростей частиц жидкости. В плоскости входного потока принято равномерное поле скоростей, направленных вдоль судна и равных скорости его хода. На остальных границах жидкой области приняты открытые граничные условия.

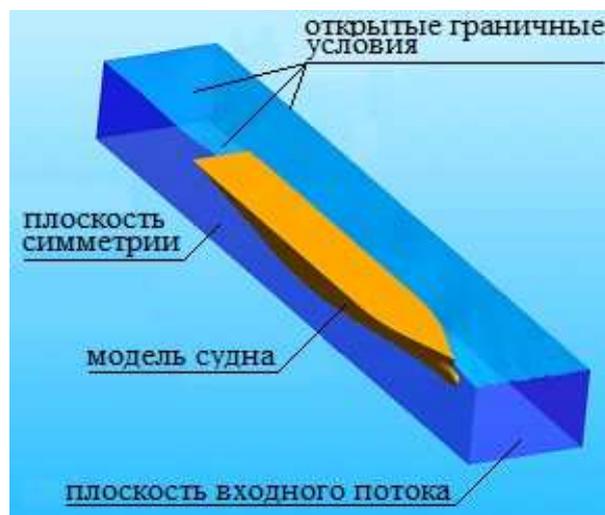


Рис. 1 Общий вид расчетной области жидкости и принятые граничные условия

Для определения вязкостного демпфирования, возникающего при поперечном обтекании судна, и его характеристик n_{i4} решалась дополнительная задача. Суть ее заключается в определении сил гидродинамического сопротивления при обтекании поперечного сечения корпуса судна, совершающего малые вертикальные колебания на границе раздела двух сред (воды и воздуха) [22 – 23]. Эта краевая задача для уравнения Рейнольдса, описывающего движение окружающей судно разнородной сплошной среды, решена в динамической постановке, а гидродинамические силы оценены для установившегося режима колебаний. Поскольку эти силы найдены путем решения нелинейного уравнения, то на первом этапе расчетного исследования принималась во внимание их нелинейная связь с кинематическими параметрами колебательного движения поперечных сечений корпуса. Затем с помощью гармонического анализа гидродинамические силы разделены на инерционные силы и силы сопротивления вибрации, определены линейные части гидродинамических сил для установившегося режима колебаний. Вычисленные таким образом линейные инерционные силы сопоставлены с известными результатами, приведенными в справочнике [24], благодаря чему установлены высокая степень их соответствия и достоверность численных расчетов. Отметим здесь, что степень нелинейности установившихся колебаний жидкости, вызванных гармоническими колебаниями шпангоутного контура с частотами ω и амплитудами, характерными для общей вибрации корпуса, невелика. Иллюстрацией этого факта могут служить расчетные данные табл. 1, в которой приведены показатели демпфирования n_{i4} , соответствующие основной частоте колебаний ω , а также супергармоническим колебаниям с частотой

2ω и субгармоническим колебаниям с частотой $\omega/2$. Расчет выполнен для поперечного сечения корпуса со скуловым килем, ширина которого b (см. рис. 2) составляла 5,2 % от ширины шпангоута, а относительные амплитуды колебаний (отнесенные к ширине киля b) – 0,036 и 0,071 (соответствующие абсолютным значениям амплитуд 2,5 см и 5 см).

Таблица 1

Частота	ω	2ω	$\omega/2$
Амплитуда колебаний 2,5 см	8,54	0,248	0,079
Амплитуда колебаний 5 см	8,59	1,68	0,272

Схема формирования конечно-элементной сетки при решении описываемой плоской задачи приведена на рис. 2. Оценка характеристик демпфирования вибрации поперечным потоком n_{i4} выполнена для различных форм поперечных сечений корпуса (при варьировании таких конструктивных факторов как отношение ширины на уровне ватерлинии к осадке, полнота площади поперечного сечения и ширина скулового киля, отнесенная к ширине шпангоутного контура). Расчеты показали, что наиболее значимым конструктивным фактором является относительная ширина скулового киля. При отсутствии киля (при нулевом значении этого фактора) демпфирование поперечным потоком жидкости выражено слабо и его можно не учитывать в расчетах вынужденной общей вибрации судна. При наличии же скуловых килей с относительно большой шириной (порядка 3 % от ширины ватерлинии), n_{i4} может составлять до 20 % от внутреннего сопротивления корпуса вибрации. При наличии килей эту характеристику демпфирования необходимо принимать во внимание при расчете параметров вибрации любых судов (как с плавными обводами в кормовой оконечности, так и судов с транцевой формой кормы), движущихся со скоростями, соответствующими $F_n < 2$.

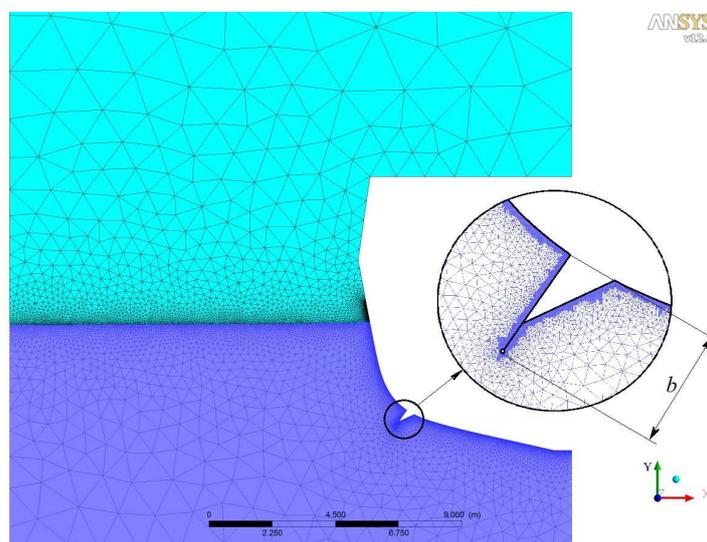


Рис. 2 Конечно-элементная сетка для решения плоской задачи поперечного обтекания шпангоутного контура корпуса со скуловым килем

В результате выполненных численных исследований предложен и апробирован новый способ расчета гидродинамического демпфирования вынужденной общей вибрации судна с учетом сил вязкостной и волновой природы. Ниже приведена относительная оценка вклада различных

составляющих гидродинамических сил в демпфирование общей вибрации судна (по отношению к силам внутреннего сопротивления конструкций корпуса общей вибрации). При этом силы внутреннего сопротивления, учитывающие конструкционное демпфирование, оценивались на основе данных по коэффициентам динамичности, найденным при испытаниях вынужденной вибрации судов без хода.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА СИЛ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ

Расчетные исследования показали, что даже при относительно невысоких скоростях хода судов с транцевой формой кормовой оконечности (при $F_n > 0,1$) самой важной составляющей гидродинамического демпфирования является транцевое демпфирование. При более низких скоростях хода и при его отсутствии наибольший относительный вклад в гидродинамическое сопротивление вибрации вносит демпфирование поперечным потоком, причем этот вклад слабо зависит от номера тона колебаний и остается значимым при больших частотах колебаний. С ростом тона колебаний корпуса роль дополнительного гидродинамического демпфирования вибрации продольным потоком ослабевает и для тонов выше третьего эта роль становится практически несущественной. Для низких тонов вибрации этот вид демпфирования является значимым в диапазоне скоростей хода, характеризуемых числами Фруда от 0,5 до 2,0 (при движении судна в скоростных режимах, близких к «горбу сопротивления»).

Иллюстрацией отмеченных особенностей гидродинамического демпфирования являются данные, приведенные на рис. 3, где показано процентное соотношение характеристик демпфирования вибрации продольным и поперечным потоками к показателю внутреннему сопротивлению судна ($n_{i2}/n_{i1} \cdot 100\%$, $(n_{i3}/n_{i1}) \cdot 100\%$ и $(n_{i4}/n_{i1}) \cdot 100\%$ при различных числах Фруда по водоизмещению $F_n = v/\sqrt{g^3 \sqrt{V}}$ (V – объемное водоизмещение судна).

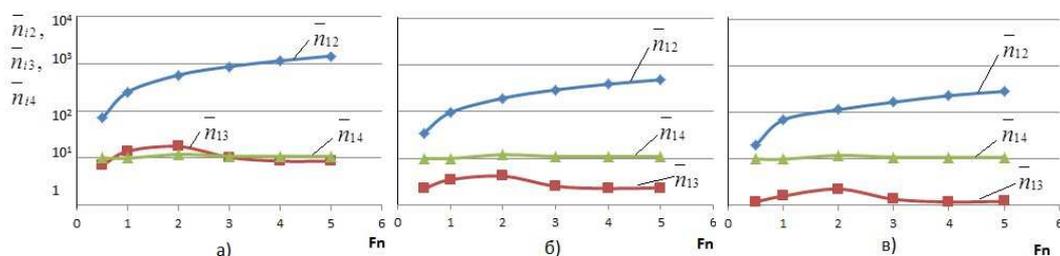


Рис. 3 Процентное соотношение составляющих гидродинамического сопротивления к внутреннему сопротивлению судна:

а) для 1-го тона колебаний; б) для 2-го тона колебаний; в) для 3-го тона колебаний

Из приведенных на рисунке графиков следует, что демпфирование продольным потоком основного тона вибрации составляет порядка 18 % от внутреннего сопротивления судна на скорости, соответствующей числу Фруда $F_n = 2$. При дальнейшем увеличении скорости характеристика демпфирования продольным потоком n_{i3} незначительно падает и вновь начинает возрастать при числах Фруда $F_n = 4$ и более. Подобная картина наблюдается и для более высоких тонов колебаний, хотя процентное отношение к внутреннему сопротивлению там гораздо меньше: 4 % для второго тона и 2 % для третьего тона соответственно. Вязкостное демпфирование, возникающее при поперечном обтекании судна, составляет порядка 10 % для всех низких тонов вибрации и всего диапазона расчетных скоростей модели.

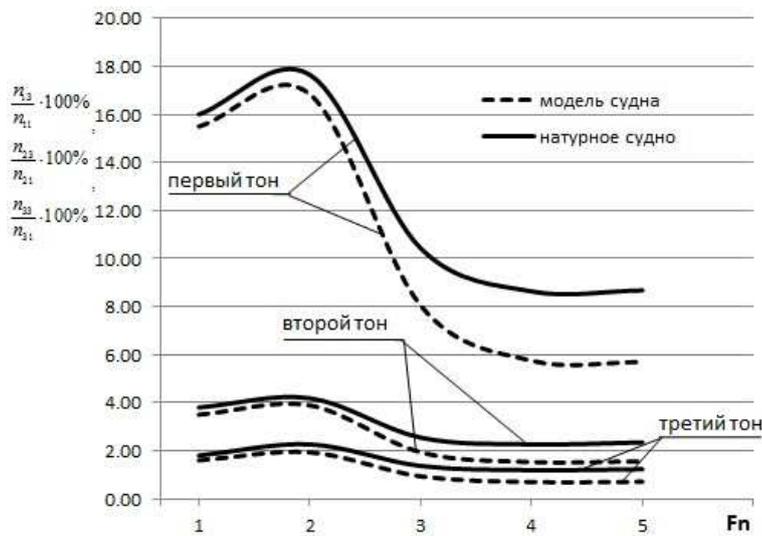


Рис. 4 Сопоставление безразмерных характеристик демпфирования вибрации продольным потоком на натурном глиссирующем судне водоизмещением 20 т и его модели (масштаб 1:6,5)

Физическое моделирование вынужденной вибрации скоростных и высокоскоростных судов является важнейшим источником информации о динамике деформирования корпуса при взаимодействии с гравитационными волнами и о внешних силах, определяющих прочность судовых конструкций. Оно обычно реализуется в условиях неполного подобия (при выполнении подобия по критерию Фруда и отсутствии подобия по числу Рейнольдса). Возникающий при этом масштабный эффект сказывается на точности определения характеристик внешних сил с помощью моделирования. Результаты расчетной оценки этого эффекта приведены на рис. 5, из которого следует, что различия в безразмерных характеристиках дополнительного демпфирования продольным потоком, полученных при «горбовых» режимах и малых скоростях движения натуральных судов и моделей, пренебрежимо малы (не превышают 1 %). На более высоких скоростях движения эти различия могут достигать 2,5 % и более, однако при этом транцевое демпфирование многократно превышает другие виды гидродинамического демпфирования, в связи с чем масштабный эффект относительно мал и не может считаться препятствием для реализации физического моделирования.

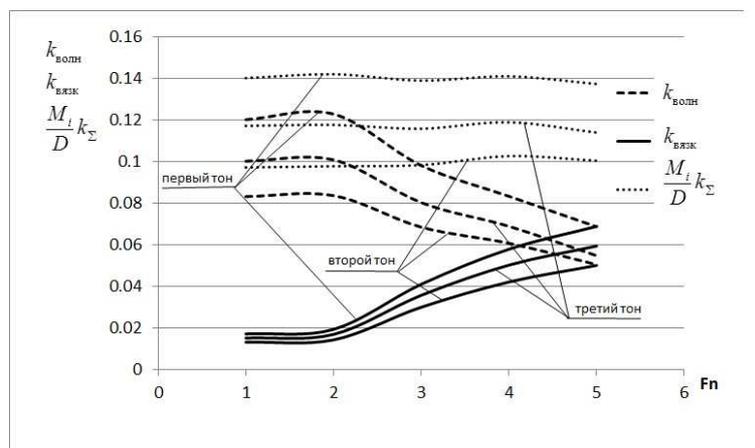


Рис. 5 Зависимость коэффициентов общего, волнового и вязкостного демпфирования вибрации натурального судна от скорости хода судна для первых трех тонов колебаний

Результаты оценок показателя гидродинамического демпфирования $2n_1$ с использованием приведенных приближенных формул сопоставлены с результатами испытаний маломасштабной буксируемой модели судна переходного режима движения в опытовом бассейне (рис. 6).

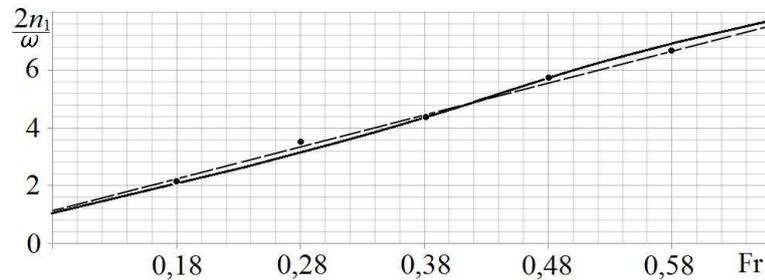


Рис. 6 Сопоставление зависимостей безразмерного показателя гидродинамического демпфирования от числа Фруда, полученных расчетом (сплошная линия) с использованием формулы (4) и экспериментальным способом на буксируемой модели судна переходного режима движения (штриховая линия)

Методика экспериментального исследования и используемое оборудование описаны в работе [17]. Поскольку внутреннее сопротивление модели невозможно оценить с помощью расчета, то при проведении такого эксперимента возможно получение лишь обобщенного показателя демпфирования n_1 на основе опытов, сопровождающихся буксировкой модели, и суммарного значения показателей демпфирования n_{11} и n_{14} (при отсутствии буксировки). Поэтому при сопоставлении показателей это суммарное значение принято на основе эксперимента. Затем на основе формул (1) и (4) подвергались фактической верификации только расчеты показателей n_{12} и n_{13} . В итоге показатели n_{12} и n_{13} суммировались с экспериментально найденными показателями n_{11} и n_{14} . Отличие оценок обобщенного показателя демпфирования, выполненных на чисто экспериментальных данных и с привлечением формул (1) и (4), невелико и лежит в пределах точности эксперимента, что подтверждает достоверность результатов расчетного исследования.

Таким образом, в итоге масштабных исследований гидродинамического демпфирования вибрации скоростных и высокоскоростных судов получены следующие результаты:

- с использованием методов вычислительной гидродинамики разработаны и апробированы способы определения основных показателей гидродинамического демпфирования вибрации упругих тел, движущихся по поверхности жидкости;
- выполнена численная оценка вклада различных категорий гидродинамических сил в демпфирование вибрации с учетом скорости хода судна и его конструктивных особенностей;
- выявлено, что с ростом номера тона колебаний влияние дополнительного продольного и поперечного демпфирования ослабевает; учет этих видов демпфирования необходим только для двух низших тонов вибрации;
- выполнена оценка масштабного эффекта, возникающего при физическом моделировании вынужденной вибрации скоростных и высокоскоростных судов в условиях отсутствия подобия по числу Рейнольдса.

5. РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗОК, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПРОЧНОСТЬ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Перечисленные выше результаты исследований гидродинамического демпфирования вибрации использованы для создания метода расчета внешних сил, действующих на глиссирующие суда и суда переходного режима движения. Другие категории гидродинамических сил определялись

методами, описанными применительно к глиссирующим судам в работах [6 – 8, 12] и применительно к судам переходного режима движения в работах [15, 16]. Расчет внешних сил, действующих в условиях регулярного волнения, выполнен численными методами на основе программы, составленной В.В. Ишковым. Для вероятностного анализа нагрузок на нерегулярном волнении использован способ, описанный в работе [25]. В результате расчетного анализа предложены упрощенные зависимости для оценки внешних сил на конструкции глиссирующих судов, приведенные ниже.

Расчетные значения переменных (динамических) составляющих изгибающих моментов в миделевом сечении корпуса при его продольном изгибе (при прогибе M_{sag} и при перегибе M_{hog}) определяется по формулам:

$$M_{sag(hog)} = K_M (3,04 - 4,25 \bar{x}_g) \cdot \Delta L n_g^{sag(hog)}, \quad (4)$$

где Δ и L – весовое водоизмещение и длина судна соответственно;

\bar{x}_g – относительное (отнесенное к длине судна L) расстояние от транца судна до его центра тяжести;

$n_g^{sag(hog)}$ – перегрузки, вызванные ударами волн в носовую и среднюю части судна соответственно и определяемые по данным, приведенным на рис. 7;

K_M – коэффициент, принимаемый равным 0,07 при ударе волны в среднюю часть судна (при расчете M_{hog}) и вычисляемый при ударе волны в носовую часть судна (при расчете M_{sag}) по формуле

$$K_M = 0,322 - 0,833 \rho_y / L,$$

где ρ_y – радиус инерции масс судна относительно поперечной оси, проходящей через центр тяжести судна.

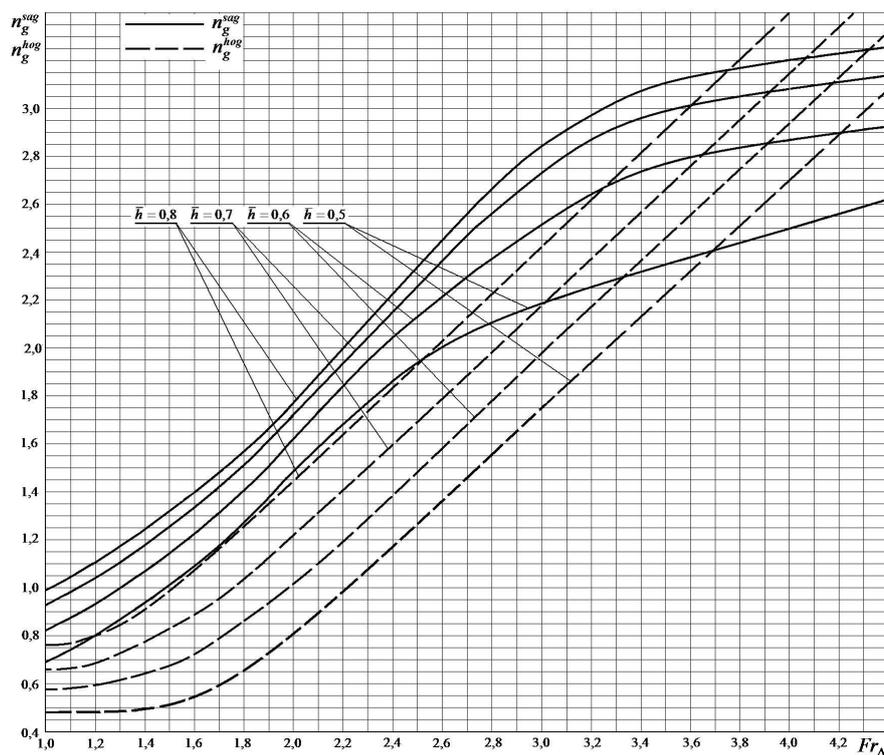


Рис. 7 Влияние относительной скорости хода судна $Fr_{\Delta} = v / \sqrt{(\Delta/\gamma)^{1/3}}$

(v – размерная скорость хода, м/с; γ – удельный вес морской воды, т/м³) и относительной высоты волн $\bar{h} = h_{3\%} / (\Delta/\gamma)^{1/3}$ ($h_{3\%}$ – допускаемая высота волны 3%-ной обеспеченности) на перегрузки n_g^{sag} и n_g^{hog} , вызванные ударами волн в носовую и среднюю части глиссирующего судна соответственно

Расчетные гидродинамические давления на днищевые перекрытия и их элементы определяются по формулам:

$$p = K_p M_{sag} \phi_1 \phi_2 \phi_3 / (B_3 L^2), \text{ кН/м}^2,$$

при оценке давлений на носовую оконечность (от нулевого до 5-го теоретического шпангоута);

$$p = K_p M_{hog} \phi_1 \phi_2 \phi_3 / (B_7 L^2), \text{ кН/м}^2,$$

при оценке давлений на среднюю и кормовую часть корпуса (от 7-го до 20-го теоретического шпангоута);

где: B_3 и B_7 – ширина корпуса по скуле в сечении по 3-му и 7-му теоретическим шпангоутам;
 K_p – параметр, принимаемый равным 280 для конструкций свода каверны судна с воздушной каверной на днище и равным 370 для всех остальных днищевых конструкций глсссирующих судов;

$$0,4 + 1,2x/L \text{ при } x/L < 0,5;$$

$$\phi_1 = 1,0 \text{ при } 0,5 \leq x/L \leq 0,85;$$

$$3,55 - 3x/L \text{ при } x/L > 0,85;$$

$$\phi_2 = (70 - \beta_a) / (70 - \beta_{\infty});$$

$$\phi_3 = 0,46 - 0,35(U^{0,75} - 1,7) / (U^{0,75} + 1,7), \text{ но не менее } 0,48 \text{ – для пластин и ребер жесткости и } 0,35 \text{ – для флоров и стрингеров};$$

$$U = 200s / (B_{тр} L);$$

s – площадь съема нагрузки;

$B_{тр}$ – ширина корпуса по скуле в транцевом поперечном сечении.

Для перекрытия площадь s представляет собой площадь перекрытия; для флоров и стрингеров – произведение расстояния между балками на длину их пролета; для пластин и ребер жесткости площадь s принимается равной произведению расстояния между ребрами жесткости (шпации) на величину, равную длине большей стороны пластины или трехкратной шпации (в зависимости от того, что меньше).

В промежутке между 5-м и 7-м теоретическими шпангоутами расчетное давление определяется путем линейной интерполяции расчетных значений, полученных для 5-го и 7-го теоретических шпангоутов.

6. СОПОСТАВЛЕНИЕ НАГРУЗОК, ВЫЧИСЛЕННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИМ ДОКУМЕНТАМ

При сравнении результатов расчета нагрузок, выполненных по известным расчетным способам [26 – 28] и по приведенным выше расчетным зависимостям, в качестве рассматриваемого объекта выбрано глсссирующее судно с теоретическим чертежом, представленным на рис. 8, и следующими основными параметрами:

водоизмещение $\Delta = 6,0$ т;

длина $L = 10,0$ м;

максимальная скорость движения $V_{max} = 40$ узл;

расчетная высота волны при глсссировании $h_{3\%} = 1,6$ м;

ширина на миделе $B_{0,5} = 3,2$ м;

ширина днища на транце $B_0 = 2,5$ м;

высота борта $D = 1,9$ м.

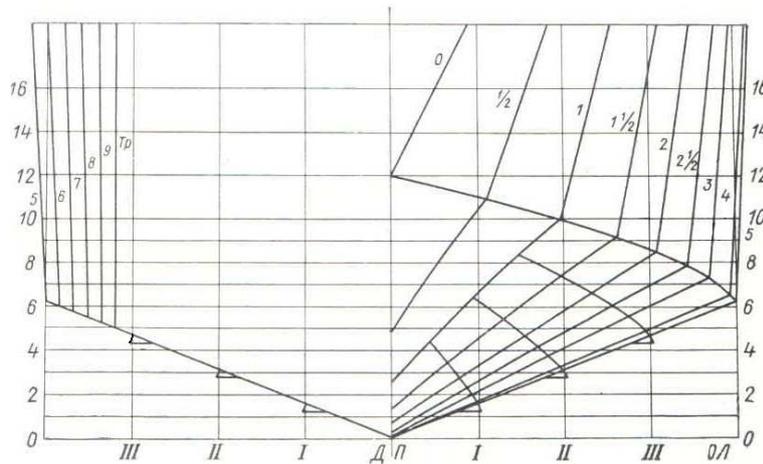


Рис. 8 Теоретический чертеж рассматриваемого глессирующего судна

На рис. 9 показаны зависимости динамического изгибающего момента на миделе глессера от скорости его движения, рассчитанные по Правилам DNV GL, LR и PC и сопоставленные с результатами испытаний маломасштабной модели судна. На рис. 10 представлены зависимости максимальных гидродинамических давлений, действующих на днище судна, от скорости его движения (а) и высоты волны 3 %-ной обеспеченности (б), полученные по нормативным документам различных классификационных обществ. Там же содержатся экспериментальные данные по максимальным давлениям, зарегистрированным при испытаниях маломасштабной модели скоростного судна.

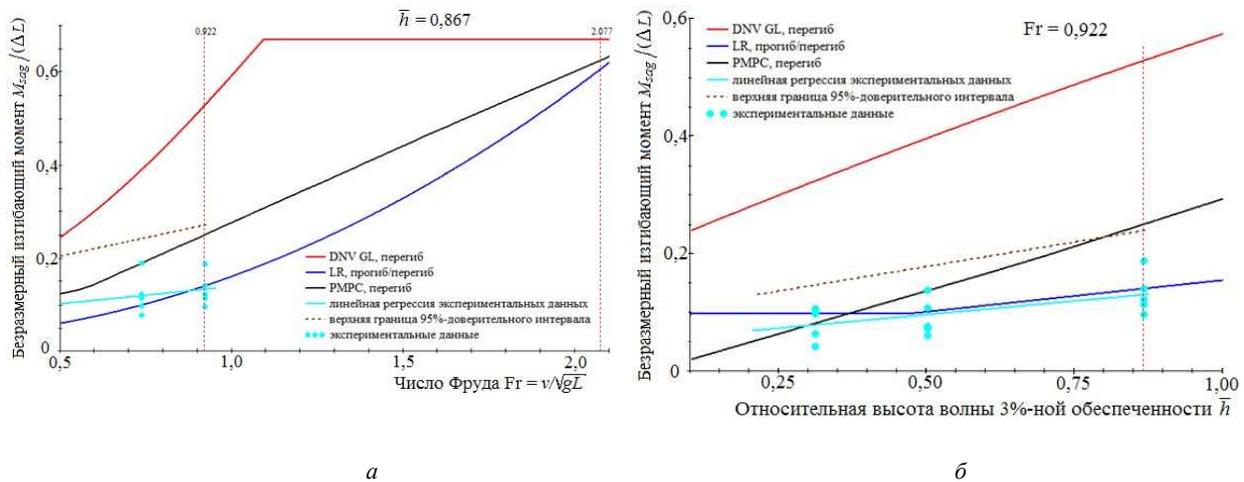


Рис. 9 Сопоставление зависимостей динамического изгибающего момента на миделе глессера от скорости его движения: (а) и высоты волны 3 %-ной обеспеченности (б), полученных различными расчетными методами

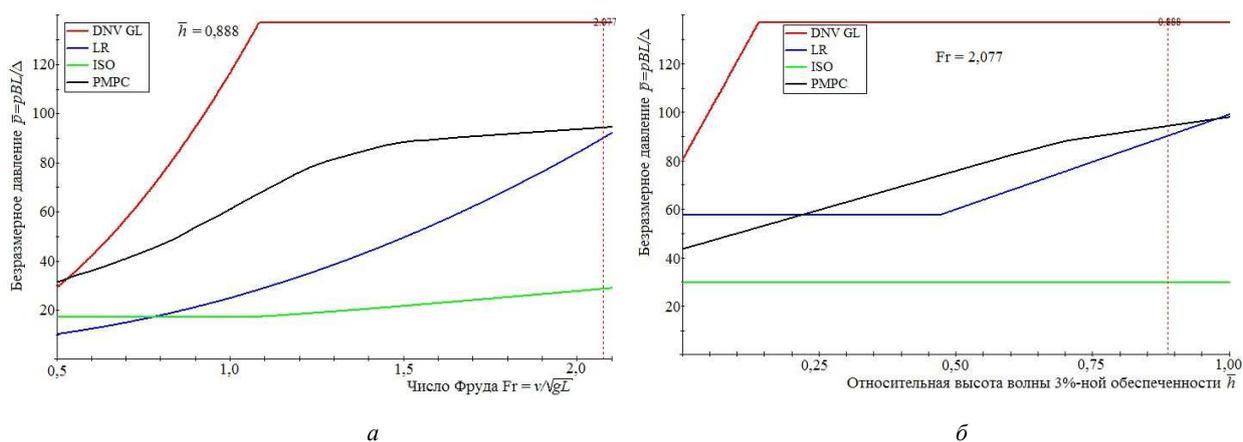


Рис. 10 Сопоставление зависимостей максимальных гидродинамических давлений на днище глессирующего судна от скорости его движения: (а) и высоты волны 3 %-ной обеспеченности (б), вычисленных различными методами

Из данных, приведенных на рис. 9 и 10, можно сделать следующие выводы:

- имеется заметное расхождение результатов расчетов, выполненных с привлечением всех упомянутых выше методов;
- результаты расчетов гидродинамических давлений, полученные на основе стандарта ISO 12215-5 [28] являются сильно заниженными по сравнению с прогнозируемыми на основе правил различных классификационных обществ и предлагаемых зависимостей данной работы, что позволяет говорить о недостоверности методов стандарта;
- расчетные данные, полученные на основе предлагаемых зависимостей, в основном, укладываются в промежуток между нагрузками, прогнозируемыми с помощью методов, изложенных в правилах DNV GL [26] и LR [27] и, в целом, хорошо соответствуют данным расчета по методикам этих классификационных обществ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

На основе выполненных расчетных исследований и разработок сделаны следующие выводы:

- сформулированы основные положения современных подходов к оценке гидродинамических сил сопротивления колебаниям скоростных судов (переходного режима движения и глессирующих), играющих важную роль в расчетах нагрузок, действующих на конструкции судов переходного режима движения и глессирующих судов;
- разработан метод математического моделирования нагрузок на суда этих типов;
- на основе результатов систематических расчетов получены упрощенные зависимости для быстрой оценки внешних сил;
- показана высокая степень достоверности результатов расчета по таким зависимостям на основе сопоставления их с данными расчетов по правилам ведущих зарубежных классификационных обществ в отношении величины нагрузок, при этом сопоставление результатов расчета требуемых размеров корпусных конструкций в рамках статьи не выполнялось.

Статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы по договору с Российским морским регистром судоходства № 18-100253 на тему «Разработка проекта новой редакции части II «Корпус» Правил классификации и постройки высокоскоростных судов с учетом требований современных международных нормативных документов, отраслевых стандартов и правил классификационных обществ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шиманский Ю.А. Расчет прочности глиссирующих катеров. // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 1946. Вып. 10.
2. Короткин Я.И. и др. Волновые нагрузки корпуса судна. Л.: Судостроение, 1987.
3. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами. Киев: Наукова думка, 1969.
4. Лотов А.Б. Глиссирование и быстрый вход тел в воду. М.: Наука, 1984.
5. Ростовцев Д.М. Гидроупругие колебания судовых конструкций: Учебное пособие. Л.: Изд. ЛКИ, 1977.
6. Косоуров К.Ф. Теоретические основы гидроавиации (гидромеханика гидросамолета). М., Военное издательство Министерства обороны СССР, 1961 г.
7. Крыжевич Г.Б. Гидроупругость конструкций судна. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2006 г. 231 с.
8. Крыжевич Г.Б. Нелинейные гидроупругие колебания корпуса судна, движущегося в условиях волнения. //Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2001 г., вып. 11.
9. Крыжевич Г.Б. Особенности расчета вынужденной общей вибрации скоростных судов. // Морской вестник. 2005, № 2.
10. Крыжевич Г.Б. Влияние скорости хода судна и рассеяния энергии в жидкости на динамический изгиб корпуса при слеминге// Труды научно-техн. конф. «Кораблестроительное образование и наука – 2005», Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 2005.
11. Крыжевич Г.Б. Практический метод учета рассеяния энергии в жидкости при общей вибрации скоростных судов.// Судостроение. 2005. № 5.
12. Крыжевич Г.Б. Динамический изгиб корпуса скоростного судна при слеминге. // Морской вестник, № 2 (18), 2006.
13. Крыжевич Г.Б. Крылья малого удлинения как средство снижения силовых воздействий на корпусные конструкции скоростного судна и его материалоемкость. // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, вып. 42, СПб, 2007.
14. Крыжевич Г.Б. Демпфирование качки и общей вибрации скоростных судов и вопросы их рационального проектирования. // Морской вестник, 2008, №4 (28). С. 87-92.
15. Крыжевич Г.Б., Ишков В.В. Анализ влияния конструктивных и эксплуатационных параметров скоростного судна на внешние силы, определяющие прочность корпуса. // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Вып. 41 (325), СПб, 2008.
16. Крыжевич Г.Б., Ишков В.В. Влияние пассивных носовых крыльев-стабилизаторов на продольную качку и общий изгиб быстроходных судов. // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Вып. 46 (330), СПб, 2009.
17. Иванов М.А., Крыжевич Г.Б. Экспериментальное и расчетное исследование влияния гидродинамического демпфирования на общую вибрацию скоростного судна. // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2012, выпуск 67 (351).
18. Крыжевич Г.Б. Демпфирование общей вибрации судна и влияние на нее гидродинамических сил волновой и вязкостной природы. – Труды Крыловского государственного научного центра, 2013, выпуск 76 (360).
19. Крыжевич Г.Б., Норьков Е.С. Практический метод расчета сил гидродинамического сопротивления общей вибрации судна. // Труды Крыловского государственного научного центра, 2014 г., выпуск 82 (366). с. 129–138.
20. Крыжевич Г.Б., Рейнер Р.Л., Тихонов Г.С. О работах Регистра Судоходства по созданию методик определения внешних сил, используемых при оценке прочности скоростных судов. // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 1997. Вып. 20.
21. Крыжевич Г.Б. Нагрузки, определяющие прочность глиссирующих судов с воздушной каверной на днище.// Тр. научно-техн. конф., посвящ. памяти Ю.А. Шиманского, Санкт-Петербург, 1999.
22. Александров А.В., Крыжевич Г.Б. Особенности плоского обтекания скуловых зон судов при качке. // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010, вып. 55 (339).
23. Александров А.В., Крыжевич Г.Б., Норьков Е.С., Шапошников В.М. Применение современных программных комплексов численной гидродинамики при решении задач прочности и вибрации конструкций корабля.// Судостроение, 2012 г., № 2, с. 23 – 27.
24. Короткин А.И. Присоединенные массы судостроительных конструкций. СПб: Мор Вест, 2007.
25. Крыжевич Г.Б. Метод решения задач статистической динамики судовых конструкций. // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005, вып. 21.
26. DNV/GL. Rules for classification: High speed and light craft. Part 3. Structures, equipment. 2018.
27. LR. Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft. Part 5. Design and load criteria. 2018.
28. ISO 12215-5. Small craft – Hull construction and scantlings. Part 5. Design pressures for monohulls, designstresses, scantlings determination. 2008.

REFERENCES

1. Shimanskiy Yu.A. Raschet prochnosti glissiruyushchikh katerov.[Strength calculation for planing speedboats] // Trudy TSNIИ im. akad. A.N. Krylova. 1946. Vyp. 10.
2. Korotkin Ya.I. i dr. Volnovyye nagruzki korpusa sudna.[Wave-impact loads on a ship's hull] L.: Sudostroyeniye, 1987.
3. Logvinovich G.V. Gidrodinamika techeniy so svobodnymi granitsami.[Hydrodynamics of free-surface flows]. Kiyev: Naukova dumka, 1969.

4. Lotov A.B. Glissirovaniye i bystryy vkhod tel v vodu.[Planing and fast entry of bodies into water] M.: Nauka, 1984.
5. Rostovtsev D.M. Gidrouprugiye kolebaniya sudovykh konstruktsey [Hydroelastic oscillations of ship structures]: Uchebnoyeposobiye. L.: Izd. LKI, 1977.
6. Kosourov K.F. Teoreticheskiye osnovy gidroaviatsii (gidromekhanika gidrosamoleta).[Theoretical basis of naval aviation (hydromechanics of a seaplane)]. M., Voennoye izdatel'stvo Ministerstva oborony SSSR, 1961.
7. Kryzhevich G.B. Gidrouprugost' konstruktsey sudna. [Hydroelasticity of ship structures] SPb.: TSNII im. akad. A.N. Krylova, 2006, 231 s.
8. Kryzhevich G.B. Nelineynyye gidrouprugiye kolebaniya korpusa sudna, dvizhushchegosya v usloviyakh volneniya. [Non-linear hydroelastic hull oscillations of a ship moving on waves] // Trudy TSNII im. akad. A.N. Krylova, 2001, vyp. 11.
9. Kryzhevich G.B. Osobennosti rascheta vyzhdennoy obshchey vibratsii skorostnykh sudov. [Calculation of forced total vibration of high speed craft] // Morskoy vestnik. 2005. № 2.
10. Kryzhevich G.B. Vliyaniye skorosti khoda sudna i rasseyaniya energii v zhidkosti na dinamicheskiy izgib korpusa pri sleminge. [Influence of a vessel's speed and energy dissipation in fluid on the vessel's dynamic vibratory moment] // Trudy nauchno-tekhn. konf. «Korablestroitelnoe obrazovanie i nauka – 2005», Saint-Peterburg State Marine Technical University, 2005.
11. Kryzhevich G.B. Prakticheskiy metod ucheta rasseyaniya energii v zhidkosti pri obshchey vibratsii skorostnykh sudov. [Practical method of energy dissipation accounting at total vibration of high speed craft]// Sudostroyeniye. 2005, № 5.
12. Kryzhevich G.B. Dinamicheskiy izgib korpusa skorostnogo sudna pri sleminge. [High speed craft vibratory moment] // Morskoy vestnik, № 2 (18), 2006.
13. Kryzhevich G.B. Kryl'ya malogo udlineniya kak sredstvo snizheniya silovykh vozdeystviy na korpusnyye konstruktsey skorostnogo sudna i ego materialoyemkost'. [Low aspect wings as a means of decreasing forces acting on the hull structures of high speed craft and its materials consumption] // Trudy TSNII im. akad. A.N. Krylova, vyp. 42, SPb, 2007.
14. Kryzhevich G.B. Dempfirovaniye kachki i obshchey vibratsii skorostnykh sudov i voprosy ikh ratsional'nogo proyektirovaniya. [Roll and total vibration damping of high speed craft and issues of its rational designing] // Morskoy vestnik, 2008, №4 (28). S. 87-92.
15. Kryzhevich G.B., Ishkov V.V. Analiz vliyaniya konstruktivnykh i ekspluatatsionnykh parametrov skorostnogo sudna na vneshniye sily, opredelyayushchiye prochnost' korpusa. [Analysis of influence of structural and operational parameters of high speed craft on external forces determining hull strength] // Trudy TSNII im. akad. A.N. Krylova. Vyp. 41 (325), SPb, 2008.
16. Kryzhevich G.B., Ishkov V.V. Vliyaniye passivnykh nosovykh krylyev-stabilizatorov na prodol'nuyu kachku i obshchiy izgib bystrokhodnykh sudov.[Influence of passive bow stabilizing wings on pitching and bending of high speed craft]// Trudy TSNII im. akad. A.N. Krylova. Vyp. 46 (330), SPb, 2009.
17. Ivanov M.A., Kryzhevich G.B. Eksperimentalnoye i raschetnoye issledovaniye vliyaniya gidrodinamicheskogo dempfirovaniya na obshchuyu vibratsiyu skorostnogo sudna. [Experimental and design investigation of influence of hydrodynamic damping on total vibration of high speed craft]// Trudy TSNII im. akad. A.N. Krylova, 2012, Vyp. 67 (351).
18. Kryzhevich G.B. Dempfirovaniye obshchey vibratsii sudna i vliyaniye na neye gidrodinamicheskikh sil volnovoy i vyzkostnoy prirody. [Damping of a vessel's total vibration and the influence on it of wave and viscous hydrodynamic forces]// Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra, 2013, vypusk 76 (360).
19. Kryzhevich G.B., Norkov E.S. Prakticheskiy metod rascheta sil gidrodinamicheskogo soprotivleniya obshchey vibratsii sudna. [Practical method of calculation of forces of ship total vibration hydrodynamic resistance] // Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra, 2014 Vyp. 82 (366). pp. 129 – 38.
20. Kryzhevich G.B., Reyner R.L., Tikhonov G.S. O rabotakh Registra Sudokhodstva po sozdaniyu metodik opredeleniya vneshnikh sil, ispol'zuyemykh pri otsenke prochnosti skorostnykh sudov [RS research aimed at the development of procedures for determining the external forces on which the assessment of high-speed ship is based] // Nauchno-tekhnicheskiy sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva. 1997. Vyp. 20.
21. Kryzhevich G.B. Nagruzki, opredelyayushchiye prochnost' glissiruyushchikh sudov s vozdushnoy kavernoyn na dnishche. [Loads determining the strength of planing vessels with bottom air cavern] // Tr. nauchno-tekhn. konf., posvyashch. pamyati Yu.A. Shimanskogo, Sankt-Peterburg, 1999.
22. Aleksandrov A.V., Kryzhevich G.B. Osobennosti ploskogo obtekaniya skulovykh zon sudov pri kachke. [Specifics of two-dimensional motion of ship bilge zones at rolling] // Trudy TSNII im. akad. A.N. Krylova, 2010, vyp 55 (339).
23. Aleksandrov A.V., Kryzhevich G.B., Norkov E.S., Shaposhnikov V.M. Primeneniye sovremennykh programnykh kompleksov chislennoy gidrodinamiki pri reshenii zadach prochnosti i vibratsii konstruktsey korablya.[Application of modern numerical hydrodynamics software in solving the problems of strength and vibration of ship structures]// Sudostroyeniye, 2012, № 2, s. 23 – 27.
24. Korotkin A.I. Prisoyedinennyye massy sudostroitel'nykh konstruktsey. [Added masses of shipbuilding structures] SPb: MorVest, 2007.
25. Kryzhevich G.B. Metod resheniya zadach statisticheskoy dinamiki sudovy khkonstruktsey. [Method of solution of the problems of ship structures statistical dynamics] // Trudy TSNII im. akad. A.N. Krylova, 2005, vyp. 21.
26. DNV/GL. Rules for classification: High speed and light craft. Part 3. Structures, equipment. 2018.
27. LR. Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft. Part 5. Design and load criteria. 2018.
28. ISO 12215-5. Small craft – Hull construction and scantlings. Part 5. Design pressures for monohulls, designstresses, scantlings determination. 2008.



МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 621.791

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ РС К СОПРОТИВЛЕНИЮ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СУДОКОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

М.А. Иванов, канд. техн. наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, e-mail: IvanovMA@susu.ru

А.К. Тиньгаев, канд. техн. наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

И.А. Ильин, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

В работе приведен краткий анализ расчетных и экспериментальных методов оценки сопротивляемости образованию холодных трещин металла сварных соединений, отмечены их положительные качества и недостатки применительно к сварным соединениям судокорпусных конструкций из экономно-легированных высокопрочных марок сталей нового поколения. Обоснована необходимость применения экспериментальных методов для оценки сопротивления образованию холодных трещин. Обоснован выбор типа пробы (Tekken-Test), приведено описание методики проведения испытаний. Для повышения выявляемости холодных трещин и снижения вероятности отказов сварных соединений на стадии эксплуатации предлагается ввести дублирующий неразрушающий контроль сварных соединений, признанных годными по результатам первичного контроля. Приведены результаты проведенных испытаний. На основе выполненных исследований сформулированы предложения по совершенствованию требований нормативных документов РС.

Ключевые слова: холодные трещины, высокопрочная сталь, диффузионный водород, остаточные напряжения, проба Тэккен

IMPROVEMENT OF RS REQUIREMENTS FOR THE COLD CRACKS RESISTANCE IN WELDED JOINTS OF SHIP HULL HIGH-STRENGTH STEEL STRUCTURES

M.A. Ivanov, PhD, associate professor, South Ural State University, Chelyabinsk, e-mail: IvanovMA@susu.ru

A.K. Tingaev, PhD, associate professor, South Ural State University, Chelyabinsk

I.A. Ilyin, South Ural State University, Chelyabinsk

The paper presents a brief analysis of the numerical and experimental methods for assessing the resistance to the cold cracks formation in metal welded joints, their positive qualities and disadvantages in relation to welded joints of ship hull structures of economically alloyed high strength steel grades of the new generation. It is justified that the experimental methods are necessary to assess the resistance to cold cracks. The choice of the test type (Tekken Test) is also justified. To improve the detection of cold cracks and to reduce the probability of failure in welded joints at the stage of operation, it is proposed to introduce a duplicate non-destructive testing of welded joints, recognized as fit by the results of the primary control. The results of the experimental studies are presented. Based on the results obtained, improvements to the RS requirements are proposed.

Keywords: cold cracks, high strength steel, hydrogen diffusion, residual stresses, Tekken test

ВВЕДЕНИЕ

Применение современных малоуглеродистых экономно-легированных высокопрочных сталей с пределом текучести 500 – 690 МПа увеличивает технико-экономическую эффективность и надежность морских судов, плавучих буровых установок и морских стационарных платформ, эксплуатируемых в экстремальных природно-климатических условиях северных и арктических морей. Успех применения этих материалов для морской техники в значительной мере зависит от их свариваемости, поскольку основным способом соединений элементов конструкций является сварка.

Одной из главных проблем при сварке высокопрочных сталей является их склонность к образованию холодных трещин, которые зарождаются в течение 2 – 5 часов после окончания сварки [1], после чего происходит их замедленное развитие на протяжении от нескольких часов до нескольких суток. Считается [1 – 6], что при образовании холодных трещин (далее – ХТ) определяющими являются три фактора: наличие закалочных структур мартенситного и бейнитного типов, высокий уровень растягивающих остаточных напряжений первого рода и насыщенность сварного соединения диффузионным водородом, который абсорбируется жидким металлом из плазмы дуги.

Проблема образования ХТ известна давно и изучается многими исследователями во всем мире. По результатам проведенных исследований разработаны многочисленные нормативные документы и рекомендации по предотвращению образования ХТ, а также методы расчетной и экспериментальной оценки сопротивляемости образованию ХТ [7 – 10], ряд из которых вошли в нормативные документы МАКО и ее членов [11 – 15].

Алгоритм нормативного подхода к предотвращению образования ХТ заключается в следующем:

1. сопротивляемость стали образованию ХТ подтверждается в процессе одобрения ее классификационным обществом в качестве основного металла для изготовления корпусных конструкций судов;

2. оценка сопротивляемости стали образованию ХТ, как правило, осуществляется расчетными методами по ее химическому составу:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}; \quad (1)$$

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}; \quad (2)$$

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{20} + \frac{V}{30} + 5B; \quad (3)$$

3. в отдельных случаях, при одобрении новых марок стали, специальных конструкций судов и условий их применения, предусмотрены дополнительные испытания на технологических пробах (CTS, Tekkent, Lehigh, Implant и др.), порядок подготовки и проведение испытания которых в действующих нормах, как правило, не конкретизированы [12, 13, 15].

Следует отметить, что данная концепция была сформулирована достаточно давно, когда повышение прочности конструкционных сталей обеспечивалось в основном за счет легирования, а снижение сопротивления образованию холодных трещин связывали с полной или частичной закалкой основного металла на участке ЗТВ. Поэтому оценку сопротивляемости образованию ХТ проводили по результатам анализа химического состава основного металла (по показателям C_{eq} , CET , P_{cm}), а местом наиболее вероятного зарождения ХТ считали ЗТВ.

Расчетные зависимости типа (1) – (3) получены на основании статистической обработки результатов экспериментальных исследований различных технологических проб, изготовленных из классических марок конструкционных сталей. Использование этих зависимостей для оценки сопротивления образованию ХТ высокопрочных сталей нового поколения недостаточно корректно, так как необходимая для них прочность достигается не столько за счет легирования, сколько за счет специальных видов термической и термомеханической обработки металлопроката, что существенно отличает их от классических высокопрочных сталей по типу и степени дисперсности микроструктуры. Применение экономно-легированных высокопрочных сталей для судокорпусных конструкций существенно улучшило их свариваемость и уменьшило долю ХТ в ЗТВ. Необходимым условием зарождения ХТ для них считаются не закалочные структуры металла ЗТВ, а наличие диффузионного водорода в наплавленном металле, который становится наиболее вероятным местом зарождения ХТ.

Учитывая многофакторность событий зарождения и развития ХТ корректировка существующих и разработка новых методов расчетной оценки сопротивления образованию ХТ, применительно к новым маркам высокопрочных сталей, должны осуществляться с позиций вероятностно-статистического подхода, предполагающего наличие репрезентативных выборок результатов экспериментальных исследований. Решение этой задачи требует координации работы отдельных исследователей и связано со значительными затратами времени и средств.

Принимая во внимание изложенное выше, можно сказать, что на сегодняшний день оценку сопротивления образованию ХТ сварных соединений судокорпусных конструкций из высокопрочных сталей необходимо выполнять с использованием экспериментальных методов [16, 17].

1. ОБОСНОВАНИЕ ТИПА ПРОБЫ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН МЕТАЛЛА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Для оценки сопротивления образованию холодных трещин основного металла и сварных соединений разработано большое количество технологических проб, которые отличаются по конструкции, способу создания напряженного состояния и области их предпочтительного применения. Для выбора типа пробы для испытаний металла сварного соединения в целом рассмотрим ряд наиболее известных альтернатив (табл. 1), которые приведены в работах [10]. Выбор наиболее предпочтительного варианта предлагаем осуществить по следующим критериям:

1. напряженное состояние должно быть локализовано в корневом валике сварного шва в течение всего времени испытания. Это связано с тем, что в большинстве случаев холодные трещины зарождаются в корне шва и развиваются по механизму замедленного разрушения;

2. напряженное состояние в корне шва должно быть максимально большим и многоосным, так как это будет способствовать проявлению большего количества неблагоприятных факторов, и позволить учесть наиболее консервативный вариант возможного развития события;

3. по месту локализации разрушения в пробе не должно быть внешних ограничений. В зависимости от сочетания неблагоприятных факторов трещина может зарождаться как в металле шва, так и в зоне термического влияния;

4. метод испытаний должен быть внедрен в международные, национальные или отраслевые стандарты и иметь положительный опыт практического применения;

5. результаты испытаний должны быть однозначны, повторяемы и воспроизводимы при минимальном количестве образцов.

Таблица 1

Перечень проб для оценки сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин

№ п/п	Наименование теста	Область применения			Место локализации трещины	НТД
		Приемочные испытания	Исследование свариваемости	Моделирование особых условий		
1	Implant-Test	+	+	–	ЗТВ	[8, 9, 18, 19, 21]
2	LTP-Test	+	+	+	ЗТВ	–
3	TRC-Test	+	+	+	ЗТВ, МШ	–
4	Bead Bend Test	+	+	+	ЗТВ, МШ	–
5	Tekken-Test	+	+	–	ЗТВ, МШ	[7, 8, 19, 21, 22, 23]
6	U-Groove Test	+	+	–	ЗТВ, МШ	[7, 9, 20]
7	Lehigh-Test	–	+	–	МШ	[19]
8	CTS-Test	+	+	+	ЗТВ, МШ	[7, 23]
9	Cruciform-Test	+	+	–	ЗТВ, МШ	[8, 19, 21]
10	WIC -Test	+	+	+	ЗТВ, МШ	–
11	IRC-Test	+	+	+	ЗТВ, МШ	–
12	RGW-Test	+	+	+	ЗТВ, МШ	[8, 21]
13	GBOP-Test	+	+	–	МШ	–

Обозначения, принятые в таблице: ЗТВ – зона термического влияния, МШ – металл шва

Критерии 1, 3 и 4, можно считать вполне определенными (не требующими дополнительных комментариев), поэтому их примем в качестве необходимых условий для выбора пробы. В таком случае критерии 2 и 5 будем считать достаточными условиями для принятия окончательного решения.

Согласно табл. 1 критериям 1, 3 и 4 удовлетворяют пробы № 5, № 6, № 8, № 9 и № 12, из которых следует исключить пробу №12 как не вошедшую в современные национальные и международные нормативные документы по оценке сопротивления образованию холодных трещин. Оставив в списке четыре пробы, перейдем к их ранжированию по критериям 2 и 5.

Первоначально сравним между собой пары проб № 8 – 9 (рис. 1 – 2) и № 5 – 6 (рис. 3 – 4) как близкие по признаку однотипности. В первом случае это сварные соединения с угловыми швами, а во втором – стыковыми.

При рассмотрении первой пары следует отметить, что Cruciform-Test (проба № 9) является развитием CTS-Test (пробы № 8) и обладает большей жесткостью [10], а следовательно, и выявляемостью ХТ. Вместе с тем практика применения пробы № 9 показала [10] что, обладая большей жесткостью, она уступает пробе № 8 по повторяемости и воспроизводимости результатов, что в ряде случаев приводит к неопределенности при принятии решения и требует проведения повторных испытаний на большем количестве образцов. Этим можно объяснить тот факт, что при

анализе методов оценки сопротивляемости образованию ХТ экспертное сообщество отдало предпочтение более стабильной пробе CTS-Test (проба № 8), которая вошла в международный стандарт [23]. Таким образом, из данной пары следует исключить Cruciform-Test (пробу № 9).

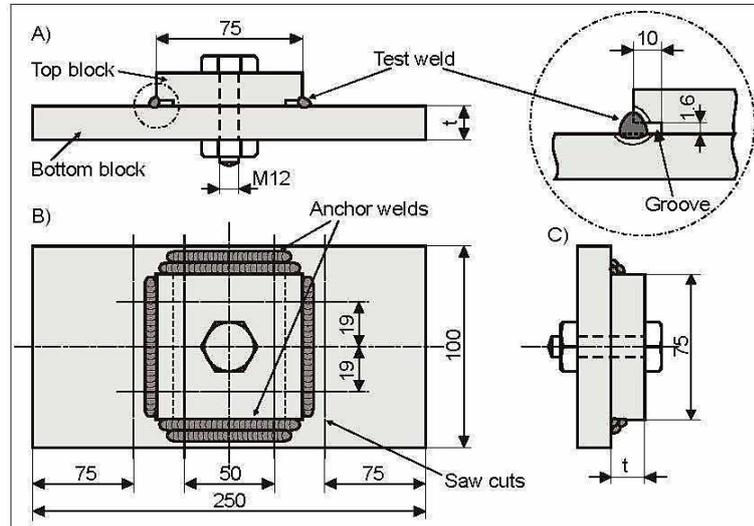


Рис. 1 Схема испытания CTS-Test [7]:
а) – вид спереди; б) – вид сверху; в) – вид сбоку.

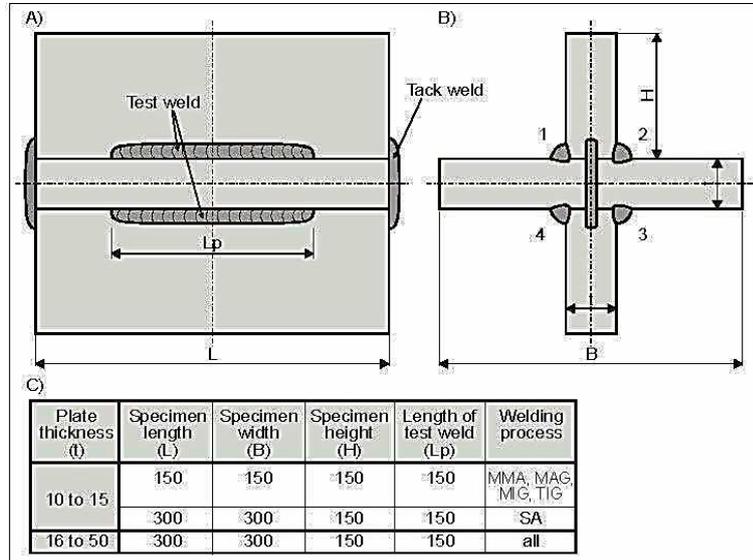


Рис. 2 Схема испытания Cruciform-Test [19]:
а) – вид спереди; б) – вид сверху; в) – вид сбоку.

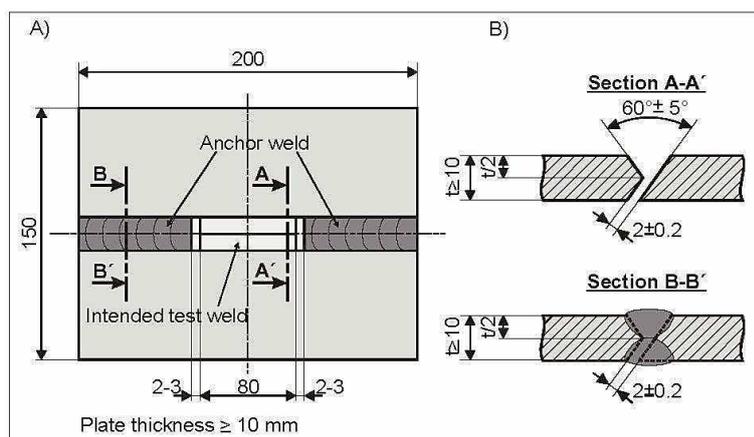


Рис. 3 Схема испытания Tekken-Test [23]:
 а) – вид сверху; б) – разделка кромок в двух сечениях

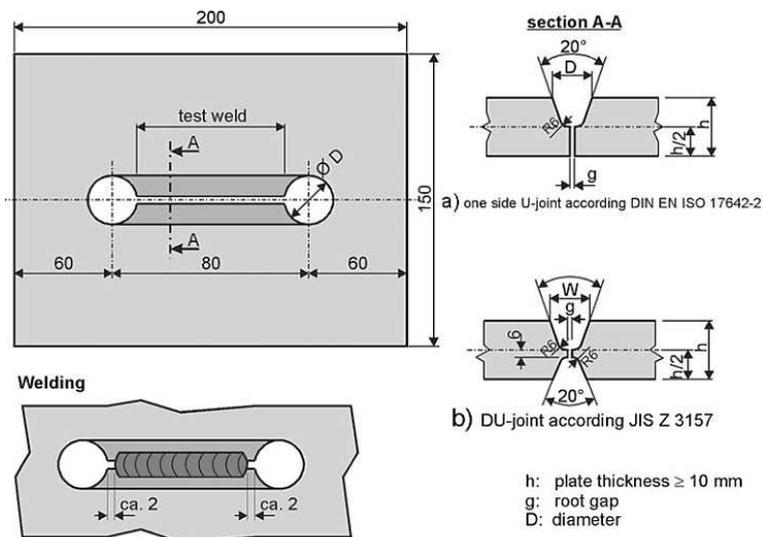


Рис. 4 Схема испытания U-Groove Test [20, 23]:
 а) – вид сверху; б) – разделка кромок в двух сечениях

Пробы № 5 – 6 (см. табл. 1) присутствуют в современных российских и международных нормативных документах, поэтому рассмотрим их более обстоятельно. С позиции критерия 5 эти пробы можно считать равнозначными, так как для обеспечения достоверности результатов испытаний в нормативных документах [7] рекомендуют испытывать одинаковое количество образцов и единую методику обработки результатов. С точки зрения жесткости напряженного состояния (критерия 2) проба № 5 (Tekken-Test), более предпочтительна, т. к. величина остаточных растягивающих напряжений в корневом валике здесь выше. Это следует из результатов работы [24], в которой показано, что при сравнении проб U-Groove Test и Tekken-Test последняя создает большую интенсивность напряженного состояния по всей длине испытываемого сварного шва (рис. 5). Таким образом, из пары № 5 – 6 остается проба Tekken-Test (№ 5), которую сравним с пробой CTS-Test (№ 8).

Прямых сравнений проб № 5 – 6 по напряженному состоянию в корне шва найти не удалось, вместе тем практики применения этих проб [25, 26] свидетельствует, что проба Tekken-Test

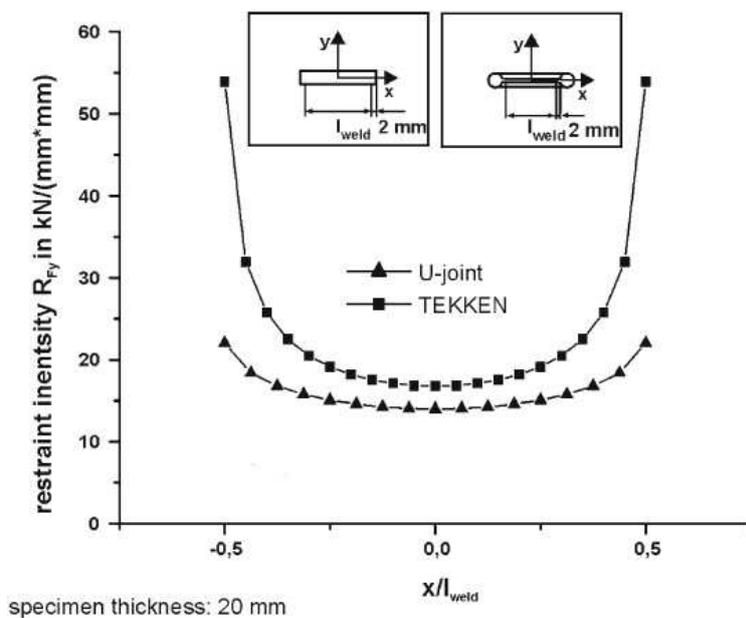


Рис. 5 Зависимость интенсивности напряжений RFY в образцах с естественной жесткостью от расстояния от центра сварного шва [24]

является более жесткой и менее трудоемкой при проведении испытаний, что подтверждается рекомендациями МАКО [27], в которых проба Tekken-Test считается основной.

Принимая во внимание вышеизложенное можно сказать, что для оценки сопротивляемости образованию ХТ наиболее подходящей на сегодняшний день является проба Tekken-Test, которая включена в современные международные, российские, европейские, американские и японские стандарты.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

В качестве нормативного документа по оценки сопротивления образованию ХТ в металле сварных соединений судокорпусных конструкций следует принять ГОСТ Р ИСО 17642-2-2012, в котором описаны основные этапы и процедуры проведения испытаний технологических проб Тэккен, конструктивные размеры которой приведены на рис. 3. Здесь же мы остановимся на отдельных моментах подготовки и проведения испытаний, которые были выявлены нами в ходе апробации методики [7, 23] и требуют, на наш взгляд, дополнительных комментариев.

При одобрении технологии сварки судокорпусных конструкций при заданных режимах и условиях сварки ГОСТ Р ИСО 17642 2 2012 рекомендует проведение испытания 1 пробы. Вместе с тем соблюдение условий испытаний по величине погонной энергии при ручной и механизированной сварке, по сравнению с автоматической, на наш взгляд затруднено, поэтому количество проб для испытаний следует принять:

- одну пробу для автоматической сварки в среде защитных газов и самозащитной порошковой проволокой (без дополнительной газовой защиты);
- две пробы для ручной сварки покрытыми электродами, механизированной сваркой в среде защитных газов и самозащитной порошковой проволокой (без дополнительной газовой защиты).

Крепежные сварные швы в пробе Тэккен предназначены для создания необходимой естественной жесткости и формирования остаточных сварочных напряжений в испытуемом шве. Наличие в крепежных швах пробы протяженных макротрещин может привести к изменению ее исходной жесткости, поэтому после выполнения и охлаждения крепежных сварных до температуры окружающей среды и необходимо проверить визуально на наличие поверхностных трещин длиной более 5 мм.

Крепежные сварные швы следует выполнять сварочными материалами, используемыми для испытуемого сварного шва. Однако для снижения риска образования в них трещин сварку можно производить и другими сварочными материалами с пределом текучести равным или меньшим пределу текучести основного металла не более чем на 25 %, при условии, что эти сварочные материалы одобрены к применению в судостроении РС.

Сварка испытуемого сварного шва следует выполнять в нижнем положении на режимах, обеспечивающих погонную энергию на 25 % ниже ее минимальной величины, предусмотренной предварительной спецификацией процесса сварки (пСПС), которая соответствует нижней границе области распространения технологии сварки. Сварку следует выполнять при температуре окружающей среды, соответствующей минимальной температуре выполнения сварочных работ в соответствии с пСПС.

Выбор минимальной погонной энергии для сварки проб обоснован необходимостью обеспечения максимальной скорости охлаждения металла сварного соединения, способствующих формированию закалочных структур, которые повышают вероятность образования холодных трещин.

Погонная энергия является интегральным показателем технологического процесса сварки, определяющим сопротивляемость металла сварного соединения образованию холодных трещин. Следует отметить, что в действующей редакции нормативных документов РС по сварке [28, 29] определение погонной энергии не дано. Поэтому рекомендуется дать определение погонной энергии и привести расчетную формулу в соответствии с ГОСТ Р ИСО 857 1 2009 [30].

В технической литературе различать погонную и эффективную погонную энергию, которые зависят от коэффициента полезного действия (КПД) процесса сварки и могут существенно отличаться. На стадии одобрения технологического процесса сварка рекомендуется оперировать понятием погонная энергия (без учета КПД процесса сварки), что упростит и упорядочит определение области распространения пСПС. Эффективная погонная энергия (включающая КПД процесса сварки) требуется в основном для определения допустимой скорости охлаждения металла сварного соединения, которая не учитывается при одобрении пСПС.

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 17642 2 2012 после сварки испытуемого шва образец необходимо выдержать при температуре окружающей среды не менее 48 часов до начала проведения контроля на наличие трещин. В ГОСТе не конкретизировано, что следует принимать за температуру окружающей среды, в результате чего при апробации методики испытаний возникли вопросы. В данном случае за температуру окружающей среды следует принять среднее значение температуры окружающего воздуха, которая была при выполнении испытуемого сварного шва, и которую необходимо внести в пСПС и протокол испытаний проб.

По прошествии 48 часов испытуемый сварной шов должен быть проверен на наличие поверхностных трещин визуально. В случае наличия видимых поверхностных трещин, испытание считается давшим неудовлетворительные результаты. Если трещин не обнаружено, то необходимо провести исследования контрольных образцов сварного шва на макрошлифах. При невозможности идентифицировать видимый дефект как трещину необходимо продолжить исследование контрольных образцов сварного шва на макрошлифах.

Контрольные образцы необходимо разделить на четыре участка для металлографического исследования в соответствии с рис. 6.

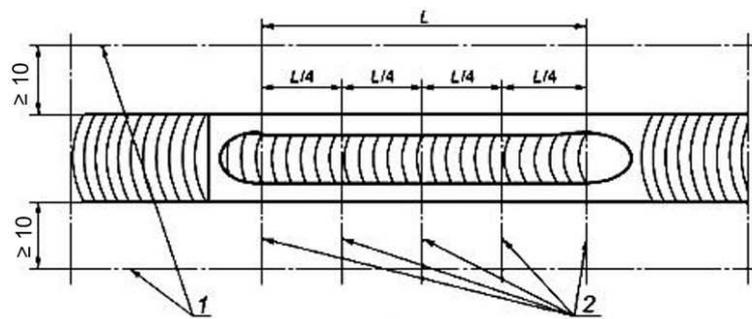


Рис. 6 Положение мест проверки сварного шва на наличие трещин:
1 – резка в направлении ширины образца; 2 – положение проверяемого сечения

Поверхности макрошлифов должны быть протравлены 10 %-м раствором азотной кислоты и осмотрены для выявления возможных трещин. Осмотр проводится невооруженным глазом или через оптический прибор с увеличением не менее $\times 50$. Вывод об отсутствии трещин на образцах подтверждают при увеличении не менее $\times 200$.

В результате осмотра возможны следующие варианты (рис.7):

.1 трещин на макрошлифах не обнаружено, испытание считается давшим удовлетворительные результаты;

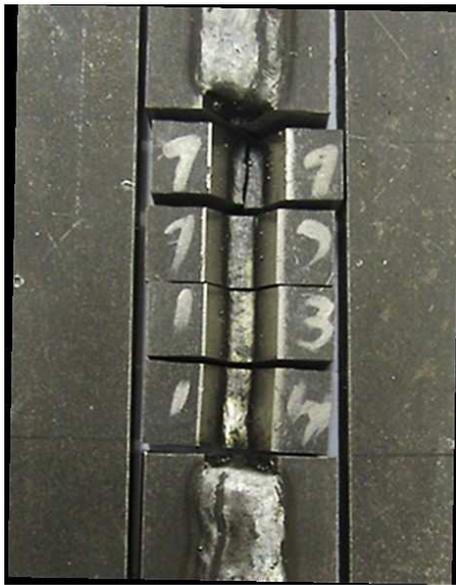
.2 на макрошлифах обнаружены трещины длиной менее 0,5 мм, испытание считается давшим удовлетворительные результаты (рис. 7в);

.3 на макрошлифах обнаружены трещины длиной более 0,5 мм, испытание считается давшим неудовлетворительные результаты (рис. 7а, б).

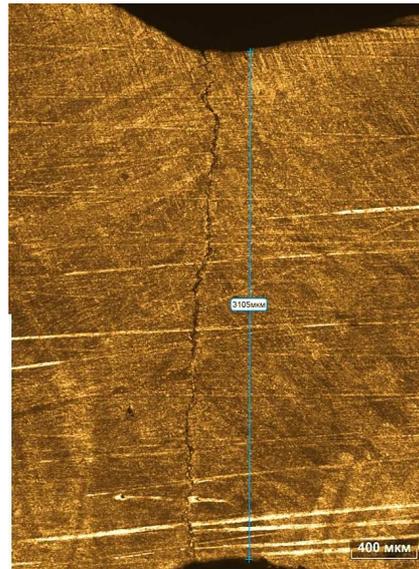
При наличии трещин в ближайших к крепежным швам сечениях первого и последнего контрольных образцов, необходимо визуально оценить площадь наплавленного металла или толщину шва, которые не должны существенно отличаться от аналогичных показателей испытываемого сварного шва данных контрольных образцов с противоположной стороны. В противном случае следует провести повторное шлифование контрольных образцов со стороны сечения с меньшей площадью наплавленного металла или толщины шва до значений этих показателей, близких к значениям аналогичных показателей с противоположной стороны, и провести повторную проверку контрольных образцов на наличие трещин.

При получении неудовлетворительных результатов испытаний необходимо внести изменения в технологию сварки с целью повышения сопротивления образованию ХТ сварных соединений, например: назначить предварительного подогрева свариваемых кромок, увеличения погонной энергии, применить другие более «мягкие» (пластичные) сварочные материалы и др.

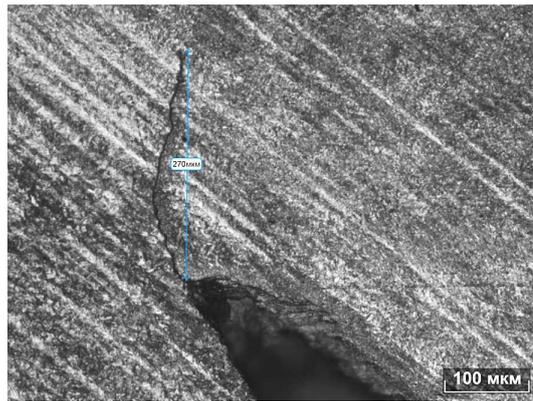
При оптимизации технологии сварки с целью установления граничных условий образования холодных трещины должна быть проведена серия аналогичных испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 857 1 2009. После получения положительных результатов испытаний необходимо внести соответствующие изменения в пСПС и заново подать заявку на одобрение новой технологии сварки.



а)



б)



в)

- Рис. 7 Варианты результатов осмотра контрольных образцов:
- а) – на образце имеется поверхностная трещина длиной более 0,5 мм;
 - б) – на образце имеется внутренняя трещина длиной более 0,5 мм;
 - в) – на образце имеется внутренняя трещина длиной менее 0,5 мм

3. ОБОСНОВАНИЕ ДУБЛИРУЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Сварка при отрицательной температуре сопровождается изменением распределения тепла в изделии и скорости диффузионных процессов на границе раздела твердой фазы, что увеличивает насыщенность металла газами, в частности водородом, по сравнению со сваркой при положительной температуре. Согласно [5] с понижением температуры проведения сварочных работ снижается интенсивность выделения диффузионного водорода в сварном соединении (рис. 8), что повышает риск образования холодных трещин по прошествии более длительного промежутка времени, чем рекомендовано действующими нормативными документами РС по неразрушающему контролю сварных соединений (не менее 48 или 72 часов для штевневых ледоколов и судов ледовых классов) [29].

По данным [5], при температуре окружающего воздуха ниже $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ выделение диффузионного водорода наблюдается после 72 часов, а при температуре $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ оно продолжается и по прошествии 200 часов после окончания сварки (см. рис. 8б). Это связано с тем, что при температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ из наплавленного металла (4Y42) свободно выделилось около $3\text{ см}^3/100\text{ г}$ водорода, при минус $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,85\text{ см}^3/100\text{ г}$, а при минус $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,2\text{ см}^3/100\text{ г}$. Таким образом, из экспериментальных исследований [5] следует, что при выполнении сварочных работ при отрицательной температуре неразрушающий контроль сварных соединений выполняемый по прошествии 48 часов после сварки не гарантирует отсутствие холодных трещин в металле сварного соединения.

Одним из вариантов решения данной проблемы может быть введение дублирующего контроля сварных соединений по прошествии определенного промежутка времени, существенно большего, чем 48 часов. Назначение времени проведения дублирующего контроля исследовано в работе [1], из которой следует, что зарождение холодных трещин в сварных соединениях зависит от толщины и температуры окружающей среды во время проведения сварочных работ, а также от химического состава и класса прочности сталей и должна быть не менее 10 дней после проведения первичного контроля. Данная процедура апробирована, внедрена и оправдала себя на практике [1].

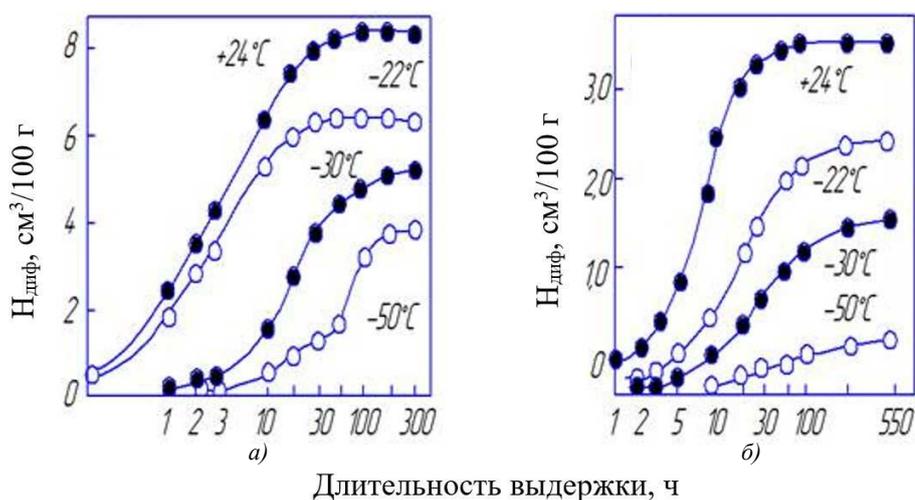


Рис. 8 Зависимость скорости выделения водорода из наплавленного металла от температуры среды: электроды АНО – 26 (4Y42); а) – глицериновая проба; б) – спиртовая проба [5]

Для повышения выявляемости холодных трещин и снижения частоты отказов сварных соединений судокорпусных конструкций из высокопрочных сталей предлагается вести для них дублирующий неразрушающий контроль, который должен проводиться не ранее чем через 10 дней после проведения первичного неразрушающего контроля, при условии, что сварные соединения относятся к жесткому контуру корпуса судна и были выполнены при отрицательной температуре окружающего воздуха. Объем дублирующего контроля следует назначать в зависимости от группы связей корпуса судна: для III группы связей – 100 %, II – 50 %, I – 25 %.

ВЫВОДЫ

Основными предложениями по совершенствованию нормативных требований РС в части обеспечения сопротивления образованию холодных трещин сварных соединений судокорпусных конструкций из высокопрочных марки сталей являются:

1) введение дополнительного испытания и обоснование типа пробы (Tekken-Test) для оценки сопротивления образованию холодных трещин металла сварного соединения, которые приняты в современных национальных и международных стандартах, и рекомендованы МАКО [27] к применению;

2) введение дублирующего неразрушающего контроля сварных соединений, признанных годными по результатам первичного контроля. Контроль проводится в отношении сварных соединений жесткого контура корпуса судна, выполненных при отрицательных температурах окружающего воздуха.

Статья подготовлена в рамках договора с РС №17-350898 на выполнение научно-исследовательской работы на тему: «Разработка предложений по корректировке требований нормативных документов РС к выбору сварочных материалов и технологическим процессам сварки корпусных конструкций, изготовленных из высокопрочной стали, включая конструкции, работающие в условиях низких температур».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаров Н.Г. Повышение стойкости сварных соединений труб против образования холодных трещин / Н.Г. Гончаров, О.И. Колесников, А.А. Братусь // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. –2014. № 3 (15). – С. 63–67
2. Гончаров С.Н. Холодные трещины при сварке высокопрочных среднелегированных сталей [Текст]: [монография]/ С.Н. Гончаров, М.П. Шалимов; М-во образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Открытое АО «Уральский з-д трансп. машиностроения». - Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 94, [1] с.: ил.; 21 см.; ISBN 978-5-321-02196-5
3. Ефименко Л.А., Елагина О.Ю., Вышемирский Е.М., Капустин О.Е., Мурадов А.В., Прыгаев А.К. Традиционные и перспективные стали для строительства магистральных трубопроводов, –М.:Логос, –2011, 316 с.
4. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. Машиностроение, 1981. 247 с.
5. Муравьев К.А. // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по матер. VIII междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2012.
6. Terasaki T., Akiyama T., Oshita S. (1986) Study of local hydrogen content related to root cracking. Quarterly Journal Of The Japan Welding Society, 4(2):378–383. doi: 10.2207/qjws.4.37
7. ГОСТ Р ИСО 17642-2-2012 Испытания разрушающие сварных швов металлических материалов. Испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин в сварных соединениях. Процессы дуговой сварки. Часть 2. Испытания с естественной жесткостью.
8. ГОСТ 26388-84. Соединения сварные. Методы испытаний на сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке плавлением.
9. EN ISO 17642-3 Разрушающие испытания сварных швов металлических материалов. Испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин в сварных соединениях. Процессы дуговой сварки. Часть 3. Испытания с приложением внешней нагрузки (ИСО 17642-3:2005).
10. Kannengiesser Th., Boellinghaus Th. Cold cracking tests – an overview of present technologies and applications // Welding in the World. February 2013, Volume 57, Issue 1, pp. 3–37. doi:10.1007/s40194-012-0001-7.
11. DNV Rules for Classification Ships. Part 2 Materials and Welding. – 2018. – 217 p.
12. ABC Rules for Materials and Welding (Part 2). – 2018. – 465 p.
13. LR Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials. – 2018. – 451 p.
14. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII. Материалы. Российский морской регистр судоходства. – 2018. – 190 с.
15. International Association of Classification Societies. Requirements concerning. Materials and Welding. –2016. – 320 p.
16. Вышемирский, Е.М. Исследование свариваемости и разработка технологии сварки высокопрочных трубных сталей в условиях Крайнего Севера: диссертация кандидата технических наук: 05.03.06 / Е.В. Вышемирский; [Место защиты: Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина].– Москва, 2009.–134 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/2333
17. Вышемирский Д.Е. Обоснование критического значения эквивалента углерода на основе оценки свариваемости сталей для труб класса прочности K65 и K70: диссертация кандидата технических наук: 05.02.10 / Д.В. Вышемирский [Место защиты: ФГБОУ ВО Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана] (национальный исследовательский университет)], 2017–138 с.
18. ГОСТ Р 56143-2014 Испытания разрушающие сварных швов металлических материалов. Испытания на сопротивляемость образованию холодных трещин в сварных соединениях. Процессы дуговой сварки. Часть 3. Испытания с приложением внешней нагрузки.

19. AWS B4.0M: 2000: Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, Approved by American National Standards Institute, July 25, 2000.
20. JSA - JIS Z 3157 Method of U-Groove Weld Cracking Test. 1993.
21. TGL 14914 Blatt 5 Ausgabe Juni 1988: Weldability testing – cold cracking resistance of the weld. [In German].
22. JSA - JIS Z 3158 Method of Y-Groove Weld Cracking Test. 2016.
23. BS EN ISO 17642-2:2005 "Destructive tests on welds in metallic materials – Cold cracking tests for weldments – Arc welding processes – Part 2: Self-restraint tests".
24. Schwenk C., Kannengiesser Th., Rethmeier M. (2008) Restraint conditions and welding residual stresses in self-restrained cold cracking tests. Proceedings of Trends in welding research 2008, Georgia, USA, 8th International Conference, ISBN 13 978 1-61503-002-6, doi:10.1361/cp2009twr766, pp. 766–773.
25. Pargeter R.J. and Wright M.D. Welding of Hydrogen-Charged Steel for Modification or Repair/Welding Research. – 2010. Vol.89 –pp. 34–42.
26. ОР-91.200.00-КТН-074-12 Отраслевой регламент «Порядок организации и осуществления строительного контроля за соблюдением проектных решений и качеством строительства подводных переходов МН и МНПП» (с изменением № 2) ПАО «Транснефть».
27. IACS Req. 1984/Rev.3 2016 W16 High Strength Steels for Welded Structures
28. Руководство по техническому наблюдению за применением сварки в судостроении и судоремонте. Российский морской регистр судоходства. – 2010. – 227 с.
29. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIV. Сварка. – 2018. – 106 с.
30. ГОСТ Р ИСО 857-1-2009. Сварка и родственные процессы. Словарь. Часть 1. Процессы сварки металлов. Термины и определения.

REFERENCES

1. Goncharov, N.D. Povyshenie stoykosti svarnykh soedineniy trub protiv obrazovaniya kholodnykh treschin [Increase of resistance of welded joints of pipes against formation of cold cracks] / N.D. Goncharov, O.I. Kolesnikov, A.A. Bratus // Science and technology of pipeline transportation of oil and oil products. –2014. № 3 (15). – P. 63-67
2. Goncharov S.N. Kholodnye treschiny pri svarke vysokoprochnykh srednelegirovannykh staley [Tekst]: [monografiya] [Cold cracks in welding of high strength medium alloy steels [Text]: [monograph] / S.N. Goncharov, M.P. Shalimov, M of education and science of the Russian Federation, Ural Federal University, 2012.–94, [1] p.
3. Efimenko L.A., Elagina O.Yu., Vyshemirskii E.M., Kapustin O.E., Muratov A.V., Pugaev A.K. Traditsionnye i perspektivnye stali dlya stroitelstva magistralnykh truboprovodov [Traditional and perspective steels for the construction of main pipelines], –M.:Logos, 2011, 316 p.
4. Makarov E.L., Kholodnye treschiny pri svarke legirovannykh staley. [Cold cracks in welding of alloy steels]. Mechanical engineering, 1981. 247 p.
5. Muravyev K.A. Issledovanie raspredeleniya vodoroda v svarnom soedinenii v zavisimosti ot temperaturnykh uslovy [Study of the distribution of hydrogen in a welded joint depending on the temperature conditions]// Technical science – theory to practice. At the VIII Intern. scientific–prakt. Conf. – Novosibirsk: Sibak, 2012.
6. Terasaki T., Akiyama T., Oshita S. Study of local hydrogen content associated with root cracking. Quarterly Journal Of The Japan Welding Society, (1986) 4 (2):378-383.
7. GOST R ISO 17642-2- Resistance tests to cold cracks in welded joints. Tests of destructive welds of metal materials. Arc welding processes. Part 2. Tests with natural stiffness, 2012.
8. GOST 26388-84. Welded joints. Test methods for resistance to cold crack formation in fusion welding.
9. EN ISO 17642-3 Destructive testing of weld metal materials. Resistance tests to cold cracks in welded joints. Arc welding processes. Part 3. Tests with the application of an external load (ISO 17642-3:2005).
10. Kannengiesser, Th., Boellinghaus Th. Cold cracking tests-an overview of modern technologies and applications // Welding in the world. February 2013, volume 57, Issue 1, pp. 3–37.
11. DNV Rules for Classification Ships. Part 2 Materials and Welding. – 2018. – 217 p.
12. ABC Rules for Materials and Welding (Part 2). – 2018. – 465 p.
13. LR Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials. – 2018. – 451 p.
14. Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XIII Materials. Russian Maritime Register of Shipping. – 2018. – 190 p. [In Russian]
15. International Association of Classification Societies. Requirements concerning Materials and Welding. –2016. – 320 p.
16. Vyshemirsky E.M. Issledovanie svarivaemosti i razrabotka tekhnologii svarki vavysokoprochnykh trubnykh staley v usloviyakh Kraynego Severa: dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk: 05.03.06 [Investigation of weldability and development of technologies of welding high strength pipe steels in conditions of the far North: thesis dissertation of the candidate of technical Sciences: 05.03.06] / E.M. Vyshemirsky [Thesis affiliation: Gubkin Russian State University of Oil and Gas]. – Moscow, 2009. – 134 p.
17. Vyshemirsky D.E. Obosnovanie kriticheskogo znacheniya ekvivalent ugleroda na osnove otsenki svarivaemosti staley dlya trub klassa prochnosti K65 i K70: the dissertation of the candidate of technical sciences: 05.02.10 [Substantiation of the

- critical value of carbon equivalent on the basis of steel weldability assessment for pipes of strength class K65 and K70: thesis of candidate of technical sciences: 05.02.10] / D.E. Vyshemirsky [thesis affiliation: MOSCOW state technical University named after N. Uh. Bauman" (National Research University)], 2017.– 138 p.
18. GOST R 56143-2014 Testing of destructive welds of metal materials. Resistance tests to cold cracks in welded joints. Arc welding processes. Part 3. Tests with the application of an external load.
 19. AWS B4.0M: 2000: Standard Methods for Mechanical Testing of Welds, Approved by American National Standards Institute, July 25, 2000.
 20. JSA-JIS Z 3157 Method of U-Groove Weld Cracking Test. 1993.
 21. TGL 14914 Blatt 5 Ausgabe Juni: Weldability testing – cold cracking resistance of the weld. [In German] 1988.
 22. JSA-JIS Z 3158 Method of Y-Groove Weld Cracking Test. 2016.
 23. BS EN ISO 17642-2: "Destructive tests on welds in metallic materials – Cold cracking tests for weldments – Arc welding processes – Part 2: Self-restrain tests" 2005.
 24. Schwenk C., Kannengiesser Th., Rethmeier restrict conditions and welding residual stresses in self-restricted cold cracking tests. Proceedings of Trends in welding research, Georgia, USA, 8th International Conference, ISBN -13 978-1-61503-002-6, 2008, pp. 766–773.
 25. Pargeter R.J. and Wright M.D. Welding of Hydrogen-Charged Steel for Modification or Repair / Welding Research. –2010. Vol.89-pp. 34–42.
 26. OR-91.200.00-KTN-074-12 Industry-specific regulations "Procedure of organization and implementation of construction control over compliance with design solutions and quality construction of underwater crossings of OTP and OPTP" (with Amendment No. 2) PJSC "Transneft".
 27. IACS Req. High Strength Steels for Welded Structures 1984/Rev.3 2016 W16.
 28. Guidelines on Technical Supervision of Application of Welding in Shipbuilding and Ship Repair. Russian Maritime Register of Shipping. – 2010. – 227 p. [In Russian]
 29. Rules for Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XIV. Welding. – 2018. – 106 p. [In Russian]
 30. GOST R ISO 857-1-. Welding and related processes. Dictionary. Part 1. The processes of welding of metals. Terms and definitions, 2009

УДК 621.375.826

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА КОЛИЧЕСТВО ОСТАТОЧНОГО АУСТЕНИТА В ЗОНЕ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

И.И. Кулешов, Дальневосточный филиал ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Владивосток, e-mail: kuleshov.ii@rs-class.org

И.И. Чернаткин, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток

В качестве методов упрочнения рабочих поверхностей чугунных деталей наибольшее распространение получили методы, связанные с термической обработкой поверхности и методы, основанные на поверхностном деформировании поверхностей. Установлено, что некоторые методы поверхностной закалки отличаются длительностью процесса либо сравнительно низкой поверхностной твердостью полученного слоя. Методы пластического деформирования не находят широкого применения в качестве упрочняющей операции для деталей, работающих при значительных температурных нагрузках ввиду возможности релаксации упрочненного слоя. Лазерное упрочнение, как метод поверхностной закалки, является наиболее приемлемым ввиду сравнительно высокой твердости покрытия, и производительности процесса. В процессе лазерной обработки в зоне лазерного воздействия при определенных режимах формируется структура, представленная ледебуритной сеткой с включениями ячеек аустенита (остаточный аустенит). В работе исследовано влияние параметров режима лазерного термоупрочнения на количество остаточного аустенита в зоне лазерного воздействия. Исследованы четыре разновидности серых перлитных чугунов. В результате исследования получено уравнение, позволяющее определить количество остаточного аустенита в зоне лазерного воздействия при обработке чугунных деталей.

Ключевые слова: лазерное упрочнение, зона оплавления, серый чугун, аустенит, оплавление, планирование эксперимента, количественный анализ, точечный метод, метод соотношения площадей

IMPACT OF LASER HARDENING TECHNOLOGICAL REGIMES ON THE AMOUNT OF RESIDUAL AUSTENITE IN THE LASER EXPOSURE ZONE

I.I. Kuleshov, Far East Branch of FAI "Russian Maritime Register of Shipping", Vladivostok, e-mail: kuleshov.ii@rs-class.org

I.I. Chernatkin, Admiral Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok

Heat treatment and surface methods based on surface deformation are the most widespread methods for working surfaces hardening of cast iron components. It has been established that some methods of surface hardening are time-consuming or result in a relatively low surface hardness of the layer. Methods of plastic deformation are not widely used as a reinforcing operation for parts operating at a significant temperature loads due to potential relaxation in the hardened layer. Laser hardening as a method of surface hardening is the most appropriate due to the relatively high hardness of the obtained coating, and the process capacity. In the laser exposure area at some laser hardening regimes ledeburite mesh appears that incorporates the cells of austenite (residual austenite). The article investigates the influence of parameters of laser heat strengthening on the amount of residual austenite in the zone of laser exposure. Four kinds of grey pearlite cast iron are studied. As a result of the study, equations to determine the amount of residual austenite in the zone of laser exposure when processing cast iron parts have been obtained.

Keywords: laser hardening, melting area, cast iron, austenite, melting, design of experiment, quantitative analysis, point method, area ratio method

ВВЕДЕНИЕ

В современном машиностроении, как и в других отраслях техники, чугун является наиболее распространенным литейным материалом. Поэтому вопрос повышения эксплуатационных характеристик чугунных деталей является весьма актуальным в настоящее время.

Существует множество способов повышения эксплуатационных показателей чугунных деталей. Среди них можно выделить наиболее распространенные: поверхностно-пластическое деформирование (ППД) [1 – 5], термоупрочнение [6 – 9]. Методы ППД хотя и отличаются в отличие от остальных методов упрочнения значительными величинами глубины упрочненного слоя (до 7 мм), однако, для деталей, особенностью эксплуатации которых является работа при повышенных тепловых нагрузках, существенным недостатком такого метода будет являться эффект релаксации, который ведет к снижению характеристик упрочненного слоя [10]. Методы термоупрочнения являются наиболее длительными процессами ввиду того, что фазовые превращения у чугунов с феррито-перлитной структурой являются продолжительными [11]. К методам термоупрочнения также относятся и способы поверхностной закалки технологическими методами. Некоторые методы поверхностной закалки, такие как плазменная закалка, закалка токами высокой частоты, применимы к чугунным деталям и позволяют упрочнить рабочие поверхности в зоне наибольшей эффективности методов, оптимальной глубиной от 0,1 до 2,1 мм. При этом твердость поверхности в результате закалки варьируется от 350 до 550 *HV* [12]. Лазерное упрочнение возможно проводить как без оплавления поверхности, так и с оплавлением. Возможность применения того или иного вида лазерного упрочнения также зависит от толщины детали. При лазерном упрочнении с оплавлением глубина зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) может достигать 1 – 2 мм. При упрочнении без оплавления оптимальная глубина ЗЛВ достигает 0,3 мм. Однако данный метод характеризуется большим количеством остаточного аустенита в зоне оплавления (30 – 50 %), микротвердость которого колеблется в пределах от 500 до 600 *HV*, а микротвердость остальной упрочненной зоны в зависимости от микроструктуры варьируется в пределах от 600 до 800 *HV* [13].

Исследование источников в области упрочнения чугунных деталей позволило сделать промежуточный вывод, что наиболее приемлемым методом упрочнения является метод лазерного термоупрочнения. Однако значительный разброс в количестве остаточного аустенита в зоне лазерного воздействия не позволяет определить область оптимальных параметров лазерной обработки для формирования необходимого качества рабочей поверхности. В работе [14] проведено исследование зависимости скорости нагрева лазерным излучением поверхности чугунной детали в результате которого было определено, что для формирования требуемого качества упрочняемой поверхности требуется оптимизация параметров режима лазерного упрочнения с учетом влияния остаточного аустенита на износостойкость поверхностного слоя.

Целью работы является определение влияния режимов технологического процесса лазерного термоупрочнения на количество остаточного аустенита в зоне лазерного воздействия при упрочнении деталей, выполненных из серого чугуна, так как в настоящее время отсутствует конкретная информация о влиянии комплекса факторов процесса лазерной обработки на структуру зоны лазерного воздействия чугунных деталей.

1. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исследовалась структура серого перлитного чугуна после лазерной обработки на режимах с оплавлением поверхности. Данное исследование дает возможность определить области оптимума для данного процесса.

Упрочнение проводилось на установке «Комета-2» при следующих технологических режимах: плотность полезной мощности [q] Вт/мм² – 140 – 190; скорость перемещения луча [v], мм/с – 10 – 40; диаметр лазерного луча [d], мм – 4 – 8.

Металлографическое исследование проводилось на микроскопе Leica DM4000 M при увеличениях от $\times 50$ до $\times 1000$ крат до травления и после травления в 4 % растворе азотной кислоты в спирте. Измерение твердости проводилось на микротвердомере МНТ-10 при нагрузке 150 Н и увеличении $\times 500$.

В качестве исходных образцов использовались образцы квадратного сечения с размерами: $10 \times 10 \times 42$ мм. Образцы выполнялись из различных видов серых перлитных чугунов. В общем случае материалы были разделены на 4 разновидности. Исследования исходной структуры чугуна по графиту и металлической основе выполнялись в соответствии с ГОСТ 3443-87.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования исходной структуры чугуна 1-го вида показали, что материал представляет серый чугун с равномерно распределенными включениями пластинчатого графита прямолинейной формы, длина отдельного включения 120 – 250 мкм, металлическая основа – перлит пластинчатый в количестве от 98 % с межпластинчатым расстоянием 0,3 – 0,8 мкм, фосфидная эвтектика тройная зернистого строения в виде разорванной сетки, диаметр ячеек сетки до 1000 мкм.

Чугун 2-го вида представляет собой серый чугун с неравномерно распределенными включениями пластинчатого графита прямолинейной формы, длина отдельного включения 120 – 250 мкм, металлическая основа – перлит пластинчатый и перлит зернистый в количестве до 85 % с межпластинчатым расстоянием 0,3 – 0,8 мкм, фосфидная эвтектика тройная зернистого строения, равномерного распределения.

Чугун 3-го вида представлен серым чугуном с неравномерно распределенными включениями пластинчатого графита прямолинейной формы, длина отдельного включения 120 – 250 мкм, металлическая основа – перлит пластинчатый в количестве от 98 % с межпластинчатым расстоянием 0,3 – 0,8 мкм, фосфидная эвтектика тройная зернистого строения и с пластинками цементита равномерного распределения.

4-й вид представляет серый чугун с равномерно распределенными включениями пластинчатого графита прямолинейной формы, длина отдельного включения 250 – 500 мкм, металлическая основа – перлит пластинчатый в количестве от 98 % с межпластинчатым расстоянием 0,3 – 0,8 мкм, площадь занятая цементитом ледебурита $5 - 15 \text{ мкм}^2$, площадь наибольшего включения цементита ледебурита $10000 - 16000 \text{ мкм}^2$.

Форма и распределение графита для всех видов чугунов представлена на рис. 1.

После определения исходной структуры образцы подвергались лазерному упрочнению. В результате лазерной обработки, в зависимости от значений параметров технологических режимов, в зоне лазерного воздействия присутствует зона оплавления.

Для определения характеристик зон лазерного воздействия при проведении данного этапа исследования был выполнен анализ, заключающийся в определении размеров зон лазерного воздействия. Результаты определения характеристик зон лазерного воздействия приведены в табл. 1

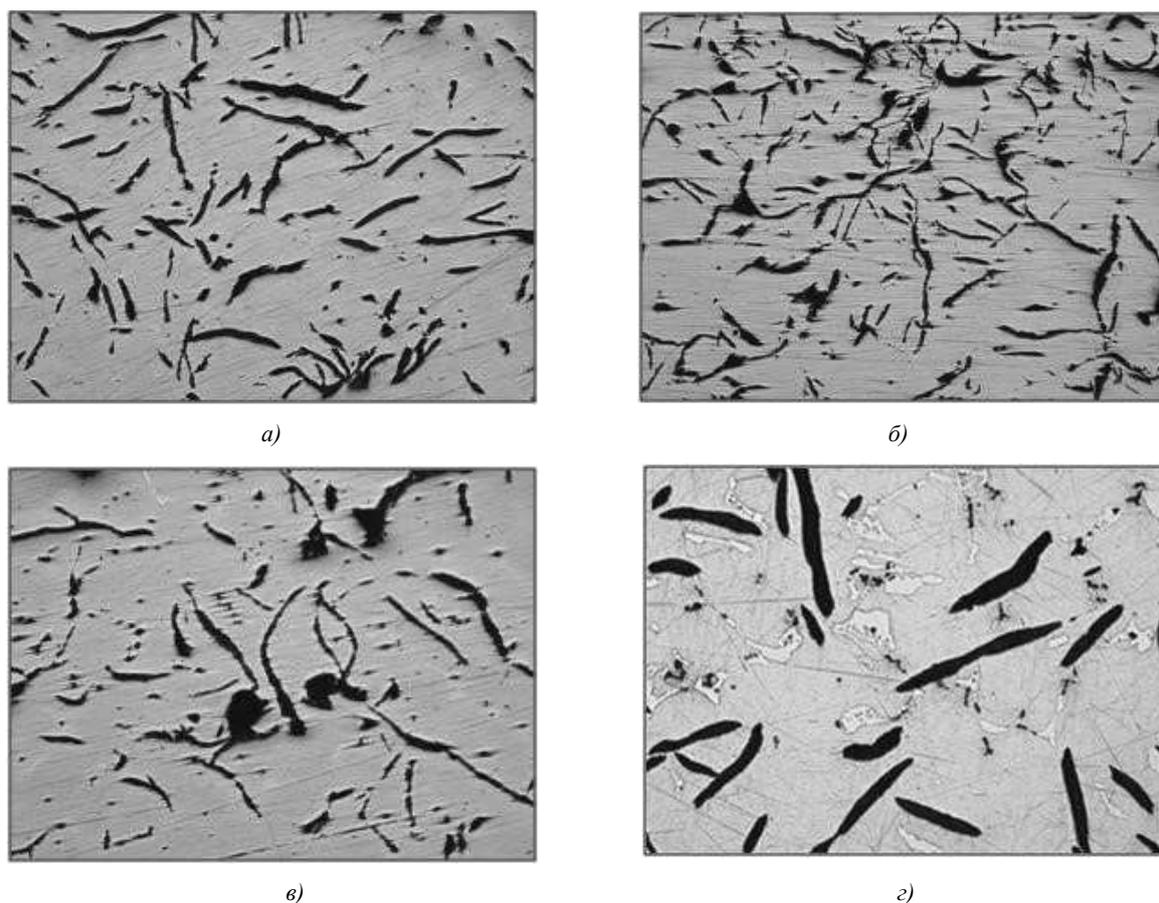


Рис. 1 Форма и распределение графита чугуна групп 1 – 4, $\times 100$:
 а) – вид 1; б) – вид 2; в) – вид 3; з) – вид 4

Таблица 1

Размеры зон лазерного воздействия, мкм

Тип чугуна	Глубина ЗЛВ	Глубина ЗО	Ширина ЗЛВ	Ширина ЗО
1	906,3	287,5	6387,5	5456,3
2	818,8	–	6375,0	–
3	768,8	243,8	6368,8	5387,5
4	868,8	–	6193,8	–

Условные обозначения: ЗЛВ – зона лазерного воздействия; ЗО – зона оплавления.

Выполнение количественного анализа может быть выполнено различными способами:

- точечным методом определения структуры состава сплава по объему (А.А. Глаголева) [14];
- методом соотношения площадей с использованием бесплатно распространяемой программы JMicroVision 1.2.7.

Точечный метод (А.А. Глаголева) основан на соотношении, согласно которому доля фазы на площади двумерной структуры (шлифа) численно равна доле числа случайных точек, попавших на эту фазу. Применение данного способа подробно описано в работе [14].

Определение количества остаточного аустенита с помощью программы JMicroVision 1.2.7 заключается в определении соотношения площадей на фотографии выделяемых микроструктур. Количество элементов определялось соотношением площадей включений перлита + мартенсит (серые пятна) к фону (ледебурит + мелкоячеистый аустенит). Для более точного результата

измерения проводились следующим образом: вычислялась площадь каждого включения в % отдельно, затем площади включений суммировались и вычитались из 100 % (за 100 % принята площадь фотографии). Полученная величина и была искомым количеством аустенита зоны оплавления. Исследовался упрочненный чугуны вида 1. В результате было определено, что структура перлит + мартенсит занимает 12,6 % (0,126) площади снимка. Аустенит остаточный, соответственно, составляет 87,4 % (0,874) площади снимка. Соответственно, количество остаточного аустенита в зоне лазерного воздействия будет составлять 87,4 % (0,874).

Использование данного метода значительно облегчает и ускоряет работу, так как не требуется вести подсчет узловых точек и меньше вероятность совершения ошибки. Следовательно, в дальнейшем для определения количества остаточного аустенита в зоне лазерного воздействия будет использоваться программа JMicroVision 1.2.7. В табл. 2 приведены результаты определения количества остаточного аустенита в ЗЛВ.

Таблица 2

Количество $A_{ост}$ в ЗЛВ

Тип чугуна	1	2	3	4
Количество $A_{ост}$	0,874	0,156	0,308	0,465

Следующим этапом исследования было проведение активного эксперимента с целью определения влияния режимов лазерной обработки на количество остаточного аустенита в зоне лазерного воздействия.

Каждый из факторов варьируется на двух уровнях. Интервалы варьирования факторов и их значения в натуральном масштабе на основном, верхнем и нижнем уровнях указаны в табл. 3.

Таблица 3

Факторы, уровни и интервалы варьирования

Фактор	Кодовое обозначение	Уровни факторов			Интервал варьирования
		+1	0	-1	
Плотность мощности q , Вт/мм ²	x_1	190	165	140	25
Скорость перемещения луча v , мм/с	x_2	40	25	10	15
Диаметр луча d , мм	x_3	4	6	8	2

Для получения более полной информации об изучаемой зависимости был использован полный факторный эксперимент 2^3 . Для этого, с целью минимизации проводимых опытов, была построена матрица планирования эксперимента для трех факторов (табл. 4) [15, 16].

В соответствии с выбранным планом было выполнено 8 опытов, порядок реализации опытов определялся по таблице случайных чисел [17]. Каждый опыт повторялся 2 раза.

Таблица 4

Матрица планирования проведения эксперимента 2^3

№ опыта	Матрица планирования						
	x_1, q	x_2, v	x_3, d	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$
1	+	+	+	+	+	+	-
2	-	+	+	-	-	+	+
3	+	-	+	-	+	-	+
4	-	-	+	+	-	-	-
5	+	+	-	+	-	-	+
6	-	+	-	-	+	-	-
7	+	-	-	-	-	+	-
8	-	-	-	+	+	+	+

Порядок реализации опытов и результаты экспериментов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты исследования

№ опыта	Порядок реализации	Результаты опытов			№ точки
		y_1	y_2	\bar{y}	
1	2	0,353	0,322	0,338	1
2	3	0,450	0,503	0,477	2
3	1	0,580	0,645	0,613	3
4	6	0,778	0,821	0,800	4
5	8	0,575	0,625	0,600	5
6	4	0,494	0,521	0,508	6
7	7	0,719	0,720	0,720	7
8	5	0,778	0,811	0,795	8

Ряд дисперсий по данным параллельных опытов считается однородным, так как выполнялась проверка по критерию Кохрена, выполнялось условие $G_{\text{табл}} = 0,6798 > G_{\text{расч}} = 0,298$. Адекватность модели проверялась по критерию Фишера: $F_{\text{табл}} = 3,84 > F_{\text{расч}} = 1,008$. Доверительный интервал равен 0,017. Коэффициенты регрессии $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ являются значимыми, так как их величина больше доверительного интервала. Величина коэффициента b_{123} менее доверительного интервала, поэтому он не имеет значимости.

В результате полного факторного эксперимента 2^3 для настоящего исследования было получено уравнение регрессии в кодированной форме:

$$y = 0,606 - 0,039x_1 - 0,125x_2 - 0,049x_3 + 0,027x_1x_2 - 0,043x_1x_3 - 0,024x_2x_3 \quad (3)$$

В результате перехода от кодированных значений к натуральным, используя формулы перехода:

$$x_1 = \frac{q-165}{25}; \quad x_2 = \frac{v-25}{15}; \quad x_3 = \frac{d-6}{2};$$

количество остаточного аустенита в зоне лазерного воздействия можно определить следующим образом:

$$A_{\text{ост}} = 0,546 + 0,0018q - 0,0155v + 0,1374d + 0,000072q - 0,00086qd - 0,0008vd. \quad (4)$$

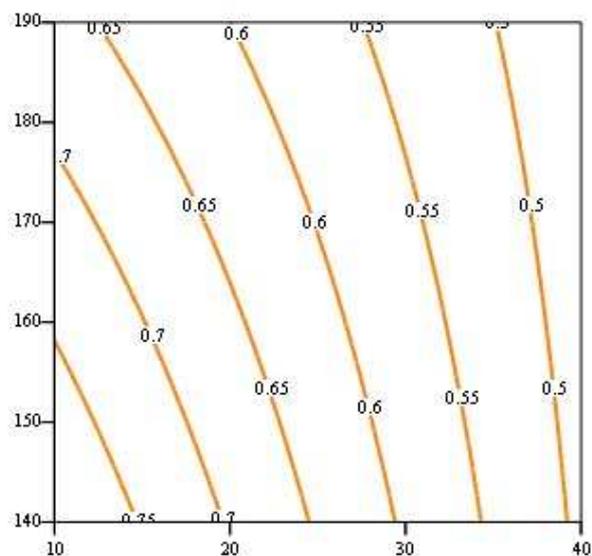


Рис. 2 Графическая зависимость $A_{\text{ост}}$ от параметров лазерного упрочнения (ось абсцисс v , ось ординат q)

ОБСУЖДЕНИЕ

При определенных режимах упрочнения в зоне лазерного воздействия формируется зона оплавления, характеризующаяся неоднородностью. Неоднородность зоны оплавления обусловлена кратковременностью лазерного воздействия, не позволяющего получать однородный по составу (прежде всего по углероду) жидкий раствор в расплавленном объеме. Этому способствует и неодновременное расплавление участков гетерогенной структуры. Графит обладает большой теплопроводностью, особенно в нагретом состоянии, кроме того, графит – практически абсолютно черное тело, что способствует поглощению лазерного излучения. Тепло легко проникает по пластинкам графита и вызывает расплавление металлической основы вокруг пластинок графита (эффект контактного плавления). Расплавление металлической основы эвтектоидного состава запаздывает, а кристаллизация ее начинается раньше. Главным фактором, определяющим конечную структуру этого слоя, является количество растворенного графита за время оплавления [18].

Отличительной особенностью строения ЗЛВ чугунов является неровная линия плавления между ЗО и ЗТВ, что обусловлено эффектом контактного плавления. Вследствие разных размеров графитных включений расплавленные объемы в разной степени насыщаются углеродом, что приводит к формированию различных структур после затвердевания: ледебурита, ледебурита с ячейками аустенита, мартенсита, мартенсита и остаточного аустенита.

При лазерной обработке поверхности серого чугуна с оплавлением поверхности в зоне термического влияния происходит: распад аустенита (металлической основы чугуна); превращения перлитографитной составляющей чугуна, связанные с эффектом контактного плавления или только растворения графита в аустените; подплавления в местах залегания фосфидной эвтектики.

Высокая скорость нагрева вызывает значительный перегрев, а высокая скорость охлаждения приводит к разной степени насыщения матрицы углеродом из включений графита. В результате нагрева этой зоны выше критической точки A_{c1} (температур порядка 1147 °С) перлитная основа превращается в аустенит, а потом происходит ее быстрое охлаждение. Степень переохлаждения аустенита определяет механизм и кинетику превращения, а, следовательно, и структуру продуктов превращения [19].

Насыщение расплава из полурасстворенной частицы графита при последующем охлаждении приводит к образованию области со структурой белого чугуна.

По мере удаления от включений графита происходит уменьшение микротвердости за счет уменьшения диффузии углерода в металлическую основу и уменьшения его содержания в кристаллической решетке мартенсита. В участках с температурой, меньшей эвтектической, происходит лишь диффузия углерода из графита в аустенит и образование после охлаждения двухслойных – мартенситной и аустенитной – оторочек, толщина которых уменьшается с увеличением глубины залегания графита вплоть до полного исчезновения.

Используя полученное выражение (4), возможно с достаточно высокой точностью определить ожидаемое количество $A_{ост}$ в зоне лазерного воздействия. На рис. 2 изображена графическая интерпретация зависимости $A_{ост}$ от технологических режимов лазерного упрочнения для рассматриваемых уровней и интервалов варьирования (табл. 2) при диаметре лазерного луча 6 мм.

В результате проведенного исследования было определено, что в зависимости от вида серого чугуна, а также от параметров процесса лазерного упрочнения варьируется и количество $A_{ост}$ в зоне лазерного воздействия. При этом, анализируя уравнение (4) можно заключить, что наибольшее влияние на формирование рассматриваемой структуры оказывает диаметр луча, меньшее – скорость перемещения луча и незначительное – плотность полезной мощности. Было установлено, что в области реальных режимов лазерного упрочнения серых чугунов при постоянном диаметре лазерного луча с увеличением скорости перемещения и увеличением плотности мощности количество остаточного аустенита уменьшается.

Также, путем планирования первого порядка в виде трехфакторного активного эксперимента была получена зависимость влияния технологических режимов лазерного упрочнения на количество остаточного аустенита в ЗЛВ (уравнение (4), рис. 2).

ВЫВОДЫ

В ходе исследования было определено, что ввиду технологических особенностей лазерного упрочнения в определенной области параметров в зоне лазерного воздействия формируется структура, представленная ледебуритной сеткой с включениями ячеек аустенита (в работе названа аустенит остаточный [$A_{ост}$]).

Путем проведения активного полного факторного эксперимента при равномерном дублировании опытов было проведено математическое планирование эксперимента. В результате планирования на основании априорной информации было получено уравнение (4), позволяющее определить планируемое количество остаточного аустенита в зоне лазерного воздействия в области определения режима лазерной обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиршович Н.Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках //Л: Машиностроение. – 1966. – 555 с.
2. Отений Я.Н., Ольштынский С.Н. Особенности формирования глубины упрочнения при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием //Известия Волгоградского государственного технического университета, 2007. – Т. 3, с. 79-82.
3. Жигалкин В.М., Усольцева О.М. Экспериментальное исследование деформации полухрупких материалов. Сообщение II: Упрочнение и разрыхление при сложном нагружении//Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2002. – № 6. – С. 39–46.
4. Ковальчук Б.И. О деформировании полухрупких тел//Проблемы прочности. – 1982. – № 9. – С. 51–57.
5. Лалазарова Н.А., Путятин Л.И., Шукин А.В. Упрочнение твердосплавных резцов для обработки деталей из высокопрочного чугуна методами поверхностного пластического деформирования // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. №33 – 2006.
6. Блинов И.С. Справочник технолога механо-сборочного цеха судоремонтного завода. – М. : Мор. транспорт, 1960. – 589 с.
7. Кулешов И.И., Ходаковский В.М. Повышение работоспособности поршневых канавок головок поршней судовых малооборотных двигателей// Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. – №6 (40). – с. 155 – 168.
8. Матвеев Ю.И., Казаков С.С. Формирование структур серого чугуна в зоне лазерного воздействия // Вестник НГИЭИ. №1 (2) том 2. – 2011. – 41 – 53 с.
9. Ходаковский В.М., Патенкова Е.П., Кулешов И.И. Исследование влияния режима лазерной обработки на глубину и структуру упрочненной зоны чугуновых деталей судовых ДВС//Вестник морского государственного университета. Сер. Судостроение и судоремонт. – Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2016. – Вып. 74/2016. – с. 28 – 36.
10. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 226 с.
11. Евсюков М.Ф., Демина Е.Г., Хулин А.Н., Лошкарев Д.В. Структурные превращения при отпуске в высокопрочных и серых чугуна // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровск.: ИЧМ НАН Украины, 2011. – Вып. 23, с. 267 –276.
12. Коротов В.А. Поверхностная плазменная закалка: М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2012. – 64 с.
13. Кулешов И.И., Ходаковский В.М. Повышение эффективности лазерного упрочнения чугуновых деталей судовых энергетических установок // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 4. – с.814 – 828.
14. Ходаковский В.М., Патенкова Е.П., Толмачев А.А., Рогулин А.Г. Влияние времени лазерного нагрева на количество остаточного аустенита в сером чугуне // Вестник морского государственного университета имени адм. Г.И. Невельского. – 2008, Вып. 25, с. 22 – 29.
15. Гмурман В.Е. Теория вероятности и математическая статистика: Учеб. Пособие для вузов – 9 изд., стер.– М.: Высш. школа, 2003. – 479 с.
16. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 278 с.
17. Патенкова Е.П. Основы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ: Методические указания. – Владивосток.: МГУ им. адм. Г. И. Невельского, 2012. – 65 с.

18. Крапошин В.С. Влияние остаточного аустенита на свойства сталей и чугунов после поверхностного оплавления // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1994, №2. – с. 2 – 5.
19. Арзамасов Б.И., Сидорин И.И., Косолапов Г.Ф. *Материаловедение*: – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.

REFERENCES

1. Girshovich N.G. (1966). *Kristallizatsiya i svoystva chuguna v otlivkah* [Crystallization and properties of cast iron in castings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 562 p.
2. Otenij Ya.P., Olshtynskij S.P. Osobennosti formirovaniya glubiny uprochneniya pri obrabotke detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Features of hardening intensity formation during details processing by surface plastic deformation]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Volgograd State Technical University]. 2007, № 3.
3. Zhigalkin V.M., Usol'tseva O.M. Eksperimental'noe issledovanie deformatsii poluhрупkih materialov. Soobshchenie II: Uprochnenie i razryhlenie pri slozhnom nagruzhennii [Experimental investigation into deformation of semi-brittle materials. Communication II: strengthening and loosening under complex loading]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Applied-physics issues of minerals mining]. 2002, № 6, pp. 39 – 46.
4. Kovalchuk B.I. O deformirovanii poluhрупkih tel [About deformation of semi-brittle objects]. *Problemy prochnosti* [Problems of strength]. 1982, № 9, pp. 51 – 57.
5. Lalazarova N.A., Putyatina L.I., Shchukin A.V. Uprochnenie tvrdo-splavnykh rezcov dlya obrabotki detalej iz vysokoprochnogo chuguna metodami poverhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya [Hardening by surface plastic deformation of hard-carbide tools for machining of high-strength cast-iron]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University]. 2006, № 33, pp. 109 – 111.
6. Blinov I.S. *Spravochnik tekhnologa mekhano-sborochnogo cekha sudoremontnogo zavoda* [Manual of technologist of shipyard machine-assembly department]. Moscow, Transport Publ., 1969.
7. Kuleshov I.I., Hodakovskij V.M. Povyshenie rabotosposobnosti porshnevnykh kanavok golovok porshnej sudovykh malooborotnykh dvigatelej [Improving the operability of the piston crowns' rings grooves of low speed propulsion marine diesel engine]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2016, № 6 (40), pp. 155 – 168.
8. Matveev Yu.I., Kazakov S.S. Formirovanie struktur serogo chuguna v zone lazernogo vozdejstviya [Formation of structures of grey pig-iron in the zone of laser influence]. *Vestnik NGIEHI* [Herald NGIEI]. 2011, vol. 2, № 1 (2), pp. 41 – 53.
9. Hodakovskij V.M., Patenkova E.P., Kuleshov I.I. Issledovanie vliyaniya rezhima lazernoy obrabotki na glubinu i strukturu uprochnyonnoy zony chugunnykh detalej sudovykh DVS [Investigation of laser treatment mode influence on intensity and structure of strengthened zone of iron details of ship internal-combustion engine]. *Vestnik morskogo gosudarstvennogo universiteta imeni adm. G.I. Nevel'skogo*. 2016, № 74, pp. 28 – 36.
10. Radchenko V.P., Saushkin M.N. Polzuchest' i relaksatsiya ostatochnykh napryazhenij v uprochnyonnykh konstruktsiyah [Creeping and locked-up stress relaxation in strengthened constructions]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005, 226 p.
11. Evsyukov M.F., Demina E.G., Hulin A.N., Loshkarev D.V. Strukturnye prevrashcheniya pri otpuske v vysokoprochnykh i serykh chugunah [Structural transformations during tempering in high-and gray cast iron]. *Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoy metallurgii* [Fundamental and applied issues in ferrous metallurgy]. 2011, № 23, pp. 267 – 276.
12. Korotkov V.A. Poverhnostnaya plazmennaya zakalka [Surface plasmatic tempering]. 2012, 64 p.
13. Kuleshov I.I., Khodakovskiy V.M. Povyshenie effektivnosti lazernogo uprochneniya chugunnykh detalej sudovykh ehnergeticheskikh ustanovok [Improvement efficiency of laser strengthening of iron details ship's power plants]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. adm. S.O. Makarova*. 2017, № 4 (44), pp. 814 – 828.
14. Hodakovskij V.M., Patenkova E.P., Tolmachyov A.A., Rogulin A.G. Vliyanie vremeni lazernogo nagreva na kolichestvo ostatochnogo austenita v serom chugune [Time effect of laser heating on amount of residual austenite in graphite iron]. *Vestnik morskogo gosudarstvennogo universiteta imeni adm. G.I. Nevel'skogo*. 2008, № 25, pp. 22 – 29.
15. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Higher school, 2003, 479 p.
16. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskij Yu.V. Planirovanie ehksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovij [Planning the experiment by searching optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 278 pp.
17. Patenkova E.P. *Osnovy nauchno-issledovatel'skikh i opytно-konstruktorskikh rabot* [Fundamentals of research and development works]. Vladivostok, Admiral Nevel'skoy Maritime State University, 2012, 65 p.
18. Kraposhin V.S. Vliyanie ostatochnogo austenita na svoystva stalej i chugunov posle poverhnostnogo oplavlenniya [Effect of retained austenite on the properties of steels and irons after surface melting]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and thermal treatment of metals]. 1994, № 2, pp. 2 – 5.
19. Arзамасов B.N., Sidorin I.I., Kosolapov G.F., Makarova V.I., Muhin G.G., Ryzhov N.M.,... & Ul'yanova N.V. *Materialovedenie. Uchebnik dlya vysshikh tekhnicheskikh uchebnykh zavedeny* [Materials science. Coursebook for higher school]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 384 p.

УДК 629.5.067

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ 3D-ПЕЧАТИ В СУДОВОМ МАШИНОСТРОЕНИИ НА ПРИМЕРЕ РЕМОНТА СИСТЕМЫ СУДОВОЙ ПОЖАРНОЙ АВТОМАТИКИ

А.В. Дектярев, Калининградский государственный технический университет (КГТУ), АО «ПСЗ «Янтарь», Калининград, nwasanches@mail.ru

П.Р. Гришин, КГТУ, Калининград, pchel2000@gmail.com

А.В. Пчелинцев, АО «ПСЗ «Янтарь», Калининград, alex_pch_89@mail.ru

В.Н. Морозов, канд. техн. наук, доцент, КГТУ, Калининград, mvn3613@gmail.com

Целью данной статьи является рассмотрение опыта ремонта системы судовой пожарной автоматики на примере извещателя пожарного комбинированного «Барк-М» на строящемся заказе на АО «ПСЗ «Янтарь» при помощи аддитивных технологий. Для этого были сформулированы и проработаны задачи по определению параметров ремонта прибора, технологическому процессу печати ремонтируемой детали, а также технико-экономическому обоснованию ремонта изделия при помощи 3D-печати. Приведена краткая характеристика и частота поломок данного прибора, а также его общий функционал надежности и ремонтпригодности. Более того, наглядно показан процесс ремонта – подготовка акта дефектации, разработка 2D-чертежа, построение 3D-модели, подбор необходимого материала и процесс печати изделия. Даны краткие характеристики ремонтируемого прибора, используемого 3D-принтера, а также материалов 3D-печатного производства, применяемых в данной работе, с указанием их достоинств, недостатков и стоимостных характеристик. Рассчитаны и обоснованы технико-экономические параметры, например, средняя рыночная стоимость ремонтируемого прибора, материальная себестоимость изготовленного ремонтируемого изделия на основе стоимости расходных материалов, временные затраты изготовления объектов при их 50 %-ти и 100 %-ом заполнении структуры материала. В заключении даются выводы по проделанной работе и краткие рекомендации по возможностям последующего применения 3D-печатного производства на судостроительных и судоремонтных предприятиях.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивные технологии, 3D-принтер, судостроение, судоремонт, судовое машиностроение, судовые системы, система пожарной безопасности, пожарный извещатель, защитный колпачок

APPLICATION OF 3D-PRINTING IN MARINE ENGINEERING AS EXEMPLIFIED BY SHIP FIRE AUTOMATICS SYSTEM REPAIR

A.V. Dektyarev, Kaliningrad State Technical University (KSTU), Yantar Baltic Shipbuilding Plant, Kaliningrad, nwasanches@mail.ru

P.R. Grishin, KSTU, pchel2000@gmail.com

A.V. Pchelintsev, Yantar Baltic Shipbuilding Plant, Kaliningrad, alex_pch_89@mail.ru

V.N. Morozov, PhD, associate professor, KSTU, Kaliningrad, mvn3613@gmail.com

The purpose of this article is to review the experience of repairing the ship fire automatic system using the example of a combined fire detector "Bark-M" on the ship under construction at the Yantar Baltic Shipbuilding Plant by the application of additive technologies. For this purpose, task was performed to determine the repair parameters, the technological process was developed for printing of the repaired part, as well as the feasibility study of repairing the product with the help of 3D-printing. The article gives a brief description and the number of breakdowns of the device, as well as its general functionality, reliability and maintainability, graphically showing the repair process, consisting of the fault detection report preparation, the development of a 2D-pattern, construction of a 3D-model, selection of the necessary material and the process of printing the product. Additionally, the paper gives brief characteristics of the repaired device and 3D-printer, as well as 3D-printing materials used in this study describing their advantages, disadvantages and cost characteristics. Technical and economic parameters are calculated and substantiated, for instance, the average market value of the repaired device, the material cost of the manufactured repaired product based on the cost of working materials, time required to produce objects at their 50 % and 100 % filling of the material structure. Finally, the article summarizes the work done, giving brief recommendations on the possibilities for the subsequent use of 3D-printing in shipbuilding and ship repair.

Keywords: 3D-printing, additive manufacturing, 3D-printer, shipbuilding, ship repairing, ship engineering, ship systems, fire safety system, fire detector, protective cap

ВВЕДЕНИЕ

Современное морское судно представляет собой сложную инженерную систему, состоящую из множества подсистем. Такие судовые подсистемы, образующие в своей совокупности единый рабочий организм, обеспечивают на судах важные мероприятия, например, по борьбе за непотопляемость, поддержанию условий обитаемости, подачи пресной и забортной воды и ее удалении с судна, противопожарной безопасности [1] и др.

Относительно последнего фактора, стоит отметить, что пожары на судне необходимо предупреждать и не допускать, однако если этого сделать не удалось, нужно принять все возможные меры по противодействию его усилению и распространению, а также ликвидации возгорания в кратчайшие сроки.

Системы судовой пожарной автоматики являются одними из самых важных средств предупреждения пожаров на судах в виду возможности автоматического включения средств пожаротушения, контроля теплового режима судовых помещений, наличия охранной и пожарной сигнализации и т.д.

Вместе с тем, ремонт объектов морской техники при помощи аддитивных технологий является практически не исследованной тематикой, хотя возможностям применения 3D-принтеров в судостроении посвящено немало трудов [2 – 5], носящих как обзорный, так и прикладной характер.

Целью данной статьи является рассмотрение цикла ремонта изделия судового машиностроения на примере системы судовой пожарной автоматики при помощи аддитивных технологий.

Исследование направлено на решение следующих вопросов:

- определение проблемных параметров ремонта;
- составление технологической последовательности ремонта изделия при 3D-печатном производстве;
- расчет и обоснование технико-экономических характеристик проведенного ремонта.

Следовательно, данная статья актуальна и востребована в современном судостроительном производстве.

1. ИЗВЕЩАТЕЛЬ ПОЖАРНЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ «БАРК М» КАК ПРИМЕР СУДОВОЙ СИСТЕМЫ ПОЖАРНОЙ АВТОМАТИКИ

Одним из примеров систем судовой пожарной автоматики является извещатель пожарный комбинированный ИП212/101 – «Барк М». Работа таких систем основывается на преобразовании величины удельной оптической плотности задымленной среды в диапазоне чувствительности от 0,05 до 0,2 дБ/м с дискретностью преобразования не более 0,02 дБ/м и временем преобразования не более 1 с в цифровой код, т.е. извещатель преобразовывает в цифровой код воздействие температуры окружающей среды в пределах своего класса с дискретностью преобразования 1 °С и временем преобразования не более 1,0 с. Инерционность срабатывания извещателя при воздействии задымленного потока воздуха с удельной оптической плотностью $(0,2 \pm 0,04)$ дБ/м и скоростью $(0,2 \pm 0,04)$ м/с составляет не более 5 с. Значения температуры срабатывания извещателя находятся в пределах классов А1, А2, А3, В по НПБ 85 2000 [6]. Прочие технические характеристики прибора представлены в табл. 1. Сам прибор представлен на рис. 1.

Таблица 1

Технические характеристики комбинированного пожарного извещателя ИП212/101 «Барк М»

Наименование	Значение
Напряжение питания приемно-контрольного и охранно-пожарного прибора «Гамма-01», в шлейф которого включается извещатель	24 ± 4 В
Ток, потребляемый извещателями (не более):	0,15 мА
• в дежурном режиме	10 мА
• в режиме срабатывания	
Оптическая индикация красного цвета:	
• в дежурном режиме	• короткие световые импульсы (0,2 с) и длительные паузы (до 1 мин)
• в режиме обмена информацией	• короткие световые импульсы (0,2 с) с паузой 0,8 с
• в режиме срабатывания	• длительные световые импульсы (0,8 с) и короткие паузы (0,2 с)
Степень жесткости по устойчивости к воздействию электромагнитных полей, наносекундных электрических импульсов и электростатических разрядов по НПБ 57-97	Вторая
Степень защиты извещателя, обеспечиваемая оболочкой, по ГОСТ 14254	IP44
Вид климатического исполнения, по ГОСТ 15150	ОМЗ
Максимальное количество извещателей в одном шлейфе	63 шт.
Габаритные размеры извещателя (не более)	145 × 100 × 130 мм
Масса извещателя (не более)	0,75 кг

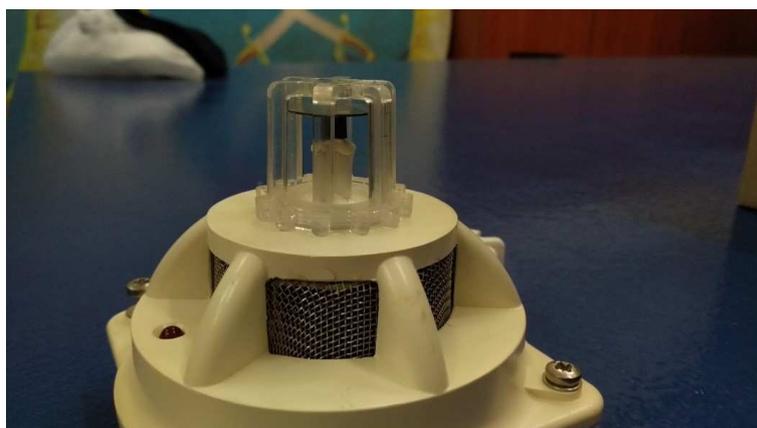


Рис. 1 Прибор с защитным колпачком

Извещатели типа «Барк-М» обладают повышенной влагостойкостью и имеют герметичные вводы для кабелей, что позволяет использовать их на речных и морских судах, а также на промышленных объектах. Такие извещатели установлены, например, на проекте 11356 «Адмирал Макаров» (рис. 2) – сторожевом корабле, третьем фрегате проекта 11356, с водоизмещением 3620 т и габаритами $L \times B \times T$ – 124,8 × 15,2 × 4,2 м [7]. На данный момент происходит установка подобных извещателей на большом десантном корабле второй серии проекта 11711 «Петр Моргунов» с водоизмещением 5000 т и габаритами $L \times B \times T$ – 120 × 16,5 × 3,6 м [8].

Однако при монтаже приборов возникают трудности с установкой мелких деталей и узлов в виду их чрезвычайной хрупкости. В рассматриваемом в статье случае проблемы возникли с защитным колпачком под температурный датчик системы пожаротушения (см. рис. 1 – верхняя



Рис. 2 Сторожевой корабль «Адмирал Макаров»

прозрачная деталь). При установке колпачка, а также при его транспортировке, из-за хрупкости используемого материала довольно часто происходят повреждения. В розничной и оптовой продаже подобные колпачки не продаются и поставляются только в комплекте с прибором, следовательно, при его поломке приходится демонтировать прибор целиком. По статистике, на одну систему приходится по 5-6 поломок защитных колпачков. Стоимость самого прибора, по средней рыночной цене, составляет около 4000 руб.

2. ПРОЦЕСС РЕМОНТА ИЗДЕЛИЯ ПРИ ПОМОЩИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Учитывая вышеуказанное, была осуществлена замена самого колпачка методами аддитивных технологий, т.е. трехмерным прототипированием. Учитывая проблемы сертификации аддитивных технологий в РФ [9], где в настоящий момент технология и материалы не сертифицированы, и руководствуясь документом [10], можно утверждать, что для данных ремонтных работ по замене защитного колпачка обязательная сертификация не требуется.

На начальном этапе был подготовлен акт дефектации прибора и после этого разработаны 2D-чертеж колпачка (рис. 3) и его 3D-модель в ПО Autodesk AutoCAD (рис. 4). Подготовка к 3D-печати (подбор параметров, нарезка на слои) производилась в ПО Ultimaker Cura. На рис. 5 показано сечение защитного колпачка по его 3D-модели, наглядно демонстрирующее его сложную геометрическую форму.

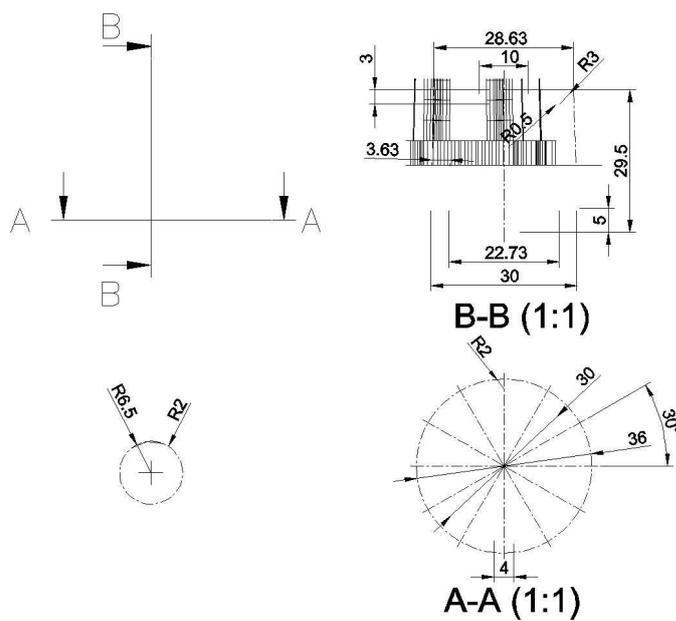


Рис. 3 2D-чертеж защитного колпачка под датчик температурный системы пожаротушения

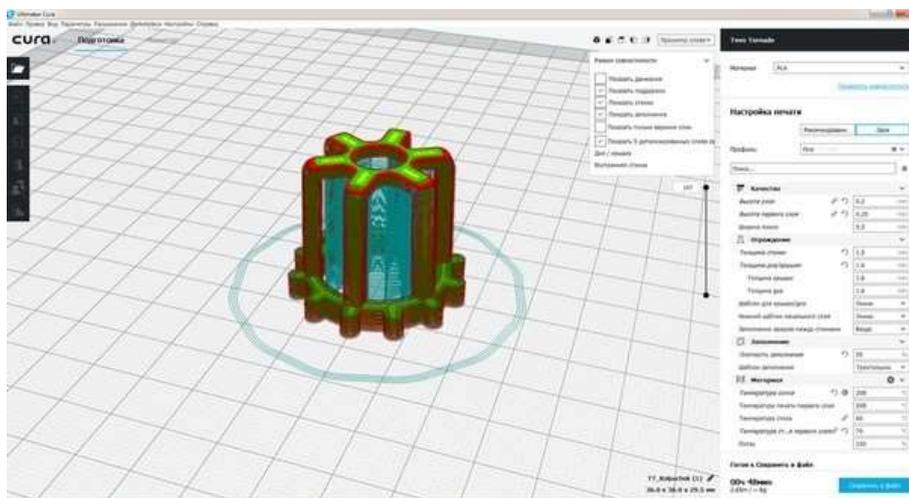


Рис. 4 3D-модель защитного колпачка

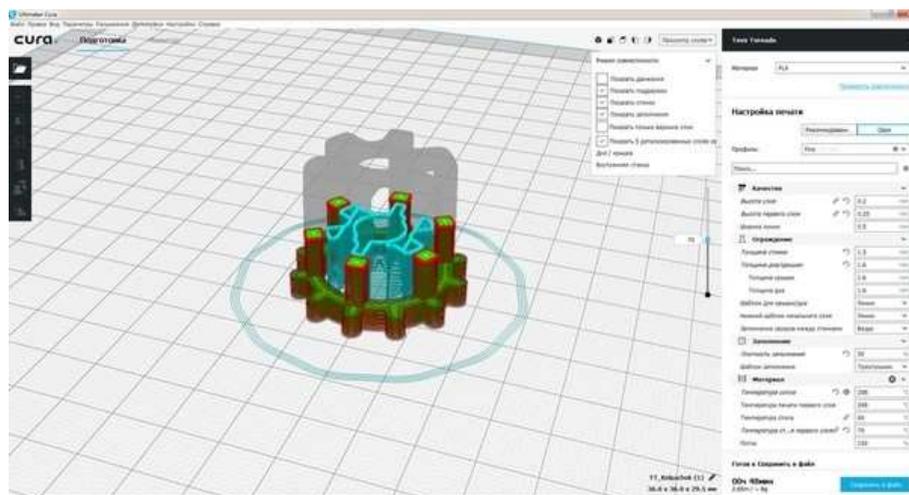


Рис. 5 Сечение по 3D-модели защитного колпачка

Печать была осуществлена на 3D-принтере модели «Tevo Tornado». Характеристики принтера показаны в табл. 2. Были распечатаны 2 защитных колпачка из SBS- и PLA-пластиков.

Таблица 2

Основные характеристики 3D-принтера Tevo Tornado

Характеристика	Значение
Разрешение слоя, мкм	100
Область печати, мм	300 × 300 × 400
Максимальная скорость печати, мм/сек	150
Температура печати, °C	250
Температура стола, °C	130

SBS-пластик представляет собой термопластичный сополимер на базе стирол-бутадиена. Обладает такими преимуществами, как прочность, пластичность, стойкость к высоким температурам и водной среде, малой усадкой, минимальным уровнем влагопоглощения, а также такими недостатками, как прозрачность (93 % светопропускания) и малый модуль упругости. Поставляется в виде катушки с нитью. Средняя рыночная стоимость за 1 кг составляет около 1500 руб.

PLA-пластик представляет собой термопластичный полиэфир, который производится из отходов различных возобновляемых биомасс. К преимуществам можно отнести возможность получения более детальных и полностью готовых объектов, наличие гладкой поверхности у деталей, малые энергозатраты из-за низкой температуры размягчения нити, нетоксичность. Недостатки: высокая цена производства сырья и недолговечность моделей в виду их разложения в естественной среде (исправляется путем нанесения лакового покрытия) [11]. Поставляется также в виде катушки с нитью. Средняя рыночная стоимость за 0,75 кг составляет около 1600 руб.

В результате было напечатано 2 образца защитных колпачков. Образец из SBS-пластика, сразу после завершения печати, представлен на рис. 6, аналогично, образец из PLA-пластика – на рис. 7.



Рис. 6 Защитный колпачок из SBS-пластика



Рис. 7 Защитный колпачок из PLA-пластика

3. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕМОНТА ПРИБОРА ПРИ ПОМОЩИ 3D-ПЕЧАТИ

Печать одного образца заняла около 40 мин при 50 %-ом заполнении структуры материала. При 100 %-ом заполнении печать осуществлялась бы около 60 мин.

На каждый колпачок было потрачено по 10 г материала, что составляет около 2,5 м пластиковой нити. При 100 %-ом заполнении потребовалось бы 15 г материала на каждый колпачок, что составляет около 4 м нити.

Расчет себестоимости образца (не включая затраты на электроэнергию и износ комплектующих), исходя из количества затрачиваемого материала, оцененная в отношении стоимости полной катушки, показал, что себестоимость защитного колпачка, при 50 %-ом заполнении структуры материала, из SBS пластика составляет около 15 руб, а из PLA-пластика –

около 20 руб. При 100 %-ом заполнении – стоимость вырастет и составит 23 и 32 руб для образцов из SBS- и PLA-пластиков соответственно.

На данный момент планируется установка подобных защитных колпачков на приборах «Барк-М» на строящемся корабле «Петр Моргунов» (рис. 8).

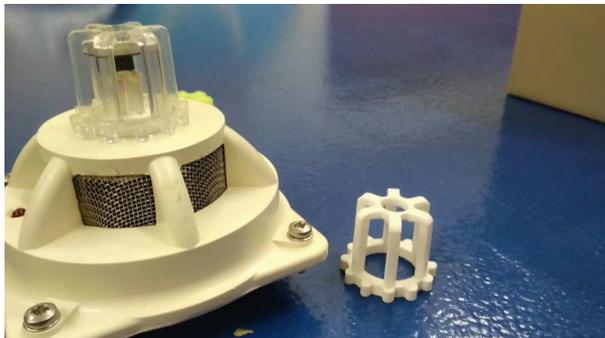


Рис. 8 Защитный колпачок из PLA-пластика перед установкой (позади – колпачок из SBS-пластика)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последующее использование 3D-принтеров небольших габаритов, как в приведенном исследовании, при ремонтных работах возможно при замене небольших по размеру комплектующих (защитные колпачки, шестерни, пресс-формы, воздухопроводы, лопатки и т.д.). Также, их применение возможно при изготовлении моделей для визуализации процессов (например, мастер-модели, гидродинамические модели, учебно-тренировочные средства и т.д.). Однако, до тех пор, пока не появится нормативная база сертификации материалов и изделий, актуальных для аддитивного производства в судостроительной отрасли, их применение возможно только для продукции, для которой законодательством РФ не предусмотрены процедуры по обязательной сертификации.

Экономическая выгода при описанном ремонте довольно значительна и при приобретении предприятием хотя бы одной подобной модели 3D-принтера, руководствуясь его средней рыночной ценой в 35000 руб, позволит окупить затраты на его покупку уже после 9-ой печати защитного колпачка системы судовой пожарной автоматики, что, учитывая среднее количество их поломок на систему, является вполне реальным.

Технологический процесс ремонта при помощи аддитивных технологий можно структурировать следующим образом:

- выполнение дефектации объекта и подготовка соответствующего акта, разработка 2D-чертежа ремонтируемой детали;
- построение 3D-модели, топологическая оптимизация (при необходимости), слайсинг (разделение на слои) под 3D-печать;
- подбор необходимого материала;
- печать изделия и его постобработка (при необходимости);
- проведение структурного анализа, проверка на конструктивность.

В результате изготовление защитного колпачка методами 3D-печати позволило существенно снизить затраты на ремонт изделия вследствие закупки новых приборов, сократить временные издержки на их поставку, а также повысить степень ремонтпригодности как данного объекта, так и многих других изделий судового машиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чайников К.Н. Общее устройство судна. Л: Судостроение, 1971. – 208 с.
2. Strickland Jason D. Application of additive manufacturing in the Marine Industry, Proceeding of PRADS 2016, p.5, 4th – 6th September 2016.
3. Jha S.K., Emerging technologies: Impact on shipbuilding, Maritime Affairs: Journal of the National Maritime Foundation of India, vol. 12, issue 2, pp. 78-88, October 2016.
4. Мальцев М.И., Рубан А.Р. 3D взгляд на современное судостроение. Сборник статей XX Международной научно-практической конференции. М: 2017. с. 22-26.
5. Киселева А.Е. Применение аддитивных технологий при решении конструкторских задач в судостроении. Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. СПб: 2017. №48-49. с.84-88.
6. Извещатели //НПО пожарная автоматика сервис [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.npo-pas.com/index.php/production/gamma01/gamma-01-sap/13-produktsiya/ip>
7. Адмирал Макаров (сторожевой корабль) //Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Адмирал_Макаров_\(сторожевой_корабль\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Адмирал_Макаров_(сторожевой_корабль))
8. Петр Моргунов (большой десантный корабль) // Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Пётр_Моргунов_\(большой_десантный_корабль\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Пётр_Моргунов_(большой_десантный_корабль))
9. Дектярев А.В., Морозов В.Н. Технико-экономическое обоснование внедрения аддитивных технологий в отечественную судостроительную промышленность. Гипотеза. СПб: 2018. №3 (4). с. 15-24.
10. Постановление Правительства РФ от 01.12.2009 №982 (ред. от 21.02.2018) «Об утверждении единого перечня продукции, подлежащей обязательной сертификации, и единого перечня продукции, подтверждение соответствия которой осуществляется в форме принятия декларации о соответствии» (с изм. и доп., вступ. в силу с 27.12.2018). 4371 «Приборы и аппаратура для систем автоматического пожаротушения и пожарной сигнализации» (исключен – Постановление Правительства РФ от 04.03.2013 № 182).
11. Дектярев А.В., Морозов В.Н. Аналитика и обзор применимости материалов 3D-печати для судостроительного производства. Вестник Молодежной науки. Калининград: 2018. №4 (16).

REFERENCES

1. Chajnikov K.N. Obschnee ustrojstvo sudna. [General ship structure] L: Sudostroenie, 1971. 208 pp.
2. Strickland J.D. Application of additive manufacturing in the marine industry, Proceeding of PRADS 2016, p. 5, 4th – 6th September 2016.
3. Jha S.K., Emerging technologies: Impact on shipbuilding, Maritime Affairs: Journal of the National Maritime Foundation of India, vol. 12, issue 2, pp. 78 – 88, October 2016.
4. Maltsev M.I., Ruban A.R. 3D vzglyad na sovremennoe sudostroenie. [A 3D approach to modern shipbuilding] Collection of articles of the 20th International scientific and practical conference M: 2017. pp. 22 – 26.
5. Kiseleva A.E. Primenenie additivnyh tekhnologij pri reshenii konstruktorskih zadach v sudostroenii. [Application of additive technologies in solving shipbuilding design problems] Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. SPb: 2017. No 48 – 49, pp. 84 – 88.
6. Izveshchatei. NPO pozharaya avtomatika servis [Signalling device. NPO fire automatics service. Electronic source]. Accessed at: <http://www.npo-pas.com/index.php/production/gamma01/gamma-01-sap/13-produktsiya/ip>
7. Admiral Makarov (storozhevoj korabl'). [Russian frigate Admiral Makarov Wikipedia [Electronic source]. Accessed at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Адмирал_Макаров_\(сторожевой_корабль\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Адмирал_Макаров_(сторожевой_корабль))
8. Petr Morgunov (bolshoj desantnyj korabl). [Landing ship Petr Morgunov] Wikipedia [Electronic source]. Accessed at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Пётр_Моргунов_\(большой_десантный_корабль\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Пётр_Моргунов_(большой_десантный_корабль))
9. Dektyarev A.V., Morozov V.N. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie vnedreniya additivnyh tekhnologij v otechestvennyu sudostroitelnyu promyshlennost. [Technical and economic justification of additive technologies application in Russian shipbuilding] Gipoteza. SPb: 2018. № 3 (4), pp.15 – 24.
10. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 01.12.2009 № 982 (red. ot 21.02.2018) «Ob utverzhdenii edinogo perechnya produkcii, podlezhashchej obyazatelnoj sertifikacii, i edinogo perechnya produkcii, podtverzhdenie sootvetstviya kotoroj osushchestvlyetsya v forme prinyatiya deklaracii o sootvetstvii» (s izm. idop., vstup. v silu s 27.12.2018). 4371 «Pribory i apparatura dlya sistem avtomaticheskogo pozharotusheniya i pozharnoj signalizacii» (isklyuchen – Postanovlenie Pravitelstva RF ot 04.03.2013 № 182). [Decree of RF Government from 01.12.2009 No 982 9 rev. on 21.02.2018) "On confirmation of a unified list of products whose compliance is performed by accepting the declaration of compliance (with amendments coming into force on 27.12.2018)" 4371 "Appliances and equipment for automatic fire extinguishing and alarm systems" (withdrawn – the RF Government Decree from 04.03.2013 No 182)].
11. Dektyarev A.V., Morozov V.N. Analitika i obzor primenyaemosti materialov 3D pechati dlya sudostroitel'nogo proizvodstva. [Analysis and review of the application of 3D-printing materials for shipbuilding]. Vestnik Molodezhnoj nauki. Kaliningrad, 2018. № 4 (16).



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 621.436.24

СУДОВЫЕ ДИЗЕЛИ С ЗАМКНУТЫМ ГАЗОВЫХЛОПОМ И АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА

А.Ф. Дорохов, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», Астрахань, e-mail: dorokhovaf@rambler.ru

С.А. Каргин, канд. техн. наук, доцент, «Каспийский институт морского и речного транспорта» филиал ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», Астрахань, e-mail: serjxxx@inbox.ru

Все более значительным становится уровень загрязнения среды обитания человека отработавшими продуктами сгорания. Постоянно ужесточающиеся экологические требования вынуждают двигателестроителей стремиться к повышению эффективности двигателей и к обеспечению их экологической безопасности. Предложена схема судовой энергетической установки с замкнутой системой газовыхлопа. При осуществлении цикла с замкнутой системой газовыхлопа отработавшие газы дизеля охлаждаются, путем конденсации удаляют из них водяной пар, фильтруют от твердых частиц, подмешивают к ним кислород из атмосферного воздуха, подогревают полученную искусственную газовую смесь и направляют на впуск дизеля. Кислород из атмосферного воздуха выделяется с помощью молекулярного сита. С целью увеличения степени использования тепловой энергии рабочего тела предложено осуществлять впрыск воды в отработавшие газы в конце процесса сгорания. Образующийся водяной пар снизит температуру в цилиндре и возможно повысит давление. Расширение будет происходить до более низкой температуры. При этом снижение температуры в цилиндре не должно ухудшить показателей процесса расширения, так как введение дополнительного рабочего тела должно привести к тому, что внутренняя энергия продуктов сгорания перейдет в потенциальную энергию водяного пара, который увеличит работу процесса расширения. Количество вводимой воды должно быть подобрано таким образом, чтобы к концу процесса расширения пар в цилиндре оставался перегретым, а температура в конце процесса расширения была ниже, чем в цикле Тринклера. В связи с тем, что снизится средняя температура цикла, появляются предпосылки к адиабатизации цилиндра. Предложенные мероприятия позволят снизить выброс окислов азота и несгоревших углеводородов в выхлопе судовых, стационарных и транспортных двигателей и повысить их энергетическую эффективность и экологическую безопасность.

Ключевые слова: замкнутый газовыхлоп, энергетическая эффективность, экологическая безопасность, выброс окислов азота, термодинамический цикл, рабочий процесс, искусственная газовая смесь.

MARINE DIESELS WITH CLOSED GAS EXHAUST AND THERMODYNAMIC CYCLE ANALYSIS

A.F. Dorokhov, DSc, professor, Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Astrakhan State Technical University", Astrakhan, e-mail: dorokhovaf@rambler.ru

S.A. Kargin, Caspian Institute of Sea and River Transport, Branch of the Volga State University of Water Transport, Astrakhan, e-mail: serjxxx@inbox.ru

With the environmental pollution by exhaust products of combustion becoming more and more significant, ever-increasing environmental requirements are forcing engine manufacturers to strive to improve the efficiency of engines and to ensure their environmental safety. The article presents the scheme of the ship power plant with the closed gas-flop system. While implementing the closed system, diesel engine exhaust gases are cooled, water vapor is removed by condensation, filtered from solid particles and mixed with oxygen from the air. The resulting artificial gas mixture is then heated and sent to the diesel inlet. Oxygen from the atmospheric air is released by a molecular sieve. In order to increase the degree of working fluid thermal energy use, it is proposed to inject water into the exhaust gases at the end of the combustion process. The resulting water vapor will reduce the temperature in the cylinder and possibly increase the pressure. Expansion will occur to a lower temperature. At the same time, the temperature decrease in the cylinder should not worsen the expansion process parameters, as the introduction of an additional working fluid should result in the internal energy of the combustion products transforming into the potential energy of water vapor, which will increase the expansion process. The amount of water to be injected shall be such as to keep the steam in the cylinder at the end of the expansion process overheated, and the temperature at the end of the expansion process lower than that in the Trinkler cycle. As the average temperature of the cycle decreases, there are prerequisites to influence the cylinder adiabatically. The proposed measures will reduce the emission of nitrogen oxides and unburned hydrocarbons in the exhaust of marine, stationary and transport engines and improve their energy efficiency and environmental safety.

Keywords: a closed gas exhaust system, energy efficiency, environmental safety, emission of nitrogen oxides, thermodynamic cycle, working process, artificial gas mixture.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность современных поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) достигается мероприятиями (наддув, новые материалы, топлива и смазки, электронное управление и т.п.), неприципиальными с точки зрения лежащих в основе их работы термодинамических процессов. На большинстве видов судов в качестве энергетических установок (ЭУ) будут доминировать поршневые ДВС, преимущественно дизели [1]. В обозримой и среднесрочной перспективе это неоспоримый факт, о чем свидетельствуют все современные тенденции развития СЭУ коммерческого флота. Это требует дальнейшего повышения энергетической эффективности и экологической безопасности судовых, стационарных и транспортных двигателей, что является целью данного исследования.

ДИЗЕЛИ С ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМОЙ ГАЗОВЫХЛОПА

Сложной проблемой дизелей являются выбросы сажи, происходящие при работе дизеля с переменной нагрузкой, что характерно для судов, например, при движении в узостях (проливы, шлюзы и пр.), то есть вблизи берега, где накладываются жесткие ограничения на токсичность отработавших газов (ОГ). Подобные режимы часты и у маневровых судов (портовые буксиры, ледоколы и т.п.).

В автотракторных ЭУ проблема частично решена фильтрами твердых частиц. При заполнении фильтра собранная сажа выжигается. Это достигается повышением температуры ОГ: производятся дополнительные впрыски топлива в конце сгорания, чтобы увеличить догорание, и впрыск топлива форсункой, установленной в выпускном тракте. Кроме увеличения противодавления на выпуске,

удорожания и усложнения конструкции ЭУ, требуются специальные дорогостоящие малозольные сорта масла. Фильтр выдерживает ограниченное число процедур выжигания сажи. Само выжигание не является экологически чистым, так как наблюдается сильное дымление и двигатель работает в нештатном режиме. В автотракторных ЭУ часты режимы неполной нагрузки и запущенное выжигание не влечет возможных аварийных ситуаций из-за ограничения выходной мощности. В условиях судовой ЭУ возможное ограничение мощности может привести к снижению живучести судна, поэтому на данный способ в судовых условиях накладывается множество ограничений.

Выбросы серы в автотракторных ЭУ уменьшаются посредством строгих требований к низкому содержанию серы в топливе, что значительно удорожает его. В судовых условиях в связи с большими расходами топлива экономически оправдано использование более дешевых высокосернистых топлив. Очистка ОГ от продуктов окисления серы при этом производится при помощи скрубберов, например, DUPONT MARINE SCRUBBER [2, 3], также очищающих ОГ от сажи. Даже при применении скрубберов предусматривается установка между дизелем и скруббером систем SCR (селективной каталитической редуции) – аналогов каталитических нейтрализаторов автотракторных ЭУ.

Это вызвано другой серьезной по современным экологическим меркам проблемой дизелей – эмиссией окислов азота (NO_x). Несмотря на то, что в дизелях максимальная температура сгорания ниже, чем в ДВС с принудительным воспламенением, содержание кислорода в ОГ дизеля выше, то есть имеется окислительная среда. Это затрудняет применение восстановительных нейтрализаторов для нейтрализации NO_x .

В автотракторных дизельных ЭУ это приводит к необходимости впрыска мочевины в ОГ. Образующийся при этом аммиак нейтрализует NO_x . Остатки аммиака нейтрализуются при этом еще одним нейтрализатором – необходимо дополнительное оборудование и запас мочевины на борту.

То есть, несмотря на то, что дизели образуют меньше NO_x в сравнении с ДВС с принудительным воспламенением, борьба с их выбросами сопряжена с большими техническими трудностями.

Несмотря на то, что значительная часть ДВС, работающих на жидком топливе и установленных на судах, которые совершают рейсы в страны, подписавшие Приложение VI к МАРПОЛ, может выполнять существующие в настоящее время требования к выбросам окислов азота без применения систем каталитической очистки, необходимы работы по снижению выброса окислов азота, так как ужесточение норм по токсичности неизбежно. Широко известна ситуация с дизельными двигателями концерна Фольксваген (Volkswagen), когда из-за повышенного уровня токсичных составляющих в отработавших газах и попытки скрыть этот факт концерн понес большие репутационные и финансовые издержки. Эта ситуация способствовала развитию со стороны экологозащитных организаций и общественности негативного отношения к использованию дизельных двигателей, в том числе на судах.

Поэтому для судовых условий вызывают интерес ЭУ с замкнутым циклом (ЗЦ). При осуществлении ЗЦ ОГ охлаждаются, удаляют из них водяной пар, фильтруют, освобождают от избыточного диоксида углерода, подмешивают к ним кислород (O_2), подогревают полученную искусственную газовую смесь (ИГС) и направляют на впуск дизеля. Расходуемый в процессе сгорания топлива O_2 , постоянно поступает в ИГС из специально создаваемых запасов.

При применении таких ЭУ в качестве судовых имеется очень эффективный охладитель для ОГ в виде забортной воды.

Основная причина образования NO_x – использование для горения атмосферного воздуха, содержащего азот. В последнее время активно развивается создание газоразделительных мембран в виде молекулярного сита с калиброванными отверстиями для селекции газов. Если в настоящее время существуют мембраны, позволяющие с низкими затратами организовать поточную молекулярную фильтрацию, и в составе судовой ЭУ пропускать через такую мембрану воздух для горения с целью удаления азота, то возможны следующие преимущества:

- снижение количества азота, поступающего в камеру сгорания, то есть количества образующихся NO_x ;
- увеличение удельной мощности вследствие большего содержания O_2 в сжимаемом заряде;
- возможна почти полная рециркуляция ОГ, так как вместо инертного азота в ИГС подмешивается большое количество инертных же ОГ.

При этом в условиях надводного коммерческого флота независимость ЭУ от наличия атмосферного воздуха не требуется. Более целесообразным выглядит вариант ЭУ с системой замкнутого газовыхлопа, представленный на рис. 1.

ОГ дизеля 1 после турбокомпрессора (ТК) 3 охлаждаются и фильтруются в скруббере 5. Атмосферный воздух пропускается через молекулярное сито 2 с целью удаления молекул азота. После чего в смесителе к воздуху, очищенному от азота, подмешиваются обработанные ОГ. Полученная ИГС поступает в цилиндры дизеля через ТК. Предусмотрен переключающий орган 4, осуществляющий обычный режим с выпуском ОГ в атмосферу и использованием для горения атмосферного воздуха.

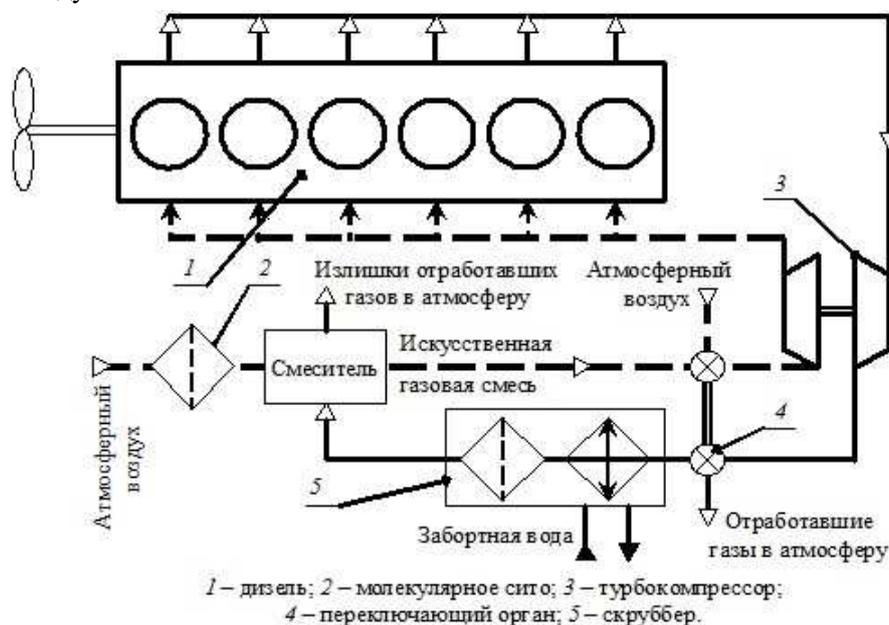


Рис. 1 Судовая дизельная установка с системой замкнутого газовыхлопа

Недостатки предлагаемых технических решений очевидны – значительное усложнение СЭУ, ее удорожание, усложнение обслуживания, но авторы считают это неизбежными издержками при решении проблем экологической безопасности и экономичности.

В настоящее время авторы готовят проведение экспериментальных исследований предложенной схемы ЭУ. Фильтрация ОГ планируется с помощью инерционно-масляного фильтра, охлаждение с помощью кожухо-трубного теплообменника с соответствующей площадью теплообмена.

При охлаждении ОГ необходимо сбрасывать значительное количество теплоты. Поэтому целесообразно произвести анализ возможностей повышения эффективности термодинамического цикла (ТЦ) судовых ДВС с целью возможно более полного использования этой теплоты в цикле, то есть повышения их энергетической эффективности.

АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ

При анализе используют изображения ТЦ в координатах $p-V$ (давление – объем) и $T-s$ (температура – энтропия), так как в $p-V$ координатах площадь под кривой процесса характеризует работу, а в $T-s$ – теплоту. Также в $T-s$ координатах удобно сравнение с ТЦ Карно, дающим возможный максимум термического КПД, к которому необходимо стремиться.

На $p-V$ диаграмме работа ТЦ характеризуется площадью внутри диаграммы. Для того чтобы увеличить работу ТЦ и, соответственно, его эффективность, необходимо увеличивать полноту диаграммы.

Работу процесса расширения можно увеличить, если заставить процесс расширения протекать более круто и проводить расширение до более низких значений давления – полнее использовать в цилиндре энергию ОГ. Но кривошипно-шатунный механизм (КШМ) не позволяет этого без дополнительных мероприятий, например, увеличения хода поршня. Поэтому, для повышения термодинамической эффективности ТЦ стоит внимательнее рассмотреть $T-s$ диаграмму. На рис. 2 представлен ТЦ Тринклера в $T-s$ координатах. Заштрихованные области на рис. 2 показывают потери теплоты в сравнении с ТЦ Карно – резервы повышения эффективности ТЦ.

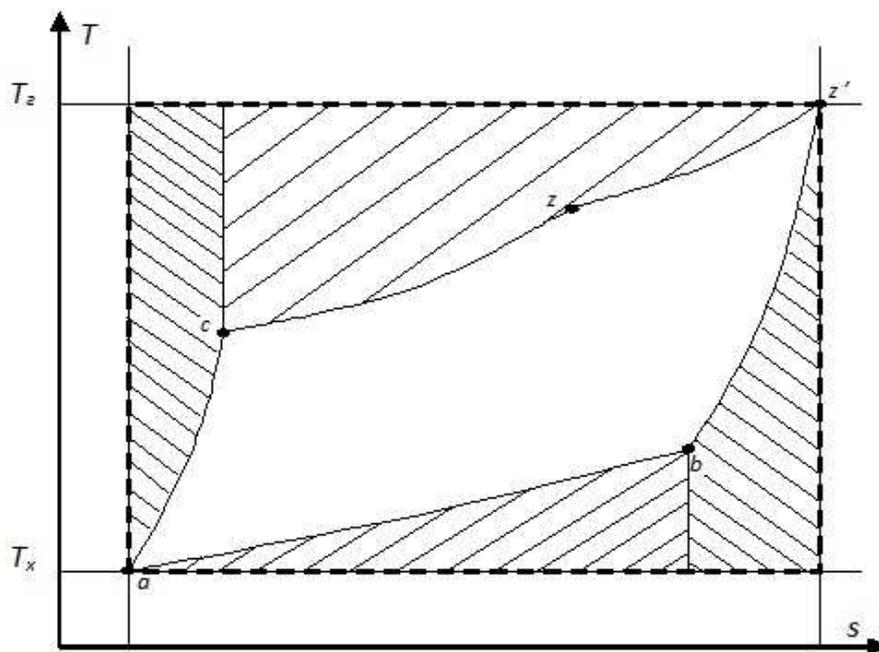


Рис. 2 Потери теплоты в цикле Тринклера

В процессах сжатия $a-c$ и расширения $z'-b$ видны потери теплоты в сравнении с адиабатным процессом в ТЦ Карно вследствие теплообмена сжимаемого заряда со стенками цилиндра – потери в охлаждающую жидкость (ОЖ). Это наводит на мысль о создании двигателя с теплоизолированным цилиндром. Действительно, охлаждение в современных ДВС нужно лишь для предотвращения роста температурных напряжений в деталях до значений, угрожающих их прочности и возможного их заклинивания. При наличии материалов, нормально работающих в таких условиях без охлаждения и с особыми условиями смазки (к сожалению, современное материаловедение пока не дает таких материалов, пригодных для массового производства), можно было бы приблизить процессы сжатия и расширения к адиабатным и повысить эффективность рабочего ТЦ. При этом, все упирается в невозможность провести полное расширение в существующих КШМ, и прирост внутренней энергии рабочего тела, полученный уменьшением

потерь в ОЖ, переходит в увеличенные потери с ОГ. С одной стороны, обладающие большей энергией ОГ, позволяют увеличить выработку механической энергии в ТК. С другой – это ведет к дополнительному усложнению конструкции, а повышение эффективности ТЦ не будет достигнуто. Фактически, теплоизоляция цилиндра приводит к перераспределению статей теплового баланса: степень использования тепловой энергии в данном ТЦ уменьшается, попытки ее использования переносятся в ТК, то есть в другой ТЦ. Кроме того, такие мероприятия ведут к увеличению эмиссии NO_x , так как повышают температуру в цилиндре.

Было бы полезно увеличить ход расширения, оставив неизменным ход сжатия, что позволило бы срабатывать больший температурный перепад при расширении и не увеличивать затраты энергии при сжатии. Это сделал в свое время Аткинсон, предложив свою конструкцию механизма преобразования, где ход расширения больше хода сжатия [6]. Однако он преследовал несколько иные цели. Его предложение не получило широкого распространения ввиду большей сложности в сравнении с традиционным КШМ. В цели данной части исследования также не входит значительное изменение технологически отработанной конструкции двигателя, поэтому необходимо использовать эту дополнительную теплоту другим способом.

Самый интенсивный теплообмен между газами в цилиндре и стенками цилиндра происходит в начале расширения, несмотря на то, что площадь контакта газов со стенками относительно невелика, так как поршень находится еще в первой трети своего хода, – здесь большой температурный перепад, а значит и тепловой поток максимальный. При дальнейшем движении поршня открывается все большая поверхность теплообмена, но температура газов уменьшается, при этом уменьшается и температурный перепад, значит и относительные потери в ОЖ. Выделение теплоты к этому моменту практически прекращается и преобладает теплоотдача от газов к ОЖ через стенки.

В этой связи представляется целесообразным после достижения максимальной температуры ТЦ ввести в цилиндр воду. Введенная вода испарится, вобрав в себя теплоту, равную скрытой теплоте парообразования. Снизится температура газов, уменьшится температурный перепад, т.е. интенсивность теплообмена, а, следовательно, и потери в ОЖ. Образовавшийся пар увеличит объем рабочего тела, его теплоемкость, повысит давление в цилиндре, что приведет к увеличению полноты индикаторной диаграммы, то есть к увеличению работы ТЦ. Повышение давления в цилиндре произойдет приблизительно в середине хода поршня, (кривошип повернут на угол близкий к 90° от верхней мертвой точки (ВМТ)), когда плечо для действия силы давления газов близко к максимальному – незначительное повышение давления в цилиндре может более благотворно сказаться на увеличении крутящего момента, чем значительное в начале хода поршня.

Теплота, отданная в стенки в конце расширения, мало влияет на общую полезную работу цикла. Основные потери составляет теплота, отданная в начале такта расширения, что было отмечено выше. Это отмечается и в [4]. Предлагаемый впрыск воды снизит именно эти потери. Ожидаемые изменения в диаграммах представлены на рис. 3 линиями большей толщины.

До момента впрыска воды (начало линий большей толщины на рис. 3) процесс расширения протекает так же, как и в ТЦ Тринклера. В момент впрыска воды происходит мгновенное парообразование. Поэтому, вероятно, от начала до конца впрыска воды процесс будет протекать близко к изобарному. После чего увеличится теплоемкость рабочего тела, а, значит, и показатель политропы расширения. В дальнейшем процесс расширения протекает более круто с большим показателем политропы до более низкой температуры, чем в ТЦ Тринклера.

Это произойдет вследствие введения дополнительного рабочего тела (в нашем случае это водяной пар), на образование которого будет потрачена теплота, что и приведет к снижению температуры в цилиндре, т. е. будет уменьшен тепловой поток от продуктов сгорания в стенки цилиндра. При этом снижение температуры в цилиндре не должно ухудшить показатели процесса расширения, так как внутренняя энергия продуктов сгорания (та, которая терялась в ТЦ Тринклера в ОЖ) перейдет в потенциальную энергию водяного пара, который увеличит работу процесса расширения. Уменьшение потерь теплоты представлено на рис. 4 штриховкой линиями увеличенной толщины.

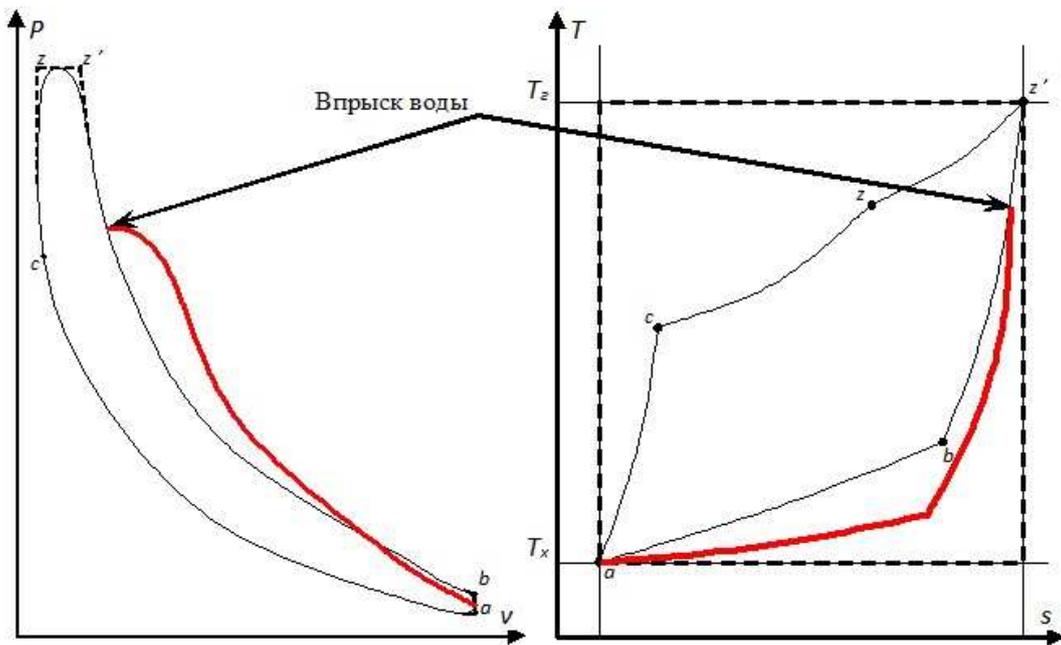


Рис. 3 Ожидаемые изменения на диаграммах $p-v$ и $T-s$

Обычно в случае хорошо организованного рабочего процесса в точке максимума температуры коэффициент активного тепловыделения достигает $0,7 \div 0,8$ [4, 7]. То есть, можно считать, что к моменту достижения максимальной температуры сгорает около 80 % топлива. Тепловыделение продолжается и после достижения максимума температуры вследствие наличия фазы догорания.

Сгорание в этой фазе характеризуется постепенным замедлением скорости тепловыделения, так как условия догорания топлива становятся все менее благоприятными: уменьшается количество неизрасходованного кислорода, заряд все более разбавляется продуктами сгорания, процесс протекает при увеличении объема и уменьшении температуры и давления. Продолжительность фазы догорания может соответствовать $(70 \div 80)^\circ$ угла поворота коленчатого вала (ПКВ) от ВМТ [4, 7].

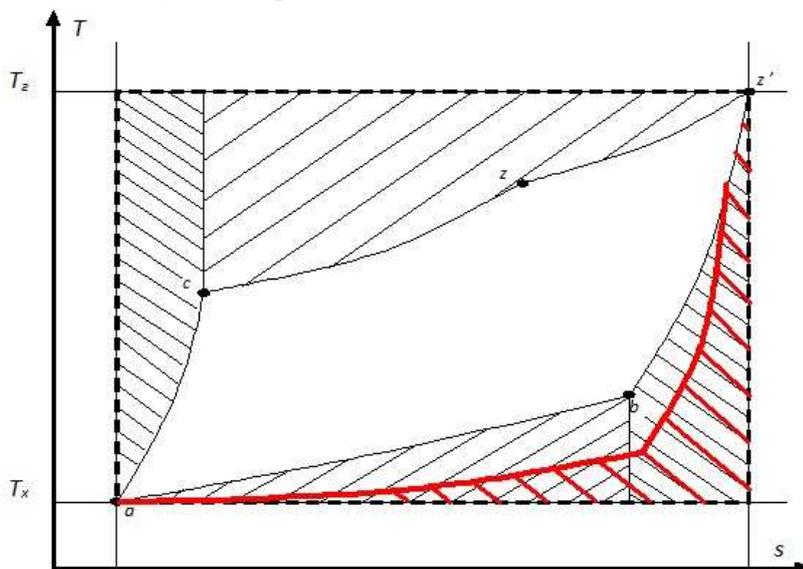


Рис. 4 Сравнение потерь теплоты в цикле Тринклера и предлагаемом цикле

Введение воды может ухудшить догорание. При наличии в горючей смеси инертных разбавителей (N_2 , CO_2 , H_2O) скорость реакций горения уменьшается, как вследствие снижения концентрации молекул топлива, так и из-за того, что часть выделяющейся при окислении теплоты расходуется на нагревание инертных разбавителей [4]. В нашем случае введение воды (то есть водяного пара как инертного разбавителя) как раз направлено на использование части теплоты продуктов сгорания, но, желательно, чтобы это не была теплота, выделяющаяся в данный момент при окислении. Наилучшим выходом было бы дожидаться окончания догорания, после чего осуществлять впрыск воды. Однако, как было отмечено выше, догорание может протекать до $(70 \div 80)^\circ$ угла ПКВ от ВМТ, а это почти половина хода поршня. В этом случае останется мало времени для использования теплоты, «возвращенной» в цилиндр посредством парообразования и эффект от введения воды может стать малозначительным.

Поэтому вводить воду целесообразно несколько позже момента достижения максимальной температуры, с тем чтобы процесс сгорания завершился как можно более полно, но не дожидаясь при этом окончания процесса догорания. Поэтому на рис. 3 и 4 момент впрыска воды смещен относительно момента достижения максимальной температуры ТЦ. Количество вводимой воды должно быть подобрано таким образом, чтобы к концу процесса расширения пар в цилиндре оставался перегретым, для исключения возможной конденсации в выпускной системе. При этом количество воды должно быть таким, чтобы температура в конце процесса расширения была ниже, чем в ТЦ Тринклера, чтобы максимизировать степень использования теплоты.

Однако нельзя с уверенностью сказать, как пойдет политропа расширения после испарения воды, так как неизвестно изменение показателя политропы.

Теплоемкость смеси газов равна сумме произведений объемных долей на теплоемкости газов, составляющих смесь [8].

Водяной пар в перегретом состоянии можно считать трехатомным газом. Для водяного пара в [4] приводятся данные, представленные в таблице.

Таблица 1

Средняя мольная изохорная теплоемкость водяного пара в зависимости от температуры

Температура, °С	2000	1900	1800	1700	1600	1500	1400	1300	1200	1100	1000
$C_{V_{газ}}$, кДж/(кмоль·К)	35,680	35,224	34,755	34,261	33,741	33,210	32,661	32,092	31,510	30,901	30,304

Теплоемкость продуктов сгорания можно оценить с помощью теплового расчета. На данном этапе достаточно рассмотреть порядок величин, поэтому, с достаточной точностью можно использовать расчетные данные из примеров расчетов, приводимых в любом из учебников по судовым ДВС. Так, например, в [7] для дизеля $N_e = 2720$ кВт и $n = 1000$ об/мин средняя мольная изохорная теплоемкость $C_{V_{газ}} = 24,83$ кДж/(кмоль·К). Там же для дизеля $N_e = 3568$ кВт и $n = 2150$ об/мин, $C_{V_{газ}} = 25,16$ кДж/(кмоль·К). В [5] для дизеля $N_e = 11,04$ кВт и $n = 1500$ об/мин расчет определяет величину $C_{V_{газ}} = 25,19$ кДж/(моль·К).

К концу процесса сгорания количество трехатомных газов в дизелях достигает $(14 \div 15) \%$ [7]. При впрыске воды и, соответственно, увеличении количества водяного пара, увеличивается количество трехатомных газов. То есть теплоемкость смеси продуктов сгорания и водяного пара должна возрасти.

Введение воды в цилиндр приведет к снижению температуры в цилиндре. Так как теплоемкость заметно зависит от температуры (что видно, в частности по табл. 1), то увеличение теплоемкости может стать не столь значительным. Чтобы определить влияние теплоемкости на показатель политропы расширения необходимо провести расчет, определяющий, в том числе, объемную долю водяного пара. В данный момент можно предположить, что теплоемкость рабочего тела увеличится, а на какую величину и как сильно это повлияет на процесс расширения, пока сказать сложно.

Увеличение теплоемкости рабочего тела должно привести к росту показателя политропы расширения, то есть будет достигнуто наилучшее теплоиспользование [4, 7].

Причем речь не идет о том, что будет использована вся энергия, затраченная на парообразование. Как минимум скрытую энергию парообразования мы использовать не сможем, и она уйдет с отработавшими газами. Однако пар повысит давление в цилиндре и позволит увеличить работу процесса расширения, в то время как в традиционном цикле Тринклера эта теплота, не совершая никакой работы, теряется в системе охлаждения. Вырабатываемая механическая энергия возрастет в ходе парообразования в цилиндре при расширении, так как будет увеличено количество рабочего тела в том же рабочем объеме. При этом на это увеличение количества рабочего тела не будет затрачиваться дополнительное количество топлива.

В связи с тем, что снизится средняя температура ТЦ, появляется возможность охлаждать цилиндр, по крайней мере его нижнюю половину. Для этого необходимо провести экспериментальное определение температурного состояния цилиндра. В свою очередь, снижение интенсивности охлаждения приближает нас к теплоизолированному двигателю, о котором говорилось выше. Только условия для использования дополнительной теплоты значительно лучше за счет перевода этой теплоты в потенциальную энергию пара. Также снижение интенсивности охлаждения может позволить немного увеличить максимальную температуру ТЦ. Это станет возможным ввиду того, что процесс сжатия также приблизится к адиабатному и будет протекать до более высоких значений давления и температуры в конце процесса. При неизменных степени сжатия и характеристиках топливоподачи это может привести к повышению максимальной температуры ТЦ. Повышение температуры ТЦ дает возможность дополнительного повышения термического КПД вследствие увеличения температуры «горячего источника».

Недостатки и достоинства подачи в цилиндры воды и термоизоляции цилиндров также известны, но целью является совершенствование термодинамического цикла и увеличение полезной работы, получаемой с единицы массы израсходованного топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предлагаемой ЭУ с замкнутым газовыхлопом вследствие исключения азота атмосферного воздуха из процесса горения топлива ожидается значительное снижение выброса окислов азота. Также в связи с исключением азота из состава ИГС возможна значительная рециркуляция ОГ (около 79 %).

Также в предлагаемой ЭУ с замкнутым газовыхлопом, водяной пар, находящийся в ОГ вследствие введения воды в конце процесса сгорания, начнет конденсироваться при охлаждении в скруббере. При этом значительная часть токсичных компонентов ОГ будет поглощена сконденсированной влагой и удалена из ОГ, а эффективность нейтрализации газообразных компонентов ОГ повысится вследствие более длительного контакта водяного пара с ОГ.

Возможное недогорание топлива, вызванное тем, что вода впрыскивается до завершения процесса догорания, может быть заметно уменьшено в связи с большой долей рециркуляции ОГ.

При определении количества воды, подаваемой в конце процесса сгорания необходимо обратить внимание на критическое давление, при котором вода не кипит, а только испаряется. Впрыскивать воду предполагается немного позже момента достижения максимальной температуры, т. е. давление в цилиндре в этот момент будет заметно ниже максимального давления ТЦ. По данным [8, 10] критическое давление для воды составляет $P_{\text{крит}} = 22,064$ (217,755) МПа (атм), то есть больше максимального давления в цилиндре, значит давление, при котором будет происходить парообразование значительно ниже критического давления.

В связи с тем, что впрыск воды будет производиться при незавершившемся догорании, необходимо рассмотреть, как водяной пар может повлиять на завершение этого процесса. С одной стороны, как было отмечено выше, при наличии в горючей смеси инертных разбавителей скорость реакций горения уменьшается как вследствие снижения концентрации молекул топлива, так и из-за того, что часть выделяющейся при окислении теплоты расходуется на нагревание инертных

разбавителей. С другой стороны, введение водяного пара приводит к значительному ингибированию образования C и CO при одновременном повышении тепловыделения, что связано с тем, что подача воды увеличивает концентрацию OH -радикалов, которые реагируют с CO и C , образуя CO_2 и H_2 . Однако это может быть заметно лишь при наличии воды в процессе сгорания, когда температура высока и диссоциация возможна. В нашем же случае вследствие снижения температуры этот эффект может быть незаметен.

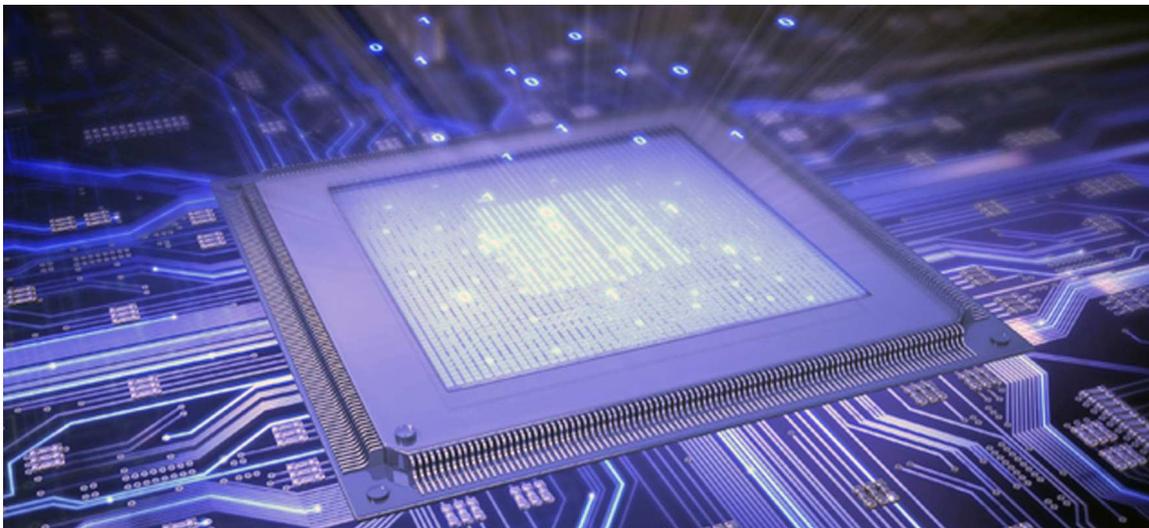
В этой связи при проведении экспериментальных исследований необходимо провести ряд испытаний с различными моментами подачи воды, что позволит определить влияние введения воды на процесс догорания топлива. Соответственно, необходимо рассчитать эти несколько ситуаций, так как количество подаваемой воды в этих случаях, вероятно, будет разным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта Учеб. пособие / Г.А. Конкс, В.А. Лашко. – М.: Машиностроение, 2005. – 512 с., ил.
2. DUPONT™ Marine scrubber exhaust gas cleaning systems for marine engines специальность 05.08.05 – Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) / С.А. Каргин. – Астрахань.: Астраханский государственный технический университет, 2006. – 165 с.
6. Цикл Аткинсона: как это работает. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://auto.today/bok/1170-cikl-atkinsona.html> (дата обращения 04.10.2018 г.).
7. Дьяченко Н.Х., Костин А.К. и др. Теория двигателей внутреннего сгорания / Под ред. Н.Х. Дьяченко. – Л.: Машиностроение, 1974. – 552 с.
8. Чухин И.М. Техническая термодинамика. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ispu.ru/files/u2/book2/TD1_19-06/ttd4-2-2.htm (дата обращения 04.10.2018 г.).
9. Сверхкритическая жидкость. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Сверхкритическая_жидкость (дата обращения 04.10.2018 г.).
10. Гажур А.А., Васичев Б.Н. Термодинамика: учебное пособие для бакалавриата / А.А. Гажур, Б.Н. Васичев. – М.:ФГБОУ ВПО «РЭУ им Г.В. Плеханова», 2013. – 263 с.

REFERENCES

1. Konks G.A., Lashko V.A. Mirovye sudovye dizelestroenie. Kontseptcii konstruirovaniya, analiz mezhdunarodnogo opyta. M.: Mashinostroenie, 2005.
2. DUPONT™ Marine scrubber exhaust gas cleaning systems for marine engines & boilers. Belco marine brochure, 2014.
3. Design of marine scrubber Belco. Web source. <http://www.dupont.ru/products-and-services/clean-technologies/products/belco-clean-air/sub-products/belco-marine-systems/dupont-marine-scrubber-design-details> (accessed 16 Nov. 2018).
4. Arkhangel'skij V.M., Vykher't M.M. and Voinov A.N. Avtomobilnie dvigateli. [Car engines]. M.: Mashinostroenie, 1977.
5. Kargin S.A. Teoreticheskoe obosnovanie i eksperimentalnoe issledovanie rabotchego protsessa sudovogo DVS s kombinirovannym smeseobrazovaniem i prinuditel'ny'm vosplameneniem. [Theoretical explanation and experimental study of the operation process of the marine ICE with the combined mixing and positive ignition]. PhD diss. Astrakhan.: Astrakhanskij gosudarstvennij tehnikeskij universitet, 2006.
6. Cikl Atkinsona: kak eto rabotaet. [Atkinson Cycle: how it works] Web source <https://auto.today/bok/1170-cikl-atkinsona.html> (accessed 4 Oct. 2018).
7. Dyachenko N.Kh., Kostin A.K. Teorija dvigatelej vnutrennego sgoraniya. [Internal combustion engine theory]. L.: Mashinostroenie, 1974.
8. Tchukhin I.M. Tekhnicheskaya termodinamika [Technical thermodynamics] Web source. http://ispu.ru/files/u2/book2/TD1_19-06/ttd4-2-2.htm (accessed 4 Oct. 2018)
9. Sverkhkriticheskaya zhidkost [Supercritical fluid] Web source. https://ru.wikipedia.org/wiki/Sverkhkriticheskaja_zhidkost (accessed 4 Oct. 2018).
10. Gazhur A.A., Vasichev B.N. Termodinamika: uchebnoe posobie dlja bakalavriata. [Thermodynamics. Course book for undergraduate students]. M.: FGBOU VPO "G.V. Plekhanov REU", 2013.



ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 629.123

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА «ATLAS». НАЗНАЧЕНИЕ И СТРУКТУРА. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В.Н. Тряскин, д-р техн. наук, профессор, Государственный морской технический университет (СПбГМТУ), Санкт-Петербург, e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru

С.Н. Рюмин, канд. техн. наук, доцент, СПбГМТУ, Санкт-Петербург,
e-mail: kpsrumin@gmail.com

М.А. Кутейников, д-р техн. наук, Российский морской регистр судоходства, Санкт-Петербург,
e-mail: kuteynikov.ma@rs-class.org

Дается характеристика автоматизированной системы для выполнения проверочных расчетов конструкций корпуса нефтеналивных и навалочных судов по требованиям Общих правил МАКО. Рассмотрена структура системы, представлены наиболее информативные результаты формирования базы данных. Приводится характеристика функциональных программных блоков, предназначенных для решения задач проверки корпусных конструкций на предмет соответствия требованиям Общих правил МАКО. Показаны основные методические принципы проверочных расчетов общей прочности корпуса судна, местной прочности и устойчивости элементов листовых конструкций и балок основного набора, усталостной долговечности конструкций в рамках упрощенной методики. Представлены некоторые результаты проверочных расчетов корпусных конструкций тестовых судов: двухкорпусного супертанкера и крупнотоннажного судна для навалочных грузов с двойными бортами, выполненных с использованием программного обеспечения разработанной автоматизированной системы.

Ключевые слова: гармонизированные Правила МАКО, автоматизированная система, проверочные расчеты прочности, конструкция корпуса, нефтеналивные суда, навалочные суда

THE ATLAS SOFTWARE. OBJECTIVE AND ARCHITECTURE. METHODOLOGICAL BASIS. TEST RESULTS

V.N. Tryaskin, DSc, professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: tryaskin.vn@yandex.ru

S.N. Ryumun, PhD, associate professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: kpsrumin@gmail.com

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

The article provides general information about the developed software for verification of hull structures of double hull oil tankers and bulk carriers according to the requirements of the IACS Common Structural Rules presenting the software architecture and the most informative software database development cases. Description of the software modules intended for verifying the compliance of hull structures with the IACS Common Structural Rules is also considered. The article also describes a simplified methodology of hull girder strength, hull local scantling, buckling and fatigue calculations according to the IACS Common Structural Rules requirements. Results of the hull structures verification in application to testing vessels are presented: to a double-hull supertanker and a large-capacity double-sided bulk cargo vessel, made using the software of the developed automated system.

Keywords: harmonized IACS Rules, computer aided system, calculations for strength verification, hull structure, oil tankers, bulk carriers

ВВЕДЕНИЕ

Общие правила МАКО вступили в силу в 2015 году. Они содержат требования к конструкции корпуса однокорпусных и двухкорпусных навалочных судов длиной равной и более 90 м и нефтеналивных двухкорпусных судов длиной равной и более 150 м. Использование этих Правил при выполнении проверочных расчетов прочности конструкций корпуса таких судов, в связи с их сложностью, возможно только при наличии специализированного программного обеспечения. Автоматизированная система "ATLAS", предназначенная для решения указанных задач¹, разработана на кафедре конструкции и технической эксплуатации судов СПбГМТУ по заказу Российского морского регистра судоходства. Работа по проекту "ATLAS" проводилась в течение трех лет. В настоящий момент первая версия автоматизированной системы "ATLAS" проходит опытную эксплуатацию.

1. СТРУКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ "ATLAS"

Автоматизированная система "ATLAS" состоит из нескольких групп программного обеспечения (ПО) различного функционального назначения: ПО для работы с файловой структурой системы; ПО для формирования базы данных по проекту; ПО для выполнения проверочных

¹Требования Общих правил МАКО делятся на базовые – проектные (prescriptive requirements), основанные на традиционных для Правил принципах, и уточняющие (design verification), требующие привлечения сложных методов анализа, основанных на трехмерном моделировании конструкций корпуса судна и использовании метода конечных элементов (МКЭ). Основные задачи проверки соответствия конструкций требованиям Общих правил МАКО решаются в процессе prescriptive-анализа. Автоматизированная система "ATLAS" предназначена для выполнения проверочных расчетов конструкций в рамках prescriptive-требований.

расчетов различных типов, сервисного ПО для визуализации результатов проверочных расчетов, подготовки отчетных документов и для работы с руководством пользователя.

Достаточно подробно общая структура автоматизированной системы "ATLAS" была рассмотрена в статье [1], опубликованной в 2107 году. В последней версии системы не вводилось кардинальных изменений в общую структуру системы. Дополнены пункты меню, связанные с новыми программными блоками: Buckling и Simplified Fatigue, Visualization, разработка которых проводилась в 2018 году. (см. п. 2).

Программное обеспечение представленной версии системы позволяет решать следующие задачи:

- автоматизированную подготовку базы данных для выполнения проверочных расчетов общей и местной прочности, устойчивости и усталостной долговечности конструкций корпуса нефтеналивных и навалочных судов;
- проверочные расчеты общей продольной прочности корпуса судна в упругой фазе работы конструкций (Hull Girder Yielding Strength);
- проверочные расчеты общей предельной прочности корпуса судна в неповрежденном (Hull Girder Ultimate Strength) и поврежденном (Hull Girder Residual Strength) состоянии;
- проверочные расчеты местной прочности (Local Strength) листовых и балочных элементов конструкций, расположенных в районах грузовых трюмов в средней части судна и за ее пределами;
- проверочные расчеты прочности поперечных танкерных рам (Transverse Webs);
- проверочные расчеты местной прочности листовых элементов, балок основного и рамного набора плоских переборок нефтеналивных судов (Flat Bulkheads);
- проверочные расчеты устойчивости листовых элементов конструкций грузовых трюмов при продольной и поперечной системах набора и продольных балок основного набора (Buckling);
- проверочные расчеты прочности и устойчивости элементов гофрированных переборок навалочников и танкеров (Corrugated Bulkheads);
- оценки усталостной долговечности узлов пересечения продольных балок основного набора с поперечными рамными связями или листовыми конструкциями (Simplified Fatigue), которые могут быть источником наибольшего числа усталостных повреждений;
- формирование выходного файла данных для передачи в программное обеспечение ATLAS HULL 3D для проведения МКЭ анализа.

2. ПОДГОТОВКА БАЗЫ ДАННЫХ ПО КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА В СИСТЕМЕ "ATLAS"

Система "ATLAS" обеспечивает высокую степень автоматизации подготовки базы данных (БД), содержащей информацию, необходимую для проведения всех видов проверочных расчетов. Имеется возможность описания геометрии и конструкции корпуса судна в виде конструктивного поперечного сечения или растяжки конструкции, как в районе цилиндрической вставки, так и за ее пределами (рис. 1, 2). Конструктивные модели плоских и гофрированных переборок также могут быть созданы (рис. 3, 4). Конструкция корпуса судна представляется в виде иерархической древовидной модели; каждый элемент корпуса судна получает уникальный код, который генерируется автоматически и используется в программном коде процедур проверочного расчета. БД системы содержит представительную информацию по корпусной стали, сортаментам составных и прокатных профилей.

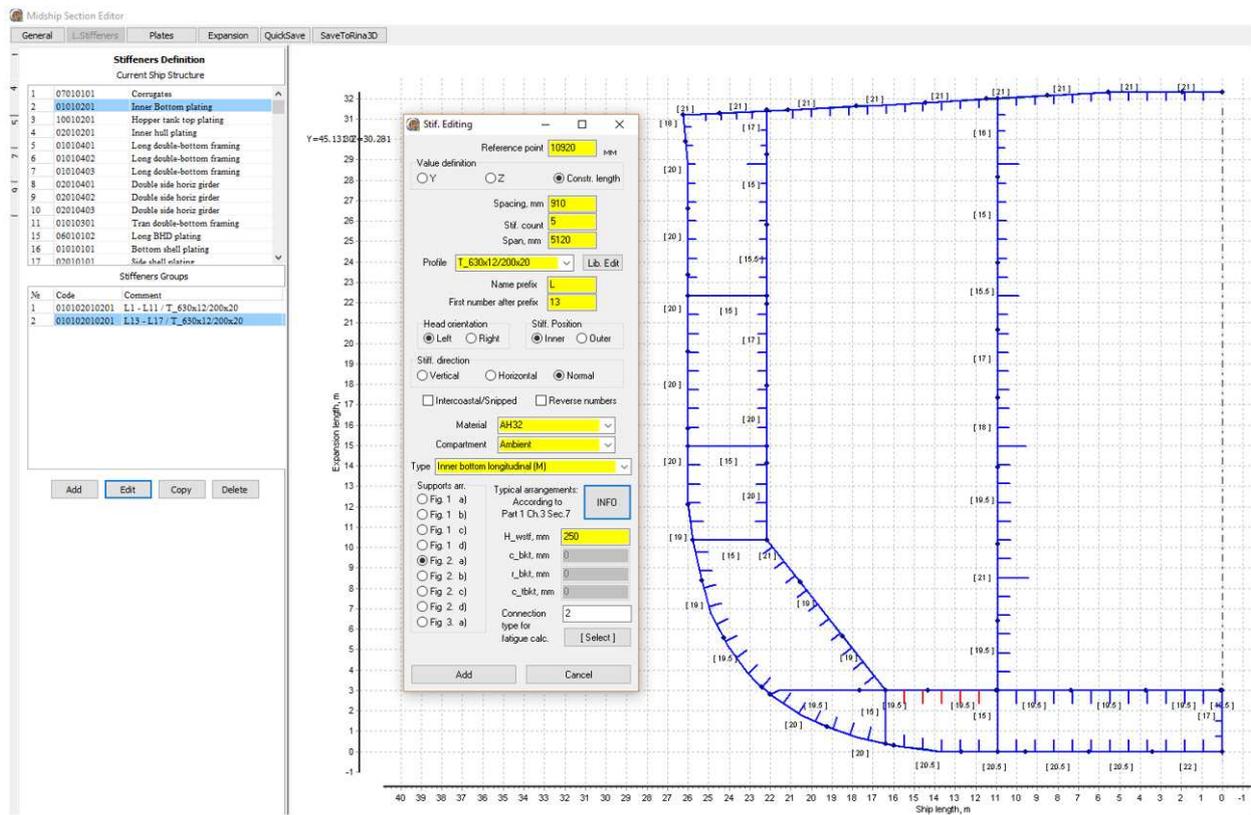


Рис. 1 Компоновка поперечного сечения за пределами цилиндрической вставки; результаты расстановки продольных балок

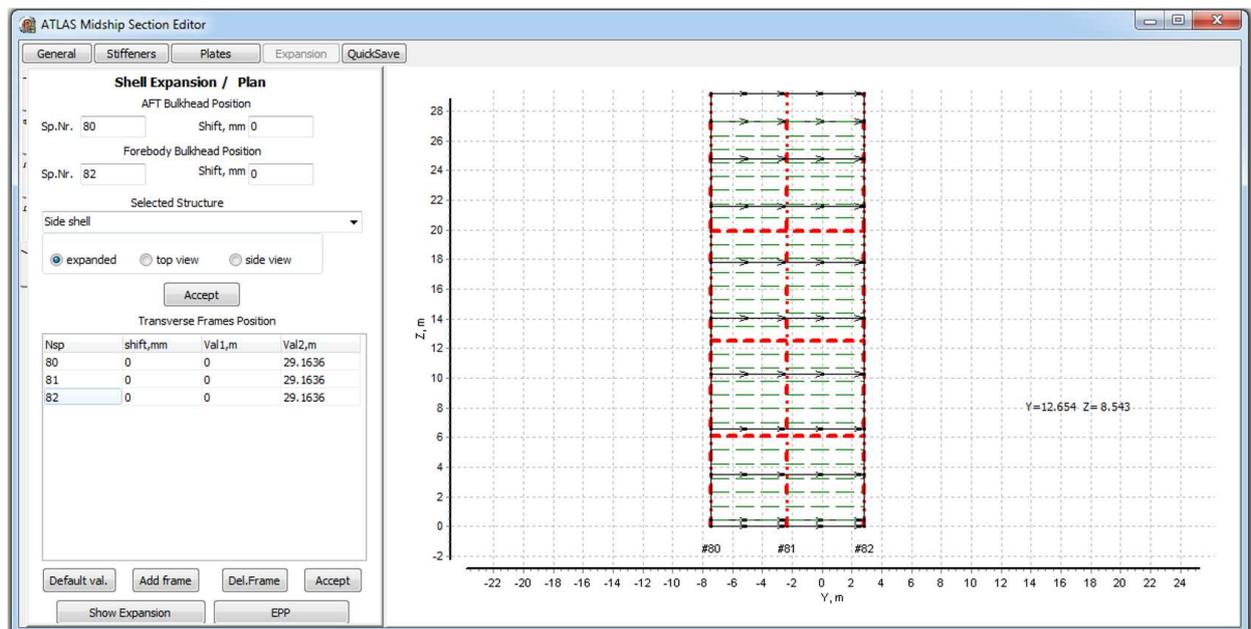


Рис. 2 Режим Expansion. Построение растяжки наружной обшивки

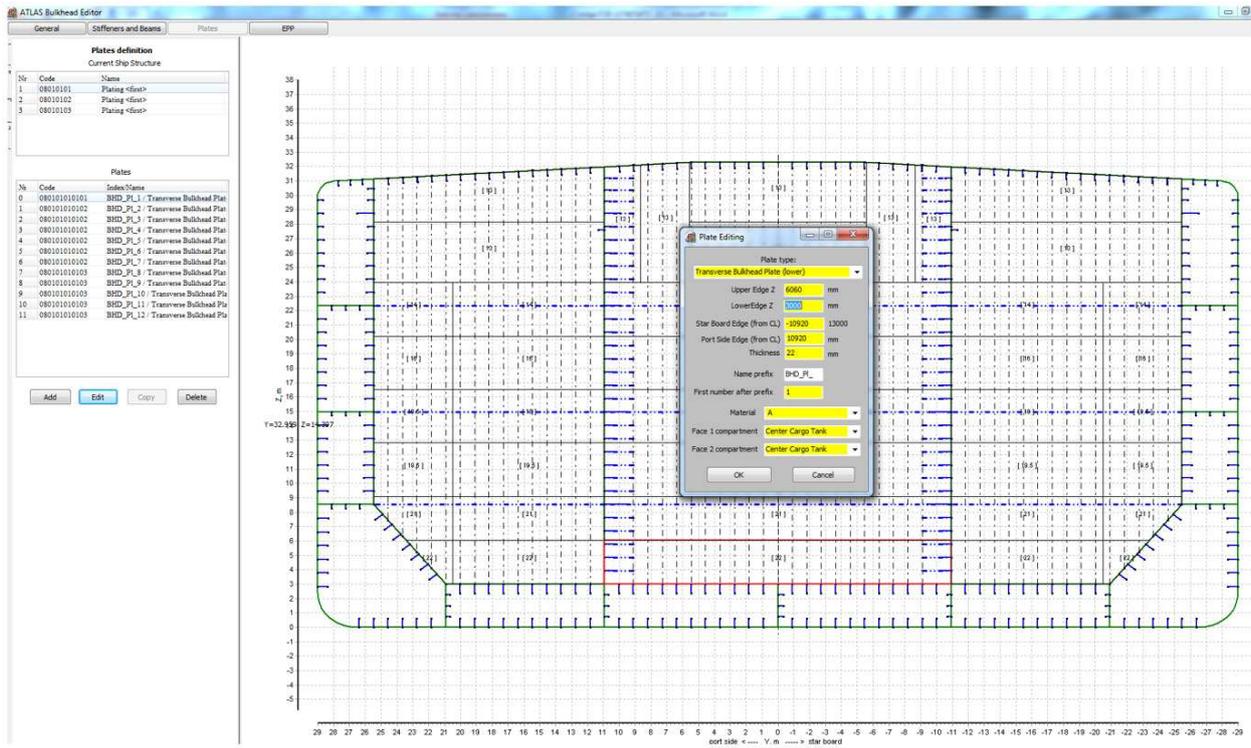


Рис. 3 Конструктивная модель обшивки поперечной переборки. Диалоговый просмотр параметров выделенного (нижнего) листа обшивки переборки

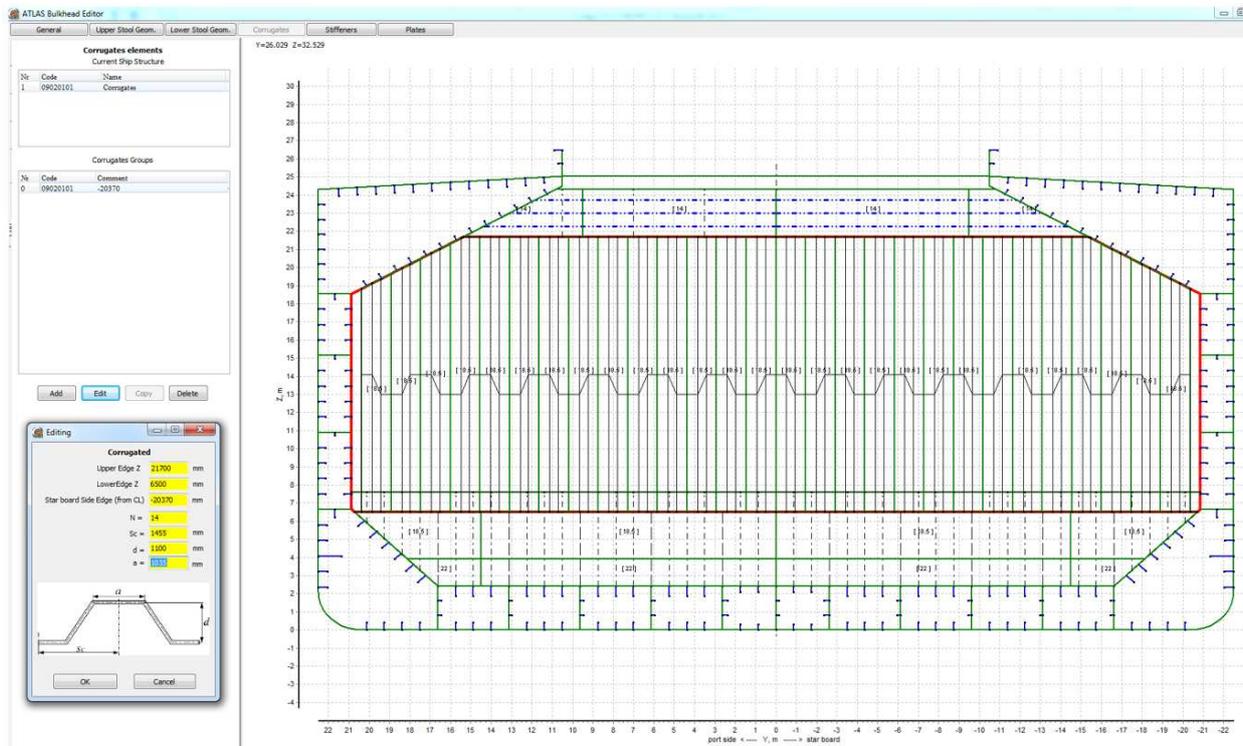


Рис. 4 Описание гофрированного полотна. Просмотр параметров гофров.

Для обеспечения расчетов местной прочности и/или устойчивости листовые конструкции разделяются на элементарные листовые панели – ЕРР. Процесс декомпозиции выполняется автоматически с использованием алгоритма случайного поиска. На рис. 5 в качестве примера представлены результаты выделения ЕРР на полотнище переборки. Параметры ЕРР могут быть просмотрены в режиме «графического» диалога.

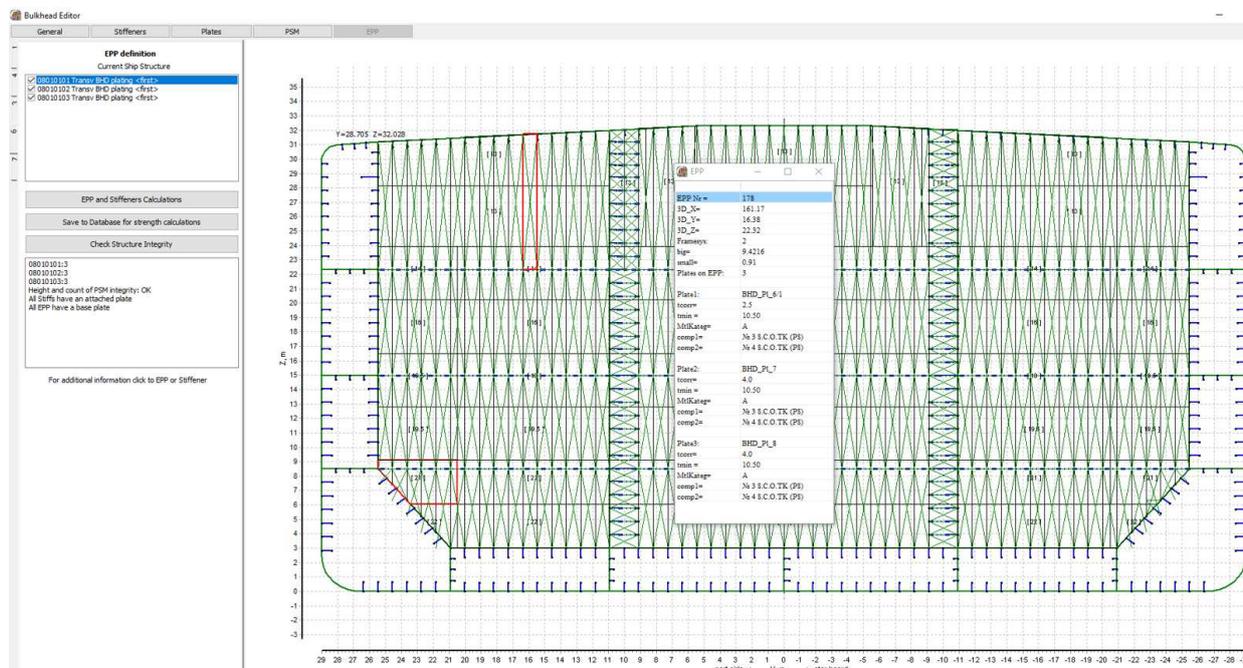


Рис. 5 Результаты выделения ЕРР. Просмотр параметров ЕРР

В режиме диалога производится описание и визуализация геометрии отсеков/помещений корпуса судна и задание их параметров. База данных по отсекам также структурирована с применением специальной системы кодирования. В последней версии системы, на основе рекомендаций пользователей, процедура формирования базы данных по отсекам значительно упрощена. Для этого разработан специальный графический редактор, обеспечивающий возможность описания отсеков в диалоговом режиме по информации, приведенной в проектной документации (рис. 6).

3. ПРОГРАММНЫЕ БЛОКИ ПРОВЕРОЧНЫХ РАСЧЕТОВ В СИСТЕМЕ "ATLAS"

3.1 Проверочные расчеты общей прочности корпуса судна

В соответствии с требованиями Общих правил МАКО выполняются проверочный расчет общей прочности корпуса судна в упругой фазе работы конструкций (Hull Girder Yielding Strength), проверочные расчеты общей предельной прочности корпуса судна в неповрежденном (Hull Girder Ultimate Strength) и поврежденном (Hull Girder Residual Strength) состоянии.

Проверочные расчеты общей прочности корпуса судна (Hull Girder Yielding Strength) включают расчеты характеристик поперечного сечения корпуса судна при нормативном коррозионном износе (рис. 7), определение расчетных изгибающих моментов и перерезывающих сил и проверку выполнения условий общей продольной прочности (рис. 8).

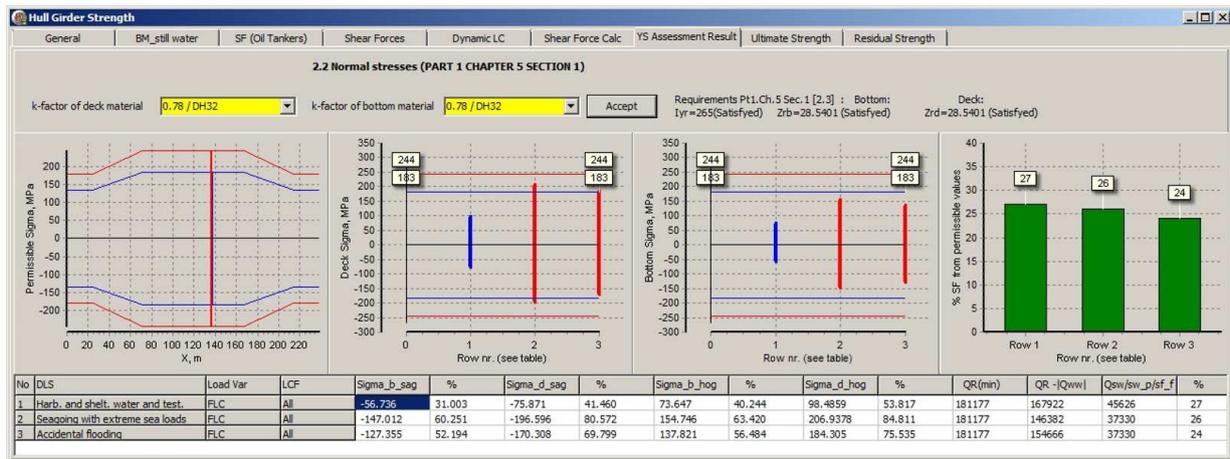


Рис. 8 Результаты проверки общей прочности (Hull Girder Yielding Strength)

Проверочные расчеты общей предельной прочности корпуса судна в неповрежденном (Hull Girder Ultimate Strength) и поврежденном (Hull Girder Residual Strength) состоянии выполняются по специальному алгоритму. Величины предельных изгибающих моментов (при перегибе и прогибе) определяются как экстремальные (положительные и отрицательные) значения на графике зависимости «изгибающий момент – кривизна», $M(\chi)$ (рис. 9), для построения которого используется итерационный (пошаговый) метод [23].

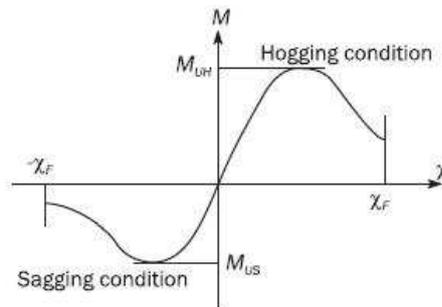


Рис. 9 Типовая зависимость между изгибающим моментом и кривизной

Результаты проверки предельной прочности в неповрежденном (Hull Girder Ultimate Strength) и поврежденном (Hull Girder Residual Strength) состоянии представляются в виде отношения допускаемых значений перегибающего и прогибающего моментов $M_{perm} = M_U / \gamma_R$ к соответствующим расчетным изгибающим моментам M_d (M_U – предельный момент; γ_R – коэффициент запаса) рис. 10, 11.

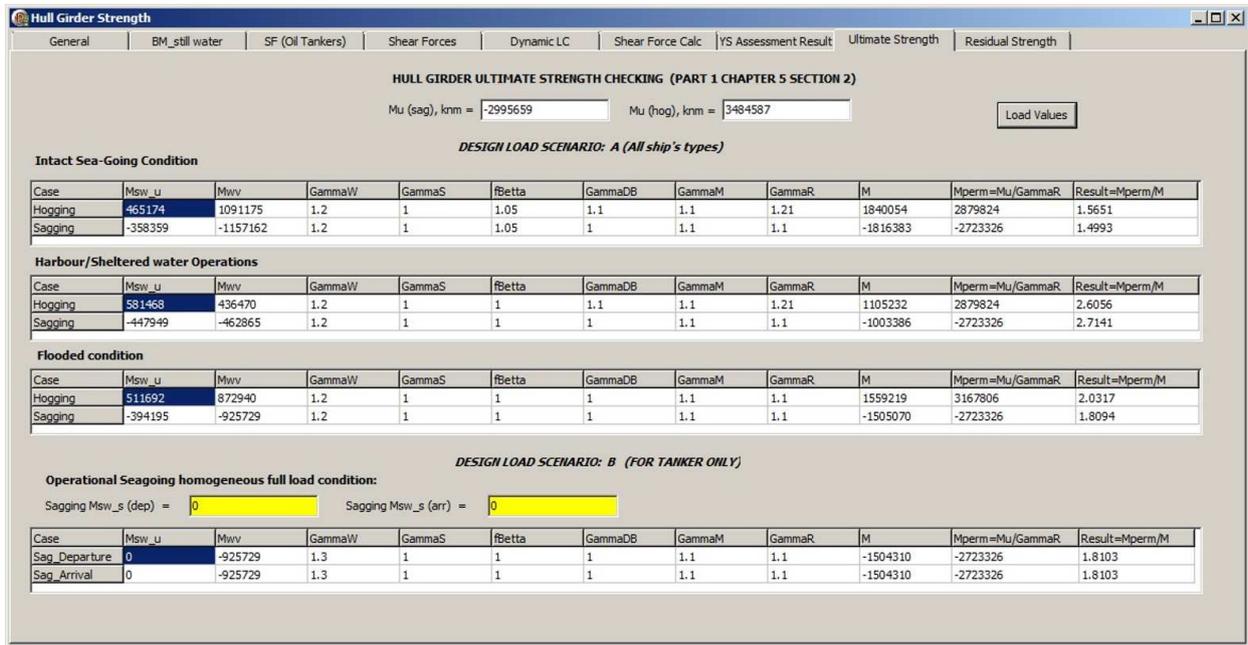


Рис. 10 Результаты проверки предельной прочности (Hull Girder Ultimate Strength)

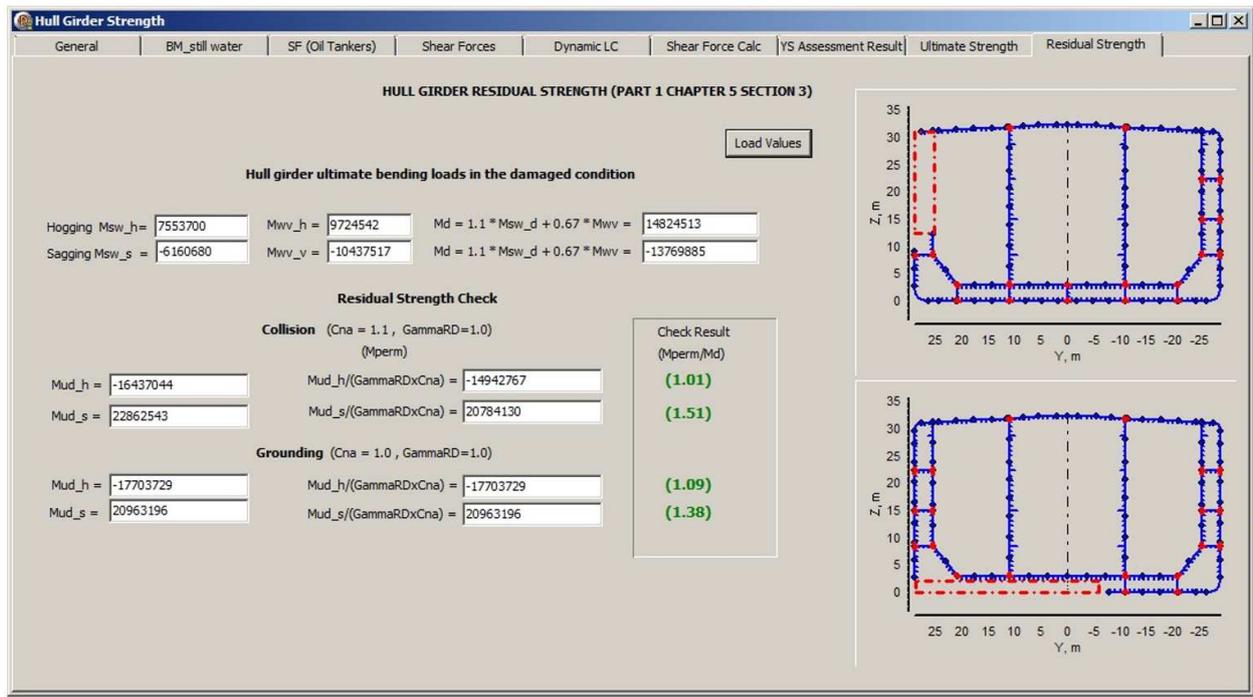


Рис. 11 Результаты проверки аварийной прочности (Hull Girder Residual Strength) для случаев повреждения бортовых и днищевых конструкций

3.2 Проверочные расчеты местной прочности корпуса судна (Local Strength)

Программный комплекс позволяет выполнять проверочные расчеты местной прочности (Local Strength) листовых и балочных элементов конструкций, расположенных в районах грузовых трюмов в средней части судна и за ее пределами. Расчетные случаи загрузки судна, для которых

будут выполняться проверочные расчеты, задаются при формировании БД "Loading Condition". Так, для нефтеналивного судна могут быть выполнены расчеты для следующих 7 случаев загрузки: Full Load Condition (В полном грузу); Harbour and Sheltered Water Condition (В условиях порта или защищенной акватории); Partial Loading Condition (При частичной загрузке); Normal Ballast Condition (Нормальные балластные условия); Ballast Water Exchange Condition (Смена балласта в море); Harbour/Test Condition (Порт/Тестовые условия); Accident Flooded Condition (Аварийные условия в море); Optional Loading Condition (Дополнительные условия загрузки). Для балкера дополнительно рассматриваются следующие случаи загрузки: Full Load Condition (Homogeneous) - (В полном грузу (загрузка всех грузовых трюмов)), Full Load Condition (Alternate) – (В полном грузу (чередующаяся загрузка грузовых трюмов тяжелым грузом)), Heavy Ballast Condition (Тяжелые балластные условия).

Для каждой конструкции набор расчетных случаев (DLS – Design Load Set) однозначно определяется Правилами. Для выполнения проверочных расчетов предварительно устанавливаются расчетные нагрузки, обусловленные воздействием внешней среды (External Loads) и жидкого груза (Internal Loads), испытательные нагрузки (Loads for Tank Testing), нагрузки при аварийном затоплении отсеков (Accident Flooded Condition).

При определении External Loads необходимо рассмотреть 7 волновых режимов (Equivalent Design Wave Load Case – EDWLC), при которых могут возникать наибольшие волновые нагрузки [4] (рис. 12)¹:

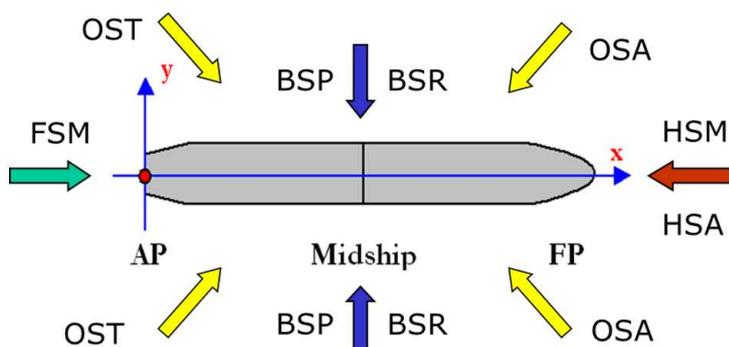


Рис. 12 Расчетные случаи для определения экстремальных динамических нагрузок с обеспеченностью 10^{-8}

HSM: волновой режим, при котором достигает экстремального (максимального – перегиб или минимального – прогиб) значения вертикальный волновой изгибающий момент на миделе при движении судна на встречном волнении – 2 расчетных режима;

FSM: волновой режим, при котором достигает экстремального (максимального – перегиб или минимального – прогиб) значения вертикальный волновой изгибающий момент на миделе (в сочетании с нулевым вертикальным ускорением) при движении судна на попутном волнении – 2 расчетных режима;

BSR: волновой режим, при котором достигает экстремального (максимального или минимального) значения угол крена при бортовой качке при положении судна лагом к волнению (отдельно при набегании волны с правого и левого борта) – 4 расчетных режима;

¹Рисунок и описание волновых режимов заимствованы из материалов презентации MAKO: IACS. CSR Harmonization. Loads. Industry Presentation, September 2012, Philippe Baumans & Åge Bøe Project Management Team (PMT).

BSP: волновой режим, при котором достигают экстремального (максимального или минимального) значения волновые давления на уровне ватерлинии в средней части судна при положении судна лагом к волнению (отдельно при набегании волны с правого и левого борта) – всего 4 расчетных режима;

OST: волновой режим, при котором достигает экстремального (максимального или минимального) значения волновой крутящий момент в сечении 0,25L от кормового перпендикуляра при движении судна косым курсом к волнению (отдельно правым и левым бортом) – 4 расчетных режима;

HSA: волновой режим, при котором достигает экстремального (максимального или минимального) значения вертикальное ускорение на носовом перпендикуляре при движении судна на встречном волнении – 2 расчетных режима;

OSA: волновой режим, при котором достигает экстремального (максимального или минимального) значения ускорение килевой качки при движении судна косым курсом к волнению (отдельно правым и левым бортом) – 4 расчетных режима.

Следовательно, общее количество случаев только динамического нагружения, подлежащих учету при выполнении расчетов местной прочности, составляет 22 при каждом расчетном случае загрузки судна на волнении. Принять решение, какой случай загрузки приводит к большим требуемым размерам листовых и балочных элементов, можно только на основе сопоставления конечных результатов расчета: требуемых толщин листовых элементов, характеристик поперечного сечения балочных элементов. Это связано с тем, что в исходную информацию входят данные не только о величине расчетных местных давлений, но и значения допускаемых напряжений, которые зависят от типа нагрузки (статическая/динамическая), вклада напряжений от общего изгиба в суммарные напряжения в листовом/балочном элементе. Расчетные местные нагрузки с одной и другой стороны от рассматриваемой конструкции также могут отличаться, что учитывается при выполнении расчетов.

В связи с этим расчеты местной прочности в соответствии с требованиями Общих правил МАКО – наиболее трудоемкие. Так, например если принять: количество случаев загрузки судна – 7, количество листов, образующих листовые конструкции – 40, число элементарных панелей (EPP) на одном листе – 4, то общее число проверочных расчетов для листовых элементов одного конструктивного сечения составит около 50000. В связи с этим расчеты местной прочности в соответствии с требованиями Общих правил МАКО достаточно трудоемкие.

Результаты расчета каждого элемента конструкции с информацией обо всех исходных параметрах сохраняются в рабочих файлах системы. Итоговые результаты представляются в виде файла в формате Microsoft Excel, удобного для проверки (рис. 13).

Bottom shell plating												
Plates												
Number of area	Position of area	Name of area										
5	80-90	Area of Tank No3										
No	Index of plate	Name of the plate	t_as built, mm	FLC	H-ShWC	NBC	BWEC	H/TC	t_round_calc, mm	DLS_calc	ratio	Local strength
1	PIBSh_1(PS)_EPP2	Flat keel	23	19.5	19.5	19.5	19.5	19.6	19.6	H/TC	1.17	Satisfied
2	PIBSh_2(PS)_EPP5	Bottom shell plate	22	18.1	17.5	18.7	17.9	19.6	19.6	H/TC	1.12	Satisfied
3	PIBSh_3(PS)_EPP4	Bottom shell plate	21	18.1	17.5	18.8	18.0	19.6	19.6	H/TC	1.07	Satisfied
4	PIBSh_4(PS)_EPP5	Bottom shell plate	20	18.3	17.5	18.9	18.1	19.6	19.6	H/TC	1.02	Satisfied
5	PIBSh_5(PS)_EPP4	Bottom shell plate	20	18.4	17.5	19.0	18.2	19.6	19.6	H/TC	1.02	Satisfied
6	PIBSh_6(PS)_EPP5	Bottom shell plate	20	18.5	17.5	19.1	18.2	19.6	19.6	H/TC	1.02	Satisfied
7	PIBSh_7(PS)_EPP5	Bottom shell plate	20	18.6	17.5	19.2	18.3	19.6	19.6	H/TC	1.02	Satisfied
8	PIBSh_8(PS)_EPP4	Bottom shell plate	20	18.7	17.5	19.3	18.4	19.6	19.6	H/TC	1.02	Satisfied
9	PIBSh_9(PS)_EPP3	Bottom shell plate	20	18.7	17.5	19.3	18.4	19.6	19.6	H/TC	1.02	Satisfied
10	PIBSh_10(PS)_EPP1	Bilge strake	20	18.9	17.5	18.9	18.6	18.4	18.9	NBC	1.06	Satisfied

Рис. 13 Фрагмент представления результатов проверочного расчета местной прочности

Результаты проверочного расчета визуально отображаются на конструктивной схеме поперечного сечения (рис. 14 и 15)

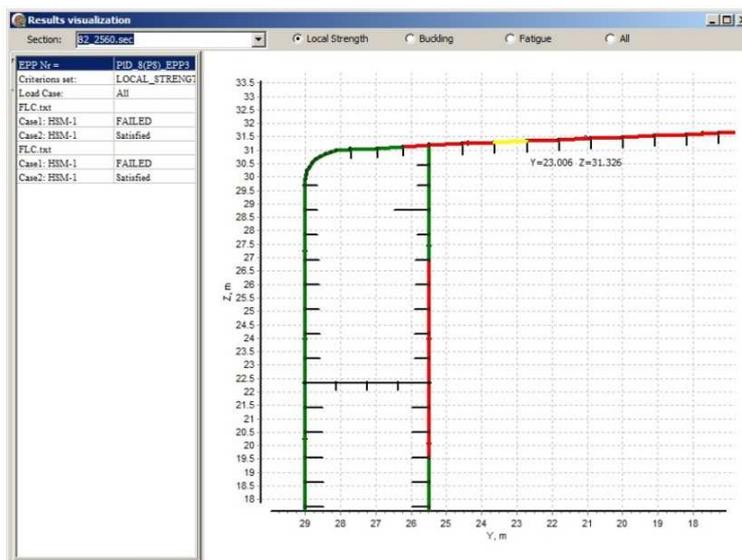


Рис. 14 Визуализация проверочного расчета листовых элементов/листа

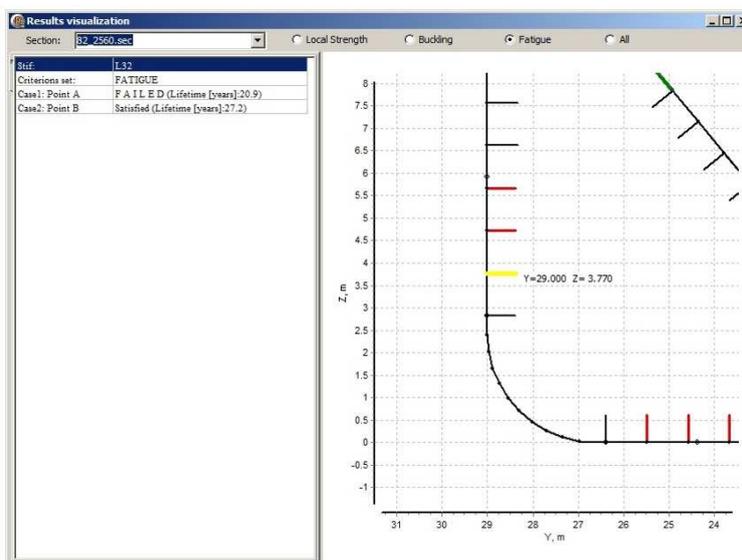


Рис. 15 Визуализация проверочного расчета балок основного набора

Проверочные расчеты местной прочности корпуса судна в соответствии с нормативами Общих правил МАКО реализуются путем последовательного запуска задач указанных в меню пункта "Hull local strength" (рис. 16):

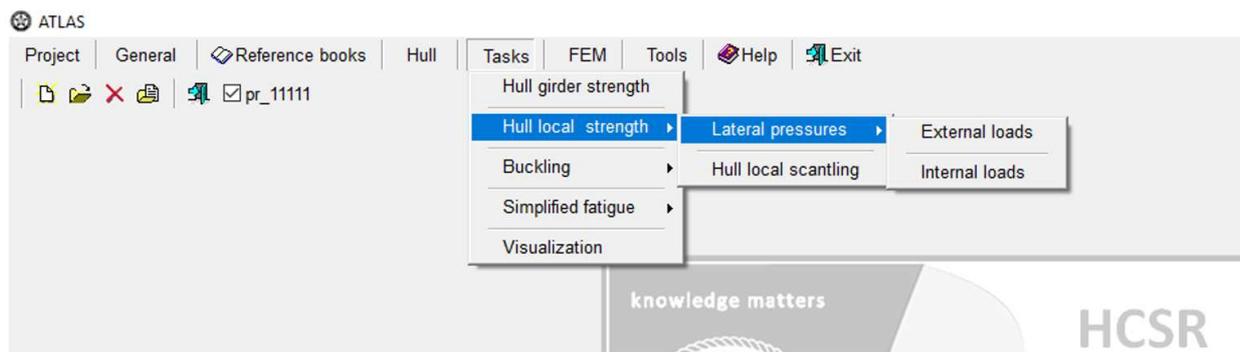


Рис. 16 Структура задачи "Hull local strength"

3.3 Проверочные расчеты устойчивости (Buckling)

Программный блок «Buckling», предназначен для выполнения проверочных расчетов устойчивости листовых элементов (ЕРР) и продольных балок основного набора корпусных конструкций, элементов гофрированных переборок, пиллерсов, книц (бракет) в рамках Prescriptive Requirements Общих правил МАКО. Требования к гибкости (Slenderness requirements) элементов конструкций (листовых элементов, элементов продольных и поперечных балок основного набора, элементов рамных балок и бракет/книц) также проверяются на этом этапе проверочного расчета. Проверка устойчивости элементов балок рамного набора в рамках Prescriptive Requirements не регламентируется Общими правилами МАКО. Она осуществляется в процессе МКЭ (FEM)-анализа.

Рассматриваемые сценарии потери устойчивости [5]¹ показаны на рис. 17 – 19.

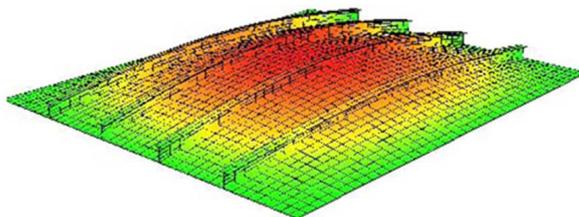


Рис. 17 Общая упругая потеря устойчивости подкрепленных панелей

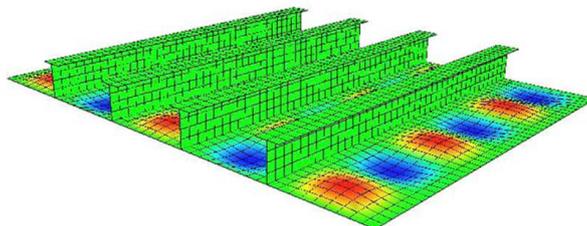


Рис. 18 Предельное состояние – предельная несущая способность пластин (листовых элементов)

¹Рисунки фрагментов моделей устойчивости заимствованы из материалов презентации МАКО: IACS. CSR Harmonization. Buckling. Industry Presentation, September 2012, Philippe Baumans & Åge Bøe Project Management Team (PMT).

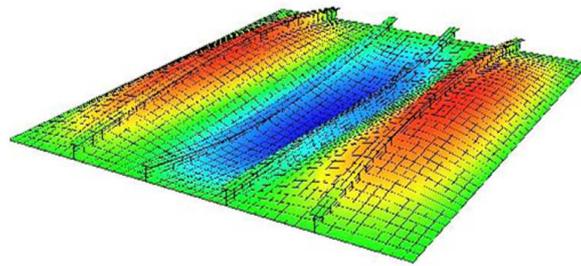


Рис. 19 Перераспределение напряжений в панели между листом и балкой

Предельное состояние (предельная несущая способность) продольных балок (Ultimate stiffener capacity) определяется с учетом совместного влияния остаточных технологических прогибов w_0 , прогибов от поперечной нагрузки w_1 (суммарный прогиб $w = w_0 + w_1$) и возможного кручения балки при изгибе (рис. 20).

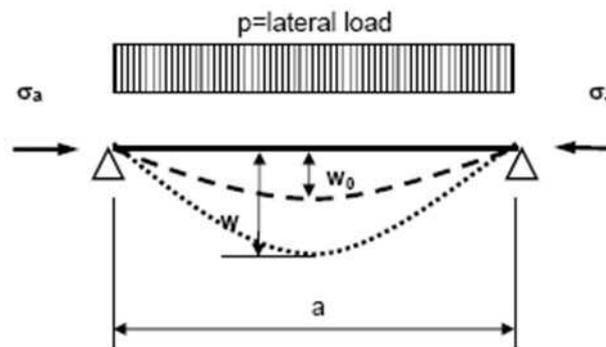


Рис. 20 Расчетная схема для определения предельной несущей способности продольных балок при расчетах устойчивости

Устойчивость оценивается по наиболее критичному сценарию. Ресурсы устойчивости определяются на основе нетто размеров конструктивных элементов: $t_{net} = t_{gr} - t_c$. Все сценарии потери устойчивости рассматриваются в рамках единого метода – так называемого Closed Form Method (CFM).

В общем случае предполагается многокомпонентная загрузка листовых элементов и продольных балок основного набора. Условие (критерий) устойчивости $\eta_{act} \leq \eta_{allowable}$, где $\eta_{act} = W_{act}/(W_u = 1/\gamma_c)$ – ресурс устойчивости (utilization factor) при комбинированном нагружении, определяемый как отношение действующих эквивалентных напряжений $W_{act} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \tau^2}$ (для листов) и $W_{act} = \sigma_a + \sigma_b + \sigma_w$ (для продольных балок) к эквивалентным напряжениям, соответствующим нормативу ресурса устойчивости $W_u = \sqrt{\sigma_{cx}^2 + \sigma_{cy}^2 + \tau_c^2}$ (для листов) и $W_u = R_{eH-S}/S$ (для продольных балок). Допускаемое значение ресурса устойчивости $\eta_{allowable} \leq 1,0$ зависит от типа конструкции и степени изменчивости действующей нагрузки (статическая (S)/статическая + динамическая (S + D)).

Отказ конструктивного элемента по причине потери устойчивости определяется путем пропорционального увеличения/уменьшения комбинации действующих напряжений до тех пор, пока не будет выполняться условие $\gamma W_{act}/W_u = 1$.

Вид комбинационных формул зависит от вида рассматриваемой модели (подкрепленная панель, листовая элемент, продольная балка с присоединенным пояском) или рассматриваемого сценария потери устойчивости, системы набора, типа листового элемента (плоский/криволинейный). В общем случае приходится одновременно учитывать несколько возможных предельных состояний, для каждого из которых должен быть подобран соответствующий коэффициент увеличения/уменьшения (мультипликатор) напряжения (stress multiplier factor) γ_{ci} . Мультипликатор напряжения при отказе принимается равным минимальному значению: $\gamma = \min(\gamma_{ci}, \gamma_{cj}, \gamma_{ck}, \dots)$ – i, j, k, \dots – номера предельных состояний по критерию устойчивости. Для определения значений γ_{ci} в общем случае приходится использовать поисковые процедуры. Предельным считается значение $\gamma = \gamma_c$. Наибольшее значение ресурса устойчивости (utilization factor) определяется как: $\eta = 1/\gamma_c$.

Подбор значения параметра γ_c выполняется два раза, поскольку каждая элементарная панель (EPP) должна удовлетворять критерию устойчивости при двух комбинациях нормальных и касательных напряжений от общего продольного изгиба:

Комбинация напряжений 1:

$$\sigma_x = 1,0\sigma_{hg}$$

$$\tau_{xy} = 0,7\tau_{hg}$$

Комбинация напряжений 2:

$$\sigma_x = 0,7\sigma_{hg}$$

$$\tau_{xy} = 1,0\tau_{hg}$$

Для продольных балок дополнительно нужно рассмотреть два случая потери устойчивости: $BFI = Pl$ – лист (Plate) инициирует потерю устойчивости балки; $BFI = St$ – балка (Stiffener) инициирует потерю устойчивости.

При расчете нагрузок от общего изгиба необходимо рассмотреть также все случаи динамического нагружения. Учитывая сказанное, видно, что объем проверочных расчетов устойчивости листовых элементов и балок набора в соответствии с требованиями Общих правил МАКО также имеет существенную трудоемкость.

Проверочные расчеты устойчивости конструкций корпуса судна в соответствии с нормативами гармонизированных Общих правил МАКО реализуются путем последовательного запуска задач указанных в меню пункта (рис. 21):

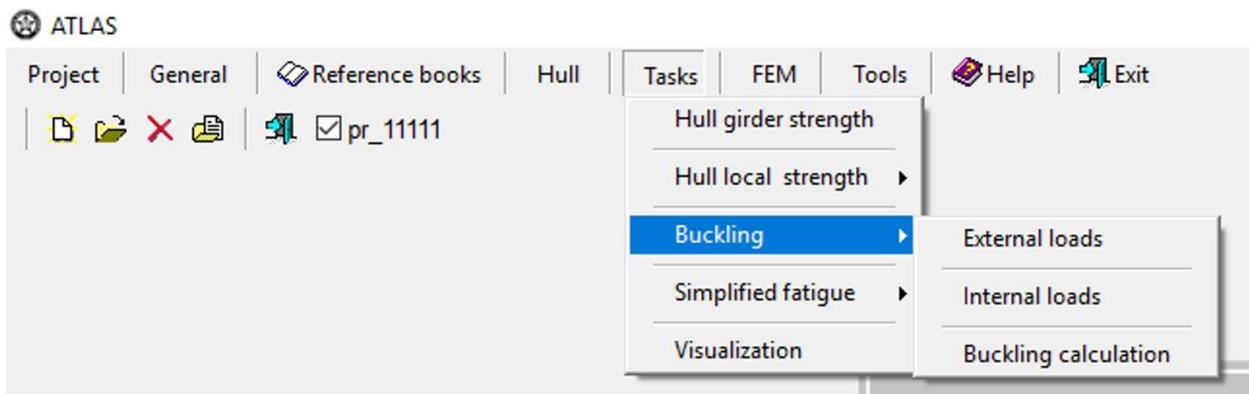


Рис. 21 Структура задачи "Buckling"

Результаты расчеты каждого элемента конструкции с информацией обо всех исходных параметрах сохраняются в рабочих файлах системы. Итоговые результаты представляются в виде файла в формате Microsoft Excel, удобном для проверки. Ниже приведены фрагменты файлов с результатами расчета листовых элементов (EPP) и продольных балок основного набора (Stiff) (рис. 22 и 23).

№	Index EPP	Name EPP	Combination 1			Combination 2		
			EDW LC	η act1	Buckling 100	EDW LC	η act2	Buckling 70
			1	PID_1(PS)_EPP1	Upper deck plate	HSM-1	1.074	Failed
4	PID_2(PS)_EPP1	Upper deck plate	HSM-1	1.079	Failed	HSM-1	0.762	Satisfied
8	PID_3(PS)_EPP1	Upper deck plate	HSM-1	1.095	Failed	HSM-1	0.800	Satisfied
12	PID_4(PS)_EPP1	Upper deck plate	HSM-1	1.105	Failed	HSM-1	0.833	Satisfied
16	PID_5(PS)_EPP1	Upper deck plate	HSM-1	1.056	Failed	HSM-1	0.740	Satisfied
20	PID_6(PS)_EPP1	Upper deck plate	HSM-1	1.053	Failed	HSM-1	0.743	Satisfied
25	PID_7(PS)_EPP1	Upper deck plate	HSM-1	1.058	Failed	HSM-1	0.772	Satisfied
30	PID_8(PS)_EPP1	Upper deck plate	HSM-1	1.072	Failed	HSM-1	0.818	Satisfied
34	PID_9(PS)_EPP1	Stringer plate	HSM-1	1.086	Failed	HSM-1	0.859	Satisfied
36	PID_10(PS)_EPP1	Stringer plate	HSM-1	1.905	Failed	HSM-1	1.587	Failed
37	PID_10(PS)_EPP2	Stringer plate	HSM-1	0.877	Satisfied	HSM-1	0.640	Satisfied
38	PID_10(PS)_EPP3	Stringer plate	HSM-1	0.876	Satisfied	HSM-1	0.645	Satisfied

Рис. 22 Фрагмент представления результатов проверочного расчета устойчивости листовых элементов (EPP)

№	Index Stiff	Name Stiff	Combination 1			Combination 2		
			EDW LC	η act1	Buckling 100	EDW LC	η act2	Buckling 70
			1	L1_BE1	Upper deck longitudinal	FSM-1	1.044	Failed
10	L10_BE1	Upper deck longitudinal	HSM-1	1.032	Failed	HSM-1	0.723	Satisfied
20	L21_BE1	Upper deck longitudinal	HSM-1	1.001	Failed	HSM-1	0.701	Satisfied
21	L22_BE1	Upper deck longitudinal	HSM-1	0.999	Satisfied	HSM-1	0.699	Satisfied
29	L31_BE1	Upper deck longitudinal	HSM-1	0.916	Satisfied	HSM-1	0.641	Satisfied

Рис. 23 Фрагмент представления результатов проверочного расчета устойчивости продольных балок основного набора (Stiff)

Результаты проверочных расчетов визуализируются на конструктивной схеме поперечного сечения (рис. 24).

3.4 Проверочные расчеты усталостной долговечности. Программный блок "Fatigue"

Программный блок "Fatigue", предназначен для выполнения проверочных расчетов усталостной долговечности узлов пересечения продольных балок основного набора с поперечными рамными связями на основе упрощенного метода определения напряжений – Simplified Stress Analysis. Этот блок обеспечивает решение следующих задач:

1. определение динамических и статических напряжений в горячих точках: от общего изгиба корпуса судна, от изгиба продольной балки под действием местных нагрузок, а также напряжений, обусловленных относительным перемещением опорных сечений продольных балок;

2. определение размахов усталостных напряжений для сварных соединений в горячих точках с учетом корректирующих факторов (с учетом влияния средних напряжений, толщины конструктивных элементов, эффекта искривления балок в районе углов люка);

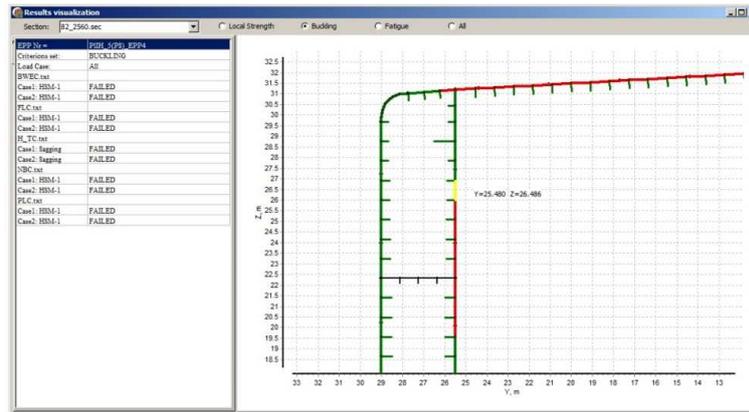


Рис.24 Визуализация проверочного расчета устойчивости листовых элементов/листа

3. определение коэффициентов концентрации напряжений, обусловленных конструктивными особенностями узла пересечения продольной балки с поперечной рамной связью: K_a – при действии осевой нагрузки от общего изгиба корпуса судна; K_b – при местном изгибе балки; K_n – при кручении в случае асимметрии поперечного сечения профиля;

4. определение усталостной долговечности сварного соединения:

- расчет элементарных усталостных повреждений;
- определение комбинированного и общего усталостного повреждения;
- расчет усталостной долговечности.

Определение общих и местных нагрузок, напряжений и размахов напряжений базируется на концепции эквивалентной расчетной волны (Equivalent Design Wave – EDW) (см. 3.2). При этом динамические случаи нагружения HSA и OSA не учитываются. Предполагается, что долгосрочное распределение размахов напряжений в элементах конструктивного узла соответствует двухпараметрическому распределению Вейбулла. Параметр формы распределения Вейбулла $\xi = 1$, а размах усталостных напряжений определяется при нормативной обеспеченности, равной 10^{-2} . Разработчики требований Общих правил МАКО считают, что при таком значении обеспеченности волновых нагрузок расчетная долговечность конструкций гораздо менее чувствительна к значениям параметра формы распределения Вейбулла (рис. 25) [4].

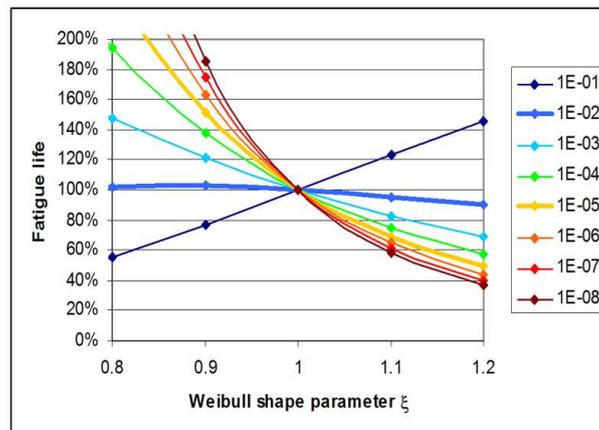


Рис. 25 К обоснованию нормативной обеспеченности размах усталостных напряжений

Расчет размахов напряжений производится для двух горячих точек: А и В, располагающихся, соответственно, в кормовом и носовом опорных сечениях расчетного пролета продольной балки (см., например, рис. 26).

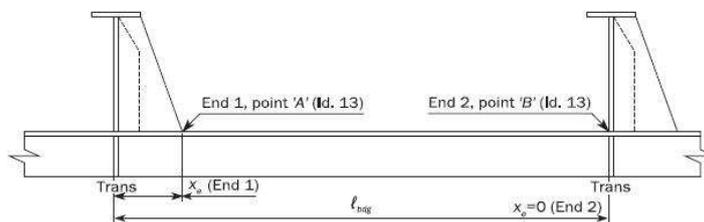


Рис. 26 Положение горячих точек для типовых узлов пересечения продольных балок с поперечными рамами

Оценка усталостной прочности конструкций при расчетах усталостной долговечности в Общих правилах МАКО базируется на стандартах типовых конструктивных решений, представленных в [2], Ch. 9, Sec. 6, содержащих также конкретные требования к конструкции узлов соединения элементов конструкций.

При оценке напряжений в конструкции используется концепция 50 % износа конструктивных элементов – t_{n50} – approach. Предполагается, что напряжение, инициирующее возникновение трещины в сварном соединении, – это напряжение в горячей точке (hot spot stress). Размахи напряжений, $\Delta\sigma_{FS}$, соответствующие усталостному повреждению, определяются с использованием упрощенного анализа напряженного состояния в узле пересечения балок с поперечными рамными связями с использованием аналитического метода, основанного на балочной теории.

Напряжения в горячих точках А и В получаются путем умножения номинальных напряжений на коэффициенты концентрации напряжений рассматриваемой детали согласно Table 4 в Ch. 9, Sec. 4, [5.2], содержащей данные по типовым узлам пересечения продольных балок с поперечными рамными связями [2].

Анализ усталостной прочности выполняется для ряда репрезентативных условий загрузки судна. Для нефтеналивных судов (танкеров) предполагается, что эксплуатация в полном грузу и в балласте составляет одинаковую часть, $\alpha(j)$ общего времени эксплуатации судна (табл. 1):

Таблица 1

Loading condition	$\alpha(j)$
Full load condition (Homogeneous)	0,5
Normal ballast condition	0,5

Доминирующие условия загрузки судов для навалочного груза (балкеров) и распределение долей времени в общей продолжительности эксплуатации представлены, соответственно, в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Тип судна	Full load conditions		Ballast conditions	
	Homogeneous	Alternate	Normal ballast	Heavy ballast
BC-A	+	+	+	+
BC-B	+	—	+	+
BC-C	—	—	+	+

Таблица 3

Длина судна, м	Loading conditions	$\alpha(j)$	
		BC-A	BC-B, BC-C
$L < 200$	Homogeneous	0,60	0,70
	Alternate	0,10	–
	Normal ballast	0,15	0,05
	Heavy ballast (1)	0,15	0,25
$L \geq 200$	Homogeneous	0,25	0,50
	Alternate	0,25	–
	Normal ballast	0,20	0,20
	Heavy ballast	0,30	0,30

(1) Для балкеров BC-B и BC-C, не оборудованных трюмом для тяжелого балласта, доля времени эксплуатации при нормальном балласте – 30 % и в тяжелом балласте – 0 %.

Размахи усталостных напряжений для каждого условия загрузки судна (j) – это размахи, определяемые для преобладающего случая динамического нагружения ($EDWLC$), как указано в Ch. 9, Sec. 1, [6.3], [3.1.2], см. [2]).

Расчет усталостной долговечности базируется на гипотезе линейного суммирования усталостных повреждений Майнера и следующих зависимостях:

- элементарное усталостное повреждение для любого (j -го) условия загрузки при работе в условиях отсутствия, $air(j)$ и наличия, $corr(j)$ коррозионной среды:

$$D_{E,(j)} = \alpha(j) \frac{N_D}{K_{2-}} \frac{(\Delta\sigma_{FS,(j)})^m}{(\ln N_R)^{m/\xi}} \mu(j) \Gamma(1 + m/\xi);$$

- комбинированное усталостное повреждение для (j -го) случая загрузки судна:

$$D(j) = D_{E,air(j)} \frac{T_D - T_C}{T_D} + D_{E,corr(j)} \frac{T_C}{T_D};$$

- суммарное усталостное повреждение для всех применимых условий загрузки судна n_{LC} :

$$D = \sum_{j=1}^{n_{LC}} D(j);$$

- усталостная долговечность определяется как

$$T_F = T_D / D_{air}, \text{ если } T_D / D_{air} \leq (T_D - T_C)$$

$$T_F = T_D - T_C + (T_D / D_{air} - T_D + T_C) \frac{D_{air}}{D_{corr}}, \text{ если } T_D / D_{air} > (T_D - T_C),$$

где $D_{air} = \sum_{j=1}^{n_{LC}} D_{E,air(j)}$ – суммарное усталостное повреждение в условиях отсутствия коррозионной среды для всех условий загрузки судна;

$D_{corr} = \sum_{j=1}^{n_{LC}} D_{E,corr(j)}$ – суммарное усталостное повреждение в условиях наличия коррозионной среды для всех условий загрузки судна.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМЫ "ATLAS"

В процессе разработки автоматизированной системы выполнялось тестирование (опытная эксплуатация) ПО применительно к двум проектам судов: супертанкер водоизмещением около 350 тыс. т. и крупнотоннажный балкер водоизмещением около 195 тыс. т., которые выбраны в качестве тестовых. По ним имеются соответствующие результаты проверочных расчетов других классификационных обществ – членов МАКО. Наличие такой информации значительно повысило эффективность отработки программного обеспечения автоматизированной системы "ATLAS". Тестирование было завершено с положительными результатами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены результаты разработки программного обеспечения первой версии автоматизированной системы "ATLAS", предназначенной для выполнения проверочных расчетов корпусных конструкций нефтеналивных двухкорпусных судов длиной более 150 м и судов для перевозки навалочных грузов длиной более 90 м на предмет соответствия prescriptive-требованиям Общих правил МАКО. Задачи, которые могут быть решены с использованием разработанного программного обеспечения, указаны в разд. 1.

В соответствии с договором по проекту "ATLAS" предусмотрено сопровождение опытной эксплуатации автоматизированной системы в течение одного года. В рамках этого срока предполагается произвести обстоятельное тестирование программного обеспечения на ряде проектов нефтеналивных и навалочных судов, в том числе и навалочных судов с одинарным бортом и поперечной системой набора борта, а также разработку ряда дополнительных программных модулей, расширяющих возможности системы "ATLAS".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тряскин В.Н., Рюмин С.Н., Кутейников М.А., Бойко М.С. Автоматизированная подготовка исходных данных для расчета общей и местной прочности судна в соответствии с требованиями общих правил МАКО при разработке программного обеспечения. Научно-технический сборник российского морского регистра судоходства. Издательство: Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, ISSN: 2223-7097, № 46/47, 2017, с. 112 – 118.
2. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, IACS, 01 Jan. 2018.
3. Манухин В.А., Тряскин В.Н. Сравнительный анализ расчетов предельной прочности танкеров и навалочных судов. Морские интеллектуальные технологии. № 2 (32), 2016, с. 9 – 13.
4. IACS. CSR Harmonization. Loads. Industry Presentation, September 2012, Philippe Baumans & Åge Bøe Project Management Team (PMT).
5. IACS. CSR Harmonization. Buckling. Industry Presentation, September 2012, Philippe Baumans & Åge Bøe Project Management Team (PMT)

REFERENCES

1. Tryaskin V.N., Rumin S.N., Kuteynikov M.A., Boyko M.S. Avtomatizirovannaya podgotovka ishodnykh dannykh dlya rascheta obschey i mestnoy prochnosti sudna v sootvetstvii s trebovaniyami Obschikh pravil MAKO pri razrabotke programmogo obespecheniya [Automatic input data preparation for global and local ship strength calculation in accordance with IACS Common Structural Rules as a software development task. Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping. No 52/53, 2017, p. 112 – 118.
2. Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, IACS, 01 Jan. 2018.

3. Manukhin V.A., Tryaskin V.N. Sravnitelny analiz raschetov predelnoy prochnosti tankerov i navalochnykh sudov. [Comparative analysis of calculations of ultimate strength of double hull oil tankers and bulk carriers]. Marine intellectual technologies. Scientific Journal No 2 (32), v.1, 2016, pp. 9 – 13.
4. IACS. CSR Harmonization. Loads. Industry Presentation, September 2012, Philippe Baumans & Åge Bøe Project Management Team (PMT).
5. IACS. CSR Harmonization. Buckling. Industry Presentation, September 2012, Philippe Baumans & Åge Bøe Project Management Team (PMT)



ПРОБЛЕМЫ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА

УДК 330

РИСКИ В СИСТЕМЕ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ МОРСКИХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ВЫСШИМИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМИ УЧРЕЖДЕНИЯМИ

И.И. Костылев, д-р техн. наук, профессор, Государственный университет морского и речного флота (СПбГУМРФ) им. адм. С.О. Макарова, Санкт-Петербург, e-mail: KostylevII@gumrf.ru

Е.Г. Орлова, канд. техн. наук, профессор, доцент, СПбГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, Санкт-Петербург, e-mail: kaf_tckvu@gumrf.ru

Б.И. Олейников, канд. техн. наук, профессор, СПбГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, Санкт-Петербург, e-mail: kaf_tckvu@gumrf.ru

Р.У. Тугушев, доцент, СПбГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, Санкт-Петербург, e-mail: kaf_tckvu@gumrf.ru

Целью представленной работы является определение наиболее значимых рисков и их причин в системе подготовки инженеров морских специальностей на уровне образовательного учреждения в системе высшей школы. Авторы исследования попытались выявить не только риски, вызывающие несоответствие выпускников требованиям нормативных документов, но и риски, предопределяющие несоответствия ожиданиям и требованиям обучающихся и работодателей. Область рассмотрения ограничена только внутренними рисками государственных образовательных учреждений ВПО. Из рассмотрения исключены внешние риски, а также административные и финансовые процессы деятельности образовательного учреждения. Значимость рисков оценивалась с точки зрения их влияния на соответствие компетенций выпускников требованиям, установленным нормативными документами, и на удовлетворенность качеством подготовки со стороны работодателей и самих выпускников. В итоге выделены наиболее значимые риски. Для каждого из них определены причины и предложены рекомендации по снижению степени риска. В результате анализа выявленных причин выделены четыре общие для наиболее существенных рисков.

Ключевые слова: *степень риска, идентификация рисков, морской специалист, качество выпускника, международные морские организации, система подготовки морских инженеров, образовательный процесс*

RISKS IN THE SYSTEM OF SEAFARERS' EDUCATION IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

I.I. Kostylev, DSc, professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, e-mail: KostylevII@gumrf.ru

E.G. Orlova, PhD, professor, associate professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, e-mail: kaf_tckvu@gumrf.ru

B.I. Oleynikov, PhD, professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, e-mail: kaf_tckvu@gumrf.ru

R.U. Tugushev, associate professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, e-mail: kaf_tckvu@gumrf.ru

The objective of the article presented is to define the most significant risks along with their causes in the training of marine engineers (seafarers) in higher school. The authors have attempted to identify both risks resulting in the graduates' failure to comply with regulatory documents requirements, and the risks predetermining discrepancies in expectations and requirements between those of the trainees' and their employers. The matter under consideration is exclusively limited to internal risks of the state higher vocational school. The research does not include external risks or administrative and financial processes in the educational establishment operation. The significance of risks has been assessed from the viewpoint of their effect on the graduates' competency compliance with requirements set in the regulatory documents, as well as in accordance with the employers' and graduates' satisfaction with the training quality. The most significant risks have eventually been identified, their causes have been defined, and recommendations on reducing the risk level have been offered. The review of identified causes allowed for the identification for common causes for the most significant risks.

Keywords: risk level, risk identification, maritime professional, graduate quality, international maritime organizations, marine engineers training system, educational process

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ВПО – высшее профессиональное образование

ОП – образовательная программа

ПДНВ – международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты

ПДП – преддипломная практика

ФГОС – федеральный государственный образовательный стандарт

Традиционно считается, что причиной 80 – 90 % всех аварий являются ошибки и халатность персонала. Глобальный центр корпоративных и специализированных рисков Allianz провел исследования основных причин 14 828 претензий по данным ведущих страховых компаний морского сектора за 2011 – 2016 гг., которые показали, что на пресловутый человеческий фактор приходится 75 % стоимости (\$1,6 млрд) всех убытков [1].

Очевидно, что полного искоренения несчастных случаев с людьми и катастроф морских судов в ближайшее время вряд ли достичь удастся.

Аварии и происшествия, обусловленные человеческим фактором, происходят из-за неудовлетворительного знания специалистами объектов своего заведования, правил технической эксплуатации, низкого уровня общей и профессиональной подготовки, низкой дисциплины и безответственности, неумения работать в команде.

В связи с этим Международное сообщество (Международная морская организация – ИМО, Международная ассоциация классификационных обществ, национальные организации стран флага и т.д.) предпринимало и предпринимает активные попытки для повышения уровня безопасности мореплавания путем принятия соответствующих конвенций, резолюций и пр.

В документах, издаваемых этими организациями, также уделяется большое внимание использованию тренажеров, различных модельных курсов для обучения специалистов с целью приобретения ими соответствующих знаний, компетенций и навыков работы [2, 3].

В России каждые пять лет внедряются новые образовательные стандарты, подробно описываются компетенции, которыми должен обладать выпускник, и критерии их оценки. Разрабатываемые профессиональные стандарты, подход на основе компетенций при подготовке нового ФГОС и закона по образованию предполагают повышение уровня подготовки выпускников. Однако качество молодых специалистов в общей массе не улучшается, а по оценке некоторых работодателей и морских специалистов с большим стажем работы – даже ухудшается. Настоящая статья – попытка разобраться в причинах сложившегося положения дел в системе подготовки инженеров морских специальностей.

Применительно к образовательной деятельности под качеством выпускника следует понимать степень его соответствия требованиям нормативных документов (ФГОС, Образовательной программы, Закона об образовании и др.), требованиям самих выпускников и требованиям работодателей, как основных потребителей результатов образовательной деятельности.

Качество выпускников любого университета в первую очередь зависит от качества студентов, зачисленных на 1-й курс, квалификации преподавательского состава и качества менеджмента ВУЗа.

Отобрать среди абитуриентов тех, кто имеет достаточный уровень подготовки для освоения образовательной программы, возможно лишь при условии наличия конкурса между абитуриентами. Конкурс, в свою очередь, зависит от привлекательности университета для выпускников школ и колледжей. Привлекательность университета в целом и конкретных специальностей, в частности, во многом определяется востребованностью выпускников ВУЗа и уровнем заработной платы, на которую они могут рассчитывать, выходя на рынок труда.

С другой стороны, чем выше качество подготовки специалистов, тем лучше репутация ВУЗа у работодателей и, следовательно, лучше перспективы трудоустройства выпускников.

Кроме того, повышение привлекательности ВУЗа способствует увеличению числа студентов, обучающихся за счет собственных средств.

Любое государственное образовательное учреждение функционирует в условиях ограниченности ресурсов. Идентификация и оценка рисков в образовательной деятельности позволяет выявить процессы, несоответствия в которых наиболее существенно влияют на качество подготовки специалистов и удовлетворенность потребителей (выпускников, работодателей, общества), и направить ресурсы на улучшение именно этих процессов с целью снижения вероятности возникновения неблагоприятных событий и уменьшения негативной значимости их последствий.

Образовательные учреждения, планирующие сертификацию своей системы менеджмента качества по стандарту ГОСТ Р ИСО 9001-2015, должны определить риски в процессах образовательной деятельности, произвести их оценку и разработать меры, пропорциональные возможному влиянию рисков на соответствие образовательной деятельности установленным требованиям [4]. Авторы надеются, что представленный материал будет полезен в этой работе заинтересованным ВУЗам.

На качество подготовки специалистов влияют как внутренние (по отношению к образовательному учреждению), так и внешние риски (недостаток финансирования со стороны государства, изменение законодательства, демографические кризисы и т.п.).

Естественно, существуют риски, характерные для любых образовательных учреждений ВПО. Однако помимо национальных требований к образовательной деятельности и компетенциям выпускников при подготовке инженеров морских специальностей имеются дополнительные международные требования, что влечет за собой специфические риски, не характерные для других технических ВУЗов РФ.

Авторы не ставили своей задачей идентификацию рисков в системе высшего образования РФ в целом, ограничив область рассмотрения только внутренними рисками в системе подготовки инженеров морских специальностей государственными образовательными учреждениями ВПО.

На сегодняшний день общепризнанный теоретический подход к проблеме управления рисками в сфере образования не существует, различаются также определения терминов. Применительно к образовательной деятельности будем далее пользоваться следующими терминами.

Риск – неблагоприятное событие, которое может произойти.

Значимость риска (З) – оценка степени влияния неблагоприятного события на результат процесса.

Вероятность риска (В) – мера возможности наступления события.

Степень риска (С) – произведение значимости на вероятность ($C = З \times В$).

1. ИДЕНТИФИКАЦИЯ РИСКОВ

Напомним, что качество выпускника – это степень соответствия характеристик молодого специалиста требованиям государства (заказчика образовательной услуги), международных организаций, требованиям работодателей и самих выпускников.

Требования со стороны государства сформулированы в ФГОС, требования международных морских организаций – в конвенциях ИМО, а вот требования обучающихся и работодателей нигде четко не обозначены, хотя справедливости ради следует отметить, что содержание профстандартов законодательно является прерогативой потребителей кадров.

Авторы исследования, опираясь на многолетний опыт работы в ВУЗах водного транспорта и ежегодное общение с бывшими выпускниками этих учебных заведений на курсах повышения квалификации командного состава экипажей судов, попытались выявить не только риски, влекущие несоответствие выпускников требованиям нормативных документов, но и риски, влекущие несоответствия ожиданиям и требованиям обучающихся и работодателей.

Для идентификации рисков в системе подготовки морских инженеров были выделены основные процессы, влияющие на качество подготовки специалистов и удовлетворенность потребителей (выпускников и работодателей) от профориентационной работы ВУЗа до дипломирования выпускников. Из рассмотрения исключены административные и финансовые процессы образовательного учреждения. Для каждого из выделенных процессов были идентифицированы риски и описаны их последствия. В общей сложности были описаны 45 рисков.

2. ОЦЕНКА РИСКОВ

Для оценки рисков применен метод экспертного опроса.

2.1 Критерии оценки

Значимость рисков оценивалась с точки зрения их влияния на соответствие компетенций выпускников требованиям, установленным нормативными документами, и на удовлетворенность качеством подготовки со стороны работодателей и самих выпускников.

Разработанные критерии оценки значимости рисков представлены в табл. 1.

Вероятность рисков также оценивалась по 10-балльной шкале.

Таблица 1

Критерии оценки значимости рисков

Последствия риска	Значимость (З)
Последствие риска, приводит к несоответствию знаний, навыков и умений большинства выпускников требованиям работодателей, ПДНВ, ФГОС, профессиональных стандартов	10
Последствие риска приводит к отсутствию некоторых компетенций у большинства выпускников	9
Последствие риска приводит к несоответствию компетенций некоторых выпускников требованиям работодателей, ПДНВ, ФГОС, профессиональных стандартов	8
Последствие риска приводит к отсутствию некоторых компетенций у некоторых выпускников	7
Последствие риска приводит к тому, что уровень развития некоторых компетенций у большинства выпускников оказывается ниже установленных требований	6
Последствие риска, приводит к тому, что уровень развития некоторых компетенций у некоторых выпускников оказывается ниже установленных требований	5
Наступление события приводит к снижению удовлетворенности выпускников качеством обучения	4
Наступление события приводит к снижению удовлетворенности обучающихся организацией учебного процесса	3
Наступление события приводит к неудобствам в процессе обучения или аттестации	2
Нет влияния на качество обучения и удовлетворенность заинтересованных сторон	1

2.2 Состав экспертов

В экспертной оценке рисков участвовали пять преподавателей Морской Академии ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, из них: один декан, один заведующий кафедрой, два профессора и один доцент.

Все эксперты имеют большой стаж преподавательской работы, преподают разные дисциплины на разных курсах обучения, как очной, так и заочной формы. Четверо экспертов выполняют функции руководителей дипломных проектов, двое из них имеют длительный опыт работы в качестве ректоров Морских учебных заведений. Один из экспертов имеет опыт работы в качестве старшего механика и механика-наставника.

Всем экспертам присвоен одинаковый весовой коэффициент, равный единице.

2.3. Результаты оценки

Степень риска (С) оценивалась, как произведение значимости (З) на вероятность (В).

К наиболее значимым рискам были отнесены риски со степенью риска (С) больше 37.

Из 45 идентифицированных рисков наиболее значимыми оказались десять рисков, которые представлены в табл. 2.

Степень согласованности мнений экспертов по совокупности рисков оценивалась коэффициентом конкордации Кендалла [8]:

$$W = \frac{12}{n^3 - n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k r_{ij} - \frac{n+1}{2} \right]^2,$$

где
 k – количество экспертов;
 n – количество оцененных рисков;
 r_{ij} – оценка степени i -го риска j -м экспертом.

Коэффициент конкордации составил 0,97 (максимальное значение –1), что свидетельствует о высокой степени согласованности мнений экспертов.

Для всех рисков со степенью риска (С) больше 37 были определены их причины и разработаны предложения, направленные на снижение степеней рисков (табл. 2).

Таблица 2

Наиболее значимые риски в системе подготовки инженеров морских специальностей

№ п.п.	Описание риска	Последствия риска	Степень риска $C = B \times 3$	Причина риска	Рекомендации по снижению степени риска
1	Низкий конкурс	Набор абитуриентов с низким уровнем знаний по программам среднего образования	40,25	Недостаточная привлекательность ВУЗа, недостаточная привлекательность специальности	Действия, направленные на увеличение конкурса: профориентационная работа в социальных сетях, привлечение курсантов и выпускников к работе с выпускниками школ
2	Недостаточная оснащенность аудиторий мультимедийной техникой.	Снижение качества обучения. Снижение удовлетворенности обучающихся организацией учебного процесса	37,75	Большое количество аудиторий. Недостаток ресурсов	Использование внебюджетных средств ВУЗа. Поиск спонсоров
3	Недостаточная оснащенность лабораторий реальными образцами судовых устройств, устаревшее лабораторное оборудование.	Отсутствие у обучающихся части компетенций. Отсутствие практических навыков управления и обслуживания современного судового оборудования и систем.	37,75	Высокая стоимость. Недостаток ресурсов	Использование внебюджетных средств ВУЗа. Поиск спонсоров. Приобретение судовых устройств, бывших в эксплуатации
4	Недостаточное количество рабочих мест на используемых тренажерах	Дополнительная нагрузка на преподавателей, снижение качества подготовки выпускников	47	Высокая стоимость. Недостаток ресурсов	Использование внебюджетных средств ВУЗа. Поиск спонсоров. Организация обучения по сменам, привлечение дополнительных преподавателей
5	Отсутствие организованных и контролируемых систем самоподготовки	Снижение уровня подготовки, академические задолженности	43,5	Сложившаяся практика	Разработка и внедрение типовых систем контроля самоподготовки
6	Недостаточность базовых знаний некоторых курсантов для освоения образовательных программ (ОП).	Отсутствие у обучающихся части компетенций. Академические задолженности.	56,25	Низкий конкурс	Действия, направленные на увеличение конкурса (см. п. 1) Увеличение набора студентов на 1-й курс с планированием выпуска 50-60 % от количества студентов, принятых на 1-й курс Публикация рейтингов курсантов (студентов) Выделение дополнительного времени для восстановления недостающих школьных знаний
7	Неспособность некоторых студентов освоить ОП.	Отсутствие у обучающихся части компетенций. Академические задолженности. Отчисление.	46	Прием студентов с недостаточным уровнем знаний	Создание подготовительных курсов для абитуриентов 3О
8	Отсутствие у студента возможности прибыть на сессию (для заочной формы обучения)	Отсутствие у обучающихся некоторых компетенций. Академические задолженности. Дополнительная нагрузка на преподавателей. Снижение качества подготовки выпускников.	44,75	Нахождение студента в рейсе в период сессии.	Установочные лекции. Рассылка студентам методических указаний и заданий заблаговременно. Организация дополнительных сессий

Продолжение табл. 2

№ п.п.	Описание риска	Последствия риска	Степень риска $C = B \times 3$	Причина риска	Рекомендации по снижению степени риска
9	Несамостоятельное выполнение студентами контрольных работ или курсовых проектов (работ)	Отсутствие необходимого уровня знаний	43,5	Неспособность выполнить задания самостоятельно. Множество предложений и их невысокая стоимость.	Вариативность заданий. Защита курсовых проектов
10	Отсутствие возможности выполнить в полном объеме требования программы практики	Невозможность получения документов о высшем образовании	37,5	Формальное отношение командного состава судна к практикантам. Отсутствие необходимого количества мест для прохождения практики.	Работа ВУЗа с судоходными компаниями. Доведение требований к организации плавательной практики до командного состава судна

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

По мнению авторов, наиболее значимые из выявленных рисков могут быть объединены в четыре группы по признаку сходных причин:

низкий конкурс среди абитуриентов, что вызвано демографическими причинами и падением популярности морских профессий. Поскольку Министерство транспорта и Росморречфлот заинтересованы в качестве специалистов, работающих на морском транспорте, то с их стороны целесообразно предпринять усилия по популяризации морских профессий, т.к. у отдельных подведомственных им ВУЗов недостаточно средств для массовой пропаганды.

Для конкретного образовательного учреждения в условиях конкуренции и борьбы за абитуриентов жизненно важно выделение ресурсов на профориентационную работу и внедрение современных методов работы с потенциальными абитуриентами;

неспособность некоторых студентов освоить ОП.

Эта проблема является прямым следствием низкого конкурса, а также связана со снижением качества подготовки в средних образовательных учреждениях.

Руководство ВУЗов и Министерство Транспорта не может повлиять на качество выпускников школ и колледжей, однако увеличение набора студентов на 1-й курс с планированием выпуска 50 – 60 % от количества принятых на 1-й курс, позволило бы мотивировать курсантов (студентов) к добросовестной учебе. Понимание, что только лучшая половина студентов получит диплом, стимулировало бы их не только к активной работе в аудитории, но и к самостоятельной работе. Со стороны ВУЗа разработка типовых систем контроля самоподготовки может помочь преподавателям контролировать самостоятельную работу студентов по изучаемым дисциплинам;

риски, вызванные недостаточным материально-техническим обеспечением образовательного процесса.

Оснащение аудиторий и учебных лабораторий современным оборудованием и обеспечение образовательного процесса тренажерами, отвечающими требованиям международных морских организаций, напрямую влияет на формирование у студентов практических навыков эксплуатации судового оборудования и систем и, следовательно, существенно влияет на способность выпускников выполнять свои функциональные обязанности на судне. Поэтому материально-техническое обеспечение образовательного процесса должно быть приоритетной задачей руководства морских образовательных учреждений;

риски, вызванные просчетами в организации учебного процесса.

К наиболее значимым в этой группе рисков относятся четыре риска:

- «Отсутствие организованных и контролируемых систем самоподготовки», «Несамостоятельное выполнение студентами контрольных работ или курсовых проектов (работ)».

По этим двум рискам на уровне образовательного учреждения могут быть предприняты меры, направленные как на снижение вероятности, так и на снижение значимости этих рисков (прежде всего путем совершенствования методического обеспечения учебного процесса и промежуточной аттестации);

- «Отсутствие у студента возможности прибыть на сессию (для заочной формы обучения)», «Отсутствие возможности выполнить в полном объеме требования программы практики».

Менеджмент ВУЗа не может повлиять на вероятность третьего риска и на значимость последнего из перечисленных рисков, следовательно, необходимо планировать действия по снижению значимости третьего риска (здесь могут быть использованы, как методические разработки, так и организационные мероприятия) и по уменьшению вероятности четвертого риска (работа с судоходными компаниями).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из результатов проведенного исследования можно заключить, что наиболее существенные риски имеют четыре основных причины:

- падение популярности морских профессий в условиях снижения общего количества выпускников средних образовательных учреждений при неизменном количестве студентов, принимаемых на 1-й курс;

- снижение качества подготовки выпускников средних образовательных учреждений;
- недостаточное материально-техническое обеспечение образовательного процесса;
- несовершенство организации и методического обеспечения учебного процесса.

Следовательно, усилия руководства морских образовательных учреждений должны быть направлены на устранение этих причин (т.е. снижение вероятности возникновения рисков там, где это возможно) или снижение значимости рисков (в тех случаях, когда повлиять на причину рисков на уровне менеджмента ВУЗа невозможно).

Настоящая статья – это «взгляд изнутри» непосредственных исполнителей процессов образовательной деятельности, которые из года в год наблюдают одни и те же проблемы. Авторы надеются, что представленное исследование поможет руководству морских образовательных учреждений в выборе приоритетов при планировании их деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мотрич В. В зоне риска балкеры, контейнеровозы и паромы. Морские вести России, № 15, 2017, с.12 –14.
2. Руководство по осуществлению положений Международного кодекса по управлению безопасностью (МКУБ). Российский Морской Регистр Судоходства, 2012, 30 с.
3. Руководство по формальной оценке безопасности (ФОб) для использования в процессе принятия решений в ИМО (MSC/Circ.1023-МЕРС/Circ.392 с поправками). - СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2011. 138 с.
4. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Национальный стандарт Российской Федерации «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь». Quality management systems. Fundamentals and vocabulary.
5. Новикова И.И. Управление рисками в деятельности высших учебных заведений Российской Федерации. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук. Москва, 2008, 24 с.
6. Костылев И.И., Мясников Ю.Н., Петухов В.А. Совершенствование подготовки судовых механиков – требование времени. Атомная стратегия. 2014г., с. 18 – 21.
7. Руководство по качеству ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова от 30.01.2018.
8. Циклопедия: <https://www.cyclowiki.org>

REFERENCES

1. Motrich V. V zone riska balkery, kontejnerovozy i paromy [Bulk cargo, container ships and ferries are within the risk envelope]. *Morskie Vesti Rossii* №15, 2017, pp.12-14. (In Russian)
2. Rukovodstvo po osushchestvleniyu polozhenij Mezhdunarodnogo kodeksa po upravleniyu bezopasnost'yu (MKUB) [Guidelines on the Implementation of the Regulations of the International Safety Management (ISM) Code]. Russian Maritime Register of Shipping, 2012, 30 p.
3. Rukovodstvo po formal'noj ocenke bezopasnosti (FOB) dlya ispol'zovaniya v processe prinyatiya reshenij v IMO (MSC/Circ.1023-MEPC/Circ.392 s popravkami) [Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process MSC/Circ 1023-MEPC/Circ.392]. SPb.: ZAO «CNIIMF», 2011. 138 p.
4. GOST R ISO 9001-2015. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii «Sistemy menedzhmenta kachestva. Osnovnye polozheniya i slovar'» [GOSTR ISO 9001-2015. Russian Federation National Standard “Quality Management Systems. Main Provisions and Glossary”].
5. Novikova I.I. Upravlenie riskami v deyatel'nosti vysshih uchebnyh zavedenij Rossijskoj Federacii. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata ehkonomicheskikh nauk [Risk management in the activities of higher education institutions of the Russian Federation. Synopsis of the Ph. D. of economic theses]. Moscow, 2008, 24 p.
6. Kostylev I.I., Myasnikov YU.N., Petuhov V.A. Sovershenstvovanie podgotovki sudovyh mekhanikov –trebovanie vremeni. Atomnaya strategiya [Improvement of Ship Engineering Training – Imperatives of the Time. Nuclear Strategy]. 2014, pp 18 – 21. (In Russian)
7. Rukovodstvo po kachestvu GUMRF im. adm. S.O.Makarova [The quality manual of GUMRF named after adm. S.O. Makarov] dated 30.01.2018.
8. Cyclopedia: <https://www.cyclowiki.org>.

ОБОЗРЕНИЕ: БЕЗЭКИПАЖНОЕ СУДОХОДСТВО

Российский морской регистр судоходства (РС, Регистр) пригласил специалистов научно-исследовательских центров, изготовителей судового оборудования и систем, других участников отрасли к обсуждению вопросов, связанных с развитием технологий безэкипажного судоходства – эта тема стала одной из ключевых на прошедших в конце марта в Главном управлении Регистра заседаниях секций Научно-технического совета РС (НТС) «Судовое радио- и навигационное оборудование» и «Электрооборудование и автоматизация судов».

Как рассказал начальник отдела электрического оборудования и автоматизации Владимир Борисович Викулин, актуальность этой проблематики для Регистра обусловлена стремительным развитием технических возможностей в отношении дистанционного и автоматического управления судами и технологическими процессами. Кроме того, в рамках Международной морской организации (ИМО) начиная с 2018 года ведется плановая работа по оценке международной нормативной базы (Regulatory Scoping Exercise – RSE) на предмет применимости требований



Заседание секции НТС «Судовое радио- и навигационное оборудование»

существующих Конвенций и Кодексов к морским автономным надводным судам (МАСС/МАНС) и выявления сфер развития требований к таким судам, для обеспечения их безопасной эксплуатации на рынке морских перевозок.

На уровне МАКО направление «Умные суда/Интеллектуальные суда/МАНС» также отнесено к стратегическим. Так, на 11-м заседании панели «Безопасность», прошедшем в марте этого года под председательством Регистра, подведены итоги анализа МАКО Главы II-2 «Конструкция – Противопожарная защита, обнаружение и тушение пожара» Международной конвенции СОЛАС, Международного кодекса по системам пожарной безопасности (FSS Code) и Международного кодекса по применению процедур испытания на огнестойкость (FTP Code) проведенного в рамках RSE.

Кроме того, по поручению Министерства транспорта Российской Федерации Регистр в настоящий момент участвует в реализации мероприятий «Дорожной карты» в рамках Национальной технологической инициативы по направлению «Маринет», основной задачей которой является поддержка перспективных технологий, в том числе безэкипажных судов и электронной навигации, путем совершенствования существующего законодательства и разработки новых национальных стандартов.

Выполнение научно-исследовательской работы по этой теме по заказу Регистра, запланированной на 2019 год, позволит разработать соответствующие предложения по дополнению и уточнению международной и национальной нормативной базы, а также актуализировать правила Регистра, в частности в отношении судового электрооборудования, автоматизации, средств радиосвязи и навигации, в соответствии с современными задачами развития отрасли», – отметил В.Б. Викулин.

Выступая на заседании НТС, участники секций и приглашенные специалисты рассказали о своих разработках в сфере безэкипажных судов. Так, начальник картографической службы ФБУ «Администрация «Волго-Балт» Вячеслав Александрович Бекряшев доложил о создании тестовой акватории, которая позволит обеспечить всестороннюю проверку разрабатываемых программно-аппаратных комплексов, информационно-аналитических сервисов в рамках глобальной концепции e-навигации, и также может быть использована для испытаний безэкипажных судов, как управляемых дистанционно, так и автоматических.

Директор Научно-образовательного центра «Беспилотные технологии на водном транспорте» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова Владимир Владимирович Каретников рассказал о ряде исследований, в ходе которых были разработаны система контроля мореходности судов, позволяющая удаленно оценивать управляемость и остойчивость судна в режиме реального времени, система маневрирования и безопасного расхождения судов и система дистанционного управления судном.

Директор по продвижению проектов АО «Кронштадт технологии» Виктор Владимирович Ефимов информировал о ходе пилотного проекта «БЭС-КФ» по созданию единой технологической платформы безэкипажного управления морскими судами коммерческого флота различного назначения, с помощью которой можно решать задачи по отработке алгоритмов такого управления, обучению специалистов морского флота работе с судами различной степени автономности, а также моделированию совместного использования традиционного и безэкипажного флотов.

Заместитель заведующего кафедрой корабельных систем управления по научной работе СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Андрей Григорьевич Шпекторов сообщил о достижениях университета в области разработки систем управления автономных беспилотных объектов.

ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЕЙ

1.1 Материал статьи должен являться оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, соответствовать профилю журнала. Он должен содержать информацию, подтверждающую актуальность и практическую значимость исследования, а также информацию о внедрении его результатов.

1.2 Авторы несут личную ответственность за то, что текст статьи не содержит материалов:

- рекламного характера;
- содержащих государственную тайну;
- публикация которых приведет к нарушению действующего законодательства РФ в сфере защиты информации и интеллектуальной собственности.

1.3 В тексте статьи может быть указан источник финансирования выполненных исследований.

1.4 К материалу должна быть приложена рецензия (отзыв) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному научному направлению. Формат рецензии доступен на интернет-сайте журнала (<http://www.rs-class.org/ru/register/research/ntsb/>). Статьи для аспирантов должны быть подписаны их научным руководителем.

1.5 Материалы для публикации в журнале предоставляются авторами на безвозмездной основе.

1.6 Общие требования к оформлению материалов.

1.6.1 Объем материалов в электронном виде должен составлять не более 20000 печатных знаков. В этот объем включаются таблицы, схемы, диаграммы и т. д., а также изображения в виде иллюстраций.

1.6.2 Статья должна содержать следующую информацию:

- заглавие на русском и английском языках, точно отражающее содержание статьи (не более 120 печатных знаков);
- фамилию, имя, отчество авторов приводятся полностью. Количество указанных авторов статьи не должно превышать 4 чел;
- сведения об авторах: по каждому из авторов должны быть приложены на русском и английском языках подробные сведения — ученые степень и звание, должность, место работы (принятое в уставе организации официальное название), город, телефон и адрес электронной почты автора;
- индекс УДК;
- аннотацию, в которой четко определены основные цели, задачи, содержание и результаты проведенного исследования, возможности его практического применения. Приводится на русском и английском языках. Объем от 100 до 250 слов;
- ключевые слова: 8 — 10 слов/словосочетаний, наиболее полно отражающих тему статьи. Недопустимо использование слов общего характера (например, — проблема, решение). Предоставляются на русском и английском языках (Key words). Ключевые слова по возможности не должны повторять термины заглавия и аннотации, а должны использовать термины из текста статьи и термины, определяющие предметную область, а также включать другие важные понятия, позволяющие облегчить и расширить возможности нахождения статьи средствами информационно-поисковой системы;
- основной текст статьи: общие принципы построения статьи могут варьироваться в зависимости от тематики и особенностей проведенного исследования. Рекомендуется выделять в тексте статьи постановку задачи, описание методов решения, анализ результатов и выводы. Если имеется перевод статьи на английский язык, желательно его представить;
- список литературы.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЕНИЮ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

2.1 Список литературы обязательно оформляется в двух вариантах: на кириллице и на латинице. Список литературы на кириллице приводится в конце статьи, оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003. Библиографические ссылки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008.

2.2 Кириллические названия в списке литературы транслитерируются на латиницу. Для автоматизации процесса транслитерации можно воспользоваться программным обеспечением, которое доступно по адресу www.translit.ru (в раскрывающемся списке «Варианты» выбрать вариант BGN).

2.3 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на статьи из журналов.

2.3.1 Для русскоязычных статей рекомендуются следующие схемы библиографической ссылки:

.1 полное описание статьи:

- авторы (транслитерация);
- заглавие статьи (транслитерация);
- [перевод заглавия статьи на английский язык в квадратных скобках];
- название русскоязычного источника (транслитерация);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;

.2 описание статьи только с переводом заглавия статьи на английский язык:

- авторы (транслитерация);
- перевод заглавия статьи на английский язык;
- название русскоязычного источника (транслитерация и курсив);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;
- указание на языке статьи (In Russ.) после описания статьи.

Предлагаемая схема:

Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. Title of Journal, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49 – 53.

Пр и м е р :

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.

Пр и м е р : Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred [Dynamics of multiphase media]*. Moscow, Nauka Publ., 1987. Pt. 1, 464 p.

2.5 Примеры описаний литературных источников в латинице.

2.5.1 Описание статьи из электронного журнала:

Kontorovich A.E., Korzhubaev A.G., Eder L.V. [Forecast of global energy supply: Techniques, quantitative assessments, and practical conclusions]. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2006, no. 5. (In Russ.) Available at: <http://www.vipstd.ru/gim/content/view/90/278/>. (accessed 22.05.2012).

2.5.2 Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. [Experimental study of the strength of joints "steelcomposite"]. *Trudy MGTU "Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh system"* [Proc. of the Bauman MSTU "Mathematical Modeling of Complex Technical Systems"], 2006, no. 593, pp. 125 – 130. (In Russian).

2.5.3 Описание материалов конференций:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi"* [Proc. 6th Int. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"]. Moscow, 2007, pp. 267 – 272. (In Russian).

Нежелательно включать только переводное название конференции, так как оно при попытке найти эти материалы идентифицируется с большим трудом.

2.5.4 Описание переводной книги:

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. *Kolebaniia v inzhernom dele*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.).

2.5.5 Описание Интернет-ресурса:

Kondrat'ev V.B. *Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost'* [The global pharmaceutical industry]. Available at: http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmacevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html. (accessed 23.06.2013).

2.5.6 Описание диссертации или автореферата диссертации:

Semenov V.I. *Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyi tor*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. And math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

2.5.7 Описание ГОСТ:

GOST 8.586.5-2005. *Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkosti i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroystv* [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 редакторе формул MS Word или символьным шрифтом. Вставки формул в виде картинок любого формата не допускаются. Размер кегля для формул – 12. Формулы, если их больше одной и если на них есть ссылки, нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках по правому краю полосы.

5.2 Таблицы, если их больше одной, должны быть пронумерованы. Таблицы должны иметь заголовок, если только они не следуют сразу за текстом, однозначно определяющим их содержание. Номер таблицы и заголовок размещаются над таблицей. Таблицы должны быть выполнены в MS Excel или MS Word и встроены в текст статьи. Вставка таблиц в виде картинок любого формата не допускается. Размер кегля для таблиц – 11.

5.3 Иллюстрации (рисунки), если их больше одной (одного), должны быть пронумерованы и иметь подпись (если только содержание иллюстрации не понятно однозначно из предшествующего текста). Графические и фотоматериалы должны быть представлены в форматах JPEG, TIFF, быть качественными и иметь разрешение не менее 300 dpi.

6. РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ СТАТЕЙ

6.1 Текст статьи в электронном виде следует направлять непосредственно в адрес главного редактора журнала (boyko.ms@rs-class.org) или через сервис подачи электронной статьи на официальном сайте Регистра.

6.2 Статьи, направляемые в журнал «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», проходят двухуровневую процедуру рецензирования. На первом этапе рецензирования автор направляет в редакцию текст статьи с приложением внешней рецензии (отзыва) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному направлению. На втором этапе текст статьи с отзывом направляется в отделы ГУР соответствующей специализации и независимым рецензентам. Также статья может быть представлена на соответствующей секции Научно-технического совета Регистра и передана ученым секретарем секции главному редактору журнала вместе с заключением о возможности опубликования. Компетентные рецензенты имеют все возможности свободно высказать мотивированные критические замечания относительно уровня и ясности изложения представленного материала, его соответствия профилю журнала, новизны и достоверности результатов. Решение о публикации статьи принимается главным редактором и редакционной коллегией журнала, с учетом всех имеющихся материалов и рецензий.

6.3 По результатам рецензирования статья может быть принята, отклонена или направлена автору на доработку.

6.4 Материалы, не утвержденные Редакционной коллегией к размещению в журнале, возвращаются автору с объяснением причины отказа в публикации.

6.5 Издание осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, соответствующих его тематике, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов и имеют в течение последних 3 лет публикации по тематике рецензируемой статьи. Рецензии хранятся в издательстве и в редакции издания в течение 5 лет.

6.6 Редакция издания обязуется направлять копии рецензий в Министерство образования и науки Российской Федерации при поступлении в редакцию издания соответствующего запроса.

В оформлении издания использовались графические материалы
из открытых источников сети интернет:

<http://gibka-rezka-svarka.ru/>
<http://ns.abunda.ru/84637-ogromnye-vinty-bolshix-korablej-27-foto.html>
<http://www.cloveritservices.com/Home.aspx>
www.fonstola.ru/
www.wallpapers.ru/
<http://www.ye42oester.nl/>
<http://miraziz.uz/>
<http://www.radioscanner.ru/>
<http://xn--24-dlcyxgbyj.xn--80asehdb/?p=4257>
<http://www.russiapost.su/archives/12268>
<http://utimenews.org/ru/>
<http://kmtп.ru/>
<http://www.efg-berlin.de/>
<http://maritimeforum.net/>
<http://korabley.net/>
<http://demoweb.hermosoft.com/efos/>

Фото для обложки журнала предоставлено Быковым Даниилом Евгеньевичем,
заместителем начальника управления качества ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

Российский морской регистр судоходства
Журнал
«Научно-технический сборник
Российского морского регистра судоходства»
вып. 54/55

Редакционная коллегия журнала

Редактор *А.В. Спиленко*
Компьютерная верстка *С.С. Лазарева*
Дизайн концепции *М.В. Батракова*

Подписано в печать 02.07.19. Формат 60 × 84/8
Усл. печ. л.: 12,3. Уч.-изд.л.: 12,1. Тираж 200

Российский морской регистр судоходства
191186, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 8
www.rs-class.org/ru/