



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

ХЛАДОСТОЙКИЕ СТАЛИ С ИНДЕКСОМ Arc
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И ИСПЫТАНИЯ 30

МОРСКИЕ ПОДВОДНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ
РАЗВИТИЕ ТРЕБОВАНИЙ РС 80

НАДЕЖНОСТЬ СУДОВЫХ СИСТЕМ
ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ 93

Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства, № 50/51, 2018

Научно-технический и информационно-аналитический журнал, издаётся 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., доц., ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова
М.А. Кутейников – д.т.н., начальник отдела конструкции корпуса и судовых устройств, ФАУ «Российский морской регистр судоходства»

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

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, 2018

Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping, № 50/51, 2018

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

Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Mikhail Kuteynikov – Doctor of Technical Science, Head of Hull Department, RS

Victor Malyshevskiy – Doctor of Technical Science, professor, Deputy Director General of Central Research Institute of Structural Materials "Prometey"

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, 2018

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

№ 50/51

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:

05.02.00 Машиностроение и машиноведение
05.08.00 Кораблестроение
05.16.00 Металлургия и материаловедение
05.22.00 Транспорт
25.00.00 Науки о Земле

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

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

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

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

The Research Bulletin publishes the articles on the main groups of specialties in accordance with the nomenclature of specialties of scientific workers:

05.02.00 Mechanical engineering
05.08.00 Shipbuilding
05.16.00 Metallurgy and materials technology
05.22.00 Transport
25.00.00 Earth science

Санкт-Петербург
2018

ОБРАЩЕНИЕ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА РС



УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

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

Традиционно в состав статей выпуска включаются результаты научно-исследовательских работ, выполняемых по заказу Регистра. В разделе «Нефтегазовые комплексы» представлена статья, подготовленная по результатам научной работы по развитию требований Регистра к конструктивному оформлению пересечения трасс подводных трубопроводов и силовых кабелей, а также выходов трубопроводов на береговой участок трассы. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью обеспечить современной нормативной базой функционирование системы подводных трубопроводов, в частности, в российском секторе Северного Каспия, услуги по классификации которой оказывает Регистр.

В 2018 году по заказу Регистра продолжает выполняться комплекс научно-исследовательских работ, направленных на совершенствование нормативных документов и повышение качества оказываемых услуг. В связи с развитием требований Общих правил МАКО по конструкции и прочности навалочных и нефтеналивных судов проводится работа по совершенствованию соответствующего прикладного программного

обеспечения. В настоящее время в практику Регистра внедрен программный комплекс ATLAS, позволяющий осуществить проверку соответствия конструкции Общим правилам в части требований как к «предварительным расчетам» (prescriptive), так и «проверочным расчетам» (design verification) с применением метода конечных элементов.

Выполняется научная работа, направленная на развитие требований Регистра к вентильным генераторным агрегатам, работающим с переменной частотой вращения, которые в настоящее время применяются на целом ряде новых судов, проектируемых и строящихся на класс Регистра. Применение таких агрегатов может способствовать снижению расхода топлива и масла, повысить надежность работы и ресурс приводных и главных двигателей, чем обусловлена актуальность выполняемой работы.

В 2018 году подписан контракт на выполнение по заказу Регистра научной работы, целью которой является разработка предложений по совершенствованию требований к выбору сварочных материалов и технологическим процессам сварки корпусных конструкций, изготовленных из высокопрочной стали и работающих в условиях низких температур. Актуальность этой работы подтверждается широким применением высокопрочных сталей для конструкций современных судов ледового плавания и, как следствие, необходимостью повышения качества сварных соединений и снижения риска появления дефектов сварных соединений на этапе изготовления блоков секций.

Также следует отметить инициированную в 2018 году научно-исследовательскую работу по разработке проекта новой редакции требований Регистра к конструкции и прочности корпуса высокоскоростных судов. Ее актуальность обусловлена появлением в последние годы ряда высокоскоростных судов новых архитектурно-конструктивных типов и существенным развитием методик проектирования корпуса, технологии изготовления, развитием современных конструкционных материалов. Учет современных достижений в области проектирования высокоскоростных судов в нормативных документах Регистра будет способствовать повышению привлекательности нормативной базы и услуг Регистра для клиентов.

Для ознакомления с промежуточными и окончательными результатами научно-исследовательских работ Регистр регулярно проводит заседания соответствующих секций Научно-технического совета, на которые приглашаются представители ведущих научных, проектных и учебных организаций, судовладельцы, производители судового оборудования, представители судостроительных верфей. По результатам каждой из выполненных работ публикуются статьи в научный журнал Регистра, организуются выступления на специализированных отраслевых семинарах и конференциях. Таким образом, для всех заинтересованных организаций судостроительной промышленности создаются условия для ознакомления с техническим обоснованием новых требований, обеспечивается возможность внесения предложений по их корректировке.

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

ОБРАЩЕНИЕ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Представляя новый выпуск журнала «Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства», обозначим несколько аспектов, характеризующих современное состояние и перспективы развития издания.

Следует отметить, что на страницах журнала выполняется регулярная публикация не только научных статей, подготовленных представителями научных, учебных организаций, судостроительных заводов и производителей оборудования, но и авторскими коллективами, включающими сотрудников Регистра. В новом выпуске журнала в разделе «Материалы и сварка» опубликована статья, посвященная обоснованию выбора параметров технологического процесса деформационного упрочнения зоны лазерного воздействия чугунных деталей СЭУ. В этом же разделе также представлена статья, посвященная характеристикам работоспособности хладостойких сталей с индексом "Arc". В разделе «Электрооборудование» публикуется статья, подготовленная авторским коллективом специалистов Регистра и посвященная вопросам оценки несинусоидальности напряжения судовых электростанции и сопоставлению требований существующих нормативных документов.

Активное взаимодействие с авторами статей позволяет формировать каждый выпуск журнала таким образом, чтобы спектр тематик был достаточно широким и охватывал по возможности наибольшее количество аспектов, характеризующих безопасность мореплавания и охрану окружающей среды. При формировании состава статей Редакционная коллегия журнала ставит цель не ограничиваться публикациями статей только по тематикам, соответствующим группам научных специальностей, по которым журнал входит в перечень ВАК. Широкий охват тематик, качественное рецензирование поступающих материалов, расширение географии и состава рецензентов являются приоритетами работы Редакционной коллегии.

Секции Научно-технического совета Регистра также активно участвуют в обсуждении, рецензировании и направлении статей для публикации в журнале. Особо следует отметить деятельность секций «Прочность и конструкция корпусов судов и плавучих сооружений», «Электрооборудование судов и автоматизация», «Морские нефтегазовые сооружения», «Мореходные качества судов»: статьи по данным направлениям регулярно публикуются на страницах журнала, в том числе в настоящем выпуске журнала.

Оперативное взаимодействие с Регистром по вопросам участия в заседаниях секций Научно-технического совета обеспечивается с помощью раздела «Научно-исследовательская работа» на официальном сайте Регистра, где также предусмотрена электронная форма подачи статей для очередного выпуска журнала. Статьи, прошедшие все предусмотренные этапы рецензирования и отработки замечаний, принимаются к публикации на безвозмездной основе.



М.С. Бойко
Главный редактор, к.т.н.
ФГУ «Российский морской регистр судоходства»



СОДЕРЖАНИЕ

<i>Пальников К.Г.</i> Обращение Генерального директора РС	2
<i>K.G. Palmnikov</i> RS Director General address	
<i>Бойко М.С.</i> Обращение главного редактора.	3
<i>M.S. Boyko</i> Editor-in-Chief address	
БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	
MARITIME SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION	
<i>Петров А.А., Черейский И.З., Идрисова С.А.</i> Технические аспекты разработки Наставления по эксплуатации судна в полярных водах и анализ необходимости контроля его содержания	6
<i>A.A. Petrov, I.Z. Chereysky, S.A. Idrisova</i> Technical aspects of the Polar Water Operation Manual development and the assessment of the need to control its content	
ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ	
STRENGTH OF SHIPS AND FLOATING FACILITIES	
<i>Емельянов М.Д.</i> Ремонт осмотических повреждений наружной обшивки из стеклопластика	14
<i>M.D. Emelyanov</i> Repair of osmotic damage to the fiberglass outer shell plating	
МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА	
MATERIALS AND WELDING	
<i>Кулешов И.И., Ходаковский В.М.</i> Статистические параметры выходных характеристик технологических режимов деформационного упрочнения зоны лазерного воздействия чугуновых деталей судовых энергетических установок	22
<i>I.I. Kuleshov, V.M. Khodakosky</i> Statistical parameters of the output characteristics of process conditions for strain hardening zone of laser treatment of cast iron parts in ship power plants	
<i>Сыч О.В., Хлусова Е.И., Гусев М.А., Юрков М.Е.</i> Характеристики работоспособности новых хладостойких сталей с индексом "Arc" для применения в Арктике	30
<i>O.V. Sych, E.I. Khlusova, M.A. Gusev, M.E. Yurkov</i> Performance characteristics of new cold-resistant "Arc"-indexed steels for application in the Arctic	
<i>Филин В.Ю., Артемьев Д.М., Гусев М.А., Ларионов А.В.</i> Испытания падающим грузом материалов подводных трубопроводов и проката "Arc"-сталей.	41
<i>V.Yu. Filin, D.M. Artemyev, M.A. Gusev, A.V. Larionov</i> Drop weight tear test for materials of subsea pipelines and "Arc"-steel rolled products	
МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ	
MECHANICAL INSTALLATIONS AND PROPULSION	
<i>Румб В.К.</i> Имитационное прогнозирование прочности и долговечности валопроводов ледоколов и судов ледового плавания	53
<i>V.K. Rumb</i> Simulation prediction of the strength and durability of shaftings for icebreakers and ice-going ships	

**ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ
ELECTRICAL EQUIPMENT**

Викулин В.Б., Устинов А.А. Некоторые вопросы оценки несинусоидальности напряжения судовой электростанции 63

V.B. Vikulin, A.A. Ustinov Some issues of voltage nonsinusoidality evaluation in shipboard electrical power system

Пехотиков В.А., Рябиков А.И., Назаров А.А., Грузинова О.И. Профилактика загораний корабельного электрооборудования на основе современных методов тепловизионной диагностики 70

V.A. Pekhotikov, A.I. Ryabikov, A.A. Nazarov, O.I. Gruzinova Fire prevention in ship electrical equipment on the basis of modern thermal imaging methods

Токарев Л.Н., Макаров Д.А. Безопасность плавания судов с электродвижением 74
L.N. Tokarev, D.A. Makarov Navigation safety of ships with electric propulsion

**НЕФТЕГАЗОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ
OIL AND GAS FACILITIES**

Лопин А.И., Субботин А.В. Разработка проекта требований Правил Регистра к конструктивному оформлению пересечения трасс подводных трубопроводов и силовых кабелей, а также выходов трубопроводов на береговой участок трассы 80

A.I. Lapin, A.V. Subbotin Development of the draft Register Rules requirements to the design of crossing between subsea pipelines and electric cables and pipeline landfalls to the onshore section of the route

Муравьева Л.В. Оценка сейсмостойкости крановых узлов заглубленных морских трубопроводов 87
L.V. Muravyeva Seismic stability assessment of block valve stations of buried subsea pipelines

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION TECHNOLOGY**

Равин А.А., Максимова М.А. Имитационное моделирование отказов судовой автоматизированной гидравлической системы 93

A.A. Ravin, M.A. Maksimova Simulation modeling of the ship automated hydraulic system failures

Кремлева Л.В., Киселева А.Е. Моделирование технологических процессов погрузки крупногабаритного оборудования строящихся судов 97

L.V. Kremleva, A.E. Kiseleva Loading process modeling for large-scale equipment of ships under construction

Богданов В.И. Внедрение безбумажных технологий в АО «ПО «СЕВМАШ» 103
V.I. Bogdanov Implementation of paperless technologies at JSC PO "SEVMASH"

Правила предоставления статей 108



БЕЗОПАСНОСТЬ МОРЕПЛАВАНИЯ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 629.12.004; 656.6.08; 341.225.5

ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ НАСТАВЛЕНИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДНА В ПОЛЯРНЫХ ВОДАХ И АНАЛИЗ НЕОБХОДИМОСТИ КОНТРОЛЯ ЕГО СОДЕРЖАНИЯ

А.А. Петров, Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота (АО «ЦНИИМФ»), Санкт-Петербург, тел.: +7 (812) 271-12-67, e-mail: Petrov25@cniimf.ru

И.З. Черейский, АО «ЦНИИМФ»), Санкт-Петербург, тел.: +7 (812) 274-47-52,
e-mail: ChereyskiyIZ@cniimf.ru

С.А. Идрисова, студент, ФГБОУ ВО «СПбГМТУ»), Санкт-Петербург,
e-mail: sabina22idrissova@gmail.com

На основе структуры и требований Международного кодекса для судов, эксплуатирующихся в полярных водах, проанализированы необходимость и актуальность детальной разработки технического документа «Наставление по эксплуатации в полярных водах» (НЭПВ). Приведен ряд разделов НЭПВ и их краткое содержание, требующие по результатам оценки текущего состояния навигационной обстановки и эксплуатационных ограничений судна тщательного инженерного анализа, основная сложность которого заключается в комплексном учете внешних условий и конструктивных особенностей судна. Сделан вывод о том, что, вследствие сложности адекватной оценки получаемых результатов и предоставляемых указаний судовладельцам, в перспективе целесообразно предусмотреть процедуры контроля содержания НЭПВ и достоверности приведенных в нем сведений.

Ключевые слова: Наставление по эксплуатации судна в полярных водах, НЭПВ, Северный морской путь, допускаемые режимы движения, ледопроездимость, полярный класс, безопасность судоходства

TECHNICAL ASPECTS OF THE POLAR WATER OPERATIONAL MANUAL DEVELOPMENT AND THE ASSESSMENT OF THE NEED TO CONTROL ITS CONTENT

A.A. Petrov, Central Marine Research and Design Institute, St. Petersburg, tel.: +7 (812) 271-12-67,
e-mail: Petrov25@cniimf.ru

I.Z. Chereysky, Central Marine Research and Design Institute, St. Petersburg, tel.: +7 (812) 274-47-52,
e-mail: ChereyskiyIZ@cniimf.ru

S.A. Idrisova, graduate student, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg,
e-mail: sabina22idrissova@gmail.com

The article, based on the structure and requirements of the International Code for Ships Operating in Polar Waters, contains relevance and applicability of elaboration analysis of the technical document "Polar Water Operational Manual" (PWOM). The article lists series of sections from the PWOM and their brief content that require, based on the assessment of the current state of the navigation conditions and operating restrictions of the ship, a thorough engineering analysis, the complexity of which lies in the reliability and availability of the provided initial information and the necessity of joint consideration of external conditions and a ship's structural particulars. Due to the complexity of an adequate evaluation of the obtained results and the provided guidance to shipowners, in the long term perspective, it is reasonable to develop the procedures for verification of PWOM content and reliability of the submitted information.

Keywords: Polar Water Operational Manual, PWOM, Northern Sea Route, safe operating regimes, ice trafficability, polar class, safety of navigation

ВВЕДЕНИЕ

Анализ ряда документов стратегического планирования РФ показывает, что в период 2020 – 2030 гг. будет наблюдаться стабильный рост разведки и освоения нефтегазовых месторождений на арктическом шельфе с достаточно надежным долгосрочным прогнозом [1]. Помимо привлекательности существенного ресурсного потенциала арктического региона трассы арктических морей и Северного морского пути (СМП) представляют большой интерес как для отечественных, так и для зарубежных грузоперевозчиков, что делает их на сегодняшний день достаточно быстро развивающимся инфраструктурным объектом судоходства. Это, в свою очередь, выдвигает первоочередную необходимость расширения соответствующего нормативного обеспечения судоходной деятельности в регионе, прежде всего, с точки зрения безопасности и экологии. Этой цели отвечают вступивший в силу Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс) [2] и Руководство по применению положений Полярного кодекса [3].

Достаточно подробно структура и требования Полярного кодекса рассмотрены в работах [4 – 6]. В дополнение к конструктивным, эксплуатационным, организационно-техническим мероприятиям и иным требованиям, предъявляемым к судам, работающим за полярным кругом, Полярный кодекс в обязательном порядке предусматривает наличие на судне технического документа «Наставление по эксплуатации судна в полярных водах» (НЭПВ), примерное содержание которого приведено в приложении 2 к [2]. Кроме того, с 10.01.2018 г. в перечень документов, предоставляемых в Администрацию СМП в составе заявления на плавание судна в акватории СМП, включено Свидетельство судна полярного плавания (ССПП), ф. 2.1.29 [7], выдаваемое, согласно [3] по результатам освидетельствования судна подразделением РС после предоставления ряда технической документации по судну, в том числе НЭПВ. Однако, несмотря на то, что наличие НЭПВ обязательно, ни одним нормативным документом не предусмотрен контроль за его содержанием и достоверностью приведенных в нем сведений, что может отрицательно сказаться на безопасности эксплуатации судна, поскольку помимо общей информации, такой как перечень допущенного оборудования, характеристики судовых систем и т.д., которая может быть внесена в НЭПВ экипажем, рассматриваемый документ должен содержать ряд разделов, данные для которых могут быть получены только в результате инженерного анализа, выполненного на основании соответствующих расчетов, трудоемкость и сложность которых рассмотрена ниже.

1. РЕКОМЕНДАЦИИ ОПЕРАТОРУ ПО БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ (РАЗД. 1, ГЛ. 1, П. 1.1)

НЭПВ должно определить средства для принятия решения о том, превышает ли ледовая обстановка расчетные пределы возможностей судна, с учетом эксплуатационных ограничений, указанных в ССПП. Для этих целей может использоваться система поддержки в принятии решений, например, Система арктических ледовых режимов для судоходства Канады – Arctic Ice Regime Shipping System (AIRSS), и/или российская система Ледовых сертификатов (Ледовых паспортов).

Применяя AIRSS, при переходе от оценки состояния ледяного покрова к оценке условий ледового плавания для отдельно взятой ледовой категории судна, используется особый интегральный показатель состояния ледяного покрова – ледовый критерий IN ("Ice Numeral" или "Ice Decision Numeral") [8].

Основным источником данных для оценки безопасности мореплавания служат декадные карты ледовой обстановки (рис. 1), где характеристики ледового режима представлены в виде овала и соответствующих цифр. К примеру, на рис. 1 в овале первая цифра (9) указывает на общую сплоченность льда, равную 9/10, что соответствует очень сплоченному льду и 1/10 – чистой воде. Во второй строке указана частная сплоченность льда цифрой (5), что означает наличие ледового образования сплоченностью 5/10 и следующая за ней цифра (4) указывает на наличие ледового образования сплоченностью 4/10. В третьей строке указан возраст ледовых образований (тип льда согласно коду Всемирной метеорологической организации): цифра (8•) это двухлетний лед первой стадии 5/10 сплоченности и цифра (1•) однолетний лед средней толщины 4/10 сплоченности [8].

Если в результате величина ледового критерия получается меньше нуля, то считается, что судно не может выполнять плавание в таких ледовых условиях.

Ледовый критерий (IN) для конкретного ледового режима в любой зоне контроля безопасности представляет собой сумму сплоченностей в десятых долях каждого типа льда и ледового множителя, определяемого как:

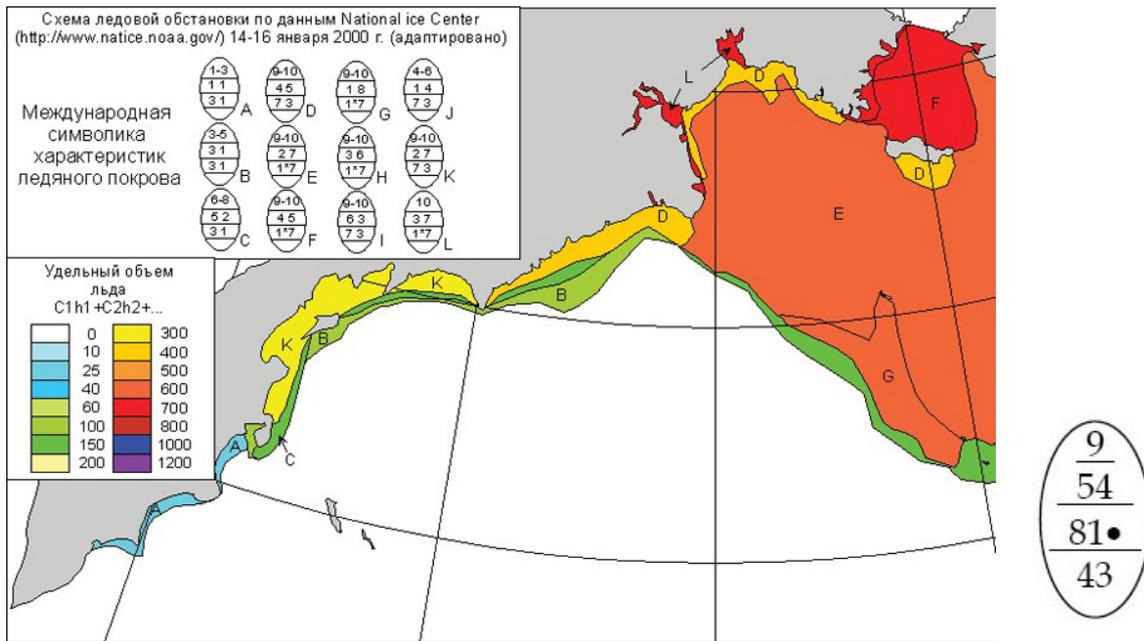


Рис. 1 Пример картосхемы ледовой обстановки для второй декады января в наиболее суровый сезон 1999/2000 гг. [9]

$$IN = \sum_i C_i IM_i \quad (1)$$

где C_i – частная концентрация (сплонность) i -го типа льда в десятых долях (0..10);
 IM – ледовый множитель IM (ice multiplier) для заданного i -го типа льда.

Алгоритм расчета IN по системе AIRSS приведен в [8] и [10]. Важно подчеркнуть, что результаты расчета IN зависят от достоверности сведений о фактической ледовой обстановке, данные о которой не всегда могут быть получены из декадных картосхем, а также от квалификации специалиста, выполняющего расчет, который, согласно [8] и [10], зачастую является нетривиальной инженерной задачей.

Вариантом альтернативы системе AIRSS является российская система Ледовых паспортов, одно из главных преимуществ которой заключается в возможности предоставления капитану рекомендаций по реализации технического потенциала судна в сложных ситуациях ледового плавания с учетом его фактического технического состояния и практики мореплавания [11] с сохранением требуемого уровня безопасности. Кроме того, такой Ледовый паспорт дает четкие критерии безопасного движения судна как самостоятельно в битом льду, так и в канале за ледоколом с одновременным определением минимальной безопасной дистанции. Ледовый паспорт состоит, по меньшей мере, из следующих разделов [12]:

1. Характеристика и учет ледовых условий в районах эксплуатации судна;
2. Перечень расчетных режимов взаимодействия корпуса судна со льдом;
3. Расчет допустимых скоростей хода судна в различных ледовых условиях;
4. Оценка безопасных дистанций движения судна под проводкой ледокола;
5. Расчет прочности бортовых конструкций во всем диапазоне допускаемых нагрузок;
6. Общие выводы с рекомендациями по возможным ограничениям для обеспечения минимизации рисков.

Наиболее эффективным инструментом, позволяющим всесторонне охватить перечисленные выше разделы применительно к НЭПВ, является нормативный документ (НД) Регистра «Методические рекомендации по выполнению допустимых режимов движения судна во льдах» [13]. Однако, несмотря на то, что этот НД содержит законченные алгоритмы всех необходимых расчетов, их выполнение в оперативно-практическом аспекте связано с рядом трудностей. Например, для каждого расчета прочности конструкции корпуса учет различных значений толщины льда и размеров льдин на весь период навигации дает большой разброс физико-механических характеристик льда. Это обстоятельство превращает задачу в мультипараметрическую, что приводит к неизбежным трудностям в ее практической реализации. Кроме того, в распоряжении специалиста, выполняющего расчет, не всегда имеются надежные исходные данные по ледовым условиям в предполагаемом районе эксплуатации, для чего в НД предусмотрены некоторые

полуэмпирические методы, применимость которых остается на усмотрение специалиста, или в отдельных случаях согласуется с Регистром.

Аналогичная проблема имеет место и при определении минимальной безопасной дистанции. Характеристикой сопротивления движению судна в канале является суммарная сила сопротивления R_{Σ} , определяемая по формуле (2):

$$R_{\Sigma} = R_W + R_{ice} \quad (2)$$

где $R_W = c_W Fr^2$ – гидродинамическое сопротивление на чистой воде, Н;
 $R_{ice} = R_{iceDirect} + c1_{ice} Fr + c2_{ice} Fr^2$ – ледовое сопротивление, Н;
 $R_{iceDirect}$ – «прямое» ледовое сопротивление, не зависящее от скорости хода, Н.

Величина соответствующих коэффициентов движения судна, а также «прямого» ледового сопротивления по согласованию с Регистром может быть определена экспериментально или с помощью аналитических методов [14]. Учитывая, что возраст судов, для которых необходима разработка НЭПВ, может составлять 15 – 20 лет и более, и за время эксплуатации мог смениться не один судовладелец, построочная проектная информация (результаты модельных и/или натурных испытаний, в том числе ледовых) с большой долей вероятности будет отсутствовать, следовательно, для таких судов остается возможность выполнять расчеты только с помощью аналитических методов, при этом каких именно, в НД не уточняется.

2. ЛЕДОПРОХОДИМОСТЬ (РАЗД. 1, ГЛ. 1, П. 1.2)

НЭПВ должно содержать сведения о ледовых условиях, в которых судно может идти непрерывным ходом, но такая информация, как правило, может быть получена из численного анализа, либо в результате модельных испытаний.

В первую очередь эта задача должна сводиться к определению минимальной устойчивой скорости движения судна в ровном сплошном пласте льда предельной толщины. Несмотря на то, что значение скорости хода принято равным 1,5 – 2,0 уз, понятие ровный сплошной морской лед является условным [11]. Данный факт при оценке ледовых условий приводит к необходимости учета прочности нового или разрушенного льда и добавки от снежного покрова.

В силу того, что в реальных условиях движение судна не является установившимся, даже небольшое увеличение сопротивления может привести к его возможно быстрой остановке и/или существенной пульсации. Поэтому на сегодняшний день основным оптимальным критерием, обеспечивающим минимальный допустимый уровень ледопроходимости судна в зависимости от класса, является мощность его силовых установок [6], отвечающая требованиям 2.1 части VII «Механические установки» Правил классификации и постройки морских судов РС [15].

Согласно [15], минимально требуемая мощность на гребных валах судов ледовых классов должна определяться по формулам (3) и (4):

$$P_{min} = f_1 f_2 f_3 (f_4 \Delta + P_0) \quad (3)$$

$$P_{min} = K_e \frac{(R_{CH}/1000)^{3/2}}{D_p} \quad (4)$$

Параметры, входящие в выражения (3) и (4), учитывают характеристики пропульсивных установок и особенности конструкции корпуса судна, определение каждой из которых требует как скрупулезной работы с проектной судовой документацией, например, при определении площади ватерлинии носового заострения или углов наклона форштевня и ватерлинии в отдельных точках, так и учета ряда условий, включая класс, водоизмещение, фактическую мощность и т.д. Подробно алгоритмы определения этих переменных приведены в [15]. Необходимо отметить, что требуемая мощность P_{min} , кВт для судов ледовых классов **Ice2** и **Ice3**, должна быть не менее любого, а для судов ледового класса **Arc4** не менее меньшего из значений (3) и (4). При этом величина P_{min} , оцениваемая по формуле (4), должна определяться как наибольшее значение, рассчитанное для верхней и нижней ледовых ватерлиний, что тоже, в свою очередь, увеличивает общий объем расчетов.

Таким образом, безопасность плавания во льдах должна обеспечиваться в комплексе как ледовой прочностью, так и ледовой ходкостью судов, что требует выполнения большого объема расчетов, подтверждающих выполнение соответствующих требований [3, 14, 15].

3. МАНЕВРИРОВАНИЯ ВО ЛЬДАХ (РАЗД. 1, ГЛ. 1, П. 1.3)

Несмотря на тот очевидный факт, что маневрирование любого судна в конкретных ледовых условиях должно осуществляться в рамках безопасности, в рекомендациях по примерному содержанию НЭПВ не оговорено, какая информация должна входить в данный раздел. С одной стороны, в настоящее время судоводители пользуются общими рекомендациями по плаванию в ледовых условиях, которые основываются на хорошей морской практике и являются универсальными, но, с другой стороны, они не учитывают конкретные конструктивные особенности и маневренные характеристики судна, что противоречит требованиям Полярного кодекса. При этом такие рекомендации зачастую не имеют технического основания для их автоматического распространения с одного проекта судна на другой. Соответственно, такая задача должна решаться либо на основе признанных аналитических методов, либо путем математического моделирования. В этой связи представляет интерес подход авторов СПбГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, описанный в [16]. В работе предложена математическая модель, описывающая различные сценарии столкновения судна с отдельной плавающей льдиной (рис. 2), на основании которой даются конкретные рекомендации для каждого судна в условиях ледового плавания, как это требуется в соответствии с НЭПВ.

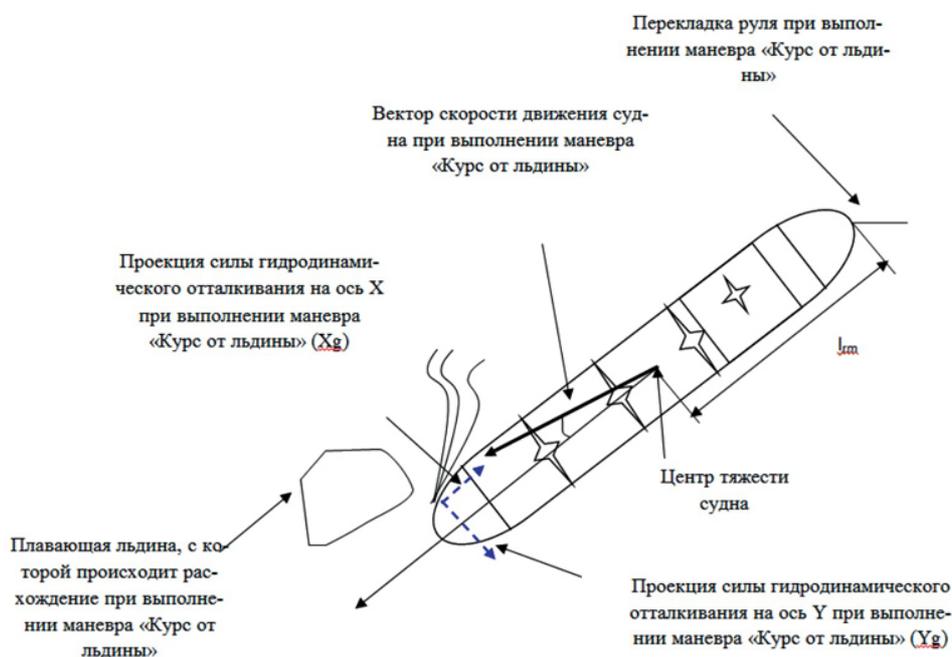


Рис. 2 Возникновение силы гидродинамического отталкивания при выполнении маневра «Курс от льдины» и сближении с плавающей льдиной [16]

В результате систематических расчетов с использованием предложенной математической модели, был разработан как универсальный маневр «Курс от льдины», который может быть применен к всем судам, так и конкретные предложения касательно маневренности, учитывающие конструктивные особенности судна и район взаимодействия (столкновения) корпуса со льдиной, где также было выявлено совпадение полученных рекомендаций с имеющимся опытом ледового плавания [16].

4. ОСОБЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ (РАЗД. 1, ГЛ. 1, П. 1.4)

НЭПВ должно включать анализ равноценности, выполненный для установления категории/полярного класса судна полярного плавания. Такой анализ может быть выполнен в соответствии с разд. 1 части XVII «Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные и

эксплуатационные особенности судна» Правил классификации и постройки морских судов РС [17]. Расчеты прочности корпуса и винто-рулевого комплекса (ВРК) судна полярного плавания – комплексная задача, решение которой сопряжено с необходимостью оперировать большим количеством переменных, зависящих от класса судна, конструктивных особенностей корпуса, типа и компоновки ВРК. Опыт АО «ЦНИИМФ» показывает, что для выполнения этих расчетов необходим высокий уровень подготовки специалистов и использование специализированного программного обеспечения. Например, для уменьшения времени выполнения расчетов по корпусу и повышения качества их результатов оказалось эффективным использовать программное обеспечение (ПО) MARSOLS [18] (рис. 3).

МАРСОЛС

Номер IMO
IMO number 7654321

Параметры расчета / Calculation parameters

Полярный класс судна Ship's Polar Class PC1 Планируемый срок Planned period 12

Полярный класс / Polar Class

Районы корпуса судна Нагрузки Наружная обшивка Основной набор Рамный набор Оптимизация конструкции

Наружная обшивка Основной набор Рамный набор

№	Обозначение Description	По умолчанию Default	Шаг, n Frame spacing, m	Пролет шп., n Frame, m	$A_n \geq A_n$ $A_n \geq A_n$	$Z_n \geq Z_n$ $Z_n \geq Z_n$	$b_n \geq 2b_n$ $b_n \geq 2b_n$ $b_n \geq 2b_n$	$b_n \geq 5t_n$	$b_n \geq 155$ $t_n \leq 5\sigma_n$
Носовой район (В)									
1	Шпангоут, полоса 55x14, поперечная, в балластном	<input checked="" type="checkbox"/>	0,590	2,000	83,90≥233,40	2761,30≥28849,60	27,46≥14,19	—	—
Носовой промежуточный район, ледовый (ВВ)									
1	Шпангоут, уголок (равнобокий) 16x11, поперечная, л	<input checked="" type="checkbox"/>	0,600	2,000	81,30≥64,72	2827,50≥1953,80	25,74≥40,50	150,00≥87,40	5,51≥7,80
Носовой промежуточный район, днищевой (ВВВ)									
1	Днищевая прод. балка, уголок (равнобокий) 2,8x3, л	<input checked="" type="checkbox"/>	0,600	1,800	81,30≥25,85	2700,20≥2750,10	20,88≥40,50	125,00≥91,40	3,98≥6,93
Средний район, ледовый (М)									
1	Шпангоут, полосульб (несимметричный) 5, попере	<input checked="" type="checkbox"/>	0,600	2,000	61,80≥131,40	2624,60≥12548,40	38,46≥40,50	125,00≥62,40	4,41≥7,80
Кормовой район, ледовый (С)									
1	Шпангоут, полосульб (симметричный) 1035, попере	<input checked="" type="checkbox"/>	0,500	2,000	68,70≥17,40	1857,60≥475,00	20,74≥40,50	125,00≥87,40	4,09≥7,80

ru_RU Чтение из БД Запись в БД

Рис. 3 Иллюстрация результатов расчета в ПО MARSOLS: оценка соответствия балок основного набора корпуса требованиям [17]

Следует отметить, что в [17] даны прямые указания на использование при определении несущей способности рамных связей корпуса, а также напряжений в лопасти гребного винта признанного и хорошо представленного (документированного) пакета Метода конечных элементов (МКЭ) или другого приемлемого альтернативного метода (рис. 4). Численное моделирование МКЭ – отдельная самостоятельная область инженерной деятельности, особенно при учете пластических свойств материала в нелинейной постановке задачи, при этом создание конечно-элементных моделей сложных геометрических объектов, таких как гребной винт, является достаточно трудоемким процессом. Необходимость выполнения подобных расчетов применительно к ВРК подтверждается практикой мореплавания и многочисленными статистическими исследованиями, например, приведенными в [11], из которых следует, что в период с 2008 по 2012 годы в Финском заливе имели место

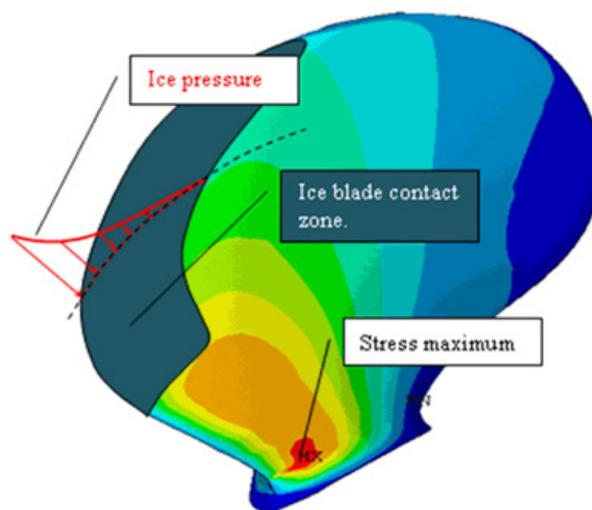


Рис. 4 Результат расчета ледовой прочности лопасти гребного винта [19]

систематические случаи повреждения гребных винтов на рефрижераторных судах с ледовыми классами, допускающими эксплуатацию в данном районе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты настоящей работы показывают, что разработка НЭПВ является сложной задачей, особенно применительно не к новым, а к уже эксплуатирующимся судам. НЭПВ – комплексный документ, требующий от разработчиков высокой квалификации, обширных знаний в области ледовой прочности корпусов и ВРК, а также навыков в использовании специализированного ПО. И если учесть, что НЭПВ является важнейшим эксплуатационным документом, исключающим формальный подход к обеспечению безопасности судна, работающего в условиях низких температур и ледовой обстановки различной тяжести, то информация и расчеты, приведенные в нем по глубине и объему проработки должны быть, по крайней мере, близкими к вышеизложенному анализу. В связи с этим представляется целесообразным в перспективе рассмотреть возможность не только корректировки нормативно-правовой базы заинтересованных ведомств, но и организации соответствующего контроля разрабатываемых эксплуатационных документов в дополнение к тем, которые рассматриваются Регистром в установленном порядке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров А.А. Проблемы проектирования и эксплуатации морских нефтегазовых платформ, предназначенных для работы на арктическом шельфе //Сб. научных трудов. – Вып. 1 (2016). – СПб: АО «ЦНИИМФ», 2016. – с.75 – 80.
2. International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code): Resolution MEPC.264(68), Resolution MSC.385(94), 2015.
3. Руководство по применению положений Международного кодекса для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярного кодекса). – СПб: РМРС, 2017. – 28 с.
4. IMO Polar Code Advisory, Houston, TX 77060 USA, January 2016. – (<http://www.eagle.org>).
5. Шурпяк В.К. Полярный кодекс ИМО: предварительный анализ первой части (требования по безопасности) // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – Вып. 38/39. – СПб: РМРС, 2015. – с.8 – 17.
6. Пересыпкин В.И., Цой Л.Г., Шурпяк В.К. Международный Полярный кодекс: российские предложения. – (<http://www.morvesti.ru/tems/detail.php?ID=29222>).
7. Федеральное государственное казенное учреждение «Администрация Северного морского пути». Официальный сайт. – (http://www.nsrp.ru/tassmotrenie_zayavleniy/zayavlenie.html).
8. Arctic Ice Regime Shipping System (AIRSS) Standards – TP 12259. – (<https://www.tc.gc.ca/eng/marinesafety/tp-tp12259-menu-605.htm>).
9. Портал NIC США. – (<http://www.natice.noaa.gov/>).
10. Мاستрюков С.И. Методический подход к оценке ледовых условий плавания и оценка тенденций их изменения на примере азиатского побережья Берингова моря //Арктика. Экология и экономика. – Вып. 1(5). – М.: 2012. – с. 74 – 81.
11. Шацбергер Э.М. Классификационные документы, ледовый паспорт и ходкость судов, удовлетворяющие основным требованиям эффективности ледокольных проводок // Эксплуатация морского транспорта. – Вып. 2(68). – Новороссийск: ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова», 2012. – с. 32 – 38.
12. Дидковский А.В., Каганов С.Д., Кутейников М. А. Развитие нормативной базы Регистра по обеспечению безопасности судов ледового плавания: аннот. к докл. на Президиуме НТС-2009 РМРС, 2009.
13. Бойко М.С. О разработке требований РС к расчету допустимых режимов движения судна во льдах: аннот. к докл. на круглом столе выставки «Нева-2015», г. Санкт-Петербург, 2015.
14. Методические рекомендации по выполнению расчета допустимых режимов движения судна во льдах. – СПб: РМРС, 2012. – 18 с.
15. Правила классификации и постройки морских судов: в 17 ч. – СПб: РМРС, 2018. – Ч. 7. – Механические установки. – 66 с.
16. Ершов А.А., Развозов С.Ю., Петухов П.И. Рекомендации по маневрированию судна в ледовых условиях // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – Вып.5(39) (2016). – СПб: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», 2016. – с. 20 – 29.
17. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XVII. Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна. – СПб: РМРС, 2018. – 140 с.
18. Лебехов И.А., Петров А.А. Автоматизация расчетов конструкций судов ледового плавания и выбора рациональных конструктивных решений на основе программного обеспечения MARSOLS // Материалы конференции по строительной механике корабля, посвященной памяти профессора В.А. Постнова. – СПб, 2017, – с. 15 – 16.
19. Buyanov S.I., Kuteinikov M.A., Andryushin A.V., Markozov G.V., Bolshev A.S.. Ice certificate principles for double-acting ships. 10 Arctic Passion Seminar, 2015, Helsinki. – (http://akerarctic.fi/sites/default/files/page/fields/field_attachments/4_buyanov.pdf).

REFERENCES

1. Petrov A.A. Problemy proektirovaniya i ekspluatatsii morskikh neftegazovykh platform, prednaznachennykh dlya raboty na arkticheskom shelf'e [Problems of design and maintenance of oil and gas platforms intended for operation on Arctic shelf]. Collected papers. Iss. 1 (2016), St. Petersburg, AO "CNIIMF", 2016, pp. 75 – 80.
2. International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code): Resolution MEPC.264(68), Resolution MSC.385(94), 2015.
3. Rukovodstvo po primeneniyu polozheniy Mezhdunarodnogo kodeksa dlya sudov, ekspluatiruyushchikhsya v polyarnykh vodakh (Polyarnogo kodeksa) [Guidelines on Application of the International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code)]. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2017, 28 p.
4. IMO Polar Code Advisory, Houston, TX 77060 USA, January 2016. – (Available at: <http://www.eagle.org>).
5. Shurpyak V.K. Polyarnyy kodeks IMO: predvaritel'nyy analiz pervoy chasti (trebovaniya po bezopasnosti) [IMO Polar Code: preliminary review of first part (safely requirements)]. Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva [Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping]. 2015, № 38/39, pp. 8 – 17.
6. Peresypkin V.I., Tsoy L.G., Shurpyak V.K. Mezhdunarodnyy Polyarnyy kodeks: rossiyskie predlozheniya [Polar Code: Russian proposals]. (Available at: <http://www.morvesti.ru/tems/detail.php?ID=29222>).
7. Federal'noe gosudarstvennoe kazennoe uchrezhdenie "Administratsiya Severnogo morskogo puti". Official website. (Available at: http://www.nsr.ru/ru/rassmotrenie_zayavleniy/zayavlenie.html).
8. Arctic Ice Regime Shipping System (AIRSS) Standards – TP 12259. – (Available at: <https://www.tc.gc.ca/eng/marinesafety/tp-tp12259-menu-605.htm>).
9. Portal NIC USA. (Available at: <http://www.natice.noaa.gov/>).
10. Mastrukov S.I. Metodicheskii podkhod k otsenke ledovykh usloviy plavaniya i otsenka tendentsiy ikh izmeneniya na primere aziatskogo poberezh'ya Beringova morya [Methodical approach to the estimation of ice conditions of navigation and trends of change as an example of the Asian coast of the Bering Sea]. Arktika. Ekologiya i ekonomika [Arctic. Ecology and Economic]. 2012, iss. 1(5), pp. 74 – 81.
11. Shatsberger E.M. Klassifikatsionnye dokumenty, ledovyy pasport i khodkost' sudov, udovletvoryayushchie osnovnym trebovaniyam effektivnosti ledokol'nykh provodok [Classification documents, ice passport and propulsive quality of ships complying with main requirements of effective ice steering]. Ekspluatatsiya morskogo transporta [Maintenance of marine transport]. 2012, iss. 2(68), pp. 32 – 38.
12. Didkovskiy A.V., Kaganov S.D., Kuteynikov M.A. Razvitiye normativnoy bazy Registra po obespecheniyu bezopasnosti sudov ledovogo plavaniya: annot. k dokl. na Prezidiume NTS-2009 [Development of Register normative base for safeguarding of ice-class ships: abstract of the report for Presidium STC-2009]. Russian Maritime Register of Shipping, 2009.
13. Boyko M.S. O razrabotke trebovaniy RS k raschetu dopustimyykh rezhimov dvizheniya sudna vo l'dakh: annot. k dokl. na krugom stole vystavki «Neva-2015» [About development of RS requirements for calculation of permissible ship motion in ice conditions: abstract of the report for round work table at "Neva-2015"]. St. Petersburg, 2015.
14. Metodicheskie rekomendatsii po vpolneniyu rascheta dopustimyykh rezhimov dvizheniya sudna vo l'dakh. [Methodological recommendations for calculation of permissible ship motions in ice conditions]. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2012, 18 p.
15. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Ch. VII. Mekhanicheskie ustanovki [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part VII. Machinery Installations]. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2018, 66 p. (In Russian)
16. Ershov A.A., Razvozov S.Yu., Petukhov P.I. Rekomendatsii po manevrirovaniyu sudna v ledovykh usloviyakh [Recommendation on maneuvering the vessel in ice conditions]. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova [The Scientific journal "Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova"]. 2016, iss. 5(39), 2016, pp. 20 – 29.
17. Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov. Ch. 17. Dopolnitel'nye znaki simvola klassa i slovesnye kharakteristiki, opredelyayushchie konstruktivnye ili ekspluatatsionnye osobennosti sudna [Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, Part XVII. Distinguishing Marks and Descriptive Notations in the Class Notation Specifying Structural and Operational Particulars of Ships]. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2018, p. 140 (In Russian)
18. Lebekhov I.A., Petrov A.A. Avtomatizatsiya raschetov konstruktivnykh sudov ledovogo plavaniya i vybora ratsional'nykh konstruktivnykh resheniy na osnove programmnoy obespecheniya MARSOLS [Automatization of calculations for ice class vessels construction and choice of efficient constructive decisions based on software MARSOLS]. Materialy konferentsii po stroitel'noy mekhanike korablya, posvyashchennoy pamyati professora V.A. Postnova [Materials of ship structural mechanics conference devoted to a memory of Professor V.A. Postnov]. St. Petersburg, 2017, pp. 15 – 16.
19. Buyanov S.I., Kuteynikov M.A., Andryushin A.V., Markozov G.V., Bolshev A.S. Ice certificate principles for double-acting ships. 10 Arctic Passion Seminar, 2015, Helsinki. (Available at: http://akerarctic.fi/sites/default/files/page/fields/field_attachments/4_buyanov.pdf)



ПРОЧНОСТЬ СУДОВ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 629.5:656.6

РЕМОНТ ОСМОТИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ НАРУЖНОЙ ОБШИВКИ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА

М.Д. Емельянов, канд. техн. наук, АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, e-mail: emelyanov@cniimf.ru

Целью настоящей работы является восстановление прочности и обеспечение долговечности наружной обшивки при получении повреждения, вызванного осмосом. Для достижения указанной цели рассмотрен процесс развития осмотических изменений в обшивке, степени ее поражения и выбор методов ремонта. При первой степени осмотического поражения, заключающейся в наличии повышенной влажности, ремонт состоит в сушке обшивки и нанесении барьерного покрытия. При второй степени, характеризующейся присутствием не удаляемой при сушке влаги, ремонт состоит в удалении гелькоута, сушке обшивки, восстановлении гелькоута и нанесении барьерного покрытия. При третьей степени, при которой возникают пузыри под гелькоутом и расслоения стеклопластиковой обшивки, ремонт состоит в удалении пузырей и расслоений с последующей сушкой, восстановлением обшивки, гелькоута и нанесением барьерного покрытия. Описаны способы оценки влажности обшивки и обнаружения расслоений поверхностных слоев стеклопластика. При ремонте стеклопластиковых судов предпочтение отдано эпоксидным композициям, которые превосходят полиэфирные по всем основным физико-механическим показателям, в том числе имеют наименьшую водопроницаемость. Кроме того, они менее чувствительны к повышенной влажности и низкой температуре окружающей среды, позволяя выполнять ремонтные работы на открытом воздухе, и допускают применение армирующих материалов без специальной обработки аппретирующими составами. Представлены технологии очистки обшивки от обрастаний, вакуумной сушки, ремонта пузырей в гелькоуте и расслоения стеклопластика, восстановление изношенной обшивки.

Ключевые слова: ремонт полиэфирных стеклопластиков, пузыри в гелькоуте, расслоение стеклопластика, износ обшивки, барьерное покрытие

REPAIR OF OSMOTIC DAMAGE TO THE FIBERGLASS OUTER SHELL PLATING

M.D. Emelyanov, PhD, Central Marine Research and Design Institute, St. Petersburg,
e-mail: emelyanov@cniimf.ru

The purpose of this work is to restore the strength and ensure the durability of the outer shell plating when receiving damage caused by osmosis. To achieve this goal, the article considers the process of development of osmotic changes in the plating, the degree of damage and selection of possible repair methods. At the first degree of osmotic damage consisting in the presence of high humidity, the repair consists in drying the plating and applying barrier coating. At the second degree, characterized by the presence of moisture not removed when drying, the repair consists in removing the gelcoat, drying the plating, restoring the gelcoat and applying barrier coating. At the

third degree when there are bubbles formed under the gelcoat and delamination of the fiberglass plating is present, repair consists in the removal of bubbles and delaminated sections with subsequent drying, restoration of the covering, gelcoat and application of barrier coating. The article also describes the methods of evaluating the plating moisture content and detecting the delamination of fiberglass surface. In the repair of fiberglass ships preference is given to epoxy compositions, which outperform polyester ones by all major physical and mechanical parameters, including their superior watertightness. In addition, they are less sensitive to high humidity and low temperature environment, allowing to perform repairs in the open air and to use reinforcing materials without special treatment with coupling compounds. Technologies of cleaning of the plating from fouling, vacuum drying, repair of gelcoat bubbles and fiberglass delamination and restoration of the worn-out plating are also presented.

Keywords: polyester fiberglass repair, gelcoat bubbles, fiberglass delamination, plating wear, barrier coating

Часто встречающимся видом повреждений наружной обшивки является гидролиз связующего с деградацией его свойств, возникающий вследствие осмоса. Осмотическое проникновение влаги в стеклопластик происходит при нарушении целостности или недостаточности декоративно-защитного покрытия (гелькоута), отклонении от требуемой технологии изготовления и при длительном пребывании корпуса в воде без технического обслуживания. В случае потертости (износа) наружной обшивки или наличия поверхностных царапин снижение прочности (момента сопротивления поперечного сечения) обшивки, как правило, незначительно. Основная опасность заключается в том, что открывается путь проникновения влаги в стеклопластик, вызывающей деградацию его свойств.

Гидролизу подвержены все полиэфирные связующие: в наибольшей степени на основе ортофталевых смол, несколько меньше – изофталевых и лучше всего сопротивляются проникновению влаги винилэфирные смолы.

Основным материалом для строительства стеклопластиковых корпусов остаются ортофталевые смолы, имеющие наилучшее соотношение «цена – качество». Для защиты обшивки от проникновения влаги на судах старой постройки часто применялся изофталевый гелькоут толщиной 0,6 – 0,8 мм, на современных судах используется гелькоут и барьерное покрытие из винилэфирных смол. Барьерное покрытие располагается под гелькоутом и обычно имеет толщину 1,5 – 1,8 мм.

Для ремонта корпусов судов из стеклопластика предпочтительно использовать эпоксидные компаунды вследствие большей прочности, адгезии, меньшей водопроницаемости и чувствительности к повышенной влажности и низкой температуре окружающей среды по сравнению с винилэфирными смолами.

ПРОЦЕСС РАЗВИТИЯ ОСМОТИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ

При постоянном контакте с водой гелькоут представляет довольно слабую преграду для ее проникновения из-за малых размеров молекул H_2O . Этому еще более способствует стекловолокно, действуя как капилляры и транспортируя воду вглубь стеклопластика. Находясь в близком контакте со смолой в гелькоуте и стеклопластике, вода образует химический раствор водорастворимых веществ, содержащихся в смоле. К этим веществам относятся фталевые кислоты, гликоли, соединения кобальта, растворитель и стирол, который не отвердился в процессе полимеризации. В той или иной степени они присутствуют в любой отвержденной полиэфирной смоле.

Все эти вещества обладают гигроскопичностью (свойством сильно притягивать молекулы воды) и немедленно реагируют с водой, фильтруемой гелькоутом, образуя кислотный раствор. Затем этот едкий раствор, являющийся продуктом гидролиза, воздействует на окружающий его пластик. Пластик в свою очередь разрушается на составляющие: фталевые кислоты, гликоли и т.д., которые опять же растворимы водой и обеспечивают процесс дополнительным материалом. Процесс, именуемый гидролизом, поддерживает сам себя до тех пор, пока обеспечивается приток воды. Со временем он все глубже и глубже проникает внутрь стеклопластика, снижая адгезию к стекломатериалу и приводя к деструкции связующего.

Если приток воды внутрь стеклопластика превышает отток гидролизной жидкости (втекает больше, чем вытекает), то кислотный раствор, являющийся побочным продуктом гидролиза, собирается во всевозможных местах в смоле, например, в микроскопических воздушных пузырьках и непроклеенных участках, образованных во время формования корпуса в матрице. По мере роста количества жидкости растет и давление, тем самым вызывая образование пузыря. Гидростатическое давление внутри пузырька может достигать 5 – 6 атмосфер [1]. В сочетании с внешним давлением, происходит гидравлическое расклинивание полости, которое со временем увеличивается в размерах и приводит к расслоению наружных слоев стеклопластика. При достаточном их количестве нарушается целостность и снижается прочность наружной обшивки. Это может привести к разрушению конструкции при расчетных режимах движения и к непропорциональному увеличению зоны аварийных разрушений в нештатных ситуациях.



Рис. 1 Стадии развития осмоса [1]

Таким образом, процесс осмоса обычно проходит 3 стадии, из которых появление пузырей (бляшек) в гелькоуте является признаком последней из них (рис. 1).

На первой стадии влага, проникающая через гелькоут в стеклопластик, испаряется внутрь корпуса, не разрушая его. Этот безопасный период, который может длиться 5 – 6 лет.

На второй стадии влага адсорбируется быстрее, чем испаряется внутрь корпуса, и часть ее задерживается в стеклопластике, постепенно разрушая его и образуя не удаляемые продукты распада. Внешних признаков пока еще может не наблюдаться.

Третья стадия характеризуется высокой концентрацией продуктов распада стеклопластика с очагами большого «осмотического давления», которое ведет к образованию пузырей и вздутий под гелькоутом, а также к расслоению стеклопластика обшивки. Вся влага, попадающая в корпус, адсорбируется в них.

При отсутствии должного ухода корпус судна может через 10 – 15 лет прийти в полную негодность при внешнем удовлетворительном состоянии обшивки.

Иногда гелькоут лопается, покрывается микротрещинами или становится пористым. При достаточной степени пористости мелкие пузыри могут не образоваться вовсе, т.к. гидролизный раствор не задерживается внутри и уходит через гелькоут наружу (это можно наблюдать в гелькоуте на основе изофталиевой смолы), хотя стеклопластик продолжает разрушаться по-прежнему. В такой ситуации образование крупных пузырей происходит только в глубине стеклопластика. Часто при его гидролизе можно заметить микроскопические точечные отложения на поверхности днища. Эти отложения представляют собой кристаллизовавшиеся твердые остатки полиэфирной смолы, которые образовались из жидкости, вытекающей из микротрещин в стеклопластике. Это также является свидетельством процесса гидролиза в стеклопластике, даже если не видно следов образования пузырей.

В случае более плотного винилэфирного гелькоута влага, тем не менее, будет все равно проникать внутрь и разница в темпах притока и оттока будет еще больше. Однако, количество проникшей внутрь влаги незначительно и, несмотря на образование пузырей, внутренние слои стеклопластика будут находиться в лучшем состоянии, чем у гелькоута на основе изофталиевой смолы.

Хотя пузыри и могут концентрироваться в том или ином месте погруженной части корпуса, гидролиз днища носит общий характер. При этом степень влажности обшивки может отличаться от участка к участку. Совершенно очевидно, что области между пузырями поражены в такой же степени, что и участки с пузырями.

Когда процесс осмоса уже значительно развился, то пузырьки и вздутия на поверхности пластика становятся наиболее заметными. Пузырьки и вздутия явно видны на блестящей мокрой поверхности, сразу после подъема судна из воды. Если оставить корпус на воздухе в течение нескольких недель, то осмотические пузырьки могут стать незаметными, но появятся снова после спуска судна на воду.

Разделяются случаи с множеством мелких пузырьков и случаи с отдельными крупными пузырями под гелькоутом. Появление мелких пузырьков свидетельствует о том, что гелькоут мягкий и позволяет возникать пузырькам с большой кривизной поверхности. Когда гелькоут жесткий и хрупкий, то точечные множественные осмотические поражения не видны и проявляются только тогда, когда они объединяются в крупные пузыри и бляшки.

Более серьезный случай – когда в поверхностных слоях стеклопластика имеются расслоения. Одиночные расслоения размером свыше 5 см и множественные мелкие расслоения, имеющие возможность объединения, подлежат удалению.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА

Наиболее достоверный метод определения влажности стеклопластика – использование электронного измерителя влажности емкостного типа.

Однако даже новые стеклопластиковые суда, впервые поднятые из воды, могут показать большое значение влажности обшивки. Реальный тест – это проверка на то, как быстро уменьшается влажность стеклопластика с течением времени. Суда без дефектов корпуса должны иметь приемлемые значения влажности (2 – 3 %) после 4 – 6 недель нахождения на суше. Подверженный осмосу корпус будет показывать чрезмерную влажность (до 9 %) даже спустя несколько месяцев.

Оценку влажности обшивки рекомендуется выполнять следующим образом.

Условно разделить корпус по длине на 3 – 5 сечений (рис. 2). В каждом сечении с каждого борта наметить по 3 точки измерений в надводной части обшивки и по 5 точек в подводной. Выполнить измерение влажности в каждой точке и зафиксировать полученные значения, например, в первый день после подъема судна из воды и через несколько недель сушки.

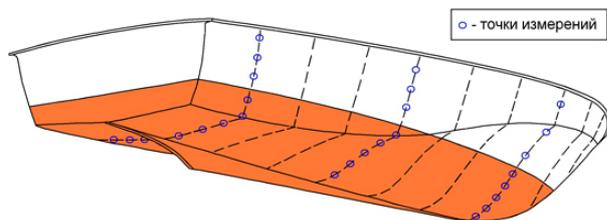


Рис. 2 Расположение точек измерения влажности обшивки

Сравнению между собой подлежат значения

влажности, полученные при замерах в надводной и подводной части корпуса, а также значения, полученные при измерениях сразу после подъема судна и через некоторый промежуток времени. Если спустя несколько месяцев естественной сушки обшивка имеет повышенную влажность, то это свидетельствует о наличии крепкого гидролизного раствора в стеклопластике.

ВЫЯВЛЕНИЕ РАССЛОЕНИЙ СТЕКЛОПЛАСТИКА

Обнаружить расслоение стеклопластика можно по наличию податливости обшивки при надавливании, по глухому звуку при простукивании или с помощью дефектоскопа, основанного на измерении степени затухания (импеданса) акустических низкочастотных колебаний при прохождении сквозь толщу стеклопластика.

Примером такого прибора является дефектоскоп «ДАМИ-С» с акустическим сканером «РС-1» и преобразователем свободных колебаний «ИПУ-1».

Для принятия решения о виде ремонта участков корпуса рекомендуется нанести на растяжку наружной обшивки или теоретический чертеж корпуса участки с повышенной неудаляемой влажностью, расслоениями и осмотическими пузырями.

Ремонт наружной обшивки начинается с очистки поверхности от обрастания, старой краски и сушке корпуса.

ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ ОТ ОБРАСТАНИЯ И СТАРОЙ КРАСКИ

Основное отличие корпусов судов из стеклопластика от стальных корпусов заключается в том, что стеклопластик имеет значительно меньшую твердость и износостойкость по сравнению со сталью. Поэтому очистка поверхности абразивно-струйным способом в данном случае неприемлема, так как она вызывает износ гелкоута. Кроме того, абразивные частицы с острыми кромками (например, купершлак) внедряются в поверхность стеклопластика, снижая адгезию с наносимым впоследствии полимерным покрытием.

Эффект при гидродинамической очистке по удалению старой краски, обрастания водорослями и микроорганизмами наступает при достаточно высоком давлении струи воды (порядка 500 бар и выше), которая может повредить менее прочную по сравнению со сталью стеклопластиковую обшивку корпуса.

Гидроабразивная очистка, по сути, представляет собой комбинацию первых двух методов и является более щадящей. Она потребляет меньшее количество абразивного материала, чем при пескоструйной очистке, и

требует меньшего давления воды (180 – 250 бар), но имеет невысокую производительность, и, в конечном счете, ее многократное использование все равно приводит к росту износа обрабатываемой поверхности.

Основными методами очистки подводной части корпуса от обрастания являются:

- химическая очистка;
- воздушно-струйная очистка с применением неабразивных чистящих частиц (мягкий бластинг) или сухого льда (криогенный бластинг);
- механическая очистка и шлифовка поверхности.

Химическая очистка выполняется путем нанесения на поверхность химически активных моющих средств с помощью волосяной щетки, губки или мочалки и выдержки времени в течение 5 – 15 мин. После экспозиции времени поверхность ремонтируемого участка следует обмыть струей водопроводной воды под давлением.

В качестве моющих средств хорошо зарекомендовали себя отечественные средства «Фаворит К» (ТУ 2384-006-55392091-2005) и «Магос Антикам 1» (ТУ 2383-004-11326837-2007). Из импортных очистителей применяют следующие средства: чистящее средство для удаления ракушек и наростов «BRAYT C1», очиститель днища «Sadira», очиститель днища «Barnacle Remover» («Hempel») и очиститель судового днища «Boat Bottom Cleaner» («StarBrite»).

Мягкий бластинг представляет собой метод струйной обработки поверхностей под давлением воздуха с применением неабразивных чистящих материалов на основе бикарбоната натрия (NaHCO_3), более известного как пищевая сода, и карбоната кальция (CaCO_3), представляющего собой обыкновенный мел. Гранулы чистящего материала должны иметь рыхлую структуру, которые разрушаются при соударении с обрабатываемой поверхностью и приводят к удалению поверхностного слоя. При этом реализуется эффект Ребиндера, проявляющийся в снижении прочности, диспергировании структуры и разрушении удаляемого слоя.

При обработке методом мягкого бластинга возможна подача чистящего материала как в сухом виде – сухая обработка, так и в смеси с водой – влажная обработка. Более предпочтительным является способ влажной обработки, так как при нем не образуется большого количества пыли в окружающем воздухе.

Водяная оболочка под действием гидростатического удара проникает в трещину и изнутри удаляет загрязнение.

Очистка методом мягкого бластинга хорошо справляется с удалением старой краски, не повреждая при этом декоративный слой (гелькоут).

Криогенный бластинг представляет собой метод струйной обработки поверхностей под давлением воздуха, в котором в качестве чистящего материала используются гранулы сухого льда (твердая фаза двуокиси углерода при температуре около минус 80 °С). Метод криогенной очистки основывается на том, что температура гранул значительно ниже температуры корпуса. В связи с этим резкое изменение температуры поверхности влечет за собой эффект «термического шока», из-за чего слой загрязнения становится ломким и хрупким, что приводит к его разрушению и отслаиванию.

Криогенный бластинг является наиболее экологически чистым методом очистки корпуса.

Для воздушно-струйной очистки с применением неабразивных чистящих частиц или сухого льда используют аппараты, аналогичные применяемым для пескоструйной обработки (рис. 3). В эти аппараты вместо абразивного порошка загружают гранулы мягких чистящих частиц или сухого льда.

Механическая очистка осуществляют с использованием скребков, шпателей и шлифовальных машин. Для облегчения удаления старой краски могут использоваться смывки, не содержащие хлорид метилена, который размягчает полиэфирный и эпоксидный пластик. Этот способ имеет низкую производительность и оставляет после его применения следы в виде рисок и царапин. От рабочих требуется навык удаления обрастания и старой краски без повреждения гелькоута.

Поэтому механическую очистку рекомендуется применять в качестве дополнительной меры после обработки корпуса другим способом, после которого остались неудаленные загрязнения и обрастания.

Очистка выполняется механизированным инструментом с плоским рабочим органом, например, УШМ (болгаркой) с гибкой опорной тарелкой или шлифовальными машинками орбитального, ленточного и плоского (вибрационного) типов.

Вакуумная сушка рекомендована взамен естественной сушки для сокращения времени на удаление влаги из обшивки. Сущность метода заключается в том, что при разряжении происходит закипание воды при температуре, соответствующей окружающей среде, и вакуумный отсос удаляет водяные пары.

Для вакуумирования необходимо собрать систему в соответствии с рис. 4.

а) схема аппарата для мягкого бластинга (<http://master-ur.ru/>)

б) аппарат для чистки сухим льдом Kärcher IB 15/80

Рис. 3 Аппараты для мягкого и криогенного бластинга

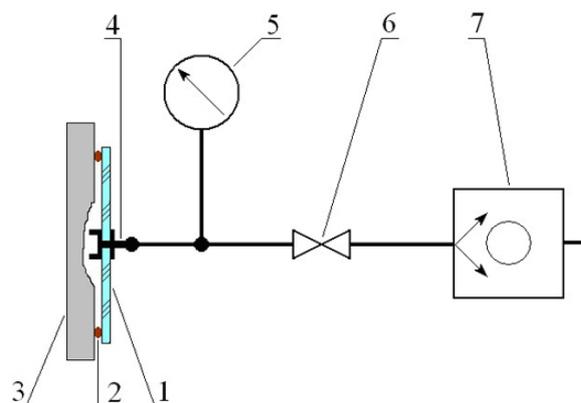


Рис. 4 Схема вакуумирования [2]:

1 – вакуумная диафрагма; 2 – герметизирующий жгут (лента);
3 – поврежденный участок обшивки; 4 – вакуумный штуцер;
5 – вакуумметр; 6 – отсечной кран; 7 – вакуумный насос

сушки показания вакуумметра не меняются, то отсечной кран закрыть, остановить вакуумный насос и выдержать 1 – 2 ч. По окончании указанного периода сравнить показания вакуумметра до и после выдержки времени. В случае если показания вакуумметра не изменились, то обшивка считается высушенной. В противном случае вакуумный насос необходимо перезапустить, открыть отсечной кран и продолжить удалять влагу. Затем повторить выдержку времени при закрытом отсечном кране и т.д. до полного удаления влаги.

Вакуумная сушка может сочетаться с обогревом обшивки со стороны трюма инфракрасными лампами или обдувом теплым воздухом. При этом температура поверхности полиэфирной стеклопластиковой обшивки не должна превышать 60 °С, что может привести к ее размягчению.

Технология вакуумирования может также применяться для прессования наформовываемого стекломатериала, удаления воздушных пузырей, повышения качества склейки и снижения расхода связующего.

Вакуумную сушку рекомендуется выполнять следующим образом:

- удостовериться в отсутствии нарушения герметичности обшивки. Для этого с обратной стороны обшивки нанести пенообразующий (мыльный) раствор, а лицевую сторону обдуть из шланга сжатым воздухом давлением 3,0 – 3,5 бар. В случае обнаружения мест прохода воздуха, необходимо обеспечить герметичность, например, с обратной стороны обшивки наклеить на эти места специальный пластырь или скотч;

- собрать вакуумную систему. Для повышения эффективности отсоса паров воды внутри герметизируемого контура между обшивкой и вакуумной диафрагмой поместить дренажную ткань, в качестве которой может использоваться сухая стеклоткань или тонкий стекломат;

- запустить вакуумный насос 7 при открытом отсечном кране 6 и выдержать в течение 2 – 3 суток, контролируя показания вакуумметра 5. Если в конце

ВЫБОР МЕТОДА РЕМОНТА НАРУЖНОЙ ОБШИВКИ

Выбор метода ремонта зависит от степени осмотического поражения наружной обшивки. Различаются три степени поражения.

Первая степень осмотического поражения характеризуется повышенной влажностью подводной части корпуса, которая приходит в норму через 4 – 6 недель нахождения на воздухе. Возможно появление мелких пузырьков под гелькоутом, которые через несколько недель сушки исчезают.

В этом случае достаточно просушить корпус, удалить старую краску и нанести барьерное покрытие на наружную сторону обшивки. Для ускорения сушки корпуса может быть применено вакуумирование, обогрев и вентиляция поверхности корпуса со стороны трюма.

Вторая степень осмотического поражения имеет место, если влажность отдельных участков подводной части корпуса не приходит в норму после нахождения судна на воздухе в течение 1 – 2 месяцев, что свидетельствует о присутствии в обшивке неудаляемых продуктов гидролиза.

При второй степени поражения необходимо удалить гелькоут на этих участках, промыть струей чистой воды под давлением и высушить обшивку. При наличии помутнения или изменения цвета стеклопластика ошкурить поверхность до естественного цвета. После этого нанести топкоут (гелькоут) и барьерное покрытие.

При третьей степени осмотического поражения под гелькоутом имеются крупные пузыри (диаметром 2 – 3 см) и может появиться расслоение поверхностных слоев стеклопластика, которые необходимо удалить.

Осмотические пузыри необходимо вскрыть, промыть струей чистой воды под напором и высушить обшивку. Если вблизи вскрытых пузырей влажность обшивки повышена, то рекомендуется удалить гелькоут на этих участках, промыть водой и просушить. При наличии помутнения или изменения цвета стеклопластика следует отшлифовать поверхность до естественного цвета или сострогать электрорубанком с регулируемой глубиной строгания.

Вскрытые полости пузырей требуется ошкурить и зашпатлевать. После отверждения шпатлевки всю поверхность необходимо обработать шлифовальной шкуркой зернистостью Р80 – Р100 и нанести барьерное покрытие.

Поверхностные слои обшивки, имеющие отслоения размером свыше 5 см подлежат удалению электрорубанком или с помощью стамески и молотка. Поверхность с удаленными слоями, имеющая помутнение или изменение цвета связующего, необходимо отшлифовать или сострогать до естественного цвета.

На участке с удаленными слоями формируют шлифовкой уклоны 1:12 шкуркой зернистостью Р40 – Р60, после чего всю поверхность необходимо обработать шкуркой зернистостью Р80 – Р100.

Восстановление удаленных слоев осуществляется путем наформовки стекломатериала, аналогичного удаленным слоям и с той же ориентацией (рис. 5а).

После отверждения связующего выступающие края стекломатериала по периметру наформовки необходимо удалить строжкой (рис. 5б), обработать всю поверхность шлифовальной шкуркой зернистостью Р80 – Р100 и наклеить подкрепляющий слой ровинговой ткани (рис. 5в).

Как показывает практика [3], прочность обшивки полностью обеспечивается при подкреплении одним слоем ровинговой ткани плотностью 450 г/м².



Рис. 5 Восстановление удаленных слоев обшивки

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗНОШЕННОЙ ОБШИВКИ В МЕСТАХ ПОТЕРТОСТЕЙ

Трение корпуса о грунт или причал приводит к общему износу (истиранию) декоративного покрытия (гелькоута) и армирующих слоев обшивки. Ремонт потертостей наружной обшивки заключается в наклейке стекломатериала на изношенные места с количеством слоев равным сношенным слоям. На восстановленный участок рекомендуется нанести слой износостойкой шпатлевки, содержащей в качестве основного наполнителя маршалит (кварц молотый пылевидный).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГЕЛЬКОУТА И НАНЕСЕНИЕ БАРЬЕРНОГО ПОКРЫТИЯ

Для восстановления гелькоута следует использовать эпоксидный топкоут (гелькоут) с суммарной толщиной сухой пленки 500 мкм в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя ЛКМ.

Топкоут (гелькоут) наносится на твердую поверхность, предварительно ошлифованную шкуркой зернистостью Р80 – Р100.

При строительстве стеклопластиковых судов барьерное покрытие располагается под гелькоутом. При ремонте судна, находящегося в эксплуатации, барьерное покрытие наносят на существующий гелькоут.

В качестве материала для барьерного покрытия могут использоваться эпоксидные краски для подводной части корпуса, наносимые на грунтровку, рекомендуемую изготовителем ЛКМ. Толщина сухой пленки покрытия обычно составляет 380 – 450 мкм.

Перед нанесением барьерного покрытия необходимо удалить старую краску и ошлифовать поверхность шкуркой зернистостью Р80 – Р100.

Последующие слои топкоута и барьерного покрытия наносятся на слегка липкий предыдущий слой для обеспечения хорошего сцепления.

Перед нанесением последнего слоя топкоута и барьерного покрытия поверхность следует выдержать до отверждения и обработать шлифовальной шкуркой зернистостью Р180 – Р220 для удаления подтеков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологии ремонта наружной обшивки из стеклопластика с осмотическими повреждениями подробно описаны в стандарте организации «Руководство по ремонту корпусов судов и спасательных шлюпок из стеклопластика. Типовые технологические процессы» (СТО ЯКУТ.52.01-2018). Руководство также содержит следующие технологические процессы:

- ремонт пробоин, трещин, царапин в наружной обшивке и отслоения набора от обшивки;
- ремонт трехслойных панелей при отслоении несущей оболочки от пенопластового заполнителя методами спринцевания клеевого компаунда в полость отслоения или замены отслоившегося участка оболочки;
- ремонт стеклопластиковых шлюпок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нигель Клэгг. У моей яхты осмос?/"Фарватер" (https://www.amariner.net/article26_osmos_ru.html).
2. Емельянов М.Д. Устройство удаления влаги из поврежденных многослойных панелей. Заявка на полезную модель № 2017121728/03 (037604) от 20.06.2017, решение о выдаче патента от 15.12.2017.
3. Gelcoat Blisters – Repair, Diagnosis & Prevention. Book by Gougeon Brothers of WEST System. Catalog number 002-650, 9th Edition Printed 6/07 (<https://www.westsystem.com/wp-content/uploads/Gelcoat-Blisters-Diagnosis-Repair-and-Prevention.pdf>).

REFERENCES

1. Nigel Clegg. Has my got yacht osmosis?// Waterway. (Available at: https://www.amariner.net/article26_osmos_ru.html).
2. Emelyanov M.D. Ustroystvo udaleniya vlagi iz povrezhdennykh mnogosloynnykh paneley. Zayavka na poleznuyu model' № 2017121728/03(037604) ot 20.06.2017, reshenie o vydachi patenta ot 15.12.2017 [The device for moisture elimination from the damaged multilayer panels. The application for useful model No. 2017121728/03(037604) from 6/20/2017, the patent issue decided from 12/15/2017].
3. Gelcoat Blisters – Repair, Diagnosis & Prevention. Book by Gougeon Brothers of WEST System. Catalog number 002-650, 9th Edition Printed 6/07. (Available at: <https://www.westsystem.com/wp-content/uploads/Gelcoat-Blisters-Diagnosis-Repair-and-Prevention.pdf>)



МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 621.432.4:51-7

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ЗОНЫ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЧУГУННЫХ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

И.И. Кулешов, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Владивосток, тел.: +7 (423) 230-12-51, e-mail: kuleshov.ii@rs-class.org

В.М. Ходаковский, канд. техн. наук, доцент, профессор, МГУ им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток, тел.: +7 (423) 230-12-51, e-mail: khodprim@mail.ru

В работе проведено теоретическое обоснование выбора параметров технологического процесса деформационного упрочнения зоны лазерного воздействия чугунных деталей. На основании опыта выполненных работ в области лазерного упрочнения чугунных деталей, а также опыта проведения деформационного упрочнения, было выполнено исследование, состоящее из нескольких этапов. На первом этапе проведено лазерное упрочнение с оплавлением, в результате которого на упрочняемой поверхности была сформирована зона лазерного воздействия, включающая в себя зону оплавления. В зоне оплавления установлено наличие значительного количества остаточного аустенита ($\approx 25\%$), обладающего сравнительно невысокой микротвердостью. После этого был проведен процесс деформационного упрочнения. В результате этого процесса на поверхности зоны оплавления была сформирована «белая фаза», обладающая повышенной микротвердостью. Выполнен математический анализ проведенного предварительного эксперимента, в результате которого определено, что распределение микротвердости «белой фазы» на поверхности зоны оплавления подчиняется нормальному закону распределения. На основании априорной информации был составлен план в виде полного факторного эксперимента. Определены уравнения регрессии микротвердости «белой фазы» в зависимости от скорости обработки, времени обработки, удельного давления. Подтверждена сходимость теоретических предположений и экспериментальных данных.

Ключевые слова: «белая фаза», деформационное упрочнение, закон распределения, статистические параметры, теоретическое обоснование, нормальный закон

STATISTICAL PARAMETERS OF THE OUTPUT CHARACTERISTICS OF PROCESS CONDITIONS FOR STRAIN HARDENING ZONE OF LASER TREATMENT OF CAST IRON PARTS IN SHIP POWER PLANTS

I.I. Kuleshov, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", Vladivostok, tel. +7 (423) 230-12-51, e-mail: kuleshov.ii@rs-class.org

V.M. Khodakovsky, PhD, associate professor, professor, G.I. Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok, tel. +7 (423) 230-12-51, e-mail: khodprim@mail.ru

The theoretical substantiation of the process parameters choice for the strain hardening zone of the laser treatment of the cast iron parts is considered. Based on the experience of work performed in the area of laser hardening of cast iron parts, as well as the experience in strain hardening, the study was carried out in several stages. In the first stage of laser hardening with the melting, in which the hardened surface was formed by the laser action zone, including the zone of melting. In the zone of fusion considerable presence of residual austenite ($\approx 25\%$) with relatively low microhardness was detected. This was followed by the process of strain hardening. As a result of this process, "white phase" with increased microhardness was formed on the surface of the reflow zone. Mathematical analysis of the preexperiment was performed, determining that the distribution of the "white phase" microhardness of on the surface of the reflow zone is subject to normal distribution law. On the basis of a priori information a plan has been drawn up in the form of a full factorial experiment. The regression equations of the "white phase" microhardness depending on the processing speed, processing time, specific pressure have been determined. The convergence of theoretical assumptions and experimental data has been confirmed.

Keywords: "white phase" deformation hardening, distribution law, the statistical parameters, the theoretical justification of the normal law

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной техники связано с созданием новых и постоянным совершенствованием существующих технологических процессов. Основой их разработки и оптимизации является эксперимент. Заметное повышение эффективности экспериментальных исследований и инженерных разработок достигается использованием математических методов планирования экспериментов.

Эффективность использования статистических методов планирования эксперимента при исследовании технологических процессов объясняется тем, что многие важные характеристики этих процессов являются случайными величинами, распределения которых близко следуют нормальному закону.

Использование математическо-статистических методов при постановке задач, в процессе экспериментирования и при обработке полученных данных существенно сокращает сроки решения задач, снижает затраты на исследования и повышает качество полученных результатов. Особенно значителен эффект при изучении сложных многофакторных процессов.

Для изготовления большинства ответственных литых деталей судовых энергетических установок применяется серый чугун. К таким деталям можно отнести: цилиндры паровых машин, блоки цилиндров, рамовые подшипники вспомогательных механизмов и распределительных валов, поршни, маслоотъематели для поршневых колец двигателей внутреннего сгорания (ДВС), втулки цилиндров ДВС и компрессоров, шевронные колеса грузовых лебедок и т.д. В процессе работы рабочие поверхности чугунных деталей, работающих как на трение, так и на ударные нагрузки, подвержены интенсивному износу вследствие накопленных остаточных напряжений. Серый чугун представляет собой сплав железа с большим количеством углерода. В структуре серого чугуна присутствует графит, который, ввиду его низкой твердости, можно определить как пустоты в структуре металла. Данная особенность обуславливает высокую хрупкость чугуна. Ввиду этого, серый чугун применяют в основном для деталей, работающих на сжатие. С целью повышения прочности и износостойкости таких деталей существует ряд методов, позволяющих значительно повысить эксплуатационные характеристики таких деталей. Все методы можно разделить на следующие группы: легирование материала, использование графитизирующих присадок, термическая обработка, упрочнение технологическими методами [1]. В работах [1, 2] определено, что методами, наиболее перспективными для упрочнения рабочих поверхностей чугунных деталей, работающих в сопряжении на износ, являются технологические методы, к которым относятся: поверхностно-пластическое деформирование (ППД), лазерное упрочнение, деформационное упрочнение. Наиболее приемлемым видом упрочнения является лазерное термоупрочнение ввиду следующих его особенностей: отсутствия механизма релаксации при нагреве до температур ниже критических, который присущ методам ППД; высоких параметров глубины и ширины зоны лазерного упрочнения; высоких прочностных характеристик зоны лазерного воздействия.

Стоит отметить, что методы лазерной обработки материалов на российском рынке используются в довольно широком диапазоне отраслей промышленности, в зависимости от технологических задач производства изделий:

- лазерная резка;
- лазерная сварка и наплавка;
- маркировка и гравировка;
- микрообработка.

Однако, вне зависимости от метода, основной составной частью формирования любого технологического процесса как на производстве, так и в лабораторных условиях, является определение значимых факторов, влияющих на параметры оптимизации. В настоящее время существуют различные методики проведения предварительного математического моделирования в зависимости от количества факторов, вида априорной информации, и т.д.

Так в работах [1 – 3] при выполнении исследований используются как методы корреляционного анализа, так и планирование на основе полного факторного эксперимента. В результате данных исследований получены уравнения регрессии, позволяющие с достаточно высокой точностью определить исследуемые параметры оптимизации.

С целью проверки теоретического обоснования параметров технологического процесса деформационного упрочнения зоны лазерного воздействия чугунных деталей были проведены экспериментальные исследования.

Проведение эксперимента и математическая обработка экспериментальных данных осуществлялись в следующей последовательности:

- определение места проведения эксперимента;
- определение применяемого оборудования;
- определение технологических режимов;
- выполнение задач эксперимента.

Проводился активный эксперимент при условии равномерного дублирования опытов. Взаимосвязь входных (скорость обработки, время обработки) и выходного (микротвердость) параметров устанавливаются в виде регрессионных зависимостей.

Цель работы заключается в установлении зависимости микротвердости и времени обработки, микротвердости и скорости обработки, а также в определении статистических параметров выходных характеристик технологических режимов деформационного упрочнения зоны лазерного воздействия чугунных деталей судовых энергетических установок.

1. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Испытания проводились на базе лабораторий кафедры технологии и организации судоремонта ФГБОУ ВО МГУ им. адм. Г.И. Невельского:

- лаборатория «Триботехнических испытаний»;
- учебно-научная лаборатория «Лазерной техники и технологии»;
- лаборатория «Дефектации и диагностики судовых технических средств».

В качестве технологического оборудования использовалось следующее:

- лазерная установка «Комета-2»;
- микроскоп Leica DM4000 M;
- микротвердомер МНТ-10;
- универсальная машина трения с высокотемпературной камерой УМКВТ;
- преобразователь частоты с управлением вектора потока EI-9011.

В качестве исходных образцов использовались образцы прямоугольного сечения с размерами 10×10×30 мм. Образцы выполнены из серого чугуна марки СЧ30 (ГОСТ 1412-85; химический состав: C = 3,16 %, Si = 1,6 %, Mn = 0,8 %, S = 0,1 %, P = 0,1 %).

Результаты определения структуры: структура серого чугуна 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 мкм², площадь наибольшего включения цементита – 10000 – 16000 мкм²: ПГф1–ПГр5–ПГд750–ПГ10–ПГ1–ПГ2–Пд0,3–Ц10–Цп13000.

Твердость металлической основы средняя 334 HV, твердость цементита средняя 1143 HV.

Контртело представлено диском: диаметр – 42 мм, ширина – 10 мм, который выполнен из стали 45 (ГОСТ 1050-88; химический состав: C = 0,44 %, Si = 0,3 %, Mn = 0,7 %, S = 0,023 %, P = 0,015 %, Ni = 0,2 %, Cr = 0,1 %, Cu = 0,17 %, As = 0,05 %, Fe – остальное.).

Лазерное упрочнение проводилось на режимах:

- мощность излучения – 1 кВт;
- диаметр лазерного луча – 4 мм;
- скорость перемещения луча – 0,04 м/с.

Пластическое деформирование выполнялось по схеме «диск – колодка» (трение скольжения) на режимах:

- время обработки t – 150-300 с;
- скорость обработки v – 0,1 – 1,2 м/с.

В ходе процесса деформационного упрочнения в зону контакта подавался смазочный материал с интенсивностью 8 – 10 капель в минуту.

Металлографические исследования проводились при 50 – 1000-кратных увеличениях до травления и после травления в 4 %-м растворе азотной кислоты в спирте. Измерение твердости проводилось при нагрузке 150 Н и увеличении $\times 500$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате лазерной обработки с оплавлением на упрочняемой поверхности чугунной детали формируется зона лазерного воздействия (ЗЛВ), которая состоит из зоны оплавления (ЗО) и зона термического влияния (ЗТВ). В ЗО формируется структура, состоящая из мелких дендритов аустенита, образовавшихся при кристаллизации расплавленного металла и окруженных дисперсным ледебуритом (рис. 1, 2). Микротвердость зоны оплавления со структурой ледебурит + аустенит – 484 *HV* – 556 *HV*. В зоне оплавления присутствуют участки со структурой мартенсит + аустенит остаточный, их микротвердость 545 – 585 *HV*.

Размеры ЗЛВ:

ширина – 4837,5 мкм;

глубина – 1025 мкм;

ширина ЗО – 3068,8 мкм;

глубина ЗО – 387,5 мкм.

В работах [1, 4, 5] установлено, что в процессе деформационного упрочнения на обрабатываемой поверхности чугунной детали, предварительно подвергшейся лазерной обработке с оплавлением образуется так называемая «белая фаза». Так же установлено, что формирование «белой фазы» преимущественно происходит по структуре ЗО, представленной ледебуритом с мелкоячеистыми включениями аустенита. При проведении данного исследования после лазерной обработки металлографическими исследованиями методом А.А. Глаголева (точечный метод определения структуры состава сплава по объему) установлено, что ЗО состоит на $\approx 25\%$ из структуры ледебурит + мелкоячеистый аустенит. Следовательно, формирование «белой фазы» в ЗЛВ возможно.

Процесс деформационного упрочнения выполнялся в несколько этапов:

- подтверждение возможности формирования «белой фазы» на упрочненной поверхности;
- деформационное упрочнение ЗЛВ.

С целью подтверждения возможности формирования «белой фазы» на упрочненной поверхности методом лазерной обработки проводился предварительный опыт, выполненный на следующих технологических режимах:

- время обработки $t = 150$ с;
- скорость обработки $v = 0,3$ м/с.

В результате проведенного исследования на данном этапе эксперимента было установлено, что в ЗО сформирована «белая фаза» (рис. 3), средняя микротвердость которой составляет 724 *HV*.



Рис. 1 Общий вид зоны оплавления, $\times 50$

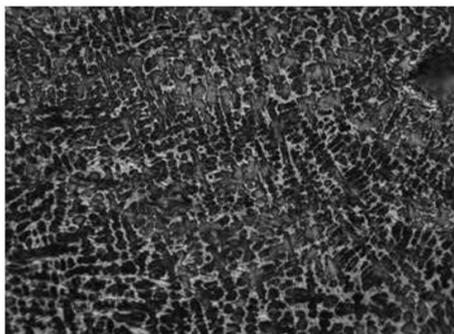


Рис. 2 Зона оплавления, $\times 1000$



Рис. 3 Общий вид «белой фазы», $\times 500$

Для проведения деформационного упрочнения следует разработать план эксперимента. Для этого необходимо установить к какому закону принадлежит распределение значения микротвердости «белой фазы».

Было выполнено 28 замеров микротвердости «белой фазы», сформированной в ходе предварительного опыта. На основании полученных данных была проведена проверка сложной гипотезы критерием χ^2 для непрерывного распределения в соответствии с методикой, приведенной в [6]. В табл. 1, приведены значения микротвердости «белой фазы» и частота наблюдений.

На основании данных табл. 1, построена гистограмма распределения частоты наблюдения и микротвердости (рис. 4).

Таблица 1

Частота наблюдений значений микротвердости «белой фазы»

Микротвердость, HV	716	718	719	720	721	723	724	726	731
Частота, n	1	2	3	5	6	5	4	1	1

По внешнему виду гистограмма (рис. 4) одномодальная, куполообразная, и в первом приближении можно считать, что она характеризует нормальный закон распределения.

Оценка параметров распределения позволила определить среднее значение микротвердости $HV_{cp} = 721,57$, среднеквадратичное отклонение $S = 2,94$. Таким образом, можно сформулировать исходную гипотезу о том, что рассматриваемое распределение вероятности значения микротвердости «белой фазы» подчиняется нормальному закону со средним значением $HV_{cp} = 721,54$ и среднеквадратичным отклонением $S = 2,94$ %.

Необходимо проверить принятую гипотезу о нормальном распределении микротвердости. Проверка проводилась с применением критерия согласия Пирсона (χ^2 – критерия). Уровень значимости принят $\alpha = 0,05$, число степеней свободы – 7. Проверка гипотезы о нормальном законе распределения обеспечила следующие результаты: $\chi^2_{набл} = 4,571$, $\chi^2_{крит.0,05,7} = 14,067$. Условие $\chi^2_{набл} \leq \chi^2_{крит}$ выполняется. Отклонение микротвердости от ожидаемых значений обусловлено влиянием большого числа факторов (применяемый вид смазочного масла в паре трения, температура окружающей среды и др.), каждый из которых не зависит от других факторов, и влияние каждого фактора незначительно по отношению к интегральному влиянию. В этом случае наиболее вероятным законом распределения микротвердости «белой фазы» будет нормальный закон распределения [7 – 9], что было принято за нулевую гипотезу. Проверка гипотезы по критерию Пирсона показала, что микротвердость действительно распределена по нормальному закону с вероятностью не менее 0,95.

На основании принятой гипотезы о нормальном распределении микротвердости установлено, что в дальнейшем для определения статистических характеристик технологических режимов деформационного упрочнения возможно использовать планирование эксперимента в виде регрессионного анализа, представленного полным факторным экспериментом [7].

Для определения количества экспериментов при двухфакторном моделировании была составлена матрица планирования, приведенная в табл. 2 [8, 10].

В качестве независимых переменных при деформационном упрочнении зоны лазерного воздействия чугуновых деталей принимались: время обработки (t), скорость обработки (v). В качестве отклика (зависимой переменной) принималась микротвердость «белой фазы», измеренная не менее чем в 7 местах и усредненная.

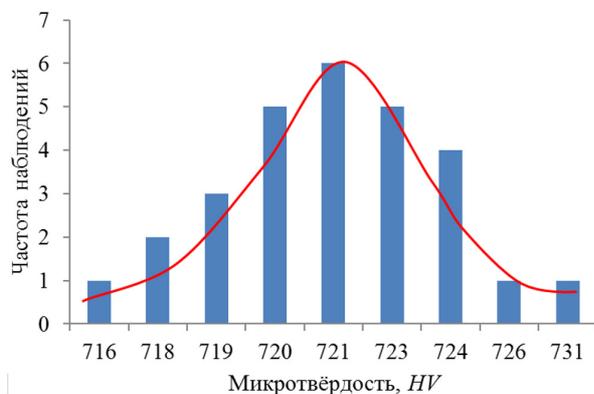


Рис. 4 Микротвердость «белой фазы»

Таблица 2

Матрица планирования

№ опыта	Матрица планирования	
	x_1	x_2
1	+	+
2	–	+
3	+	–
4	–	–

3. ОБСУЖДЕНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Факторы, их уровни и интервалы варьирования, выбранные на основании априорной информации и предварительных экспериментов, приведены в табл. 3. Результаты эксперимента приведены в табл. 4. Обработка результатов эксперимента проводилась для равномерного дублирования опытов.

Таблица 3

Факторы, уровни и интервалы варьирования

Фактор	Кодовое обозначение	Вариант	Уровни факторов			Интервал варьирования
			+1	0	-1	
Время обработки t , с	x_1	1	250	200	150	200
		2	50	300	250	
Скорость обработки v , м/с	x_2	1	0,1	0,3	0,5	0,6
		2	0,2	0,2	0,4	0,2

Таблица 4

Результаты измерения микротвердости «белой фазы»

№ опыта	Микротвердость «белой фазы» HV			
	y_1		y_2	
1	587	597	613	601
2	632	654	675	658
3	694	713	740	735
4	748	787	782	791

По данным параллельных опытов проводился расчет дисперсий и проверялась гипотеза их однородности по критерию Кохрена. Поскольку выполнялось условие $G_{\text{табл}} = 0,6798 > G_{\text{расч}} = 0,617; 0,536$, ряд дисперсий считался однородным.

Рассчитывались коэффициенты регрессии и проверялась их статистическая значимость. Статистически значимыми признавались коэффициенты, абсолютная величина которых равна или превышает доверительный интервал. В данном случае это b_0, b_1, b_2 .

Величина коэффициента b_{12} менее доверительного

интервала, поэтому он не имеет значимости. Таким образом, в результате полного факторного эксперимента 2^2 для исследуемого процесса деформационного упрочнения зоны лазерного воздействия чугуна были получены уравнения регрессии для определения микротвердости «белой фазы» в кодированном виде:

$$y_1 = 676,5 - 28,75x_1 - 59x_2; \tag{1}$$

$$y_2 = 699,375 - 27,125x_1 - 62,625x_2; \tag{2}$$

Графики зависимости микротвердости «белой фазы» от скорости и времени обработки для двух вариантов исследования в кодированной форме представлены на рис. 5.

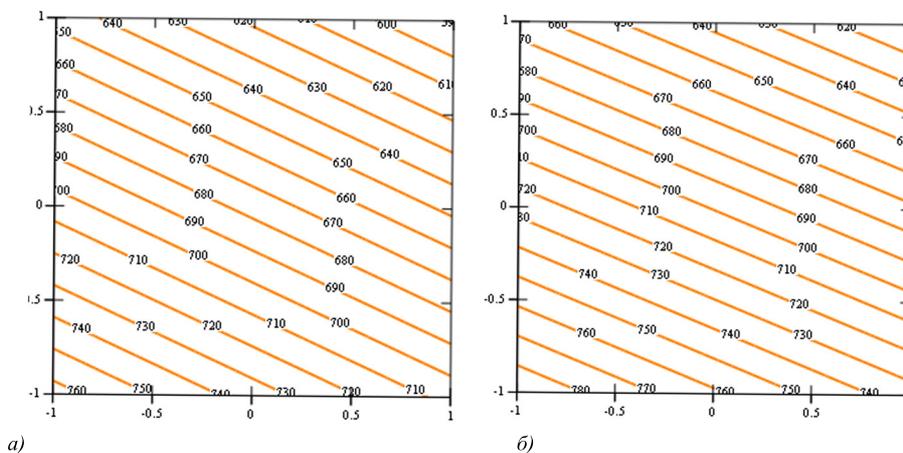


Рис. 5 Графики зависимости микротвердости «белой фазы» от скорости и времени обработки в кодированной форме:

Адекватность модели проверялась по критерию Фишера. При уровне значимости $\alpha = 0,05$ табличное значение критерия Фишера $F_{\text{табл}} = 3,84$. Поскольку $F_{\text{табл}} = 3,84 > F_{\text{расч}} = 0,274; 0,818$, то принималась гипотеза об адекватности моделей. Результаты регрессионного анализа приведены в табл. 5.

Результаты регрессионного анализа уравнения для микротвердости «белой фазы»

Расчетные величины	Результаты расчета	
	1	2
Коэффициенты регрессии:		
b_0	676,5	699,375
b_1	-28,75	-27,125
b_2	-59	-62,625
b_{12}	3,25	-2,625
Доверительный интервал $\pm \Delta b_i$	20,243	9,464
Критерий Кохрена G : табличный	0,6798	
расчетный	0,617	0,536
Дисперсия адекватности $S_{\text{ад}}^2$	84,5	55,125
Дисперсия воспроизводимости эксперимента $S_{\text{в}}^2$	308,25	67,375
Критерий Фишера F : табличный	3,84	
расчетный	0,274	0,818

Таблица 5

Поскольку линейные части полиномов адекватны, следовательно, микротвердость «белой фазы» для каждого варианта с достаточной точностью можно аппроксимировать уравнениями линейного вида. В результате перехода от кодированных значений к натуральным по формулам для случая, когда скорость обработки изменяется в пределах от 0,1 до 0,5 м/с:

$$x_1 = \frac{t-200}{50}; \quad x_1 = \frac{v-0,3}{0,2},$$

получили

$$HV_1 = 880 - 0,575t - 295v, \quad (3)$$

а когда скорость обработки изменяется в пределах от 0,2 до 0,6 м/с:

$$x_1 = \frac{t-250}{50}; \quad x_1 = \frac{v-0,4}{0,2},$$

получили

$$HV_2 = 960,25 - 0,54t - 313,13v, \quad (4)$$

Графики зависимости микротвердости «белой фазы» от скорости и времени обработки для двух вариантов исследования для натуральных значений представлены на рис. 6.

Эти формулы (3, 4) позволяют рассчитывать микротвердость «белой фазы» для зоны лазерного воздействия чугунов при различных скоростях обработки и времени обработки с достаточно высокой точностью.

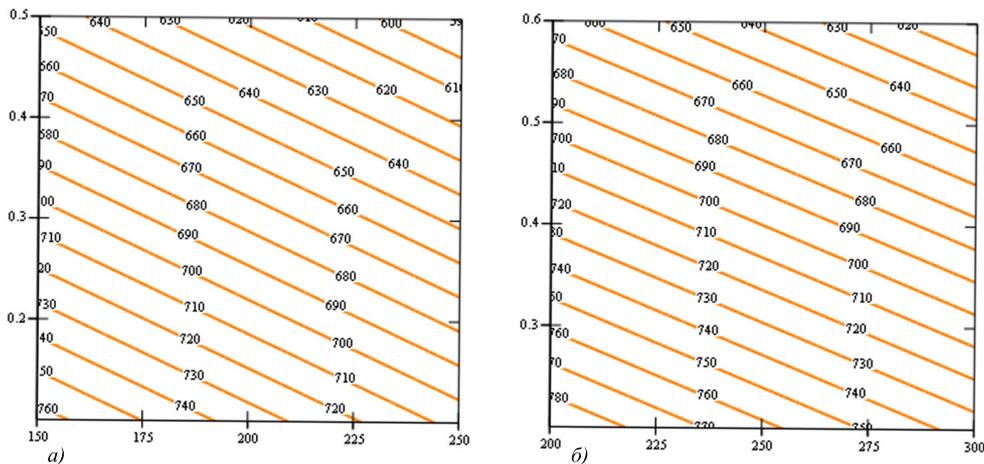


Рис. 6 Графики зависимости микротвердости «белой фазы» от скорости и времени обработки для натуральных значений: а) – вариант 1; б) – вариант 2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования было выявлено следующее:

- распределение микротвердости «белой фазы» при деформационном упрочнении зоны лазерного воздействия чугунной детали происходит в соответствии с нормальным законом распределения;
- математическое моделирование процесса деформационного упрочнения в виде двухфакторного эксперимента позволяет определить, что существенное влияние на изменение микротвердости «белой фазы» оказывают скорость обработки (v) и время обработки (t);
- определены статистические характеристики параметров процесса деформационного упрочнения;
- в результате двухфакторного эксперимента были получены уравнения регрессии (3, 4), позволяющие с достаточно высокой точностью определить значения рассматриваемых параметров технологического процесса, для получения ожидаемого параметра оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулешов И. И., Ходаковский В.М. Повышение эффективности лазерного упрочнения чугунных деталей судовых энергетических установок // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 814–828.
2. Кулешов И.И., Ходаковский В.М. Повышение работоспособности поршневых канавок головок поршней судовых малооборотных двигателей // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2016. — Т. 40. — № 6. — С. 155–168.
3. Кулешов И.И., Ходаковский В.М. Исследование влияния тепловых и механических нагрузок на деформацию головок поршней судовых малооборотных дизелей // Морские интеллектуальные технологии. — 2017. — Т. 35. — № 1. — С. 43–53.
4. Кулешов И.И., Ходаковский В.М. Повышение эффективности лазерного упрочнения чугунных противозносных колец // XVIII международная научно-практическая конференция «Технические науки — от теории к практике». Москва. — 2017. с. 17 – 23.
5. Кулешов И.И., Ходаковский В.М. Влияние обработки трением на микротвердость и структуру зоны лазерного воздействия чугунных деталей // Вестник морского государственного университета. Сер. Судостроение и судоремонт. – Владивосток : Мор. гос. ун-т, 2017. – Вып. 79/2017., с 15-24.
6. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. - М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
7. Длин А.М. Математическая статистика в технике: Издание третье, переработанное. – М.: Советская наука, 1958. – 469 с.
8. Гмурман В.Е. Теория вероятности и математическая статистика: Учеб. Пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – 9 изд., стер.– М.: Высш. школа, 2003. – 479 с.
9. Неве Ж. Математические основы теории вероятностей. – М., 1986. – 310 с.
10. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 278 с.

REFERENCES

1. Kuleshov I.I., Khodakovskiy V.M. Povyshenie effektivnosti lazernogo uprochneniya chugunnykh detaley sudovykh energeticheskikh ustanovok [Improvement efficiency of laser strengthening of iron details ship's power plants]. The scientific journal "Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova". 2017, vol. 9, № 4, pp. 814 – 828.
2. Kuleshov I.I., Khodakovskiy V.M. Povyshenie rabotosposobnosti porshnevykh kanavok golovok porshney sudovykh malooborotnykh dvigateley [Improvement the operability of the piston crowns rings grooves of low speed propulsion marine diesel engine]. The scientific journal "Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova". 2016, vol. 6, № 40, pp. 155–167.
3. Kuleshov I.I., Khodakovskiy V.M. Issledovanie vliyaniya teplovykh i mekhanicheskikh nagruzok na deformatsiyu golovok porshney sudovykh malooborotnykh dizeley [Investigation of thermal and mechanical capacity on deformation of piston crown of low speed propulsion marine diesel engine]. Morskoe intellektual'niye tekhnologyy [Marine Intellectual Technologies]. 2017, vol. 35, № 1, pp. 43 – 53.
4. Kuleshov I.I., Khodakovskiy V.M. Povyshenie effektivnosti lazernogo uprochneniya chugunnykh protivoznosnykh kolets [Improvement efficiency laser hardening of cast iron wear rings]. XVIII Mezhdunarodnaya nauchno-practicheskaya konferenciya "Tekhnicheskie nauki – ot teorii k practice" [XVIII International theoretical and practical conference "Technical science – from theory to practice"]. 2017, pp. 17 – 22.
5. Kuleshov I.I., Khodakovskiy V.M. Vliyaniye obrabotki treniem na mikrotverdost' i strukturu zony lazernogo vozdeystviya chugunnykh detaley [Influence of friction processing on microhardness and structure of laser action zone of iron parts]. Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta imeni admiral G.I. Nevelskogo. Sudostroenie i sudoremont. 2017, 79, pp. 15 – 24.
6. Stepnov M.N. Statisticheskie metody obrabotky resul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy [Statistical methods of mechanical tests results processing]. Moscow, Machinostroenie Publ., 1985.
7. Dlin A.M. Matematicheskaya statistika v tekhnike [Mathematical statistic in technic]. Moscow, Sovetskaya nauka Publ., 1958.
8. Gmurman V.E. Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistic]. Moscow, Vischaya shkola, 2003.
9. Nevey J. Matematicheskie osnovy teorii veroyatnostey [Mathematical basis of probability theory]. Moscow, 1986.
10. Adler Yu.P., Markova E.V. and Granovskiy Yu.V. Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy [Planning an experiment under search of optimal conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976.

УДК 669.14.018.41:620.17

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НОВЫХ ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ С ИНДЕКСОМ "ARC" ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АРКТИКЕ

О.В. Сыч, канд. техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, e-mail: npk3@crism.ru

Е.И. Хлусова, д-р техн. наук, профессор, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, e-mail: npk3@crism.ru

М.А. Гусев, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, e-mail: npk3@crism.ru

М.Е. Юрков, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург, e-mail: yurkov.me@rs.class.org

Представлены результаты комплексных испытаний листового проката из новых хладостойких "Arc"-сталей с гарантированным пределом текучести 355 – 390 и 750 МПа. Определены стандартные механические характеристики, температуры вязкохрупкого перехода T_k и T_{kb} , нулевой пластичности NDT , значения критического раскрытия в вершине трещины $CTOD$ основного металла и зоны термического влияния, характеристики коррозионно-механической прочности стали. Разработанные стали с индексом "Arc" могут быть использованы для любых элементов морских арктических конструкций без ограничений при температуре эксплуатации до -40 °С. Приведены данные о выборе принципиальных схем производства и разработке технологий, гарантирующих высокую работоспособность толстолистового проката при низких температурах в соответствии с требованиями Правил РС к сталям с индексом "Arc".

Ключевые слова: низколегированная "Arc"-сталь, высокопрочная сталь, механические свойства, работоспособность, хладостойкость, трещиностойкость

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF NEW COLD-RESISTANT "ARC"-INDEXED STEELS FOR APPLICATION IN THE ARCTIC

O.V. Sych, PhD, NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey", St. Petersburg, e-mail: npk3@crism.ru

E.I. Khlusova, DSc, professor, NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey", St. Petersburg, e-mail: npk3@crism.ru

M.A. Gusev, NRC "Kurchatov Institute" – CRISM "Prometey", St. Petersburg, Russia, e-mail: npk3@crism.ru

M.E. Yurkov, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: yurkov.me@rs.class.org

The results of complex tests of new cold-resistant "Arc"-indexed steels with guaranteed yield strength 355 – 390 and 750 MPa are submitted. Standard mechanical characteristics, ductile-brittle transition temperatures T_k and T_{kb} , nil ductile temperature NDT , crack tip opening displacement $CTOD$ of base metal and HAZ , corrosion-mechanical strength are determined. The developed "Arc"-indexed steels are applicable for any Arctic marine structures elements without limitations at service temperatures down to -40 °C. Data on fundamental technological schemes and technology development providing high performance characteristics of thick rolled plates at low temperatures in accordance with the RS Rules requirements for "Arc"-indexed steels are also presented.

Keywords: low-alloyed "Arc"-steel, high-strength steel, mechanical properties, working capacity, cold-resistance, crack resistance

ВВЕДЕНИЕ

В связи с задачами круглогодичного освоения Северного морского пути, транспортного обслуживания и освоения шельфовых месторождений и прибрежной инфраструктуры Арктики возникает потребность в обеспечении строительства ледоколов и широкого спектра судов ледового плавания различных типов (танкеров, контейнеровозов, судов снабжения и др.) и развития технологий подводной добычи новыми хладостойкими коррозионностойкими материалами с хорошей свариваемостью и технологичностью в судокорпусном производстве.

Материалы для Арктики должны обладать высоким качеством и высокой конкурентоспособностью по отношению к зарубежным аналогам по своим технико-экономическим показателям.

На рис. 1 представлена зависимость максимально возможной толщины элемента конструкции (для наиболее высоконагруженных элементов – группы связи III) от расчетной температуры эксплуатации для

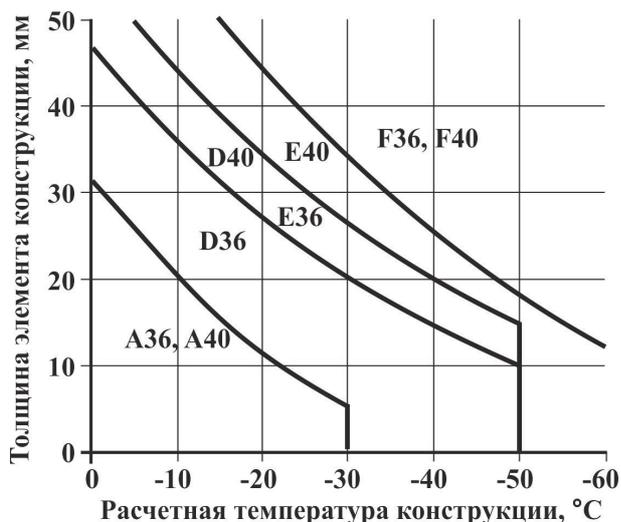


Рис. 1 Взаимосвязь максимальной толщины элемента конструкции группы связей III и расчетной температуры эксплуатации [1]

сталей категорий хладостойкости А, D, E, F (категорий прочности 36 – 40). Так, например, максимальная толщина элементов конструкции, для которой применима сталь категорий F36 – F40 при расчетной температуре конструкции –40 °C, составляет 25 мм. То есть согласно подходу, принятому в Правилах РС [1 – 3], выполнение требований только лишь по работе удара для стали данной категории гарантирует отсутствие хрупких разрушений при толщине листового проката до 25 мм. Безопасное применение стали в толщинах, превышающих данные ограничения, возможно после подтверждения ее хладостойкости и работоспособности по результатам дополнительных испытаний [1 – 3].

В 2012 г. Российским морским регистром судоходства введены в действие требования к сталям с индексом "Arc". Согласно редакции Правил РС 2016 г. [2, 3], "Arc" – символ, добавляемый к обозначению стали категории, для которой выполнен комплекс испытаний по программе РС с целью определения дополнительных характеристик хладостойкости и работоспособности, удовлетворяющих соответствующим требованиям, предъявляемым к

сталям улучшенной свариваемости и требованиям по Z-свойствам.

Рядом с индексом "Arc" указывается расчетная (минимальная) температура эксплуатации материала T_d (без знака «минус»), до которой сталь может быть использована для любых конструктивных элементов без ограничений, например, F36W^{arc40}. За минимальную расчетную температуру T_d принимают наиболее высокое из всех полученных при дополнительных испытаниях значений температур вязко-хрупкого перехода $T_{кб}$ (при статическом нагружении) и T_{DWT} (при динамическом нагружении), температуры нулевой пластичности NDT , и T_{CTOD} (для основного металла и сварного соединения). Принятие решения о присвоении стали индекса "Arc" возможно при определении только одной или двух из трех температур вязко-хрупкого перехода ($T_{кб}$, NDT , T_{DWT}). В отечественной судостроительной практике принято проводить испытания по программе РС с определением двух температур $T_{кб}$ и NDT .

Принципиальным отличием сталей с индексом "Arc" от сталей категории F является то, что характеристики работоспособности таких сталей, в частности, при низких температурах, должны гарантироваться технологией их производства [4].

Наиболее востребованными как материал для судов широкого назначения остаются стали с гарантированным пределом текучести 355 – 390 МПа. В связи с этим была поставлена **первая задача** – создания судостроительных конструктивных сталей категории прочности 355 – 390 МПа в виде листового проката толщиной до 50 мм, позволяющих гарантировать характеристики работоспособности при эксплуатации в условиях Арктики.

Для подводных технических средств, строящихся на класс Российского морского регистра судоходства, снижение толщины корпусных связей за счет применения более прочных материалов позволяет достичь не только облегчения конструкции, но и повышения ее надежности по отношению к опасности хрупких разрушений. Это делает перспективным применение высокопрочной стали и в надводных конструкциях морской техники (в том числе, для подкрепляющего набора и ледового пояса ледоколов и нового класса кораблей ледового плавания). Повышенная коррозионно-механическая прочность таких сталей позволит ставить задачу снижения запасов на коррозию, высокая хладостойкость – обеспечить расширение линейки сталей с индексом "Arc", а относительно невысокий уровень легирования и малоэнергозатратные технологии – снизить экономические издержки при производстве.

Поэтому **второй задачей** являлось повышение прочности судостроительных сталей, поставляемых в виде листового проката толщиной до 40 мм, с 690 до 750 МПа с сохранением достигнутого уровня хладостойкости и хорошей свариваемости на базе известного химического состава [5].

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлась низкоуглеродистая низколегированная сталь с гарантированным пределом текучести 355 – 390 МПа, химический состав которой соответствует требованиям Правил РС [2, 3] и ГОСТ Р 52927-2015 [4] к стали марок F36W^{arc40} – F40W^{arc40}, и низкоуглеродистая экономнолегированная сталь с гарантированным пределом текучести 750 МПа, химический состав которой соответствует патенту № 2507295 [5]. Фактический химический состав листового проката исследованных плавок приведен в табл. 1.

Исследуемый листовый прокат отличался типом исходной заготовки (листовой слиток или ковчаная заготовка), технологией изготовления (термомеханическая обработка или закалка с прокатного нагрева с последующим высокотемпературным отпуском) и уровнем легирования.

Таблица 1

Химический состав листового проката исследованных плавок, масс. %

Категория прочности	Массовая доля элементов, %										
	C	Si	Mn+Ni+ Cu	Cr	Mo	Nb	Al	S	P	P _{см} ¹	C _{экв} ²
355-390	0,05	0,23	1,82	–	–	0,028	0,027	0,002	0,004	0,13	0,29
750	0,08	0,27	3,55	0,83	0,27	0,036	0,012	0,005	0,005	0,25	0,60

¹P_{см} = C + (Mo + Cr + Cu)/20 + Si/30 + Ni/60 + Mo/15 + V/10, . % (1)

²C_{экв} = + (Mo + Cr + V)/5 + (Cu + Ni)/15 + Mn/6, . % (2)

Программы комплексных исследовательских испытаний опытных образцов листового проката из новых сталей включали стандартные механические испытания (на статическое растяжение по ГОСТ 1497, на ударный изгиб и ударный изгиб после механического старения при отрицательных температурах на образцах с V-образным надрезом по ГОСТ 9454 и ГОСТ 7268 соответственно, испытания на статический изгиб по ГОСТ 14019, испытания на излом полнотолщинных проб по ГОСТ Р52927, испытания на растяжение в направлении толщины (Z-направлении) по ГОСТ 23870, определение характеристик работоспособности ($T_{кб}$, NDT , $CTOD$ основного металла), коррозионные испытания, испытания на свариваемость (в том числе, $CTOD$ зоны термического влияния).

Испытания по определению температуры вязко-хрупкого перехода $T_{кб}$ проводили на универсальной сервогидравлической испытательной машине SCHENCK 2500 кН в соответствии с Правилами РС [2, 3] и методикой СТО-07516250-256-2014 [6], утвержденной РС. Испытывали образцы прямоугольного сечения с глубоким круглым надрезом на трехточечный изгиб до разрушения при ряде последовательно понижающихся температур. За критическую температуру вязко-хрупкого перехода $T_{кб}$ принимали температуру, соответствующую 70 % доли вязкой составляющей в изломе образцов.

Испытания для определения температуры нулевой пластичности (NDT) проводили на вертикальном копре К90 (с максимальной возможной энергией разрушения 1350 Дж) путем нагружения падающим грузом в соответствии с Правилами РС [2, 3], методикой СТО-07516250-257-2009 [7], утвержденной РС, и стандартом ASTM E208 [8]. Испытаниям подвергали специальные образцы с нанесенной хрупкой наплавкой на растягиваемой поверхности и предварительно выполненным надрезом в наплавке. Критическую температуру NDT определяли, как наибольшую температуру с интервалом 5° С, при которой хотя бы один образец отвечает критерию «разрушен» [2, 3, 7, 8].

Испытания на трещиностойкость $CTOD$ основного металла и сварных соединений проводили в соответствии с Правилами РС [2, 3], методикой СТО-07516250-233-2012 [9], утвержденной РС, и зарубежными стандартами BS 7448 p.1 [10], BS/EN/ISO 15653 [11] и ISO 12135 [12]. Выращивание усталостной трещины проводили на резонансной машине RUMUL TESTRONIC 250V6. Образцы испытывали на сервогидравлической испытательной машине SCHENCK 1000 кН при квазистатическом нагружении со скоростью перемещения нагружающей траверсы, обеспечивающей возрастание коэффициента интенсивности напряжений для упругого участка нагружения образцов около 1,5Н/мм²√м/с. Для поддержания заданной температуры в течение всего испытания образцы находились в криотермокамере [2, 3, 9 – 12].

Коррозионные испытания включали следующие виды испытаний:

- определение склонности к коррозионному растрескиванию методом медленного одноосного растяжения по РД5.АЕИШ.3637-2013 [13],

- определение склонности к коррозионному растрескиванию методом консольного изгиба со ступенчато возрастающей нагрузкой по РД5.АЕИШ.3635-2013 [14].

Исследование микроструктуры было выполнено методами оптической металлографии с помощью микроскопа "Axiovert 40 MAT" на шлифах после травления в соответствии с требованиями ГОСТ 5639.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для низколегированных хладостойких сталей термомеханическая обработка с ускоренным охлаждением (ТМО) обладает рядом преимуществ перед альтернативными технологическими схемами производства. Во-первых, она является наиболее экономически эффективной и производительной, поскольку позволяет непосредственно после прокатки получать готовый продукт без необходимости использования дополнительных технологических операций. Во-вторых, термомеханическая обработка в комплексе с микролегированием обеспечивает формирование микроструктуры с более мелким аустенитным и действительным (ферритным) зерном, а, следовательно, и более высокий уровень вязкости при низких температурах испытания, а также позволяет обеспечить заданный уровень прочности при снижении содержания углерода и минимальном легировании.

При производстве высокопрочных хладостойких сталей достижение оптимального структурного состояния стали при закалке с прокатного нагрева (ЗПН) с отпуском осуществляется в результате регламентированного охлаждения сразу же после окончания деформации и наследования конечной структурой созданного при горячей деформации структурного и субструктурного состояния высокотемпературной фазы (аустенита) с сохранением высокой плотности дислокаций. Повышение однородности и измельчение структуры, более равномерное распределение примесей, карбидных и других включений, уменьшение влияния границ зерен способствует значительному росту сопротивляемости хрупким разрушениям, а также снижает склонность стали к отпускной хрупкости.

Низколегированные стали. Опыт производства низколегированных марок сталей с гарантированным пределом текучести 355 – 390 МПа показывает, что прочностные характеристики листового проката слабо зависят от толщины листов при использовании технологии термомеханической обработки. При этом увеличение толщины листового проката приводит к понижению работы удара (особенно в середине по толщине листов свыше 30 мм) и работы удара после механического старения после испытаний при температурах –40°C и ниже.

Установлено, что для достижения требуемых механических свойств, в частности, работы удара не менее 50 Дж при температуре испытаний –60°C, и характеристик работоспособности уровень легирования стали категорий прочности 355 – 390 МПа должен обеспечивать формирование близких по морфологическому типу структурных составляющих в достаточно широком интервале скоростей охлаждения, что в свою очередь и позволяет получить однородную дисперсную структуру по всей толщине листового проката [15]. При этом формирование требуемой структуры определяется размером аустенитного зерна, сформированного при прокатке, что требует разработки термомеханических режимов, обеспечивающих его последовательное измельчение за счет процессов рекристаллизации аустенита, фрагментации и полигонизации дислокаций.

Высокопрочные стали. После закалки с прокатного нагрева хромоникельмедьмолибденовая сталь отличается повышенной отпускостойчивостью, повышенными значениями предела текучести [16], при этом имеет уровень значений работы удара при низких температурах не ниже, чем после традиционной закалки с отдельного печного нагрева с отпуском.

При этом очевидно, что закалка с прокатного нагрева является более предпочтительной с экономической точки зрения, поскольку позволяет исключить одно звено в технологической цепочке производства и уменьшить себестоимость продукции. Однако режимы горячей пластической деформации перед закалкой требуют серьезной доработки. Как показывает опыт производства легированных сталей, нерациональные термомеханические режимы приводят к формированию разнотерности в структуре стали, не устраняемой и при последующем охлаждении, что в сочетании с более высокими скоростями охлаждения по сравнению с термомеханической обработкой снижает сопротивление хрупким разрушениям и характеристики работоспособности стали.

3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ, ГАРАНТИРУЮЩИХ ВЫСОКУЮ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ПРИ ТРЕБУЕМОМ УРОВНЕ ПРОЧНОСТИ И ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Проблема разработки нового поколения экономнолегированных хорошо свариваемых сталей с индексом "Arc" с гарантированной высокой работоспособностью решена в данной работе путем выбора сбалансированного содержания в стали дорогостоящих легирующих элементов, использования микролегирования, применения новейших металлургических процессов (внепечное рафинирование и вакуумирование) и способов получения требуемого структурного состояния стали при прецизионной термомеханической обработке и закалке с прокатного нагрева с отпуском.

Для низколегированной стали разработана технология двухстадийной термомеханической обработки с ускоренным охлаждением: обеспечена строгая регламентация попроходных термомеханических режимов высокотемпературной (черновой) стадии прокатки для измельчения зерна аустенита за счет протекания процессов рекристаллизации и чистовой стадии прокатки для последовательного создания развитой субзеренной структуры аустенита и накопления необходимой плотности дислокаций перед началом ускоренного охлаждения по всей толщине раската.

Для высокопрочной экономнолегированной стали разработана технология закалки с прокатного нагрева с последующим высокотемпературным отпуском, которая позволяет сформировать мелкое аустенитное зерно на первой стадии прокатки с регламентацией схемы обжатий в области протекания динамической и статической (в паузах между проходами) рекристаллизации и обеспечить при завершении прокатки ниже температуры рекристаллизации формирование деформационной субструктуры в аустените с развитыми малоугловыми границами перед мартенситно-бейнитным превращением.

Реализация разработанных схем деформации и режимов охлаждения на оборудовании стана «5000» (г. Колпино) при производстве толстолистого проката из кузнечных и листовых слитков электросталеплавильного производства ООО «ОМЗ-Спецсталь» (в сочетании с последующим высоким отпуском для высокопрочной стали) позволяет при снижении уровня легирования на 15 % обеспечить требуемые прочностные характеристики и сохранить высокие вязкопластические свойства (табл. 2 и 3).

Требуемая прочность, пластичность, хладостойкость и работоспособность стали обеспечивается благодаря формированию мелкодисперсной квазигомогенной структуры по толщине листового проката:

- феррито-бейнитной с преобладанием гранулярного бейнита при среднем размере зерна по всей толщине проката 50 мм не более 7,8 мкм (10–11 баллов по ГОСТ 5639-82) в стали с пределом текучести не менее 355 – 390 МПа (рис. 1, а, б);
- мартенситно-бейнитной с высокой плотностью дислокаций и развитой субструктурой, состоящей преимущественно из реечного мартенсита, доля которого составляет 75 – 80 % в стали с пределом текучести не менее 750 МПа (рис. 1, в, г).

Характеристики работоспособности новых сталей с индексом "Arc".

Низколегированная сталь. На рис. 1 представлены характеристики хладостойкости и сопротивления хрупкому разрушению листового проката из низколегированной "Arc"-стали с гарантированным пределом текучести 355 – 390 МПа. На рис. 2 приведены зависимости критического раскрытия в вершине трещины *CTOD* основного металла от температуры испытаний.

Результаты определения работы удара при понижающихся температурах испытания показали, что температура вязко-хрупкого перехода для листового проката толщиной 25 (рис. 2, а) и 50 мм (рис. 2, б) ниже –80°С. Плотный волокнистый вид излома свидетельствует о высоком сопротивлении хрупкому разрушению (рис. 2, в).

Разработанные прецизионные режимы термо-механической обработки с ускоренным охлаждением при производстве листового проката из новых сталей с индексом "Arc" гарантируют обеспечение низких значений критических температур вязко-хрупкого перехода и высокой трещиностойкости. Получены следующие значения данных характеристик (рис. 2, г и 3):

$T_{кб} = -30^{\circ}\text{C}$, $NDT = -60^{\circ}\text{C}$, $CTOD = 0,78 - 1,22$ мм при температуре -60°C для листов толщиной 25 мм;

$T_{кб} = -15^{\circ}\text{C}$, $NDT = -60^{\circ}\text{C}$, $CTOD = 1,00 - 1,48$ мм при температуре -60°C , $CTOD = 0,35 - 2,03$ мм при температуре -50°C для листов толщиной 50 мм.

Значения температур вязко-хрупкого перехода $T_{кб}$ и нулевой пластичности NDT соответствуют требованиям Правил РС [2, 3] к стали с индексом "Arc30"/"Arc40". Полученные значения критического

Таблица 2

Механические свойства листового проката из хладостойкой "Arc"-стали с гарантированным пределом текучести 355 – 390 МПа

Толщина листового проката, мм		Место отбора образцов	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Работа удара при –60 °С, Дж	Работа удара после механического старения при –60 °С, Дж	Относительное сужение в z-направлении, %	% волокна в изломе пробы	Угол изгиба, град
25	min-max среднее	Поверхность	590–610 600	500–530 515	21–23,5 22,5	152–218 177	89–185 140	64–75 72	100	120, без трещин
50		Поверхность	546–585 560	434–472 455	26–29 27,5	162–281 209	119–226 151	72–81 76	100	120, без трещин
		Середина по толщине	541–590 563	435–468 452	25,5–32 29	127–247 235	–			
Требования [2–4]	F36Warc	490–630	≥ 355	≥ 21	≥ 50	≥ 50	≥ 35	≥ 80	120, без трещин	
	F40Warc	510–660	≥ 390	≥ 20						

Таблица 3

Механические свойства листового проката из хладостойкой высокопрочной стали с гарантированным пределом текучести 750 МПа

Толщина листового проката, мм		Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Равномерное удлинение, %	Относительное сужение, %	Работа удара при –40 °С, Дж	Работа удара после механического старения при –40 °С, Дж	Угол изгиба, град
25	min-max среднее	808–834 820	753–758 754	19,6–21,8 20,4	6,6–7,0 6,8	65,4–70,3 67,6	Поперек		120, Без трещин
							96–98 97	63–110 83	
							Вдоль		
							153–154 153	90–143 124	
40		818–838 827	750–760 754	19,7–21,2 20,5	6,7–7,0 6,9	66,8–71,7 69,4	Поперек		120, Без трещин
							106–116 110	86–117 96	
							Вдоль		
							178–188 182	129–163 150	
Требования		800–970	≥750	≥15	≥6	≥55	≥80	≥54	120, без трещин

раскрытия в вершине трещины *CTOD* при температурах испытаний –40, –50 и –60°С существенно превышают (в 5 – 7 раз) требования Правил РС [2, 3] к стали с индексом "Arc". Таким образом, по критерию трещиностойкости *CTOD* основного металла листового проката из низколегированных сталей с гарантированным пределом текучести 355 и 390 МПа удовлетворяет требованиям к стали с индексом от "Arc40" до "Arc60".

Значения критического раскрытия в вершине трещины *CTOD* металла зоны термического влияния при температуре испытаний –40 °С (0,69 – 1,09 мм при среднем значении 0,67 мм при требованиях Правил РС [2, 3] – не менее 0,15 мм) для сварных соединений листового проката толщиной 50 мм из низколегированных сталей с гарантированным пределом текучести 355 и 390 МПа, выполненных автоматической сваркой под флюсом при высоком уровне тепловложения (6 кДж/мм), также существенно превышают требования Правил РС [2, 3] к стали с индексом "Arc40", что говорит о потенциальной возможности понижения температуры эксплуатации T_d и обеспечения требований к сталям с индексом "Arc50" – "Arc60" по данному критерию.

Высокопрочная сталь. Результаты определения работы удара при понижающихся температурах испытания показали, что температура вязко-хрупкого перехода для листового проката толщиной 25 и 40 мм составляет

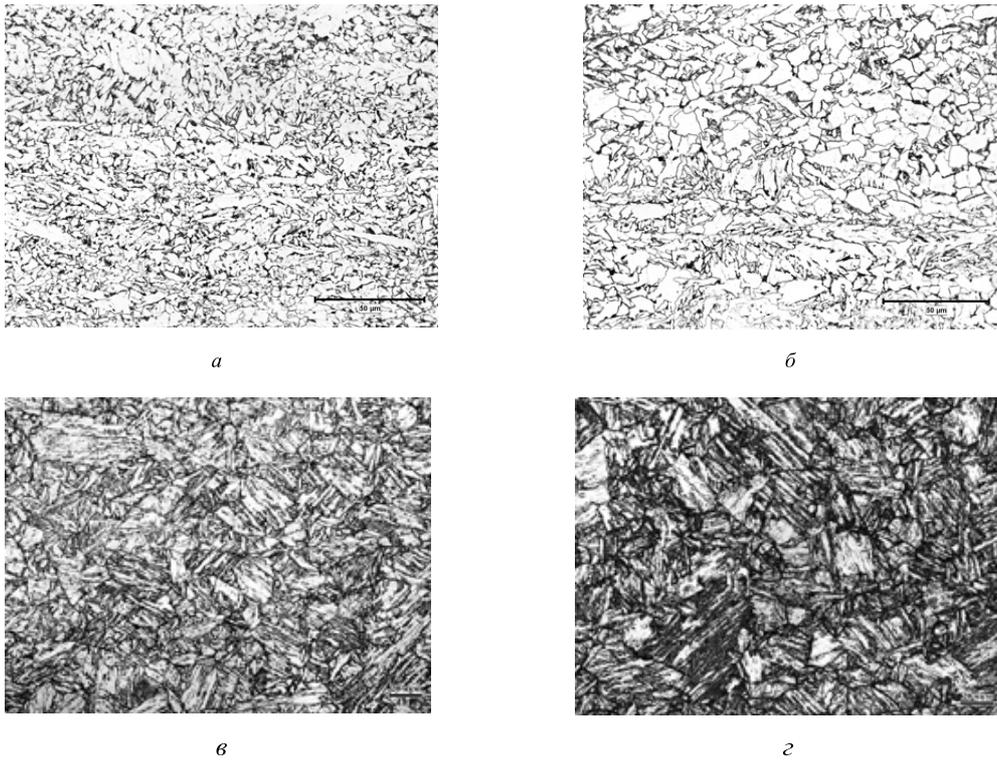


Рис. 1 Структура листового проката толщиной 50 мм из стали с пределом текучести не менее 355-390 МПа (а, б) и толщиной 40 мм из стали с пределом текучести не менее 750 МПа (в, г) на поверхности (а, в) и в середине по толщине листов (б, г)

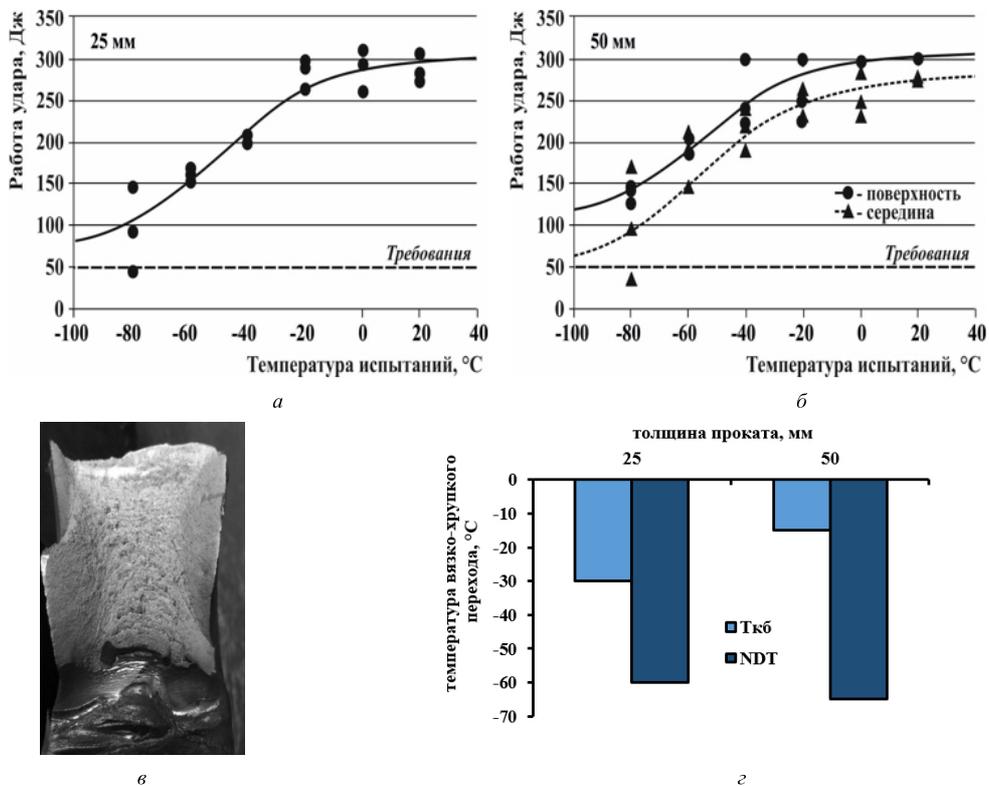


Рис. 2 Изменение работы удара при понижающихся температурах испытания листового проката из низколегированной стали с гарантированным пределом текучести 355 – 390 МПа толщиной 25 (а) и 50 (б) мм. Вид излома полнотолщинной пробы 50 мм (в). Значения температур вязко-хрупкого перехода $T_{кб}$ и нулевой пластичности NDT (г)

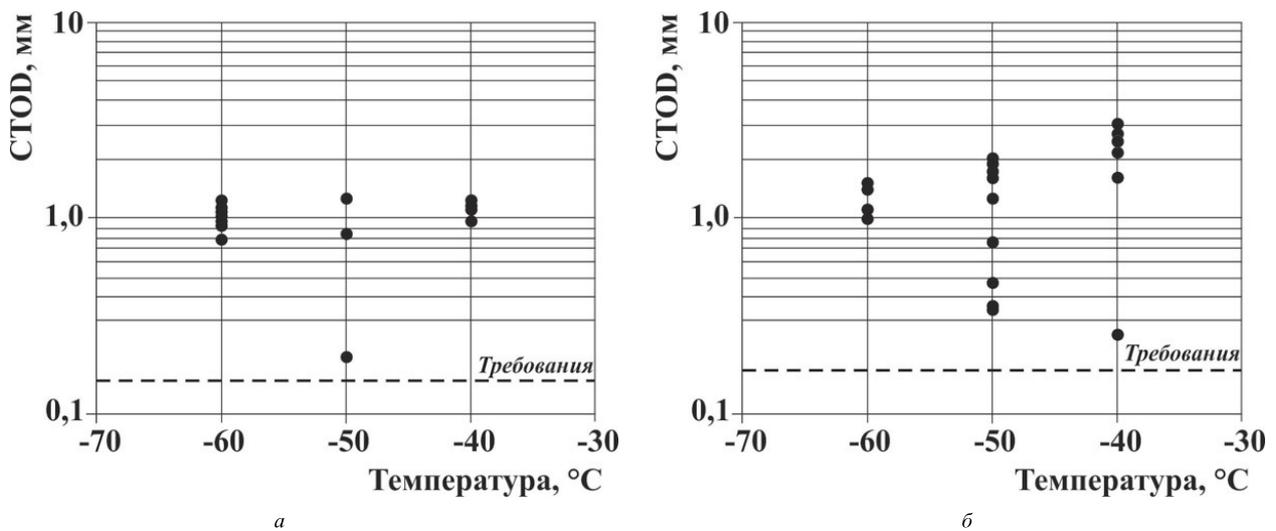


Рис. 3 Зависимости критического раскрытия в вершине трещины *CTOD* листового проката из низколегированной стали с гарантированным пределом текучести 355 – 390 МПа толщиной 25 (а) и 50 (б) мм (основного металла) от температуры испытаний

– 60 °С (рис. 4, а). Значение критической температуры вязко-хрупкого перехода $T_{кв}$, определенной по критерию работы удара – 50 Дж, для листов толщиной 25 мм и 40 мм составило – 70°С при испытаниях образцов, вырезанных как поперек, так и вдоль направления прокатки (рис. 4, б). Плотный волокнистый вид излома свидетельствует о высоком сопротивлении хрупкому разрушению разработанной высокопрочной стали с гарантированным пределом текучести 750 МПа (рис. 4, в).

Температура вязко-хрупкого перехода $T_{кв}$ для листового проката толщиной 25 мм составляет – 60 °С (что удовлетворяет требованиям Правил РС [2, 3] к стали с индексом "Arc60"), для листового проката толщиной 40 мм – минус 55 °С (что удовлетворяет требованиям Правил РС [2, 3] к стали с индексом "Arc70"). Полученные значения температуры нулевой пластичности *NDT* составляют: для листового проката толщиной 25 мм – минус 80 °С (что удовлетворяет требованиям Правил РС [2, 3] к стали с индексом "Arc60"), для листового проката толщиной 40 мм – минус 75 °С (что удовлетворяет требованиям Правил РС [2, 3] к стали с индексом "Arc50") – рис. 4, б.

В Правилах РС [2, 3] требования к величине критического раскрытия в вершине трещины *CTOD* заданы в табличном виде в зависимости от толщины листового проката *t* и гарантированного предела текучести стали R_e . Для максимально нагруженных и ответственных элементов конструкции в приближенном виде они могут быть записаны в виде условия [17]:

$$\delta_c \geq 1,95 \cdot R_e t / E, \tag{3}$$

где E – модуль упругости.

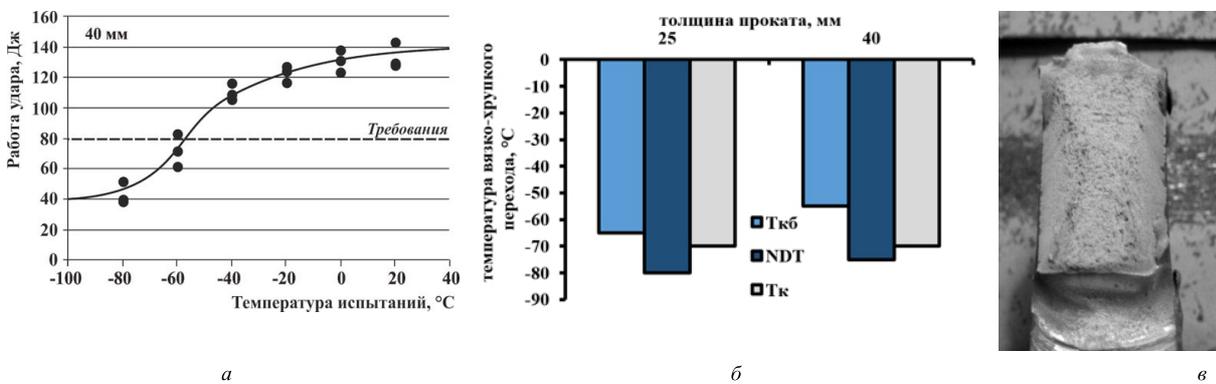


Рис. 4 Изменение работы удара при понижающихся температурах испытания листового проката из высокопрочной стали с гарантированным пределом текучести 750 МПа толщиной 40 (а). Значения температур вязко-хрупкого перехода $T_{к}$ и $T_{кв}$ и нулевой пластичности *NDT* (б). Вид излома полнотолщинной пробы 40 мм (в).

Повышение требований к абсолютному значению критического раскрытия в вершине трещины *CTOD* с ростом толщины листового проката и категории прочности стали обусловлено увеличением вклада упругой части в раскрытие вершины трещины и риска возможных последствий хрупкого разрушения.

В случае полностью вязкого разрушения критическое значение *CTOD* определяется в момент начала потери пластической устойчивости испытываемого образца (соответствует максимуму нагрузок) и напрямую зависит от способности испытываемой стали к деформационному упрочнению. Как известно, с повышением прочности стали неизбежно уменьшается способность стали к деформационному упрочнению (в том числе происходит уменьшение равномерного удлинения, увеличение отношение предела текучести к временному сопротивлению стали). Прямая экстраполяция требований к параметру трещиностойкости *CTOD* для сталей категории прочности выше 690 МПа может привести к предъявлению невыполнимых требований для высокопрочных сталей даже в случае их полностью вязкого поведения. Данный аспект был принят во внимание при разработке технических требований для листового проката из высокопрочной стали с гарантированным пределом текучести 750 МПа, отсутствующих в Правилах РС [2, 3].

Результаты испытаний на трещиностойкость *CTOD* для стали данной категории должны соответствовать одному из следующих условий:

- в случае полностью вязкого поведения материала вплоть до момента плавного снижения нагрузки требования к абсолютному значению *CTOD* не предъявляются;
- в случае наличия хрупкого разрушения, в том числе значимых хрупких остановленных проскоков трещины, результаты определения параметра *CTOD* должны быть не ниже следующих значений: 0,25 мм и 0,20 мм – для основного металла (ОМ) и металла зоны термического влияния (ЗТВ), соответственно, для листа толщиной 25 мм; 0,30 мм и 0,25 мм – для ОМ и ЗТВ для листа толщиной 40 мм.

Испытания на определение критического раскрытия в вершине трещины *CTOD* опытных образцов листового проката (основного металла) из высокопрочной стали с пределом текучести 750 МПа при температурах испытаний -40 – -60 °С продемонстрировали полностью вязкое разрушение в изломе образцов, при этом значения *CTOD* составили 0,12 – 0,18 мм для листа толщиной 25 мм и 0,13 – 0,20 для листа толщиной 40 мм, что близко к соответствующим значениям для сталей-аналогов.

Для сварных соединений листового проката толщиной 40 мм из высокопрочной стали с гарантированным пределом текучести 750 МПа, выполненных ручной аргонодуговой сваркой, полученные средние значения критического раскрытия в вершине трещины *CTOD* металла зоны термического влияния при температуре испытаний -40 °С: 0,22 мм – для образцов с надрезом по линии сплавления и 0,18 мм – для образцов с надрезом по дальней зоне ЗТВ при вязком разрушении образцов.

Результаты коррозионных испытаний. Как видно из табл. 4, характеристики пластичности образцов из низколегированной и высокопрочной стали в среде 3,5 % NaCl (имитирующей воздействие морской воды) и на воздухе отличаются друг от друга незначительно, что позволяет судить об отсутствии склонности материала к коррозионному растрескиванию. Все образцы разрушились вязко, с утяжкой, трещины на рабочей поверхности отсутствуют.

Таблица 4

Результаты коррозионных испытаний образцов из новых сталей с гарантированным пределом текучести 355 – 390 и 750 МПа методом медленного одноосного растяжения

Категория прочности	Испытательная среда	δ , %	ψ , %	$\delta_{\text{сред}}/\delta_{\text{возд}}$	$\Psi_{\text{сред}}/\Psi_{\text{возд}}$
355 – 390	Воздух	19,6 – 19,8	80,6 – 80,9	–	–
	3,5 % NaCl	17,3 – 18,0	76,8 – 77,0	0,88 – 0,91	0,95
750	Воздух	13,4	68,0	–	–
	3,5 % NaCl	13,6	66,5	1,01	0,98

Определение склонности к коррозионному растрескиванию образцов листового проката из обеих сталей методом консольного изгиба со ступенчато возрастающей нагрузкой показали, что характер разрушения всех образцов вязкий, с выраженной утяжкой на боковых гранях. Результаты коррозионных испытаний оценивались по соотношению разрушающих напряжения в среде 3,5 % раствора NaCl и на воздухе. Соотношение $\beta_{\sigma} = \sigma_{\text{сcc}}/\sigma_{\text{с}} > 0,85$ выполнено для всех образцов и составляет $\beta_{\sigma} = 0,907 – 0,947$ для низколегированной стали с гарантированным пределом текучести 355 – 390 МПа и $\beta_{\sigma} = 0,996$ для высокопрочной стали с пределом текучести не менее 750 МПа.

Проведенный комплекс коррозионных испытаний позволяет признать разработанные стали не склонными к коррозионному растрескиванию в морской воде.

ВЫВОДЫ

1. Изготовленный в условиях ООО «ОМЗ-Спец-сталь» с применением разработанных технологических режимов листовой прокат толщиной до 50 мм из низколегированной стали с пределом текучести не менее 355 – 390 МПа и листовой прокат толщиной до 40 мм из экономнолегированной высокопрочной стали с пределом текучести не менее 750 МПа обладает повышенным комплексом механических свойств и гарантированными характеристиками работоспособности, соответствующими требованиям Правил РС [2, 3] к сталям с индексом "Arc", включая температуры вязко-хрупкого перехода ($T_{кв}$, NDT) и параметр трещиностойкости $CTOD$ основного металла и зоны термического влияния.

1.1. Листовой прокат из низколегированных сталей с гарантированным пределом текучести 355 и 390 МПа в толщинах до 50 мм и его сварные соединения выдержал испытания в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52927-2015 [4] и Правил РС [2, 3] к стали категории хладостойкости F (по работе удара) с индексом "Arc30"/"Arc40". Значения критического раскрытия в вершине трещины $CTOD$ основного металла при температурах испытаний -40 , -50 и -60°C и металла ЗТВ при температуре испытаний минус 40°C существенно превышают требования Правил РС для сталей с индексом "Arc40", что говорит о потенциальной возможности понижения температуры эксплуатации T_d .

1.2. Листовой прокат из высокопрочной стали с гарантированным пределом текучести 750 МПа в толщинах до 40 мм и его сварные соединения выдержали испытания в соответствии с требованиями Правил РС [2, 3] к стали категории хладостойкости E (по работе удара) с индексом "Arc40".

2. Листовой прокат из рассматриваемых сталей отличается стойкостью к коррозионно-механическим повреждениям в морской воде.

3. Разработанные технологии обеспечивают гарантированные характеристики работоспособности металлопроката в конструкции (хладостойкость, трещиностойкость) при низких температурах и сложных условиях эксплуатации в арктическом регионе (коррозионно-механическая прочность) за счет формирования по всей толщине проката дисперсной зеренной и субзеренной структуры.

Работа выполнена в рамках государственного контракта с Министерством промышленности и торговли Российской Федерации от 20 октября 2016 г. № 16411.1810190019.09.003.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Часть II. Корпус. – СПб: Российский морской регистр судоходства, 2017, 229 с.
2. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII. Материалы. – СПб: Российский морской регистр судоходства, 2017, 201 с.
3. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. – СПб: Российский морской регистр судоходства, 2014, 484 с.
4. ГОСТ Р 52927-2015 Прокат для судостроения из стали нормальной, повышенной и высокой прочности. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2015, 92 с.
5. Патент № 2507295 Высокопрочная хладостойкая ARC-сталь.
6. СТО-07516250-256-2014 Методика определения температуры вязко-хрупкого перехода $T_{кв}$ углеродистой и низколегированной стали. – СПб: ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 2014. - 19 с.
7. СТО-07516250-257-2009 Методика испытания падающим грузом для определения температуры нулевой пластичности NDT углеродистой и низколегированной стали. – СПб: ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 2009, 15 с.
8. ASTM E 208 Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels, 2006.
9. СТО-07516250-233-2012 Определение параметров вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом нагружении стали и сварных соединений. Методика испытаний. – СПб: ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 2012, 56 с.
10. BS 7448 P.1:1991 Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of KIC critical $CTOD$ and critical J values of metallic materials, 48 p.
11. BS/EN/ISO 15653:2010 Metallic materials – Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds, 41 p.
12. ISO 12135:2016 Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness, 96 p.
13. РД5.АЕИШ.3637-2013 Определение склонности сталей к коррозионному растрескиванию методом одноосного растяжения при медленном деформировании. Методика. – СПб: ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 2013, 20 с.
14. РД5.АЕИШ.3635-2013 Определение склонности сталей и сварных соединений к коррозионному растрескиванию методом консольного изгиба при ступенчатом нагружении. Методика. – СПб: ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 2013, 29 с.
15. Орлов В.В., Малышевский В.А., Хлусова Е.И., Голосиенко С.А. Разработка технологий производства конструкционных сталей для морской техники и магистральных трубопроводов, предназначенных для эксплуатации в Арктике. Сталь, 2014, № 9, с. 79 – 88.
16. Счастливцев В.М., Табачникова Т.И., Яковлева И.Л., Дельгадо-Рейна С.Ю., Голосиенко С.А., Пазилова У.А., Хлусова Е.И. Влияние термомеханической обработки на сопротивление хрупкому разрушению низкоуглеродистой низколегированной стали. Физика металлов и металловедение, 2015, т. 116, № 2, с. 199-209.

17. Гусев М.А., Ильин А.В., Ларионов А.В. Сертификация судостроительных материалов для судов, эксплуатирующихся в условиях Арктики. Судостроение, 2014, вып. № 5 (816), с. 39 – 43.

REFERENCES

1. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part II. Hull. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2017, 229 p (In Russian).
2. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XIII Materials]. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2017, 201 p (In Russian).
3. Rules for classification, construction and equipment of mobile offshore drilling units and fixed offshore platforms]. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2014, 484 p (In Russian).
4. GOST R 52927-2015 Prokat dlya sudostroeniya iz stali normal'noy, povyshennoy i vysokoy prochnosti. Tekhnicheskie usloviya [State Standard R 52927-2015 Rolled of normal, increased – and high-strength steel for shipbuilding. Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 92 p.
5. Patent № 2507295 Vysokoprochnaya khladoistoikaya ARC-stal' [Patent № 2507295 High-strength cold-resistant ARC-steel].
6. STO-07516250-256-2014 Metodika opredeleniya temperatury vyazko-khrupkogo perekhoda Tkb uglerodistoi i nizkolegirovannoy stali [STO-07516250-256-2014 Methodology for determination of ductile-brittle transition temperature Tkb for carbon and low-alloyed steel]. St. Petersburg, FSUE CRISM "Prometey", 2014, 19 p.
7. STO-07516250-257-2009 Metodika ispytaniya padayushchim gruzom dlya opredeleniya temperatury nulevoi plastichnosti NDT uglerodistoy i nizkolegirovannoy stali [STO-07516250-257-2009 Methodology of drop weight test for determination of zero ductility temperature NDT for carbon and low-alloyed steel]. St. Petersburg, FSUE CRISM "Prometey", 2009, 15 p.
8. ASTM E 208 "Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels", 2006.
9. STO-07516250-233-2012 Opredeleniye parametrov vyazkosti razrusheniya (treshchinostoikosti) pri staticheskom nagruzhении stali i svarykh soedineniy. Metodika ispytaniy [Determination of ductility fracture parameters under static loading of steel and welded joint. Test procedure]. St. Petersburg, FSUE CRISM "Prometey", 2012, 56 p.
10. BS 7448 P.1:1991 Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of KIC critical CTOD and critical J values of metallic materials, 48 p.
11. BS/EN/ISO 15653:2010 Metallic materials – Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds, 41 p.
12. ISO 12135:2016 Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness, 96 p.
13. RD5.AEISH.3637-2013 Opredeleniye sklonnosti staley k korrozionnomy rastreskivaniyu metodom odnoosnogo rastyazheniya pri medlennom deformirovanii. Metodika [RD5.AEISH.3637-2013 Determination of steel tendency to corrosion cracking by uniaxial tension method under slow deformation. Methodology]. St. Petersburg, FSUE CRISM "Prometey", 2013, 20 p.
14. RD5.AEISH.3635-2013 Opredeleniye sklonnosti staley i svarykh soedineniy k korrozionnomy rastreskivaniyu metodom konsol'nogo izgiba pri stupenchatoy nagruzke. Metodika [RD5.AEISH.3635-2013 Determination of steel and welded joints tendency to corrosion cracking by cantilevered bending method under step stress. Methodology]. St. Petersburg, FSUE CRISM "Prometey", 2013, 29 p.
15. Orlov V.V., Malyshevsky V.A., Khlusova E.I., Golosienko S.A. Razrabotka tekhnologiy proizvodstva konstruktsionnykh staley dlya morskoy tekhniki i magistral'nykh truboprovodov, prednaznachennykh dlya ekspluatatsii v Arktike [Production technology for arctic pipeline and marine steel]. Stal' [Steel]. 2014, № 9, pp. 79 – 88.
16. Schastlivtsev V.M., Tabatchikova T.I., Yakovleva I.L., et al. Vliyaniye termomekhanicheskoy obrabotki na soprotivleniye khrupkomu razrusheniyu nizkouglerodistoy stali [Effect of thermomechanical treatment on the resistance of low-carbon low-alloy steel to brittle fracture]. Fizika metallov i metallovedeniye [The Physics of Metals and Metallography]. 2015, vol.116, № 2, pp.199-209.
17. Gusev M.A., Ilyin A.V., Larionov A.V. Sertifikatsiya sudostroitel'nykh materialov dlya sudov, ekspluatiruyushchikhsya v usloviyakh Arktiki [Certification of shipbuilding materials for ships operating in arctic conditions]. Sudostroenie [Shipbuilding]. 2014, № 5 (816), pp. 39 – 43.

УДК 621.774.2 :620.178.7:620.111.1:620.1.08

ИСПЫТАНИЯ ПАДАЮЩИМ ГРУЗОМ МАТЕРИАЛОВ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ И ПРОКАТА "ARC"-СТАЛЕЙ

В.Ю. Филин, канд. техн. наук, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, e-mail: npk3@crism.ru

Д.М. Артемьев, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

М.А. Гусев, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

А.В. Ларионов, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург

Рассмотрена практика традиционного вида испытаний образцов DWTT (ИПГ) для оценки вязкого состояния металла труб и проката по виду излома «волокну/кристалл», при которых возникли проблемы с оценкой результатов испытания современных высокопрочных сталей для подводных газопроводов с большой толщиной стенки и судостроительных сталей для судов ледовых классов Arc, особенно для сталей, произведенных методами термомеханической обработки. Дан обзор истории и перспективных направлений развития методики, способов перехода к количественному критерию сопротивления разрушению при испытаниях по методу DWTT с учетом достижений техники в обеспечении проведения инструментированных испытаний. Показано, что попытки нормирования работы разрушения образца сталкиваются с методическими трудностями и большим разбросом экспериментальных данных. Предложено одновременно работать в двух направлениях: совершенствовать общепринятую методику и уточнять количественный критерий, основанный на использовании механики разрушения.

Ключевые слова: испытания падающим грузом, вид излома образцов, количественная оценка результата испытаний, угол раскрытия в вершине трещины СТОА

DROP WEIGHT TEAR TEST FOR MATERIALS OF SUBSEA PIPELINES AND "ARC"-STEEL ROLLED PRODUCTS

V.Yu. Filin, PhD, NRC Kurchatov Institute – CRISM Prometey, St. Petersburg, e-mail: npk3@crism.ru

D.M. Artemyev, CRISM Prometey, St. Petersburg

M.A. Gusev, CRISM Prometey, St. Petersburg

A.V. Larionov, CRISM Prometey, St. Petersburg

Testing practice as per the traditional DWTT procedure is discussed in the present article. This test is aimed at the assessment of the ductility of pipe and rolled plate metal by shear/cleavage fracture appearance. There have been some issues observed in test result interpretation for modern high-strength steels intended for thick-walled underwater pipelines and hull plates for ice class Arc ships, especially for TMCP steels. The history and perspective ways to improve the test method are reviewed including the use of a quantitative criterion for DWTT based on technical achievements in the field of test instrumentation. It is shown that attempts to set a certain required DWTT impact energy are methodologically problematic and unreliable as to the range of experimental data. It is suggested that the research should progress simultaneously in two directions: improvement in the applied methodology and development of a more accurate quantitative criterion based on the application of fracture mechanics.

Keywords: drop weight tear test, fracture appearance, quantitative criterion, crack tip opening angle, СТОА

ВВЕДЕНИЕ

Освоение нефтегазовых месторождений шельфа России требует развития сети подводных нефте- и газопроводов и строительства инженерных сооружений в труднодоступных районах с экстремальными климатическими условиями. Для таких конструкций предполагаемые последствия разрушений требуют повышенного внимания к характеристикам применяемой стали, одной из главных характеристик является способность торможения трещины в диапазоне температур эксплуатации.

Параметры газопроводов (рабочее давление и диаметр), определяющие их производительность, повышаются. Это заставляет применять все более прочные стали и увеличивать толщину стенки трубы, что объективно ведет к повышению опасности хрупких или протяженных вязких разрушений. В арктических регионах к этим факторам добавляются экстремально низкие температуры, а для подводных трубопроводов, свободно лежащих на дне — вымывание грунта с созданием дополнительных изгибных нагрузок.

Прямое определение температуры торможения трещины, развивающейся по хрупкому механизму, возможно на крупномасштабных образцах или модельных участках трубопровода, что, очевидно, является очень затратным и не может использоваться при контроле качества в условиях массового производства. Существуют многочисленные косвенные методы. Один из них, наиболее широко применяемый в трубной промышленности, был разработан институтом Battelle более 50 лет назад. Испытание на трехточечный изгиб ударом бойка падающего груза с визуальным определением «вязкой» и «хрупкой» составляющих в изломах испытанных образцов позволяет главным образом получить качественную оценку применимости материала. За критерий качества материала принимается достижение не менее 85 % волокнистой (вязкой) составляющей поверхности излома образцов при предполагаемой минимальной температуре эксплуатации.

Данные испытания в зарубежной литературе получили наименование "DWTТ" (drop weight tear test); в российской литературе для них также используется термин «ИПГ» (испытания падающим грузом). Методика таких испытаний представлена в документе API RP 5L3 [1], на который ссылаются технические условия на трубы API Spec. 5L [2] и аналогичный стандарт ISO [3], в России принятый в переводе в качестве ГОСТ [4].

Метод испытаний падающим грузом, изначально ориентированный на испытания сталей феррито-перлитного класса, обеспечивал удовлетворительное соответствие получаемых оценок с результатами полигонных пневматических испытаний на разрушение труб из таких материалов [5].

ПРОЦЕДУРА ИСПЫТАНИЯ

На образце высотой 75 мм, длиной около 300 мм и толщиной, равной полной толщине металла проката или стенки трубы (или уменьшенной толщины), при необходимости подвергнутом правке, наносят надрез методом прессования (вдавливания острого индентора) или резания (применимость резания дискутируется). Образец охлаждают до требуемой температуры в жидкостной ванне, помещают на опоры наковальни копра и производят нагружение по схеме трехточечного изгиба падающим грузом со скоростью 5 — 10 м/с до разрушения. Испытанный образец высушивают и производят определение доли волокнистой составляющей в изломе.

Запасенная энергия современных копров может составлять более 100 кДж. Предпочтительным было бы применение маятниковых копров, однако при таких энергиях это затруднительно. Уменьшение толщины образца механической обработкой допускается, если энергии копра недостаточно для разрушения образца в полной толщине, масштабный эффект учитывают введением запаса на величину температуры испытаний. Процедура испытаний может предусматривать построение температурной зависимости этой величины по результатам испытания серии образцов, и температура, соответствующая требуемой доле волокнистой составляющей, определяется по построенной зависимости.

На рис. 1 представлена схема испытания и вертикальный копер ЦНИИ КМ «Прометей» с энергией удара до 60 кДж, достаточной для разрушения образцов толщиной t до 40 мм.

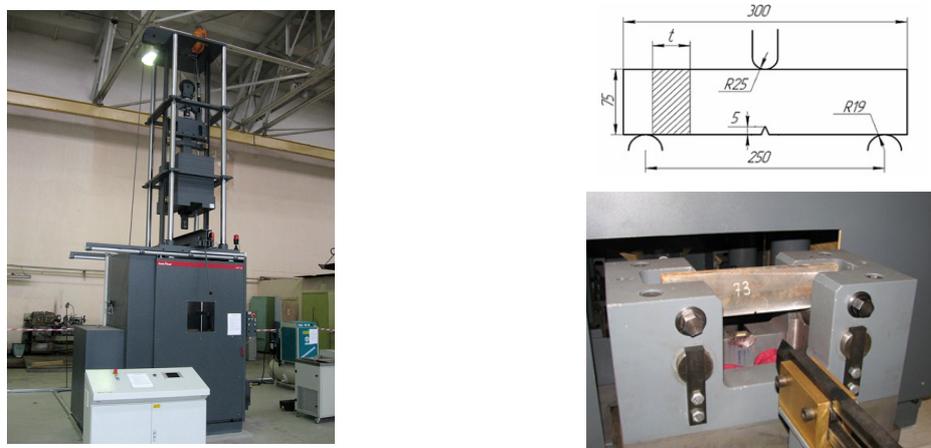


Рис. 1 Вертикальный копер ZWICK-DWT60 и схема испытания

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ И ПРОБЛЕМЫ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ СТАЛЕЙ

За прошедшие годы, помимо перечисленных выше документов, были разработаны стандарты на проведение испытания падающим грузом: ASTM E436 (1971) [6], ТИ/ВНИТИ 13 36 83 [7], EN 10274 (1999) [8]. Было уточнено понятие «зачетной части» излома (из рассмотрения исключаются участки излома непосредственно под надрезом и со стороны контакта с бойком на расстояние t , но не более 19 мм). Методика ВНИТИ, использовавшаяся в СССР с 1983 года, имела ряд отличий от ASTM: испытания всегда предполагалось проводить на полнотолщинных образцах, были включены образцы из многослойных труб, разрешалось выполнять надрез резанием, допускалось собирать механически или сваркой тонкие образцы в пакеты для испытания одним ударом, допускалось неполное разрушение образцов. Была разработана отечественная методика оценки вязкой и хрупкой составляющих в изломах, которая впоследствии перешла в ГОСТ 30456 [9]. Большинство остальных инноваций было впоследствии отменено в пользу гармонизации с зарубежными стандартами.

На основании опыта работ, проведенных в ЦНИИ КМ «Прометей» [10], нормативы по проведению таких испытаний были внесены в соответствующие положения Правил классификации и постройки морских подводных трубопроводов [11] и Правил классификации и постройки морских судов [12] Российского морского регистра судоходства.

Определение критической температуры DWTT с помощью визуального контроля вида излома не представляло особых трудностей до 1980-х годов, тогда в основном испытывали нормализованные стали относительно небольших толщин, для которых характерен резко выраженный вязко-хрупкий переход, а участки кристаллического и волокнистого излома имеют четкие границы, как показано на рис. 2. «Классический» излом имеет хрупкий участок старта трещины от надреза. Трещина затем тормозится (или не тормозится) металлом образца.

В настоящее время при производстве проката освоены более дешевые процессы термомеханической обработки (ТМО). Для стали ТМО вязко-хрупкий переход оказывается значительно более «размытым», то есть растянутым в большом температурном диапазоне – рис. 3, а морфология изломов характеризуется появлением иных типов разрушения, вызывая разногласия в определении доли вязкой составляющей. Авторами накоплен большой практический опыт анализа характерных морфологических элементов изломов сталей ТМО [13, 14], таких как «размерные стрелки» на губах среза, обычно представляющие собой вязкое разрушение по телу зерен с расщеплениями по их границам, развитые «размерные стрелки» в центральной по

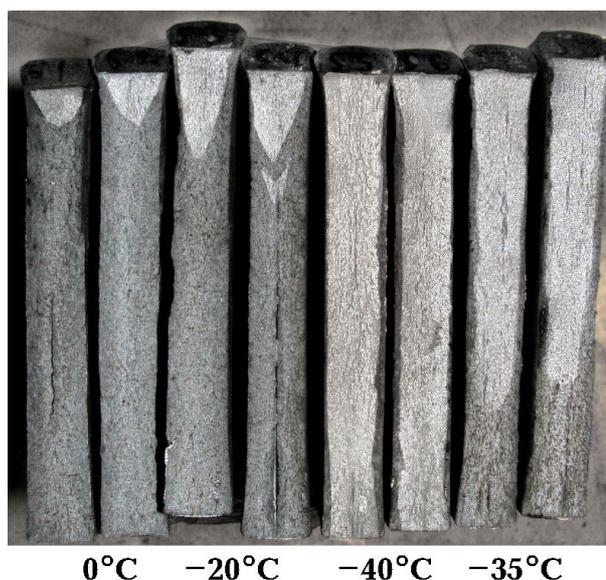
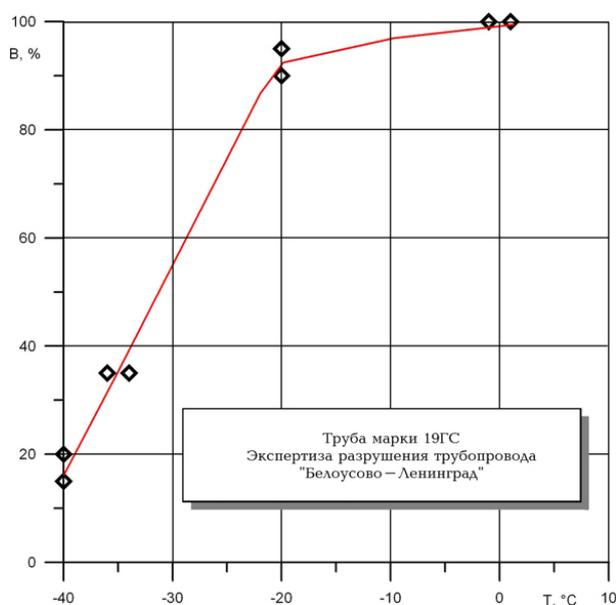
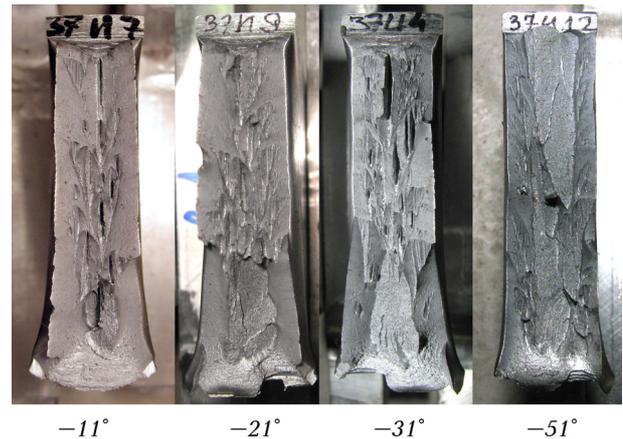
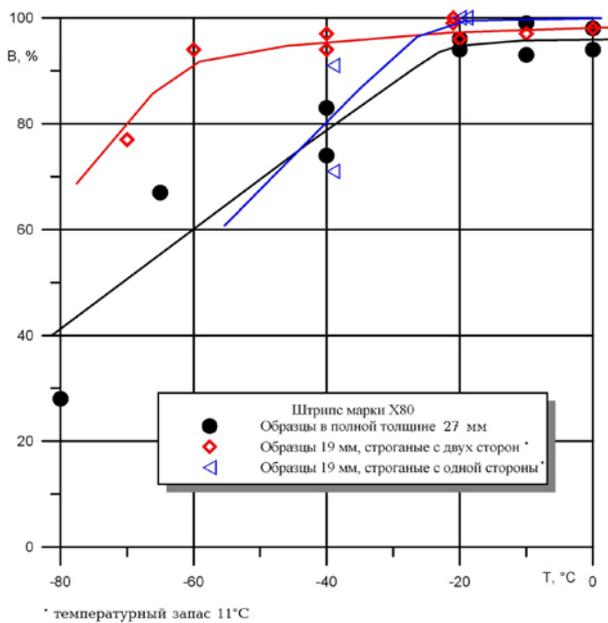


Рис. 2 Температурная кривая процента волокна и «классический» вид изломов нормализованной трубопроводной стали

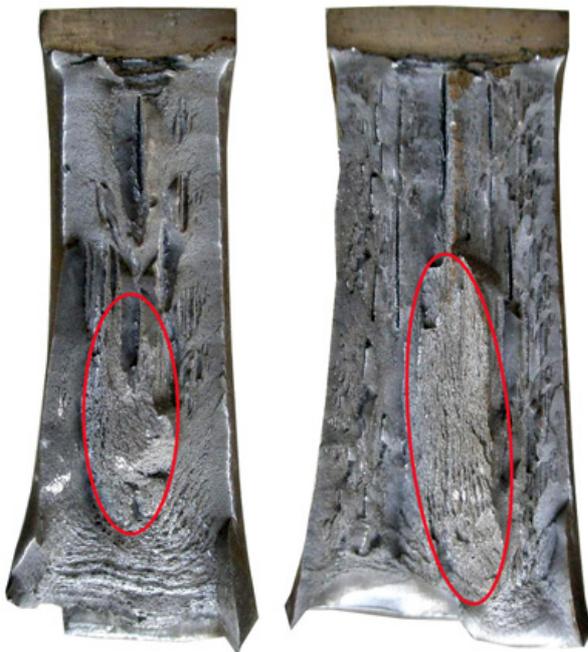


Образцы, строганные с двух сторон

Рис. 3 Температурная кривая процента волокна и явление «обратного излома» трубопроводной стали ТМО

толщине части излома, где присутствует квазискол с прослойками вязкого разрушения по межфазным границам, а также схожий по морфологическим признакам «обратный излом» – площадка в средней по толщине и приближенной к месту контакта с бойком копра части поверхности разрушения, расположенная под углом к ней [15] – рис. 4. «Обратный излом» всегда начинается из расщепления, параллельного поверхности исследуемого металла, которое развивается в процессе испытания образца.

Учет «обратного излома» в качестве кристаллической составляющей поверхности разрушения противоречит изначальной идее применения данной методики испытаний — хрупкому разрушению от надреза в образце, торможение которого и является предметом исследований [16]. «Обратный излом» наблюдается, в том числе, при испытаниях падающим грузом современных сталей с подтвержденной другими

Рис. 4 Участки «Обратного излома» на образцах стали ТМО разной толщины (температура испытаний -20°C)

методами высокой вязкостью материала. Его появление связывают с распространением трещины в материале, упрочненном ударом бойка, и уже претерпевшем значительную пластическую деформацию.

Таким образом, проблема визуальной трактовки вида излома для сталей ТМО оказывается нерешенной. Основные вопросы к визуальной трактовке излома следующие:

- отсутствует согласованное понимание, к какому типу разрушения относить блестящие области излома, которые при фрактографической оценке не имеют характера скола и микроскола, а также рельефные участки с чередующимися полосами, параллельными направлению распространения трещины;

- если хрупкое разрушение не стартует от надреза, то для его старта требуется внести значительную пластическую деформацию металла. При этом «классическое» хрупкое разрушение, захватывающее весь излом образца, происходит при температурах испытаний, существенно более низких, чем минимальная температура эксплуатации. Является ли появление рельефа типа «стрелок» и «обратного излома» с площадью более 15 % поверхности излома браковочным признаком?

- достичь 85 % волокнистой составляющей в сталях ТМО крайне затруднительно, так как разрушение по вязкому механизму сопровождается образованием расщеплений и «стрелок» с элементами квазискола на «верхнем шельфе» температурных зависимостей процента волокна в изломе и в области вязко-хрупкого перехода. Ситуация усугубляется требованиями заказчиков обеспечить 90 % волокнистой составляющей в прокате для изготовления сварных труб в качестве запаса на потерю деформационной способности металла в процессе последующего производства, хотя не доказано, что такой высокий критерий нужен для торможения магистральной трещины в конструкции. Например, еще в 1979 году Эйбером и Макси [17] показано, что при полномасштабных испытаниях труб, торможение трещины, распространяющейся со скоростью до 450 м/с (такая скорость характерна для магистральной трещины в газопроводе, обгоняющей волну декомпрессии), было достигнуто при температуре, соответствующей 40 % волокнистой составляющей в изломах DWTT. Разрушение сталей ТМО является менее энергоемким, поэтому для современных сталей научно не доказана возможность снижения критерия по доле волокнистой составляющей, в Правилах Регистра [11] для материалов морских трубопроводов он оставлен на уровне 85 %, что соответствует одобренным ТУ на поставку труб;

- отсутствуют обоснованные количественные оценки допустимых размеров и количества расщеплений в изломах.

Чтобы ограничить влияние эффекта «обратного излома», различные исследователи предлагали изменить конструкцию образца. К примеру, применяют образцы с пропилом и жесткой вставкой [18], с которой контактирует боек копра при ударе, с сохранением неизменной нетто-высоты сечения (рис. 5) или брутто-высоты. Результаты таких испытаний дискутируются. Следует отметить, что, по литературным данным [18], такой подход повышает скорость вязкого разрушения в пределах зачетной части излома, то есть принципиально изменяет условия испытания и затрудняет сравнение с результатами, полученными ранее.

Таким образом, можно выделить два пути развития методики испытаний падающим грузом:

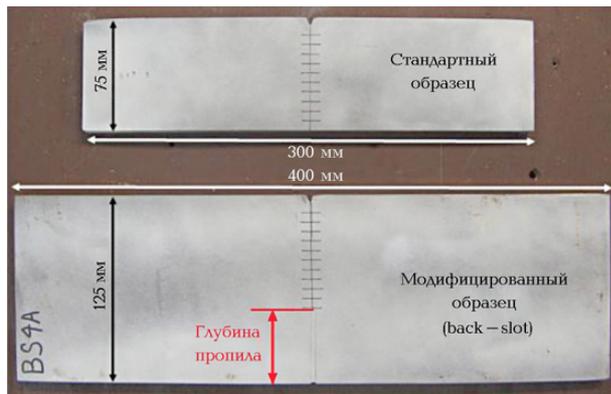


Рис. 5 Образец с пропилом в сравнении со стандартным образцом [18]

- выработка согласованного понимания в части визуальной оценки изломов современных сталей, подкрепленного научно обоснованным назначением запаса по температуре испытаний на основании расчетов, выполненных методом конечных элементов. Авторы настоящей работы продолжают исследования в данном направлении [19];

- Переход к количественному критерию сопротивления разрушению. В Правила Регистра [11] внесена формулировка: «кроме процента волокнистой составляющей целесообразно регистрировать работу, затрачиваемую на разрушение образца». В ЦНИИ КМ «Прометей» были предприняты исследования по измерению этой величины [20]. Очевидным преимуществом обладали бы маятниковые копры по аналогии с испытаниями на ударный изгиб образцов Шарпи, в то время как вертикальные копры с падающим грузом приходится оснащать дополнительными средствами измерения.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИНСТРУМЕНТИРОВАННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Современные вертикальные копры позволяют измерять мгновенную скорость груза или его перемещение, а также усилие с помощью бойка, оснащенного силоизмерителем. Дополнительно может быть установлена видеокамера со скоростью съемки около 18000 кадров в секунду, показывающая весь процесс разрушения образца. Примеры измерительных устройств показаны на рис. 6. Производители гарантируют высокую точность измерения каждого из параметров, однако не берутся дать количественную оценку погрешности измерения работы удара, так как невозможно однозначно определить момент окончания разрушения образца. Критерием обычно служит величина перемещения по линии нагружения – рис. 7. Кроме того, взаимодействие бойка с образцом носит колебательный характер, что вносит дополнительную погрешность.

К настоящему времени разработка инструментированных методик испытания падающим грузом ведется по двум направлениям. Первое направление — определение требований к работе удара (работе разрушения образца) DWTT на основе корреляций с результатами иных испытаний, в том числе полигонных испытаний

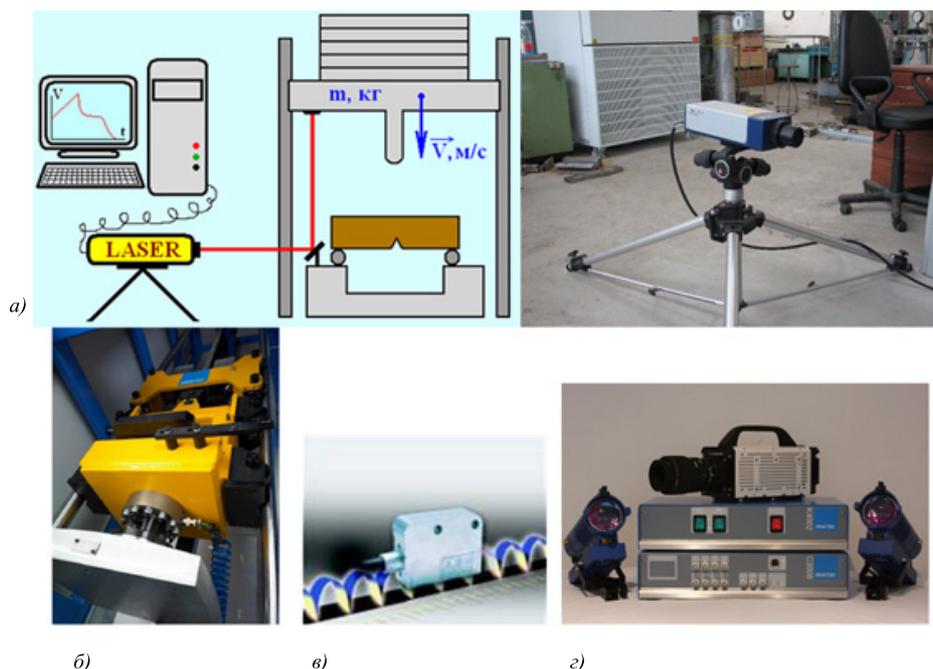


Рис. 6 Примеры инструментирования копров:
 а) лазерная регистрирующая система, б) силонизмеритель на грузе копра, в) датчик перемещения «магнитная полоса»,
 г) высокоскоростная оптическая система

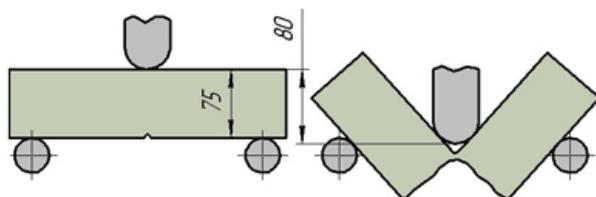


Рис. 7 Назначение момента окончания разрушения образца

давлением воздуха (рис. 8). Второе направление — использование параметра механики разрушения *СТОА* (критического угла раскрытия вершины трещины) как характеристики энергоемкости распространения разрушения, определяемой при испытании образцов DWTT.



Рис. 8 Разрушение труб при полигонных испытаниях

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМОЙ РАБОТЫ УДАРА DWTT

Данное направление является продолжением многочисленных исследований, в которых, исходя из результатов крупномасштабных пневматических испытаний труб, определяли требования к работе удара *KV* стандартных образцов Шарпи. Известные корреляционные формулы перечислены в работе [5], они существенно отличаются по набору параметров и имеют ограниченное применение. Для современных материалов требования по *KV* по сравнению с этими формулами приходится дополнительно повышать в 1,3–1,5 раза [21, 22]. В результате, в мировой практике в настоящее время используются высокие требования к величине *KV* материала труб, изготавливаемых для газопроводов повышенной эксплуатационной надежности, они включены в ряд технических условий по крупным современным трубопроводным проектам и стандарты, например, [2, 3]. Требуемое минимальное значение $KV = 200$ Дж стало обычным для производителей труб.

Наиболее современная формула, связывающая работу удара образцов Шарпи KV [Дж] и работу распространения трещины A_p в образце DWTT [Дж], предложена компаниями Nippon Steel и Sumitomo [23]:

$$A_p = 3,29 \times t^{1,5} \times KV^{0,544}, \quad (1)$$

где t – толщина проката или стенки трубы, мм.

Практическое применение формулы (1) затруднено необходимостью разделять работу зарождения и распространения трещины в образцах DWTT, для чего дополнительно испытывают специальные образцы с внесенной трещиной [24, 25], что позволяет оценивать A_p при испытаниях стандартных образцов. Трещину вносят статическим или циклическим предварительным нагружением образца DWTT. Авторами разработан метод использования образцов DWTT с хрупкой наплавкой [13, 14] – рис. 9. Получено, что для современной стали ТМО высокой прочности работа зарождения трещины постоянна в широком диапазоне температур вязкохрупкого перехода и для пресованного надреза приблизительно составляет 200 Дж/мм толщины образца. Тогда

$$E_p = A_3 + A_p = 200t + 3,29 \times t^{1,5} \times KV^{0,544}, \quad (2)$$

где E_p – работа удара для образца DWTT с пресованным надрезом,
 A_3 – работа зарождения трещины из надреза.

Данную формулу уже можно использовать для оценки требуемой величины E_p . Например, при $t = 27$ мм и $KV = 200$ Дж, $E_p = 13600$ Дж. Кстати, отсюда следует вывод о возможных причинах опасений, связанных с использованием надрезов, изготовленных резанием: возникает неопределенность в части определения работы зарождения разрушения, связанная с погрешностями формы надреза, а также наклепа, вносимого механическим инструментом.

Физическое обоснование этой и других корреляций ученые пытаются найти с начала использования метода испытания DWTT. В основополагающей работе Холмса и др., [5], сделано предположение об условии торможения трещины в виде

$$A_{\text{торм}} \geq A_{\text{вязк}}, \quad (3)$$

где $A_{\text{торм}}$ – удельная работа торможения трещины (характеристика материала) [Дж/мм²],

$A_{\text{вязк}}$ – удельная работа распространения вязкого разрушения материала в конструкции (трубе) [Дж/мм²], отнесенная к площади поверхности разрушения в продольном направлении $t \cdot l$, которая по сопоставлению с результатами полигонных испытаний составляет 0,007П, где П – удельная потенциальная энергия П [Дж/мм²], запасенная в трубе:

$$П = \frac{\pi D \sigma}{2000} \left[\ln \frac{P}{P_{\text{атм}}} + \frac{\sigma}{E} \right], \quad (4)$$

где P – давление в газопроводе с учетом декомпрессии, МПа,
 $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, МПа,
 D – диаметр трубы, мм,
 $\sigma = PD/2t$ – окружные напряжения, МПа,
 E – модуль упругости, МПа.

Первое слагаемое в формуле (4) описывает энергию газа, находящегося в трубе под давлением, а второе – упругую энергию материала, которая значительно меньше, и в дальнейших рассуждениях может не учитываться. Следуя выкладкам Холмса [5], авторами получена формула для работы удара DWTT, достаточной для торможения трещины в трубе той же толщины стенки [13, 14]:

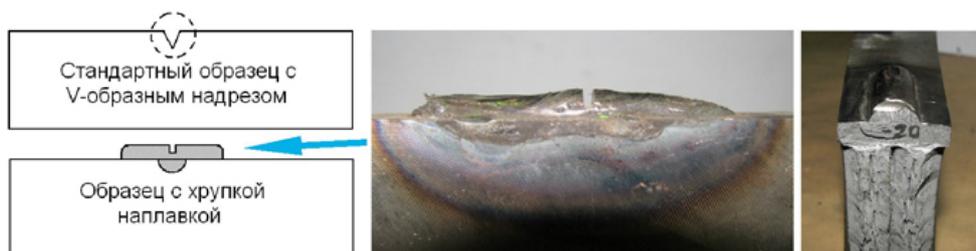


Рис. 9 Образец DWTT с хрупкой наплавкой и его излом

$$E_p = 0,00026PD^2 \ln \frac{P}{P_{\text{атм}}} . \quad (5)$$

Например, для газопровода диаметром 1000 мм с давлением 14,5 МПа (при толщине стенки $t = 27$ мм $\sigma = 268$ МПа, что составляет $0,6\sigma_{0,2}$ для стали Х65) оценка E_p составляет 18760 Дж.

Физический смысл такой оценки, тем не менее, сомнителен. Экспериментальные данные, непосредственно полученные авторами [13, 14], показали, что влияние размеров образцов DWTT, если они не находятся в полностью хрупком состоянии, выражается соотношением $E_p \sim t^2$, что связано с размером зоны пластического деформирования.

Рабочее давление в трубопроводах обычно назначают, чтобы получить в стенке трубы напряжения, составляющие некоторую долю предела текучести материала. Тогда, как видно из формулы (5), требования к работе удара DWTT должны расти пропорционально пределу текучести. Это объясняет, почему трудно обеспечить торможение магистральной трещины в трубопроводах, изготовленных из высокопрочной стали. В мире разработаны и запатентованы технические решения для остановки (закольцовывания) трещины – сварка в линейную часть трубопровода катушек большей толщины или использование арресторов – рис. 10.

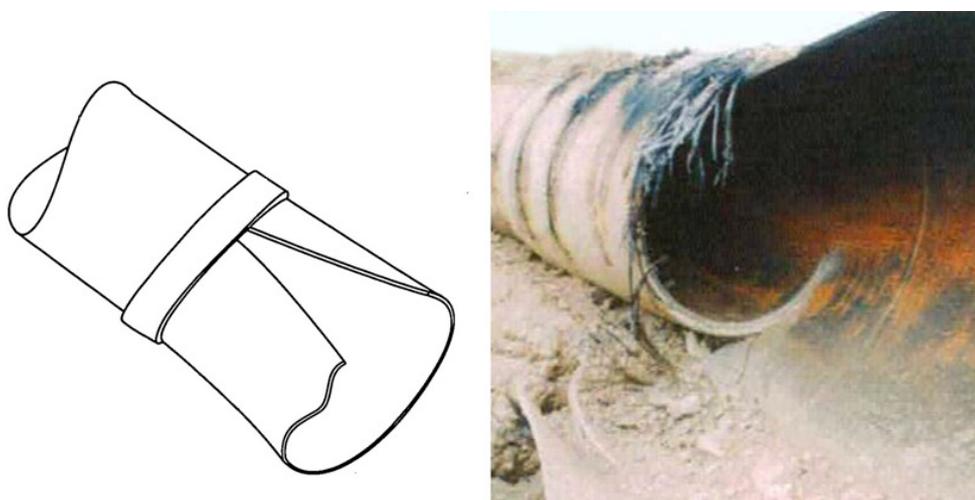


Рис. 10 Кольцо-аррестор из композитного материала [22]

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТЕРИЯ УГЛА РАСКРЫТИЯ В ВЕРШИНЕ ТРЕЩИНЫ СТОА

Инструментированные испытания DWTT могут быть использованы для определения параметра *СТОА*, характеризующего способность материала к совершению работы пластического деформирования при разрушении и рассматриваемого как трещинодвижущая сила при вязком разрушении на его установившейся стадии. Кроме того, испытания DWTT наименее трудоемкие из всех способов определения *СТОА*. Известны теоретические разработки [26], позволяющие связать эту характеристику со скоростью распространения разрушения и, таким образом, выйти на количественный критерий надежности материала на основе следующего положения: скорость движения трещины в металле должна быть меньше, чем скорость декомпрессии газа в трубе (фактически тот же тезис лежит в методе «двух кривых» Battele, [21]).

Способы определения *СТОА* и определение влияющих на него величин изучены многими исследователями при испытаниях на вязкость разрушения в условиях квазистатического нагружения, в том числе в ЦНИИ КМ «Прометей» [27]. В том числе получено, что *СТОА* зависит от наличия расщеплений в изломе: с увеличением суммарной протяженности расщеплений *СТОА* падает.

Условие торможения вязкого разрушения в трубе формулируется в виде

$$(СТОА)_c \geq (СТОА)_{\text{max}}, \quad (6)$$

где $(СТОА)_c$ – критическое значение угла раскрытия трещины
(характеристика материала),

$(СТОА)_{\text{max}}$ – наибольшая трещинодвижущая сила.

На основе серии модельных расчетов разрушения газопроводов в работе [26] получено следующее аппроксимирующее соотношение (для природного газа):

$$(CTOA)_{\max} = 106 \left(\frac{PD}{2tE} \right)^{0,753} \left(\frac{PD}{2t\sigma_{flow}} \right)^{0,778} \left(\frac{D}{t} \right)^{0,65} [^\circ], \quad (7)$$

где $\sigma_{flow} = 0,65(\sigma_{0,2} + \sigma_s)$ [МПа] – напряжения динамического течения.

Раскрывая скобки и учитывая указанную в [26] погрешность аппроксимации, получим

$$(CTOA)_{\max} = 45 \frac{P^{1,531}}{\sigma_{flow}^{0,778} E^{0,753}} \left(\frac{D}{t} \right)^{2,181} [^\circ]. \quad (8)$$

Для нашего примера ($P = 14,5$ МПа, $D = 1000$ мм, $t = 27$ мм, $\sigma_{flow} \approx 635$ МПа) получаем $(CTOA)_{\max} = 4,8^\circ$. Данная оценка выглядит заниженной, что, возможно, связано с использованием в [26] данных для толщины t менее 19 мм. Авторами настоящей статьи в работе [27] было показано, что разрушение по хрупкому механизму для $t = 27$ мм возможно при значении $CTOA = 14^\circ$. Для распространяющейся трещины характерен эффект туннелирования (большого распространения в середине толщины), численно смоделированный авторами в работе [19] и показывающий различное поведение трещины в металле разной толщины.

Результаты теоретических разработок по использованию критерия $CTOA$, таким образом, до сих пор являются дискуссионными. Качественно наблюдается эффект данного параметра, однако количественная оценка подлежит уточнению. В качестве первого приближения можно использовать данные работы [29], где численными методами исследований показано, что минимальное значение $(CTOA)_c$ порядка 20° может быть достаточным для материала трубопроводов.

При инструментированных испытаниях DWTT величину $CTOA$ определяют на установившемся участке диаграммы разрушения в координатах «нагрузка – перемещение по линии нагружения» после прохождения максимума нагрузки – рис. 11. Используют гипотезу постоянства отношения расстояния от вершины трещины до центра поворота сечений образца к мгновенному значению оставшейся высоты сечения перед трещиной. Представленная диаграмма наблюдается при вязком механизме разрушения образца.

Авторами настоящей статьи получено [13, 14], что $CTOA$ прямо пропорционален величине работы распространения трещины в образце DWTT. Учитывая «динамический» эффект введением величины σ_{flow} , получим

$$A_p = CTOA \cdot \frac{\pi}{180^\circ} \cdot \frac{(W - a_0)^2 t \sigma_{flow}}{3080}, \quad (9)$$

где $W = 75$ мм – высота образца,
 $a_0 = 5$ мм – глубина надреза.

Для стандартного образца

$$E_p = [\text{Дж}] = t[\text{мм}] \times (200 + 0,0278 CTOA [^\circ]) \sigma_{flow} [\text{МПа}]. \quad (10)$$

Для рассмотренного выше примера, принимая требуемое $(CTOA)_c = 20^\circ$, получим $E_p = 14930$ Дж.

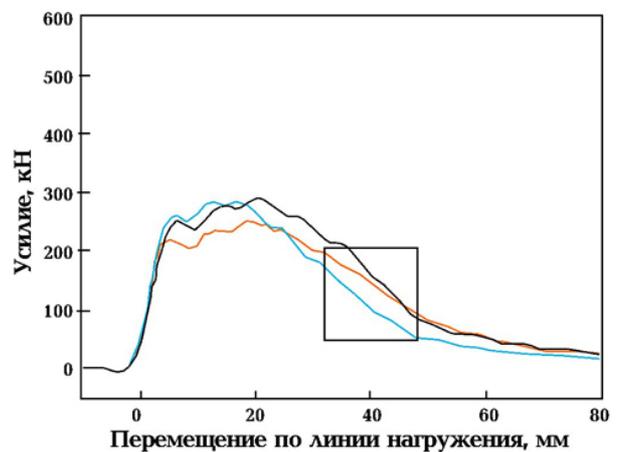


Рис. 11 Кривые «нагрузка–перемещение» при испытании стандартных образцов DWTT толщиной 19 мм стали X70-X80 трех разных плавок [25]. Выделена область стабильного вязкого разрушения

О РАЗБРОСЕ ИЗМЕРЯЕМЫХ ЗНАЧЕНИЙ РАБОТЫ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ DWTT

Предыдущие разделы дают приблизительное представление о требуемой работе удара DWTT. Насколько можно верить значениям работы удара, измеряемым при испытаниях на инструментированных копрах? Производители оборудования уклоняются от ответа на данный вопрос, говоря только о точности применяемых датчиков усилия, перемещения и т.д. Специалисты компании Rautaruuki Oy [30] организовали сравнительные испытания образцов DWTT (по 5 образцов в каждой серии, испытываемой при одной температуре) из трубы с толщиной стенки 10 мм в нескольких лабораториях. Использовали маятниковый копер с энергией 9 кДж и копры с падающим грузом с различной максимальной энергией удара. На рис. 12 показаны результаты, которые позволяют сделать вывод, что при температурах вязко-хрупкого перехода возможен десятикратный разброс измеряемой работы удара. При температуре, предположительно соответствующей «верхнему шельфу» температурных зависимостей получен двукратный разброс значений работы удара. Оценки достижимости требуемой работы удара не позволяют использовать такой коэффициент запаса.

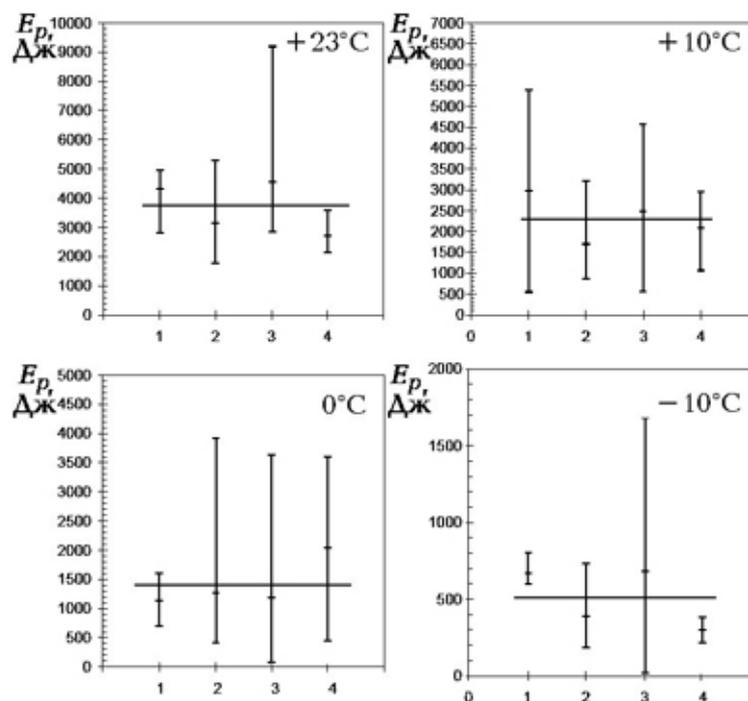


Рис. 12 Результаты сравнительных испытаний в лабораториях EPRG [30]: 1 – маятниковый копер 9 кДж, 2 – 4 – копры с падающим грузом с максимальной энергией 50, 16 и 11 кДж, соответственно

ВЫВОДЫ

1. Высокопрочные стали, разработанные для трубопроводов с высокими параметрами, показывают в изломах участки различной и весьма разнообразной морфологии, в том числе вязкое разрушение по телу зерна, для которого не требуется большая энергия. Вязко-хрупкий переход растянут в большом температурном интервале. Это приводит к необходимости адаптировать методику испытаний падающим грузом к современным материалам.

2. Оснащение испытательного оборудования средствами измерения не вызывает больших трудностей. Переход к серийному производству инструментированных копров сделал их стоимость сравнимой с обычными копрами.

3. Перечислены перспективные направления теоретических исследований с целью получения научно обоснованных количественных критериев применимости материала по данному виду испытаний.

4. Для применения количественных критериев требуется разделение работы зарождения и работы распространения трещины в образце DWTT, один из способов предложен авторами: образцы с хрупкой наплавкой.

5. Показаны перспективы использования механики разрушения, а именно, критерия *CTOA*, в качестве меры применимости трубных материалов.

6. На данном этапе необходимо накопление данных инструментированных испытаний для верификации численных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. API 5L3 Recommended Practice for Conducting Drop-Weight Tear Tests on Line Pipe. 4th edition, August 2014
2. API 5L Specification for Line Pipe. 45th edition. December 2012
3. ISO 3183-2012. Petroleum and natural gas industries – Steel pipe for pipeline transportation systems.
4. ГОСТ ISO 3183-2015 Трубы стальные для трубопроводов нефтяной и газовой промышленности. Общие технические условия.
5. Holmes B., Priest A.H., Walker E.F. Prediction of Linepipe Fracture Behaviour from Laboratory Tests // Int. J. of Pressure Vessels and Piping, 1983, No. 12, pp. 1 – 27.
6. ASTM E436-03 (2014). Standard Test Method for Drop-Weight Tear Test of Ferritic Steels.
7. ТИ/ВНИТИ 13 36 83 Испытания крупномасштабных образцов типа ДВТТ на ударный изгиб.
8. EN 10274: 1999 Materials with metallic properties. Drop weight tear test.
9. ГОСТ 30456-97 Металлопродукция. Прокал листовой и трубы стальные. Методы испытания на ударный изгиб.
10. Larionov A.V., Ilyin A.V. Application of DWT-test for determination of resistance to brittle and ductile fracture of hull steels/Proceedings of the 6th International Conference NSN-2011, June 30 – July 1, 2011, St. Petersburg.
11. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов, 2017 г.
12. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII «Материалы». 2017 г.
13. Филин В.Ю., Артемьев Д.М., Ильин А.В., Ларионов А.В. О проблемах перехода к количественным оценкам энергоемкости разрушения при испытаниях падающим грузом образцов натурной толщины /Труды конференции «Тестмат-2017», Москва, ВИАМ, 20 апреля 2017г., доклад № 18.
14. Филин В.Ю., Артемьев Д.М., Ильин А.В., Ларионов А.В. О проблемах перехода к количественным оценкам энергоемкости разрушения при испытаниях падающим грузом образцов натурной толщины //Авиационные материалы и технологии, 2017, № 4.
15. Hasenhutl A., Erdelen-Pepler M., Kalwa C. Understanding inverse fracture – comparison between laboratory BDWT and partial gas test //3R International. Technical journal for piping system integrity and efficiency. Special 01, 2016, pp. 18 – 22.
16. Inagaki H., Kurihara K., Kozasu I. Influence of Crystallographic Texture on the Strength and Toughness of the Controlled Rolled High Tensile Strength Steel// Tetsu-to-Hagane, 1979, No. 61, 7, pp. 991 – 1011.
17. Eiber R.J., Maxey W.A. Fracture Propagation Control Methods /Proceedings of Annual Symposium, Society of Flight Test Engineers, 1979, pp. 1 – 16.
18. Wilkowski G., Shim D-J., Hioe Y., Kalyanam S., Brust F. How new vintage line-pipe steel fracture properties differ from old vintage line-pipe steels. /Proc. 9th International Pipeline Conference, Calgary, Canada, September 24 – 28, 2012 (IPC2012-90518).
19. Ильин А.В., Артемьев Д.М., Филин В.Ю. Моделирование МКЭ распространения и торможения хрупкого разрушения в пластинах с исходной трещиной при варьировании их толщины //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018 (в печати).
20. Larionov A.V., Leonov V.P., Malyshevskiy V.A., Ilyin A.V., Danilov G.I. Determination of DWTT energy for pipeline steels. /Proc. "TRUBY-2010" International Science and Application Conference, International Scientific and Technical Conference, Chelyabinsk, Russia, September 13 – 15, 2010.
21. Саугеруд О.Т., Фридхейм С. Испытания трубопровода Бованенково-Ухта на остановку лавинного разрушения: вопросы и уроки // Наука и техника в газовой промышленности, №1, 2009. – с. 35 – 41.
22. Кнауф Г., Деморфонти Д. Подход группы EPRG по предотвращению протяженного вязкого разрушения в газопроводных трубах // Наука и техника в газовой промышленности, №1, 2009. – с. 10 – 16.
23. Hiroyuki Makino, Toshihiko Amano. Demonstration of Crack Arrestability of X100 Line Pipe and Development of Evaluation Technologies for Three-dimensional Fracture Process. Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report No. 107, February 2015.
24. Taishi Fujishiro, Takuya Hara. Effect on inverse fracture on crack arrestability during DWTT/6th International Pipeline Technology Conference, Ostend, Belgium. 6 – 9 October 2013.
25. Sang Yong Shin et al. Effects of Notch Shape and Specimen Thickness on Drop-Weight Tear Test Properties of API X70 and X80 Line-Pipe Steels/Metallurgical And Materials Transactions A. Volume 38A, March 2007, pp. 537 – 551.
26. O'Donoghue P.E., Kanninen M.F., Leung C.P., Demofonti G. The development and validation of a dynamic fracture propagation model for gas transmission pipelines //Int. J. Pressure Vessels and Piping, 1997, No.70, pp. 11 – 25.
27. Ilyin A.V., Vinogradov O.P., Gusev M.A. Development of Techniques for Determination of the Critical Crack-Tip Opening Angle as a Characteristic of the Extended Failure of Pipeline Metal //Inorganic Materials: Applied Research, 2013, V4, No.6, pp. 554 – 661.
28. Benamara M., Pluvinage G., Capella J., Azari Z. Influence Yield Stress on Arrest Pressure in Pipe Predicted by CTOA/21st European Conference on Fracture, ECF21, 20 – 24 June 2016, Catania, Italy.
29. Xu S., Tyson W.R., Eagleson R., McCowan C.N., Drexler E.S., McColskey J.D., Darcis Ph.P. Measurement of CTOA of pipe steels using MDCB and DWTT specimens/ Proceedings of the 8th International Pipeline Conference IPC2010.
30. Torvela N.O. et al. Investigation of the drop weight tear test /Canberra Joint Technical Meeting, 16 March 2007.

REFERENCES

1. API 5L3 Recommended Practice for Conducting Drop-Weight Tear Tests on Line Pipe. 4th edition, August 2014
2. API 5L Specification for Line Pipe. 45th edition. December 2012
3. ISO 3183-2012. Petroleum and natural gas industries – Steel pipe for pipeline transportation systems.
4. GOST ISO 3183-2015 Truby stal'nye dlya truboprovodov neftyanoy i gazovoy promyshlennosti. Obshchie tekhnicheskie usloviya [State Standard ISO 3183-2015 Steel pipes for pipelines of petroleum and natural gas industries. General specifications].
5. Holmes B., Priest A.H., Walker E.F. Prediction of Linepipe Fracture Behaviour from Laboratory Tests. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, 1983, No. 12, pp. 1 – 27.
6. ASTM E436-03 (2014). Standard Test Method for Drop-Weight Tear Test of Ferritic Steels.
7. TI/VNITI 13 36 83 Impact bend test of large-scale DWTT-type specimens.
8. EN 10274: 1999 Materials with metallic properties. Drop weight tear test.
9. GOST 30456-97 Metalloproduksiya. Prokat listovoy i truby stal'nye. Metody ispytaniya na udarnyy izgib [State Standard 30456-97 Metal production. Rolled steel and tubes. Methods of blow bending tests].
10. Larionov A.V., Ilyin A.V. Application of DWT-test for determination of resistance to brittle and ductile fracture of hull steels/Proceedings of the 6th International Conference NSN-2011, June 30 – July 1, 2011, St. Petersburg.
11. Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the Classification and Construction of Subsea Pipelines, 2017.
12. Russian Maritime Register of Shipping. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, Part XIII "Materials", 2017.
13. Filin V.Yu., Artemiev D.M., Ilyin A.V., Larionov A.V. O problemakh perekhoda k kolichestvennym otsenkam energoemkosti razrusheniya pri ispytaniyakh padayushchim gruzom obraztsov naturnoy tolshchiny /Trudy konferentsii "Testmat-2017" [Difficulties of the transition to quantitative estimation of fracture energy at drop-weight testing of specimens in full thickness /Proc. TESTMAT 2017 conference]. Moscow, VIAM, 20 April 2017, Report No. 18.
14. Filin V.Yu., Artemiev D.M., Ilyin A.V., Larionov A.V. O problemakh perekhoda k kolichestvennym otsenkam energoemkosti razrusheniya pri ispytaniyakh padayushchim gruzom obraztsov naturnoy tolshchiny [Difficulties of the transition to quantitative estimation of fracture energy at drop-weight testing of specimens in full thickness]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies] 2017, № 4.
15. Hasenhutl A., Erdelen-Peppler M., Kalwa C. Understanding inverse fracture – comparison between laboratory BDWT and partial gas test. 3R International. Technical journal for piping system integrity and efficiency. Special 01, 2016, pp. 18 – 22.
16. Inagaki H., Kurihara K., Kozasu I. Influence of Crystallographic Texture on the Strength and Toughness of the Controlled Rolled High Tensile Strength Steel// *Tetsu-to-Hagane*, 1979, № 61, 7, pp. 991 – 011.
17. Eiber R.J., Maxey W.A. Fracture Propagation Control Methods. Proceedings of Annual Symposium, Society of Flight Test Engineers, 1979, pp. 1 – 16.
18. Wilkowski G., Shim D-J., Hioe Y., Kalyanam S., Brust F. How new vintage line-pipe steel fracture properties differ from old vintage line-pipe steels. Proc. 9th International Pipeline Conference, Calgary, Canada, September 24 – 28, 2012 (IPC2012-90518).
19. Ilyin A.V., Artemiev D.M., Filin V.Yu. Modelirovanie MKE rasprostraneniya i tormozheniya khrupkogo razrusheniya v plastinakh s iskhodnoy treshchinoy pri var'irovaniikh tolshchiny [Finite element modeling of propagation and arrest of brittle fracture in steel plates of different thicknesses with initial crack]. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*. 2018 (accepted for print).
20. Larionov A.V., Leonov V.P., Malyshevskiy V.A., Ilyin A.V., Danilov G.I. Determination of DWTT energy for pipeline steels. Proc. "TRUBY-2010" International Science and Application Conference, International Scientific and Technical Conference, Chelyabinsk, Russia, September 13 – 15, 2010.
21. Saugerud O.T., Fredheim S. Ispytaniya truboprovoda Bovanenkovo-Ukhta na ostanovku lavinnogo razrusheniya: voprosy i uroki [Bovanenkovo-Ukhta Pipeline Fracture Arrest Tests – Lessons Learned, Questions Asked]. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti* [Science Technology in the Gas Industry, №1, 2009, pp. 10 – 16.
22. Hiroyuki Makino, Toshihiko Amano. Demonstration of Crack Arrestability of X100 Line Pipe and Development of Evaluation Technologies for Three-dimensional Fracture Process. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report No. 107*, February 2015.
23. Taishi Fujishiro, Takuya Hara. Effect on inverse fracture on crack arrestability during DWTT/6th International Pipeline Technology Conference, Ostend, Belgium. 6 – 9 October 2013.
24. Sang Yong Shin et al. Effects of Notch Shape and Specimen Thickness on Drop-Weight Tear Test Properties of API X70 and X80 Line-Pipe Steels/*Metallurgical And Materials Transactions A*. Volume 38A, March 2007, pp. 537 – 551.
25. O'Donoghue P.E., Kanninen M.F., Leung C.P., Demofonti G. The development and validation of a dynamic fracture propagation model for gas transmission pipelines. *Int. J. Pressure Vessels and Piping*, 1997, No.70, pp. 11 – 25.
26. Ilyin A.V., Vinogradov O.P., Gusev M.A. Development of Techniques for Determination of the Critical Crack-Tip Opening Angle as a Characteristic of the Extended Failure of Pipeline Metal. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2013, V4, No.6, pp. 554 – 661.
27. Benamara M., Pluvinaige G., Capellea J., Azari Z. Influence Yield Stress on Arrest Pressure in Pipe Predicted by CTOA/21st European Conference on Fracture, ECF21, 20 – 24 June 2016, Catania, Italy.
28. Xu S., Tyson W.R., Eagleson R., McCowan C.N., Drexler E.S., McColskey J.D., Darcis Ph.P. Measurement of CTOA of pipe steels using MDCB and DWTT specimens/ Proceedings of the 8th International Pipeline Conference IPC2010.
29. Torvela N.O. et al. Investigation of the drop weight tear test /Canberra Joint Technical Meeting, 16 March 2007.



МЕХАНИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ДВИЖИТЕЛИ

УДК 629.12.06

ИМИТАЦИОННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВАЛОПРОВОДОВ ЛЕДОКОЛОВ И СУДОВ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ

В.К. Румб, канд. техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, e-mail: vkrumb@mail.ru

В статье отмечена роль валопровода в судовом движительно-двигательном комплексе. Представлена методология, позволяющая на этапе проектирования прогнозировать прочность и долговечность валопроводов ледоколов и судов ледового плавания. Дано физико-теоретическое описание силового взаимодействия лопасти гребного винта с льдиной. Получены зависимости для определения ударной силы. Также в статье рассмотрен механизм передачи ледовых нагрузок на валопроводы при различных условиях эксплуатации судна. Приведены основные положения имитационного моделирования, позволяющего воспроизвести случайный ударно-колебательный процесс в валопроводе. Особое внимание уделено механике разрушения деталей в условиях накопления усталостных повреждений. Рассмотрены теоретические предпосылки расчета на выносливость судовых валопроводов с учетом рассеивания прочностных свойств материала валов и действующих в них напряжений. Показано, как с помощью представленных методик удается прогнозировать долговечность валопровода. Работоспособность методик иллюстрируются конкретными примерами.

Ключевые слова: гребной винт, льдина, имитационное моделирование, ледовые нагрузки, валопровод, прочность, долговечность

SIMULATION PREDICTION OF THE STRENGTH AND DURABILITY OF SHAFTINGS FOR ICEBREAKERS AND ICE-GOING SHIPS

V.K. Rumb, PhD, professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: vkrumb@mail.ru

The article describes the role of shafting in a ship's thruster-engine complex, presenting a methodology that allows to predict the strength and durability of shafting for icebreakers and ice-going ships at the design stage. Physical and theoretical description of propeller blades interaction with ice floe with respect to the loads that occur is also given. The formulas for determination of impact forces are derived. The article also describes the mechanism of transfer of ice loads on shaftings under different operating conditions. The main provisions of the numerical simulation are given, allowing to simulate the occasional impact and vibrational process in shafting. Special attention is given to the mechanics of destruction of parts due to fatigue damage accumulation. The theoretical background is based on endurance of ship shafting with the variation of shafting material strength characteristics and the stresses acting in them. It is also demonstrated how to use the presented techniques to predict the durability of shafting. The applicability of the method is illustrated by calculation examples.

Keywords: propeller, ice floe, simulation, ice load, shafting, strength, durability

ВВЕДЕНИЕ

В судовом движительно-двигательном комплексе валопровод выполняет функции промежуточного звена, он соединяет в единое целое главный двигатель и гребной винт. Несмотря на вспомогательные функции и кажущую простоту, судовой валопровод играет решающую роль в работоспособности всего движительного комплекса. До сих пор поломки валов и трещины в гребных валах довольно частые явления, приводящие к аварийным ситуациям с потенциальной угрозой для жизни экипажа и судна в целом. При этом количество повреждений гребных валов возрастает с увеличением их диаметра.

В равной мере сказанное распространяется на валопроводы ледоколов и судов ледового плавания. Валопроводы этих судов кроме обычных напряжений от крутящего момента, упора и изгиба испытывают дополнительные напряжения от ледовых нагрузок. Они обусловлены эпизодическими соударениями лопастей винта со льдом. При ударе лопасти о лед возникают большие динамические силы и моменты, которые стремятся не только изогнуть или сломать лопасть, но и вызвать в валопроводе ударно-колебательный процесс [5]. Так, в моменты ударов лопастей винта со льдом амплитуды крутящего момента в валопроводе превосходят номинальное значение в 6 – 10 раз, изгибающий момент превышает гидродинамический момент на чистой воде в 8 – 15 раз, перегрузка по упору составляет 1,5 – 2,5 раза. Наряду с дополнительными динамическими нагрузками отмечается возрастание и среднего крутящего момента в валопроводе. В реальных ледовых условиях величина этого момента превышает номинальное значение в 2 – 2,5 раза и иногда становится причиной заклинивания гребного винта [8].

Все это свидетельствует о необходимости уметь не только оценивать ледовые нагрузки, но и прогнозировать их воздействия на валопровод. В условиях постоянно возрастающих требований к безаварийной эксплуатации судов данный прогноз оправдано выражать объективным понятием – долговечностью, выражая ее в конкретных величинах, например, часах работы от начала эксплуатации до усталостной поломки или появления первой макроскопической трещины. Очевидно, что умение прогнозировать долговечность валопровода расчетным путем позволяет повысить эксплуатационную надежность движительного комплекса.

Поставленные выше задачи во многом нашли практическое отражение в настоящей статье. По существу, в ней приведены основные положения методик, последовательное выполнение которых дает возможность определить долговечность судового валопровода с учетом случайного соударения лопастей гребного винта с льдинами.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ СИЛЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛОПАСТИ ВИНТА С ЛЬДИНОЙ

Большинство известных решений задачи о взаимодействии гребного винта со льдом базируются на идеализации лопасти гребного винта в виде стержня, жестко закрепленного в корневом сечении и имеющего постоянную геометрию [7]. При этом предлагаемые зависимости исходят из заданного закона распределения ледовой нагрузки по кромке лопасти, но главный их недостаток – они рассматривают статическое приложение нагрузки. В действительности эти нагрузки вызваны ударами, а поэтому оправдано учитывать динамическое взаимодействие лопастей винта с льдинами. Более того, согласно теории удара форма ударной силы $P(t)$ существенным образом влияет на динамику ударно-колебательного процесса, интенсивность которого в основном определяется крутизной переднего фронта силы $P(t)$.

Учитывая значимость отмеченного аспекта, для установления формы ударной силы рассмотрим деформацию лопасти совместно с движением льдины, т.е. будем считать, что после удара льдина продолжает свое движение и обуславливает деформацию лопасти. При этом первоначальная скорость движения льдины будет постепенно убывать за счет противодействия силы упругости лопасти. На основании теоремы об изменении количества движения это уменьшение скорости можно выразить так

$$v = v_0 - \frac{1}{M} \int_0^t P(t) dt, \quad (1)$$

где M – масса льдины;
 v_0 – скорость льдины в начале удара.

Движение взаимодействующих тел следует рассматривать как сложное, состоящее из относительного (скорости судна v_0) и переносного, равного произведению угловой скорости гребного винта ω на удаление точки удара от оси вращения R_0 , рис. 1. Тогда $v_0 = v_c + \omega R_0$.

Выражение для перемещения льдины получается путем интегрирования (1)

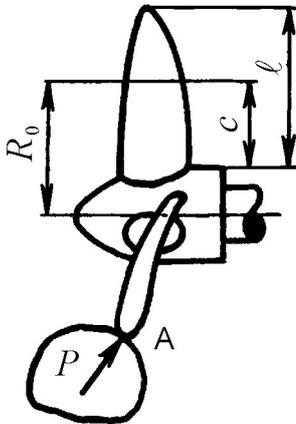


Рис. 1 Расчетная схема гребного винта

$$y = v_0 t - \frac{1}{M} \int_0^t \left(\int_0^t P(t) dt \right) dt. \quad (2)$$

Перемещение льдины возможно только за счет деформации лопасти. Если лопасть гребного винта идеализировать консольной балкой, жестко зашпеленной в корневом сечении и нагруженной силой $P(t)$, то уравнение изогнутой оси этой балки можно представить так:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M_i}{EJ} \frac{J_0}{J} + \frac{1,18}{GF} \frac{F_0}{F} \frac{dQ}{dx}, \quad (3)$$

где M_i – изгибающий момент;
 Q – поперечная сила;
 J – момент инерции и
 F – площадь поперечного сечения лопасти – переменные величины, зависящие от точки контакта лопасти со льдом и геометрии гребного винта;
 J_0 и F_0 – минимальный момент инерции и площадь корневого сечения лопасти;
 E и G – модули упругости и сдвига соответственно.

Если лопасть воспринимает удар в точке А (рис. 1), удаленной от зашпеления на расстоянии c , то на участке $0 \leq x \leq c$ изгибающий момент и поперечная сила являются аргументами ударной силы и координаты точки ее приложения, следовательно: $M_i = P(t)(c - x)$, $Q = P(t)$. С учетом этого и двукратного интегрирования (3) получим

$$y = \frac{P(t)}{EJ_0} \int_0^c \int_x (c - x) \frac{J_0}{J} dx^2 + \frac{\gamma P(t)}{GF_0} \int_0^c \int_x \frac{F_0}{F} dx^2. \quad (4)$$

Таким образом, условие совместности деформации лопасти (4) и перемещения льдины (2) позволяет получить уравнение для искомой силы удара

$$P(t) = \frac{(v_c t + \omega R_0 t) - \frac{1}{M} \int_0^t \left(\int_0^t P(t) dt \right) dt}{\frac{1}{EJ_0} \int_0^c \int_x (c - x) \frac{J_0}{J} dx^2 + \frac{\gamma}{GF_0} \int_0^c \int_x \frac{F_0}{F} dx^2}. \quad (5)$$

Решение данного уравнения осуществляется методом последовательных приближений при заданных значениях координаты точки удара и массы льдины. Иначе говоря, процедуру определения формы ударной силы следует рассматривать как уточнение силы P в дискретные моменты времени с выбранным шагом дискретизации Δt , обычно $\Delta t = 0,001$ с. Подробнее о решении (5) сказано в [7]. С использованием (5) выполнены расчеты по определению ледовой силы при взаимодействии со льдом лопастей гребного винта ледокола «Капитан Крутов». Результаты расчета для нескольких вариантов исходных данных представлены на рис. 2. Обращает на себя внимание несимметричная форма ударной силы: передний и задний фронты имеют разную крутизну.

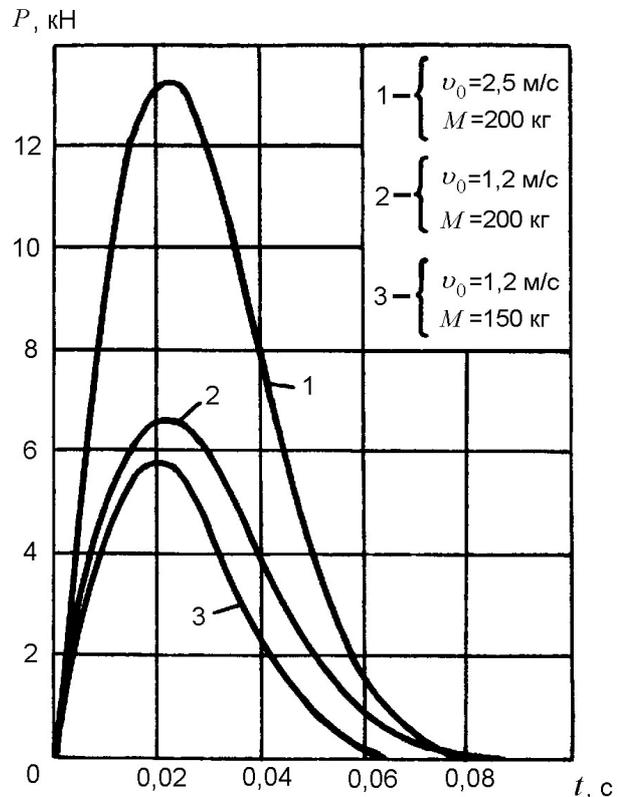


Рис. 2 Формы ледовой силы

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

При эксплуатации судна в ледовых условиях его валопровод подвергается дополнительному нагружению от эпизодических соударений лопастей гребного винта с льдинами. Частота и интенсивность этих ударов, а соответственно и напряжения в лопастях гребного винта и в валопроводе представляют собой случайные величины, зависящие от многих факторов: толщины и структуры льда, направления движения судна, места расположения, заглублиния и частоты вращения гребного винта, размеров льдины и точки ее контакта с лопастью и т.д. Результаты испытаний ледоколов и судов ледового плавания дают общее представление об уровне механических напряжений в гребном винте и в валах валопровода при работе судна во льдах, однако содержат далеко не всю ту информацию, которая необходима для обобщающих выводов и прогнозирования их прочности и долговечности. В условиях неопределенности исходной информации имитационное моделирование остается единственным способом прогнозирования ледовых нагрузок. Основная идея имитационного моделирования заключается в многократном повторении расчета по (5) с исходными данными, которые являются случайными числами [9]. К таким данным, прежде всего, относятся масса льдины, месторасположение точки соударения, взаимное положение лопасти и льдины и т.п. Они для каждого повторного расчета задаются генератором случайных чисел – специальной подпрограммой. Генератор сначала с помощью стандартной программы выдает число ξ , равномерно распределенное в интервале (0,1), а затем преобразовывает его так, чтобы оно подчинялось заданному закону распределения.

Следующий этап моделирования – это передача ледовой нагрузки от гребного винта на валопровод, т.е. задача определения ударно-колебательного процесса. Данная задача предусматривает решение системы дифференциальных уравнений

$$[M]\{\ddot{\varphi}\} + [B]\{\dot{\varphi}\} + [C]\{\varphi\} = \{P(t)\}, \quad (6)$$

где $[M]$, $[B]$ и $[C]$ – матрицы масс, демпфирования и жесткости; $\{\varphi\}$ и $\{P(t)\}$ – матрицы-столбцы обобщенных координат и ударных усилий.

Решить (6) при случайно изменяющихся усилиях классическими методами теории колебаний невозможно. Поэтому предлагается решать задачу об ударных колебаниях как в обобщенных, так и в главных координатах [7]. В первом случае применяется численное интегрирование (6), например, достаточно известным в инженерной практике методом Рунге – Кутты 4-го порядка. Алгоритм реализации метода заключается в циклических вычислениях искомых переменных по каноническим формулам [1]. Что касается трудностей применения метода главных координат, то они обусловлены проблемой определения полного спектра частот свободных колебаний и соответствующих им коэффициентов распределения амплитуд. Только из-за этого применение данного метода ограничивается системами с небольшим числом переменных.

Заключительный этап поставленной задачи – это само имитационное моделирование, последовательность которого поясняет рис. 3. После ввода исходных данных генерируются по заданным вероятностным законам время до удара t_1 и время между ударами t_2 . Затем тем же генератором разыгрываются все необходимые случайные параметры для определения ударной силы, и производится ее вычисление в полном соответствии с уравнением (5). Подсчитываются напряжения и деформации гребного вала и другие интересные величины. Если расчетная длительность действия

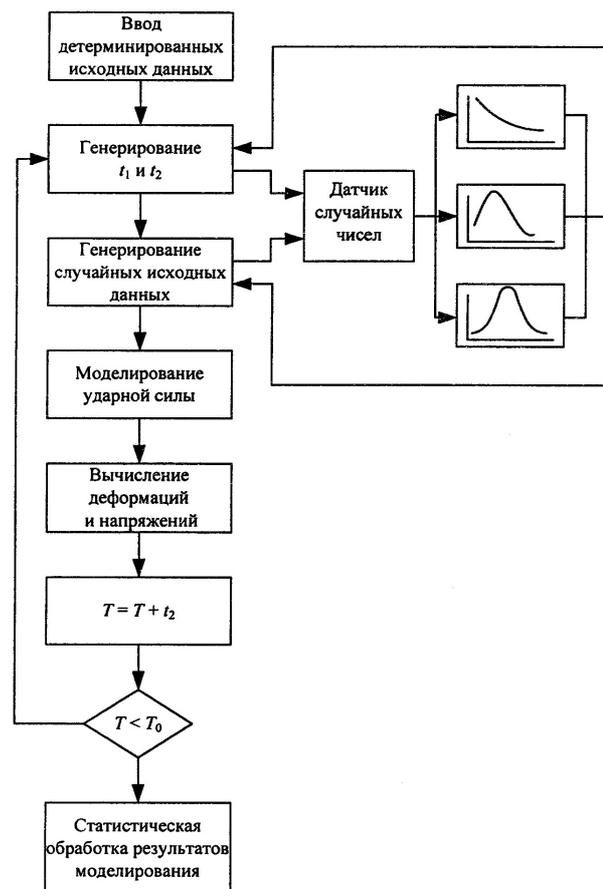


Рис. 3 Блок-схема имитационного моделирования ледовых нагрузок

ударной силы t окажется больше t_2 , то это свидетельствует о перекрытии фронтов ударных сил и, следовательно, имеет место фрезерование льдины. В противном случае будет единичный удар. Далее процедуры повторяются: снова генерируется время до следующего удара, осуществляется прогон модели и определяется ударная сила, подсчитываются напряжения и деформации и т.д. В результате такой имитации получается реализация в виде случайного процесса (рис. 4), близкого реальной тензограмме.

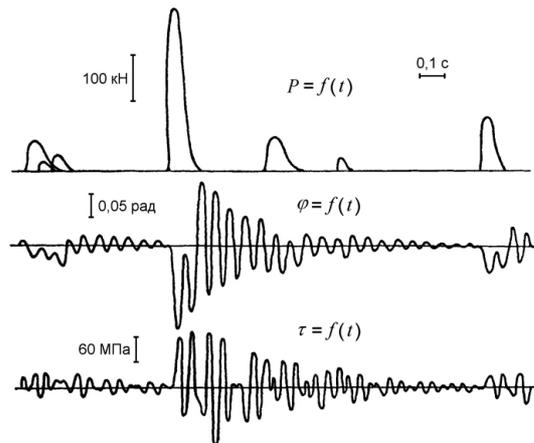


Рис. 4 Фрагмент имитационного моделирования ледовых нагрузок (P), деформаций (φ) и напряжений (τ) гребного вала

3. ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ СЛУЧАЙНОГО УДАРНО-КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Особой проблемой имитационного моделирования остается проверка адекватности полученного и реального случайных процессов. Первый шаг проверки – дискретизация, т.е. замена непрерывного случайного процесса последовательностью случайных чисел – осуществляется с шагом квантования Δt . При имитационном моделировании ударно-колебательных процессов шаг квантования назначают таким, чтобы по полученным значениям ординат можно было воссоздать случайный процесс без потери его индивидуальности. В результате дискретизации получается выборка случайных чисел, ее статистическая обработка позволяет подсчитать среднее арифметическое, дисперсию, среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации.

Следующий шаг проверки адекватности сводится к определению длительности реализации случайных процессов, так как от ее во многом зависит точность определения числовых характеристик исследуемых процессов. Необходимая для проверки длительность случайных процессов устанавливается в результате построения корреляционной функции. При дискретном представлении случайного процесса в виде чисел $x_i (i = 1, \dots, N)$ ординаты нормированной корреляционной функции вычисляются по формуле

$$\rho(t) = \frac{1}{D^2(N-m-1)} \sum_{i=1}^{N-m} [(x_i - \mu)(x_{i+m} - \mu)], \quad (7)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots, p-1$ – число, определяющее величину сдвига;
 p – число ординат корреляционной функции, обычно $p = 0,1N$;
 μ и D^2 – среднее арифметическое и дисперсия реализации случайного процесса.

График функции $\rho = f(t)$ с ростом времени t чаще всего затухает и достигает минимума при t_k . Это интервал корреляции, по сути, делит всю реализацию на временные промежутки, между которыми можно пренебречь вероятностными связями. Соответственно, совпадение корреляционных функций и результатов статистической обработки моделируемого и реального процессов за время t_k может служить критерием проверки адекватности этих процессов.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВАЛОПРОВОДА

Моделированием ударно-колебательного процесса удается воспроизвести во времени изменения напряжений в валопроводе, обусловленные эпизодическими соударениями лопастей винта со льдом.

Понятно, что эти напряжения представляет собой случайную функцию времени, т.е. $\sigma = f(t)$. По этой причине усталостная долговечность не может быть детерминированной величиной. Ее случайность обусловлена влиянием большого количества факторов на процессы зарождения и развития усталостных трещин. Из-за неодинакового влияния этих факторов сценарии накопления повреждений могут существенно отличаться друг от друга, что в конечном итоге приводит к разбросу ресурса даже однотипных валов.

Достаточно точно прогнозировать усталостную долговечность удастся только при наличии представительской выборки случайных напряжений. Ее необходимая длительность устанавливается по времени корреляции t_k . С учетом этого времени количество блоков нагружения λ за всю долговечность вала T до появления признаков усталостного разрушения будет

$$\lambda = T/t_k. \quad (8)$$

После того, как определена необходимая длительность выборки $\sigma = f(t)$ осуществляют схематизацию, т.е. подсчитывают амплитуды напряжений, которые вызывают усталостные повреждения. Наибольшее распространение получили методы схематизации: максимумов и размахов, рис. 5. При первом методе за амплитуду напряжений принимают отклонение между максимальным значением и средним уровнем. При методе размахов амплитудами напряжений считают половину между двумя соседними экстремумами.

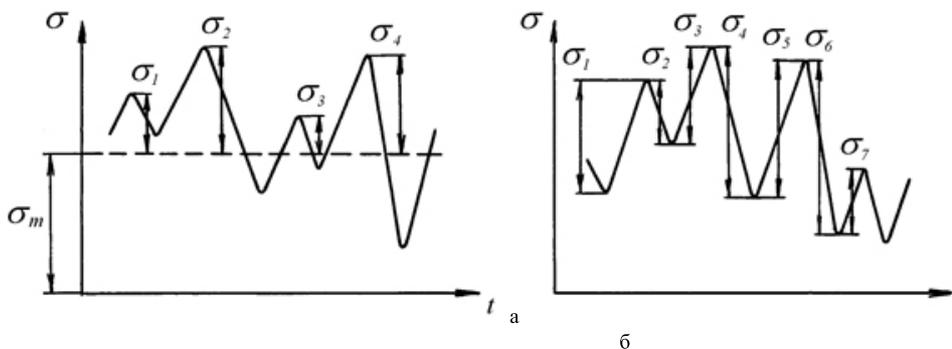


Рис. 5 Методы схематизации функции $\sigma = f(t)$:
а – максимумов, б – размахов

В результате схематизации получают дискретный ряд амплитуд напряжений σ_{ai} . Статистическая обработка этого ряда сводится к построению гистограммы (рис. 6), которая представляет собой ступенчатую линию, ординаты которой на каждом интервале постоянны и равны v_i/v_6 , где v_i – число амплитуд напряжений, попавших в i -ступень гистограммы; v_6 – суммарное количество амплитуд σ_{ai} в блоке нагружения. Соответственно общее число циклов переменных напряжений с данной амплитудой за весь ресурс вала составит

$$p_i = v_i \lambda. \quad (9)$$

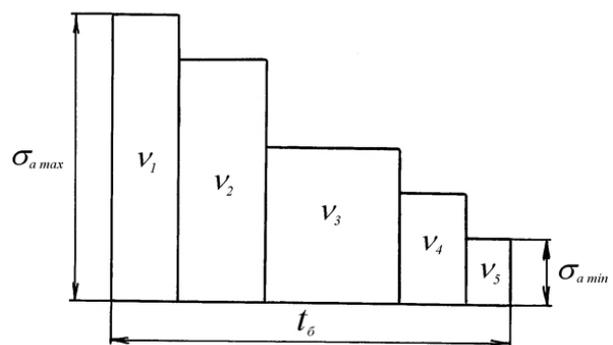


Рис. 6 Гистограмма распределения амплитуд напряжений в блоке нагружения

Непосредственная оценка долговечности – продолжительности работы валопровода от начала эксплуатации до наступления предельного состояния – основывается на необратимом росте усталостной трещины в результате последовательного накопления повреждений [4]. Так, согласно гипотезе линейного суммирования повреждений Пальмгрена – Майнера полное разрушение произойдет, когда сумма накопленных повреждений $a_p = 1$. Между тем, результаты многочисленных испытаний образцов на усталость показали, что значение a_p к моменту поломки может находиться в пределах от 0,05 до 4. Столь большой разброс естественно отражается на точности: двух- или даже трехкратная ошибка в оценке долговечности по линейной гипотезе суммирования повреждений считается нормой. На этом основании более оправдано пользоваться корректи-

рованной гипотезой суммирования повреждений. Она предложена В.П. Когаевым [3]. В предлагаемом варианте известной гипотезы a_p подсчитывается, в частности, для блочного нагружения

$$a_p = \sum_{i=1}^r \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{a\max}} \cdot \frac{v_i}{v_6}, \quad (10)$$

где r – число ступеней гистограммы.

Для данного случая нагружения скорректированная гипотеза суммирования повреждений выражается уравнением

$$\sum_{i=1}^r \frac{p_i}{N_i} = a_p. \quad (11)$$

Величина N_i , входящая в (11), определяется из уравнения кривой усталости

$$N_i = \frac{(\sigma_{-1}^n)^m N_B}{\sigma_{ai}^m}, \quad (12)$$

где m – показатель степени, характеризует угол наклона правой ветви кривой усталости;
 $m = \text{ctg} \varphi$, рис. 7;
 σ_{-1}^n – предел выносливости материала реального вала;
 N_B – базовое число циклов нагружения.

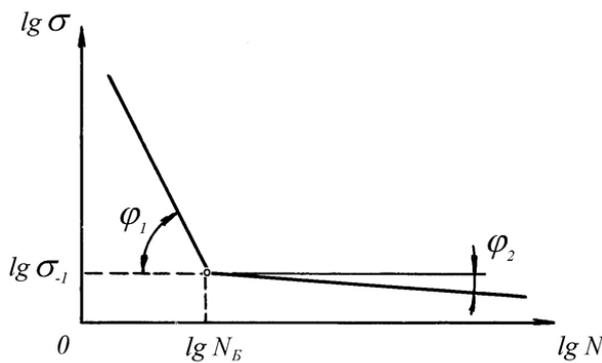


Рис.7 Кривая усталости в двойных логарифмических координатах

Совместное рассмотрение приведенных зависимостей позволяет получить формулу для искомой долговечности валопровода по критерию усталости материала. Между тем, более рациональной является формула, в которой долговечность выражается через коэффициенты запаса прочности. Переход к такой формуле поясняют следующие преобразования

$$T = \frac{a_p (\sigma_{-1}^n)^m N_B}{\sum_{i=1}^r (v_i \sigma_{ai}^m)} t_k = \frac{a_p N_B}{\sum_{i=1}^r \left[v_i \frac{\sigma_{ai}^m}{(\sigma_{-1}^n)^m} \right]} t_k = \frac{a_p N_B}{\sum_{i=1}^r \frac{v_i}{n_i^m}} t_k. \quad (13)$$

По условию прочности коэффициент запаса прочности n_i , входящий в (13), не должен быть меньше минимально допустимого значения n_{\min} . С учетом данного условия (13) принимает вид [6]

$$T = \frac{a_p N_B}{\sum_{i=1}^r \frac{v_i}{(n_i/n_{\min})^m}} t_k, \quad (14)$$

где $a_p = \sum_{i=1}^r \frac{n_{\min}^* / n_{\min} v_i}{n_i / n_{\min} v_i}$, n_{\min}^* – минимальное значение коэффициента запаса прочности из совокупности n_i , $i = 1, 2, \dots, r$.

Напомним, входящие в (14) аргументы являются случайными числами с присущими им законами распределений. Как функция случайных аргументов величина T также будет случайной. Чтобы дать корректный прогноз по долговечности, надо многократно повторить расчет по этой формуле, моделируя каждый раз значения указанных аргументов заново. В результате этих расчетов получается вариационный ряд из значений T , статистическая обработка которого дает математическое ожидание μ_T , среднее квадратическое отклонение S_T и функцию распределения $f(T)$. С помощью данной функции удается определять вероятность усталостного разрушения вала за время μ_T . Однако с целью безопасной эксплуатации валопровода оправданно задавать долговечность валов не по среднему, а по гаммапроцентному ресурсу [2].

5. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВАЛОПРОВОДА

В качестве примера иллюстрирующего практическое применение изложенных методик, приведем результаты расчета долговечности валопровода судна ВС 14 дедвейтом 23250 т, имеющего длину 180,5 м, осадку 9,91 м, полное водоизмещение 74000 м³, ледовый класс **Arc 5**, скорость 15,2 узла. Судно предназначено для перевозки навалочных грузов и контейнеров международного стандарта.

Судовая главная энергетическая установка: одномашинная, одновальная, тип передачи – прямая. Главный двигатель – дизель 6S50MC-C (6ДКРН50/200) производства ОАО «Брянский машиностроительный завод» с максимальной длительной мощностью 9480 кВт при частоте вращения коленчатого вала 127 мин⁻¹. Масса сухого дизеля 207000 кг.

Гребной винт – четырехлопастной фиксированного шага, имеет диаметр 5,15 м, шаг 4,09 м, дисковое отношение 0,527, массу 19200 кг.

Валопровод состоит из гребного, промежуточного и проставочного валов. Между собой они соединяются посредством фланцев. На гребном вале фланец съемный, на промежуточном – откован за одно целое с валом. Соединение фланцев выполняется плотно пригнанными (призонными) болтами. Минимальные диаметры валов составляют: для гребного вала – 595 мм; для промежуточного вала – 460 мм. Поковки валов стальные, гребной вал изготовлен из стали, ее механические свойства: предел прочности – 567 – 602 МПа; предел текучести – 336 – 363 МПа. Механические свойства стали для промежуточного вала: предел прочности – 532 – 540 МПа; предел текучести – 274 МПа.

Кормовой и носовой дейдвудные подшипники из белого антифрикционного металла, работают в масле. Дейдвудное уплотнение «SIMPLEX-COMPACT».

Расчеты валопровода сводились к оценке прочности и долговечности кормовой части гребного вала. В качестве концентратора напряжений рассматривался шпоночный паз. Сначала были выполнены расчеты на выносливость отдельно для каждого из четырех скоростных режимов движения судна по чистой воде. Параметры этих режимов приведены в таблице. При этом мощность, требуемая для обеспечения заданной скорости судна, определялась по формулам адмиралтейского коэффициента, а частота вращения коленчатого вала – по зависимости для винтовой характеристики.

Т а б л и ц а

Режимы эксплуатации судна проекта ВС14

Номер режима	Скорость судна, уз	Мощность главного двигателя, кВт	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Относительная длительность работы на режиме, x_i	Коэффициент запаса прочности, n_i
1	15,2	9480	127	0,1	1,89
2	14	7407	116	0,4	2,08
3	13	5930	108	0,3	2,27
4	11	3593	92	0,2	2,68

В результате расчета на выносливость были вычислены коэффициенты запаса прочности с учетом переменных величин крутящего момента и изгиба в двух взаимно перпендикулярных плоскостях [6]. Значения этих коэффициентов приведены в таблице. Минимально допустимое значение коэффициента запаса прочности отвечает коэффициентам вариации предела выносливости 0,06 и расчетных напряжений 0,12 и соответствует достоверности их задания с вероятностью 0,915.

При известных коэффициентах запаса прочности и их минимально допустимом значении долговечность гребного вала, выраженная числом циклов до появления усталостных трещин в месте расположения шпоночного паза, будет равна

$$N = \frac{N_b}{\sum_{i=1}^4 \frac{x_i}{\left(\frac{n}{n_{\min}}\right)^m}} = \frac{10^8}{\frac{0,1}{\left(\frac{1,89}{1,77}\right)^{15}} + \frac{0,4}{\left(\frac{2,08}{1,77}\right)^{15}} + \frac{0,3}{\left(\frac{2,27}{1,77}\right)^{15}} + \frac{0,2}{\left(\frac{2,68}{1,77}\right)^{15}}} = 1,242 \cdot 10^9.$$

Долговечность гребного вала в часах работы главного двигателя

$$T = \frac{1,242 \times 10^9}{60(127 \times 0,1 + 116 \times 0,4 + 108 \times 0,3 + 92 \times 0,2)} = 188353 \text{ час.}$$

Приведенные долговечности подсчитаны по формулам линейного суммирования повреждений. При использовании скорректированной гипотезы суммирования повреждений усталостная долговечность

$$T_k = a_p T = 0,85 \times 188353 = 160100 \text{ час,}$$

где

$$a_p = \sum_{i=1}^4 \frac{n_{\min}^*}{n_i} x_i = \frac{1,77}{1,89} 0,1 + \frac{1,77}{2,08} 0,4 + \frac{1,77}{2,27} 0,3 + \frac{1,77}{2,68} 0,2 = 0,85.$$

Далее были выполнены еще два расчета, учитывающие частичное движение судна во льдах. Эти расчеты производились в полном соответствии с изложенной выше методологией. Поэтому сначала моделировался ударно-колебательный процесс в течение интервала корреляции, затем подсчитывались напряжения от кручения и строилась гистограмма напряжений, после этого вычислялись коэффициенты запаса прочности и определялась долговечность по (14). В первом из этих расчетов считали, что судно 30 % всего ходового времени движется в сплошном ледовом поле толщиной 0,6 м, остальное время – плавание в свободной воде. В этом варианте расчетная долговечность составила 46420 час. Во втором расчете полагали, что судно будет двигаться 40 % во льдах толщиной 0,3 м и 30 % в ледовом поле толщиной 0,6 м. При этих условиях плавания долговечность гребного вала будет 27916 часов. Указанные долговечности соответствуют вероятности отсутствия усталостных трещин, равной 0,89.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные методические основы прогнозирования долговечности судовых валопроводов во многом базируются на имитационном моделировании ударно-колебательного процесса, обусловленного силовым взаимодействием лопастей гребного винта со льдом и характерного при движении судна во льдах. Стохастическая природа рассматриваемого процесса состоит в отсутствие какой-либо закономерности попадания льдин в поле диска гребного винта и невозможности аналитического описания чередования отдельных ударов лопастей о лед и фрезерования крупных льдин. Возможность имитации данного процесса на ЭВМ позволяет расчетным путем с использованием предлагаемых методик оценивать напряженно-деформированное состояние валопроводов ледоколов и судов ледового плавания. Такое умение в условиях постоянно возрастающих требований к проектным решениям становится весьма важным, поскольку позволяет предупреждать поломки валов.

Многие из приведенных методик представлены в виде программных блоков, что ускоряет выполнение расчетов. Однако даже в этом случае прогнозирование долговечности валопровода по критерию усталости материала остается весьма трудоемкой задачей в вычислительном отношении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам к программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. Справочник. – М.: Наука, 1987. – 240 с.
2. Ефремов Л.В. Практика инженерного анализа надежности судовой техники / Л.В. Ефремов. – Л.: Судостроение, 1980. – 176 с.
3. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В.П. Когаев – М., Машиностроение, 1977. – 232 с.
4. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение / Дж. Коллинз. – М.: Мир, 1978. – 624 с.
5. Меркулов В.А., Тимофеев В.И., Яковлева М.В. Исследование нагрузок на валопроводах ледоколов и транспортных судов ледового плавания // Судостроение, 1981, № 3. – С.35 – 39.
6. Румб В.К. Прочность и долговечность судовых машин и механизмов: учебное пособие / В.К.Румб – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2014. – 237 с.
7. Румб В.К. Прочность судового оборудования. Конструирование и расчеты прочности судовых валопроводов.: учебник / В.К.Румб. – СПб., СПбГМТУ, 2008. – 298 с.
8. Рывлин А.Я. Испытание судов во льдах / А.Я. Рывлин, Д.Е. Хейсин. – Л.: Судостроение, 1980. – 207 с.
9. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 418 с.

REFERENCES

1. D'yakonov V.P. Spravochnik po algoritmam k programmam na yazyke beysik dlya personal'nykh EVM. Spravochnik [Algorithm handbook to programs in Basic language for personal computers]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 240 p.
2. Yefremov L.V. Praktika inzhenernogo analiza nadezhnosti sudovoy tekhniki [Practice of engineering analysis of ship machinery reliability]. L.: Shipbuilding Publ., 1980, 176 p.
3. Kogaev V.P. Raschety na prochnost' pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni [Strength calculations at time-varying stresses]. M.: Mechanical engineering Publ., 1977, 232 p.
4. Collins J. Povrezhdenie materialov v konstruksiyakh. Analiz, predskazanie, predotvrashchenie [Damage of materials in constructions. Analysis, prediction, prevention]. Moscow: Mir Publ., 1978, 624 p.
5. Merkulov V.A., Timofeev V.I., Yakovleva M.V. Issledovanie nagruzok na valoprovodakh ledokolov i transportnykh sudov ledovogo plavaniya [Study of loads on icebreakers and ice navigation transport ships shaftings]. Sudostroenie [Shipbuilding], 1981, № 3, pp. 35-39.
6. Rumb V.K. Prochnost' i dolgovechnost' sudovykh mashin i mekhanizmov: uchebnoe posobie [Strength and durability of ship machinery and mechanisms: tutorial]. St. Petersburg, SPbSMTU, 2014, 237 p.
7. Rumb V.K. Prochnost' sudovogo oborudovaniya. Konstruirovaniye i raschety prochnosti sudovykh valoprovodov: uchebnyk [Strength of marine equipment. Design and strength calculation of ship shafting: tutorial]. St. Petersburg, SPbSMTU, 2008, 298 p.
8. Rivlin A.Y. Ispytanie sudov vo l'dakh [Test of vessels in ice] / A. Rivlin, D.E. Hejsin. L.: Shipbuilding Publ., 1980, – 207 p.
9. Shannon R. Imitatsionnoye modelirovaniye sistem – iskusstvo i nauka [Systems simulation modeling – the art and science]. Moscow, Mir Publ., 1978, 418 p.



ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

УДК 629.1.05

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

В.Б. Викулин, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург,
e-mail: vikulin.vb@rs-class.org

А.А. Устинов, канд. техн. наук, ФАУ «Российский морской регистр судоходства», Санкт-Петербург

В статье выполнена оценка несинусоидальности напряжения судовой электростанции по правилам Российского морского регистра судоходства и береговым стандартам. Проведен сравнительный анализ и сформулированы рекомендации по обеспечению воспроизводимости результатов. В частности, отмечается дополнительная погрешность в оценке несинусоидальности напряжения по морским требованиям из-за размытия спектра. Предлагается нормировать расстояния между спектральными составляющими в соответствии с береговыми стандартами, а также синхронизировать измерительное преобразование с частотой питающего напряжения и учитывать гармонические подгруппы. Рассматриваются причины, по которым оценки несинусоидальности по морским и береговым стандартам не в полной мере учитывают помехи, генерируемые преобразователями частоты. Предлагается учитывать интергармонические центрированные подгруппы и нормировать допустимые их значения. Отмечается, что береговые стандарты не в полной мере применимы для морских объектов по диапазону учитываемых гармоник и по допустимому отклонению частоты.

Ключевые слова: несинусоидальность, быстрое преобразование Фурье, гармоники, интергармоники, суммарный коэффициент гармонических составляющих, коэффициент несинусоидальной кривой

SOME ISSUES OF VOLTAGE NONSINUSOIDALITY EVALUATION IN SHIPBOARD ELECTRICAL POWER SYSTEM

V.B. Vikulin, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg, e-mail: vikulin.vb@rs-class.org

A.A. Ustinov, PhD, FAI "Russian Maritime Register of Shipping", St. Petersburg

Voltage harmonic distortion in electrical distribution network and specifically in modern ship's network with its limited power source capacity, comparable power of the electrical consumers, abundant use of the non-linear loads such as Variable Frequency Drives (VFDs) and high density of electrical equipment arrangement can cause a significant detriment in electrical equipment performance, increases the risk of fire due to excessive heating of the cable conductors, motors and transformers caused by the increase of current and additional core loss and may lead to malfunction of the electrical and electronic equipment. This paper deals with the evaluation of the ship's power network voltage harmonic distortion in accordance with requirements of the Russian Maritime Register of Shipping Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships and that of GOST R 32144-2013 Standard. The comparative analysis is done with a view to assess the additional error in evaluation of voltage harmonic distortion caused by the spectrum blur and the impact of the conducted emissions generated by VFDs to the evaluation uncertainty. The paper further outlines the difficulties in assessment of the real time harmonic distortion and provides the recommendations to ensure the reproducibility of the results. In particular, the evaluation of interharmonic subgroups and respective accepted limits are suggested.

Keywords: nonsinusoidality, fast Fourier transform, harmonics, interharmonics, total harmonic distortion, harmonic distortion factor

Контроль отклонения кривой напряжения от синусоиды в береговых сетях общего назначения осуществляется в РФ (Евросоюзе) по ГОСТ 30804.4.7-2013 (МЭК 61000-4-7:2009) [1]. Показатели, определенные по этому стандарту, нормируются в ГОСТ 32144-2013 (EN50160:2010) [2]. На морских объектах эти показатели и их нормы определены в Правилах классификации и постройки морских судов, далее Правилах РС [3]. Наименование показателей, методики их определения, допустимые значения в береговых и морских стандартах несколько отличаются. Обобщенный показатель отклонения кривой питающего напряжения от синусоиды в ГОСТ 30804.4.7 и ГОСТ 32144 называется суммарным коэффициентом гармонических составляющих. В Правилах РС аналогичный показатель называется коэффициентом несинусоидальной кривой.

Предлагается выполнить сравнительную оценку несинусоидальности напряжения судовой электро-станции по Правилам РС и ГОСТ 32144. С мая 2016 года вступило в силу унифицированное требование МАКО E24 [4], согласно которому необходимо проводить измерение показателей несинусоидальности напряжения при освидетельствованиях судна, поэтому такая оценка видится актуальной.

Предлагается следующая методика исследования:

- моделирование несинусоидального сигнала;
- его разложение с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ);
- построение спектра;
- оценка несинусоидальности по Правилам РС и ГОСТ 32144;
- сравнение результатов с исходными данными.

Пусть дано фазное напряжение на шинах ГРЩ судовой электростанции, содержащее 1-ю, 3-ю и 5-ю гармоники:

$$u(t) = 249\sin(2\pi \cdot 1 \cdot 50t + 0^\circ) + 124\sin(2\pi \cdot 3 \cdot 50t + 60^\circ) + 62\sin(2\pi \cdot 5 \cdot 50t + 308), \text{ В}$$

Его среднеквадратичное значение, рассчитанное по формуле

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N u_i^2}{N}} = 201.6 \quad (\text{В})$$

где u_i – мгновенное значение напряжения i -ого отсчета, В;
 N – число отсчетов в выборке.

Коэффициент несинусоидальной кривой по Правилам РС, определенный по формуле (1), равен 48,9 %.

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{200} U_k^2}{U_C^2}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где U_k – действующее значение k -ой гармоники напряжения, В;
 U_C – действующее значение напряжения сети, В;
 k – номер гармоники.

Суммарный коэффициент гармонических составляющих по ГОСТ 32144 (EN 50160), определенный по формуле (2), равен 55,9 %.

$$K_U = \sqrt{\sum_{k=2}^{40} \left(\frac{U_{p,k}}{U_{p,1}} \right)^2} \quad (2)$$

где $U_{p,k}$ – среднеквадратичное значение подгруппы k -ой гармоники

$$U_{p,k} = \sqrt{U_k^2 = \sum_{h=-1}^{h=+1} U_{C,k+h}^2}, \text{ В}$$

где U_k – среднеквадратичное значение k -ой гармоники, В;
 $U_{C,k}$ – среднеквадратичное значение спектральной составляющей, непосредственно прилегающей к k -ой гармонике.

Среднеквадратичные значения гармонических подгрупп по формуле (2) в данном случае из-за отсутствия в заданном сигнале спектральных составляющих равны среднеквадратичным значениям соответствующих им гармоник: $U_{p,k} = U_k$.

Отличие в значениях коэффициента несинусоидальной кривой по Правилам РС и суммарного коэффициента гармонических составляющих по ГОСТ32144 объясняется тем, что в знаменателе в формуле (1) фигурирует действующее значение всей кривой, а в формуле (2) – среднеквадратичное значение только 1-й гармоники.

В соответствии с выбранной методикой исследования предлагается задаться частотой дискретизации f_d по теореме Котельникова. Учитывая, что частота наивысшей гармоники 250 Гц, частота дискретизации должна быть не меньше 500 Гц. Пусть $f_d = 1000$ Гц. БПФ возможно только при числе отсчетов в выборке $N = 2^n$. Пусть $n = 5$, тогда число отсчетов $N = 32$. Осциллограмма анализируемого сигнала с отмеченными на ней отсчетами представлена на рис. 1. Спектр этого сигнала – на рис. 2.

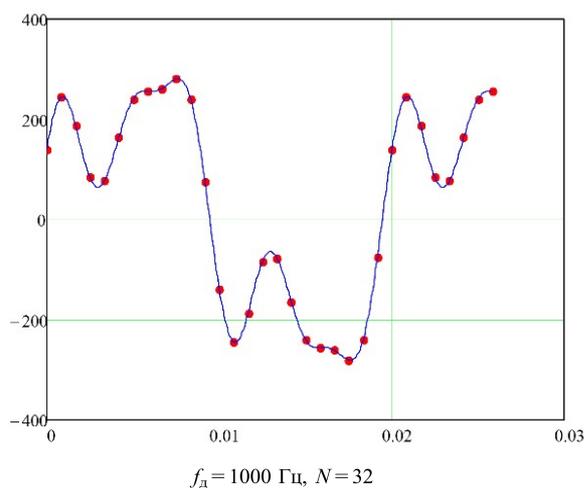


Рис. 1 Осциллограмма сигнала

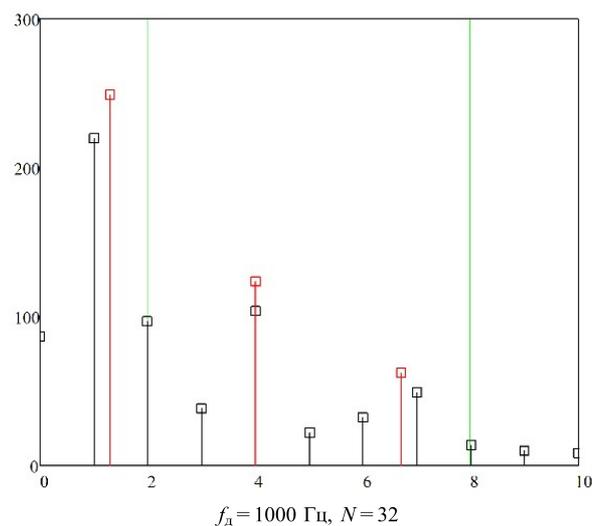


Рис. 2 Спектр сигнала

На рис. 2 отмечены красными линиями истинные значения заданных гармоник. Как видно, гармоники, полученные в результате БПФ, не совпадают с истинными значениями ни по положению на спектре, ни по амплитуде, кроме того, присутствуют дополнительные спектральные составляющие. Не трудно заметить, что спектр получился размытым. Коэффициент несинусоидальной кривой по Правилам РС теперь равен 40,4 %, суммарный коэффициент гармонических составляющих по ГОСТ 32144 равен 50,2 %. Сравним полученные в результате БПФ значения коэффициентов по формулам (1) и (2) с истинными значениями, мы видим, что значения уменьшились. Ведь амплитуды полученных гармоник меньше, чем их заданные значения, из-за размытия спектра. Относительные погрешности составили 17 % и 10 % соответственно. Коэффициент гармонических составляющих по ГОСТ 32144 оказался менее чувствителен к размытию спектра, т.к. в формуле (2) учитываются еще и ближайшие к гармоникам спектральные составляющие. Каково критическое значение коэффициента? В литературе встречается значение 15 %, выше которого изготовители не гарантируют исправную работу своего электрооборудования, например, [6].

Спектр, представленный на рис. 2, размыт из-за того, что расстояние между спектральными составляющими Δf по частоте не кратно частоте основного сигнала. Известно, что расстояние между спектральными составляющими Δf прямо пропорционально частоте дискретизации и обратно – числу отсчетов: $\Delta f = f_d / N$.

Примем $\Delta f = 25$ Гц, тогда при числе отсчетов $N = 32$, частота дискретизации будет 800 Гц. Осциллограмма исходного сигнала с отмеченными на ней отсчетами представлена на рис. 3. Спектр этого сигнала – на рис. 4.

Спектральные составляющие полностью совпали с истинными гармониками как по частоте, так и по амплитуде. Коэффициент несинусоидальной кривой по Правилам РС равен 48,9 %. Суммарный коэффициент гармонических составляющих по ГОСТ 32144 равен 55,9 %. ГОСТ 30804.4.7 устанавливает расстояние между спектральными составляющими Δf равным 5 Гц для частоты основного сигнала 50 Гц.

Таким образом, для одного и того же сигнала значения коэффициента несинусоидальной кривой при разных расстояниях Δf будут разными. Увеличение погрешности при этом будет занижать значения коэффициента. Воиспроизводимость результатов при этом не обеспечивается.

Следует обратить внимание на то, что одновременно с требованием обеспечения кратности расстояния Δf , необходимо обеспечить условие числа отсчетов $N = 2^n$ для выполнения БПФ, а также выбора частоты

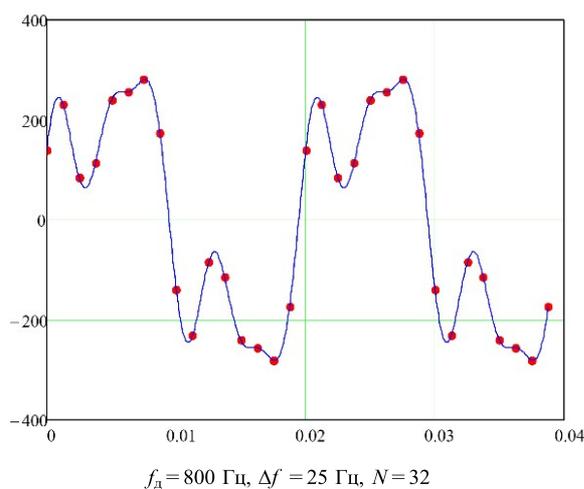


Рис. 3 Оциллограмма сигнала

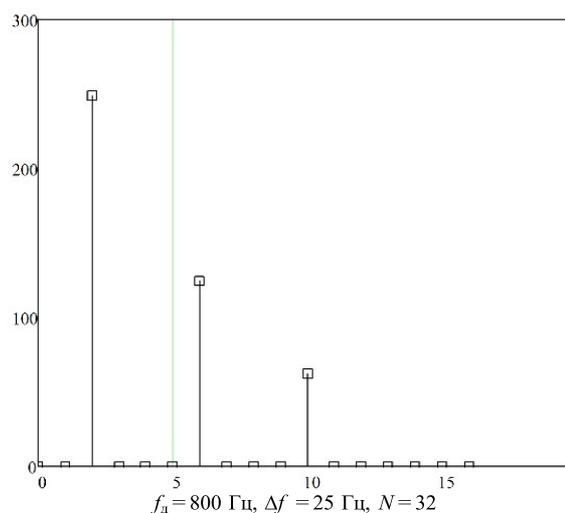


Рис. 4 Спектр сигнала

дискретизации в 2 раза больше частоты наивысшей гармоники. Далеко не каждый цифровой осциллограф может выполнить все три условия одновременно, особенно по глубине записи и требуемой частоте дискретизации для заданного коэффициента развертки. Авторы, столкнувшись с этой проблемой, применяли средства интерполяции, в частности, по методу Филона. ГОСТ 30804.4.7 средства интерполяции не предусматривает.

Отличительной особенностью судовой электроэнергетической системы является наличие потребителей соизмеримой мощности с судовыми генераторами. Пуск и останов таких потребителей создает резкопеременную нагрузку на генераторы, что влечет за собой отклонение частоты питающего напряжения от номинальной. Предлагается смоделировать сигнал с теми же гармониками, но с кратковременным провалом частоты всего на 1 Гц на период. БПФ выполняется при проверенных условиях $f_d = 800$ Гц, $\Delta f = 25$ Гц, $N = 32$. Оциллограмма анализируемого сигнала с отмеченными на ней отсчетами представлена на рис. 5. Спектр этого сигнала – на рис. 6.

На рис. 5 для сравнения представлена оциллограмма этого же сигнала, но без провала частоты (отмечена пунктирной линией). Спектр получил дополнительные спектральные составляющие так, как будто появился новый источник гармонических искажений в питающую сеть. Амплитуды всех спектральных составляющих более 2 % от амплитуды первой гармоники, амплитуды некоторых составляющих превышают 8 % и даже 12 %. Одновременно амплитуды основных гармоник стали меньше истинных значений. Коэффициент

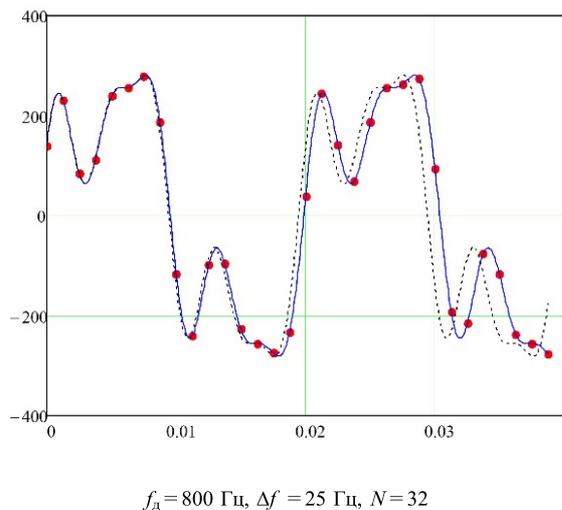


Рис. 5 Оциллограмма сигнала при провале частоты

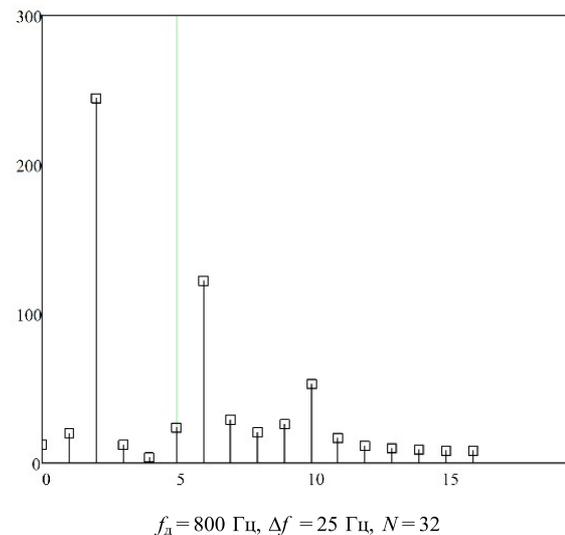


Рис. 6 Спектр сигнала при провале частоты

несинусоидальной кривой по Правилам РС равен 47 %, что на 4 % меньше, чем до провала частоты. Суммарный коэффициент гармонических составляющих по ГОСТ 32144 равен 57,9 %, что на 4 % больше, чем до провала частоты. Уменьшение значения коэффициента несинусоидальной кривой произошло из-за уменьшения амплитуд основных гармоник. Суммарный коэффициент гармонических составляющих увеличился по двум причинам. Во-первых, в знаменателе формулы (2) учитывается не среднеквадратичное значение всего напряжения, а только его первая гармоника, которая тоже претерпела уменьшение. Во-вторых, в этой формуле присутствуют не сами гармоники, а их гармонические подгруппы, которые учитывают не только гармоники, но и близлежащие спектральные составляющие. В рассмотренном примере размытие спектра произошло из-за нестационарности анализируемого сигнала. ГОСТ 30804.4.7 требует синхронизировать процесс БПФ с частотой питающего напряжения с погрешностью не более $\pm 0,03$ % при отклонении частоты до ± 5 %. При потере синхронизации данные должны маркироваться и в расчете показателя не должны участвовать. Следует учитывать, что Правила РС допускают кратковременное отклонение частоты до ± 10 %.

Отклонение частоты сигнала не единственная причина появления дополнительных спектральных составляющих. Значительные по амплитуде спектральные составляющие генерируют в сеть преобразователи частоты. Это особенно актуально в единых судовых электростанциях, где вспомогательные потребители получают питание от шин гребной электрической установки с мощными преобразователями частоты. Они генерируют в сеть помехи с частотами, не кратными частоте основного сигнала. Например, преобразователь частоты со звеном постоянного тока создает помехи с частотами, кратными частоте его широтноимпульсного модулятора. Такие составляющие в спектре получили название интергармоник. Предлагается смоделировать сигнал с теми же гармониками, добавив к ним интергармонику на частоте 187,5 Гц (между 3-й и 5-й гармониками) и с амплитудой 62 В (как у пятой гармоники). БПФ выполняется при проверенных условиях $f_d = 800$ Гц, $\Delta f = 25$ Гц, $N = 32$. Осциллограмма анализируемого сигнала с отмеченными на ней отсчетами представлена на рис. 7. Спектр этого сигнала – на рис. 8.

Из рис. 7 видно, что исследуемый сигнал стал непериодическим. Коэффициент несинусоидальной кривой по Правилам РС равен 49,7 %, что только на 2 % больше, чем без интергармоники. Суммарный коэффициент гармонических составляющих по ГОСТ 32144 равен 61,1 %, что на 9 % больше, чем без интергармоники. На спектре интергармоника видна, но размыта, т.к. ее частота не кратна расстоянию между спектральными составляющими Δf . За счет размытия спектральная составляющая в окрестностях интергармоники попала в гармоническую подгруппу пятой гармоники. По этой причине суммарный коэффициент гармонических составляющих сумел частично учесть интергармонику. Однако, при меньшем Δf вероятность этого резко падает. ГОСТ 30804.4.7 предусматривает объединение спектральных составляющих в интергармонические центрированные подгруппы по аналогии с гармоническими подгруппами, но ГОСТ 32144 их допустимые значения не нормирует.

Следует отметить, что исследование непериодического сигнала всего на двух периодах совершенно недостаточно. ГОСТ 32144 предусматривает БПФ в интервалах времени 10 периодов без промежутков между

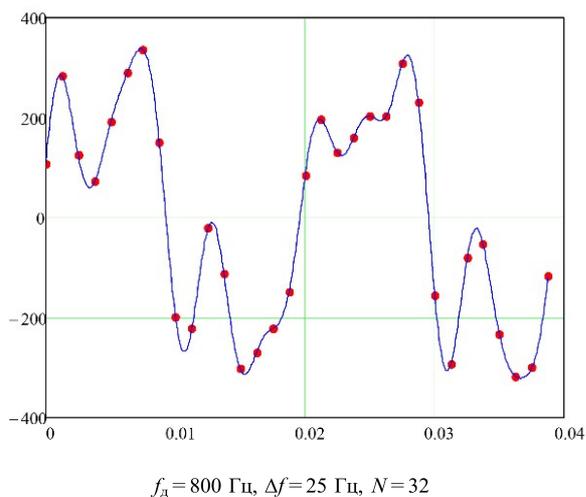


Рис. 7 Осциллограмма сигнала с интергармоникой

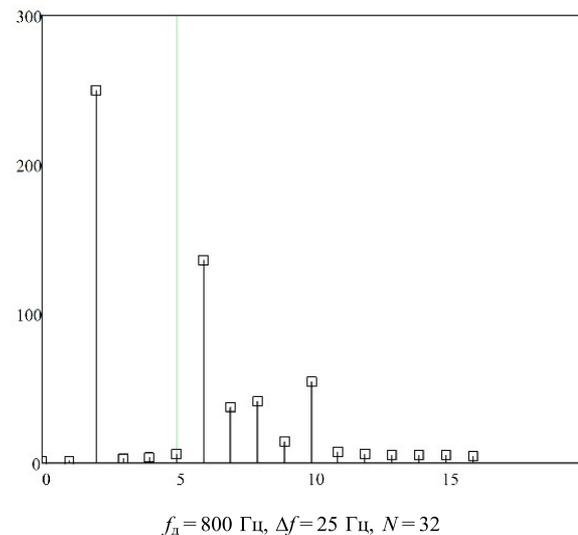
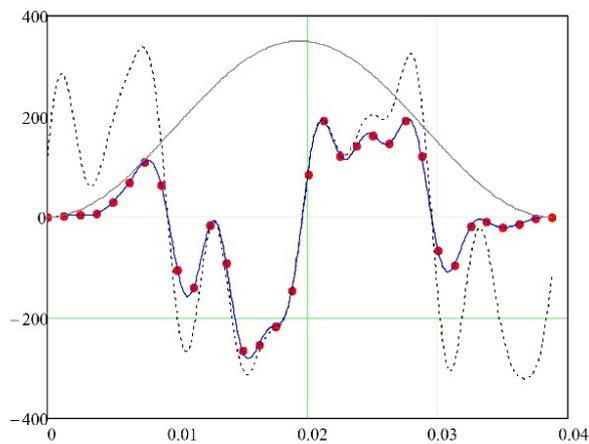


Рис. 8 Спектр сигнала с интергармоникой

интервалами с последующим усреднением в интервале времени 10 мин. Усреднение результатов актуально из-за возможных переходных процессов и резонансных явлений в электросети.

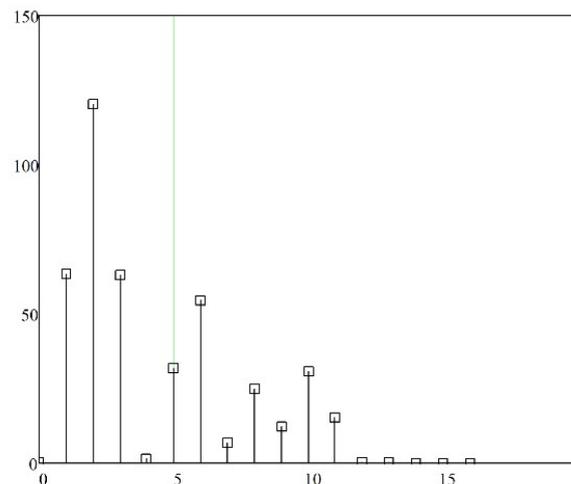
В радиотехнике для исследования нестационарных сигналов широко используют различные окна разложения. До сих пор было использовано прямоугольное окно. Для исследования мелких деталей спектра радиоспециалисты применяют другие окна. Предлагается выполнить БПФ сигнала, содержащего интергармонику (предыдущий случай), в окне Ханна (Хеннинга) при тех же условиях $f_d = 800$ Гц, $\Delta f = 25$ Гц, $N = 32$. Осциллограмма анализируемого сигнала с отмеченными на ней отсчетами представлена на рис. 9. Спектр этого сигнала – на рис. 10.

Для сравнения на рис. 9 представлен сигнал в прямоугольном окне (пунктирная линия), а также оконная функция Ханна. Как видно из рис. 10, оконная функция значительно исказила спектр, уменьшив амплитуды основных гармоник. Очевидно, что для оценки несинусоидальности допустимо применять только прямоугольное окно разложения, что отмечено в ГОСТ 30804.4.7.



$$f_d = 800 \text{ Гц}, \Delta f = 25 \text{ Гц}, N = 32$$

Рис. 9. Осциллограмма сигнала в окне Ханна



$$f_d = 800 \text{ Гц}, \Delta f = 25 \text{ Гц}, N = 32$$

Рис. 10. Спектр сигнала в окне Ханна

ВЫВОДЫ

1. Для обеспечения воспроизводимости результатов определения коэффициента несинусоидальной кривой видится целесообразным нормировать расстояние между спектральными составляющими.
2. При расчете коэффициента несинусоидальной кривой желательно использовать не действующее значение кривой, а действующее значение первой гармоники.
3. Для уменьшения погрешности из-за нестационарности анализируемой кривой предпочтительней оперировать не гармониками, а гармоническими подгруппами.
4. Для уменьшения погрешности из-за отклонения частоты основного сигнала желательно синхронизировать процесс БПФ с этой частотой.
5. Необходимо оговорить допустимость применения только прямоугольного окна разложения.
6. Вышеперечисленным рекомендациям удовлетворяют требования ГОСТ 30804.4.7 (МЭК 61000-4-7:2009) и ГОСТ 32144-2013 (EN 50160:2010). В случае учета требований этих стандартов в Правилах РС, целесообразно заменить термин «коэффициент несинусоидальной кривой» на «суммарный коэффициент гармонических составляющих».
7. Вышеперечисленные береговые стандарты не в полной мере удовлетворяют требованиям Правил РС. В первую очередь по диапазону учитываемых гармоник (40 и 200 гармоник соответственно). Во вторую очередь по допустимому отклонению частоты $\pm 5\%$ и $\pm 10\%$ соответственно).
8. Учитывая, что интергармоники от преобразователей частоты при определении и коэффициента несинусоидальной кривой и суммарного коэффициента гармонических составляющих по большей части игнорируются, желательно нормировать допустимые значения интергармонических центрированных подгрупп.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009) Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Москва, Стандартинформ, 2013.
2. ГОСТ 32144-2013 (EN 50160:2010, NEQ) Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва, Стандартинформ, 2014.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XI. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2016.
4. IACS UR E24 Harmonic distortion for ship electrical distribution system including harmonic filters.
5. Guidance notes on control of harmonics in electrical power systems. American bureau of shipping. – 2006.
6. M. Steurer, P. Ribeiro, Y. Liu. Re-evaluating electric power system harmonic distortion limits for shipboard systems. Center for advanced power systems. – 2004.

REFERENCES

1. GOST 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009) Sovmestimost tehniceskikh sredstv elektromagnitnaya. Obschee rukovodstvo po sredstvam izmereniy i izmereniyam garmonik i intergarmonik dlya sistem elektrosnabzheniya i podklyuchaemyih k nim tehniceskikh sredstv [State Standard 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009) Electromagnetic compatibility of technical equipment. General guide on harmonics and interharmonics measuring instruments and measurement, for power supply systems and equipment connected thereto]. Moscow, Standartinform Publ., 2013.
2. GOST 32144-2013 (EN 50160:2010, NEQ) Normyi kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obschego naznacheniya [State Standard 32144-2013 (EN 50160:2010, NEQ) Power quality limits in the public power supply systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014.
3. Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships. Part XI. St. Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2016. (In Russian)
4. IACS UR E24 Harmonic distortion for ship electrical distribution system including harmonic filters.
5. Guidance notes on control of harmonics in electrical power systems. American bureau of shipping, 2006.
6. M. Steurer, P. Ribeiro, Y. Liu. Re-evaluating electric power system harmonic distortion limits for shipboard systems. Center for advanced power systems. 2004.

УДК 621.31:614.84

ПРОФИЛАКТИКА ЗАГОРАНИЙ КОРАБЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

В.А. Пехотиков, канд. техн. наук, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, тел.: +7 (495) 524-98-54, e-mail: napoz46@mail.ru

А.И. Рябиков, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, тел.: +7 (495) 521-99-73, e-mail: fire_test_cable@mail.ru

А.А. Назаров, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, тел.: +7 (495) 521-27-61, fax: +7 (495) 521-99-73, e-mail: izol_material@mail.ru

О.И. Грузинова, ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, тел.: +7 (495) 524-81-33, e-mail: oi_gruzinova@mail.ru

В статье представлена информация о пожарах и загораниях на судах от электрооборудования. Показано, что только за один год в России уничтожено 7 морских и речных судов, 64 судна повреждено, ущерб от этих пожаров составил 1,39 млрд. рублей. Наиболее часто пожары на судах возникают в жилых и служебных помещениях, а также машинных отделениях. Констатируется, что более половины всех пожаров и загораний связаны с электрическими причинами в сетях постоянного тока. Одной из основных причин является плохой электрический контакт в местах соединения проводов и повреждения изоляции. Описан новый опыт работы по профилактике пожаров от электрооборудования с помощью бесконтактных методов обследования. Основными преимуществами тепловизионного обследования являются: объективность и точность получаемых данных, безопасность, не требуются отключение электрооборудования и подготовка рабочего места. Для таких изделий, как розетки, выключатели и др. не требуется открывать их корпуса. Изложены принципы бесконтактного, неразрушающего контроля пожарной опасности электроустановок, представлены основные положения методики проведения тепловизионных исследований электроустановок. Приведены формулы для определения «избыточной температуры» в зависимости от соотношения возможных номинальных и рабочих токов. Классифицированы критерии пожароопасных дефектов, даны рекомендации по практическому применению методики на флоте. Отмечено, что современный тепловизор высокой точности, при относительно доступной цене, представляет собой носимый компактный прибор, не требующий охлаждения низкотемпературными жидкостями и высокой профессиональной подготовки.

Ключевые слова: пожары на кораблях, электрооборудование, аварийные дефекты, метод неразрушающего контроля

FIRE PREVENTION IN SHIP ELECTRICAL EQUIPMENT ON THE BASIS OF MODERN THERMAL IMAGING METHODS

V.A. Pekhotikov, PhD, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, tel.: +7 (495) 524-98-54, e-mail: napoz46@mail.ru

A.I. Ryabikov, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, tel.: +7 (495) 521-99-73, e-mail: fire_test_cable@mail.ru

A.A. Nazarov, FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, tel.: +7 (495) 521-27-61, fax: +7 (495) 521-99-73, e-mail: izol_material@mail.ru

O.I. Gruzinova, FGBU EMERCOM Russia, Balashikha, tel.: +7 (495) 524-81-33, e-mail: oi_gruzinova@mail.ru

The article presents information on fires onboard ships caused by faults in the electrical equipment. Statistically, in one year only, fires destroyed 7 sea and river vessels, 64 more were damaged, the total damages amounting to 1,39 billion rubles. Most often fires on ships occur in accommodation quarters, service and machinery spaces. It is stated that more than half of all the fires is associated with electrical resistance in DC networks. One of the main causes is faulty electrical contact at the joints and wire insulation damage. A new methodology of prevention of fires caused by electrical equipment using non-contact methods of inspection is described. The main advantages of thermal imaging surveys are: the objectivity and accuracy of the data, as well as security. The method does not involve a shutdown of electrical equipment and preparation of workplace. For devices such as sockets, switches, etc. no opening of the case is required. The principles of contactless, non-destructive testing of fire hazard in electrical installations, as well as the main provisions of the methodology of their thermal imaging surveys are provided. The formulas for determining the "excess temperature" depending on the ratio of possible nominal and operating currents are given. The article further classifies the criteria for fire hazard defects, providing recommendations on the practical application of the method onboard the ships. It is noted that the modern high accuracy thermal imager is an affordably priced compact device, which does not require cooling of low-temperature fluids and high-level training of the end user.

Keywords: fires on ships, electrical equipment, emergency defects, non-destructive testing methods

Пожары являются одной из самых опасных разновидностей аварий на судах любого назначения. Установлено, что пожары и взрывы становятся основными причинами катастроф с участием судов.

При обсуждении этой проблемы на «круглом столе», который прошел в Санкт-Петербурге 29 мая 2013 года, прозвучал доклад, по данным которого за 2011 год пожарами повреждено 80 морских и речных судов, уничтожено 4 морских и речных судна. Возникло 23396 пожаров, прямой материальный ущерб от которых составил 379 млн. рублей. Согласно статистике 2012 года, в России уничтожено 7 морских и речных судов, 64 судна повреждено, ущерб от этих пожаров составил 1,39 млрд. рублей (информационно-аналитический журнал «Морские порты» №4 (2013), URL: <http://www.morvesti.ru/tems/detail.php?ID=23822>)

Практика показывает, что развитие пожаров на судах происходит с большой скоростью. Площадь пожара растет скачкообразно и зависит от конструктивных особенностей судна. К ним можно отнести большое количество пустот, в которых проложены коммуникации, наличие вентиляционных шахт и каналов и т.п.

Учет аварий на судах мирового флота наиболее полно ведут две международные организации: Регистр судоходства Ллойда и Ливерпульская ассоциация страховщиков.

По данным этих организаций актуальной остается проблема пожарной опасности пассажирских судов. Как показывает статистика, основными районами возникновения и борьбы с пожарами на современных пассажирских судах являются жилые и служебные помещения, а также машинные отделения.

В мировой практике пожары подразделяются на 4 класса (в зависимости от вида горящего вещества) – **A, B, C, D** – и для каждого из них применяются свои предпочтительные методы тушения. Отдельный класс **E** – это пожары, вызванные неисправностями электрооборудования (короткое замыкание, дуга, перегрузки) и нарушениями правил технической эксплуатации электроустановок (сайт «Морская библиотека», Пожары и их классификация, URL: <http://sea-library.ru/borba-s-pozharom/229-pozhary-i-ix-klassifikaciya.html>).

Современные суда оснащены протяженными электрическими сетями, а также многочисленным электротехническим и радиоэлектронным оборудованием. Вследствие этого имеется достаточно большое количество потенциальных источников загорания или взрыва.

Пожары от электросетей занимают первое место в статистике пожаров на воде, из них 55 % по причине короткого замыкания в сети постоянного тока. Одной из основных причин является также плохой электрический контакт в местах соединения проводов и повреждения изоляции (URL: http://gidro.tech-group.pro/pozhar_na_bortu). Здесь следует отметить, что доля пожаров в народном хозяйстве от электроустановок по стране в целом от всех пожаров ежегодно составляет около 30 %. При этом до 80 % приходится на жилые и общественные здания.

В этой связи особое место занимают вопросы, связанные с профилактикой пожарной опасности судового электрооборудования, в первую очередь кабельных линий и электропроводок, аппаратов электрической защиты, силовых и распределительных шкафов, светотехнических и электронагревательных изделий, радиоэлектронной аппаратуры и, в составе перечисленного оборудования, различного рода контактных соединений.

Как показала практика, традиционные методы профилактики электроустановок – плановые осмотры, протяжка контактов, измерение величины сопротивления изоляции и др. – не в полной мере обеспечивают требуемый уровень их пожаробезопасности.

Учитывая актуальность проблемы, в 2014 году специалистами ФГБУ ВНИИПО МЧС России были разработаны Методические рекомендации «Проверка пожарной опасности электрооборудования жилых и общественных зданий с помощью тепловизора», которые были утверждены МЧС России и рекомендованы к применению. Практическая апробация метода проводилась в течение нескольких лет на нескольких сотнях социальных объектах Раменского района Московской области и показала его высокую эффективность. По нашему мнению, данный метод может быть с успехом адаптирован и применительно к судовому электрооборудованию.



Этот метод бесконтактного, неразрушающего контроля основан на том, что обследование проводится под рабочей нагрузкой и не требует отключения оборудования, которое ведет к серьезным финансовым потерям [1].

Суть тепловизионной диагностики заключается в бесконтактной регистрации температурного поля на поверхности объекта измерительной аппаратурой, построении и анализе термограмм для обнаружения и классификации дефектов и принятия решения. Наличие дефекта при такой диагностике характеризуется аномальным повышением температуры в дефектной зоне по сравнению с качественными областями.

За основу при научном обосновании критериев пожарной опасности эксплуатируемого электрооборудования жилых и общественных зданий при тепловизионной диагностике приняты требования нормативных документов.

Предложено ввести два уровня при определении пожарной опасности элементов электрооборудования.

Первый уровень – соответствует аварийному режиму работы электрооборудования. Температура контактного соединения или токоведущей жилы электропроводки превышает предельно допустимое значение температуры или превышения температуры, регламентированное нормативными документами на конкретные виды изделий.

Второй уровень – соответствует пожароопасному режиму работы. Температура контактного соединения или токоведущей жилы электропроводки превышает температуру термической деструкции полимера изоляции токоведущей жилы или подводящих проводов. Дефект требует немедленного устранения.

По полученным экспериментальным данным сформулированы критерии оценки пожарной опасности для каждого электротехнического изделия.

При этом с помощью тепловизионного обследования выявляются не только застарелые и предаварийные дефекты, но и дефекты, только зарождающиеся или находящиеся на самых ранних стадиях развития, а также дефекты, которые невозможно определить никаким иным методом.

Таблица 1

Соответствие предельно допустимого значения температуры или превышения температуры на элементах электротехнических изделий и показаний тепловизора, измеренных на поверхности соответствующих электротехнических изделий

№ п/п	Вид электротехнического изделия	Режим			
		Аварийный		Пожароопасный	
		Требования по НД	Показания тепловизора на поверхности	Требования по НД	Показания тепловизора на поверхности
1.	Электропроводка, проложенная в пластмассовых электромонтажных коробах:				
	– с ПВХ изоляцией;	$T > 75 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T > 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T > 145 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T > 110 \text{ }^{\circ}\text{C}$
	– с резиновой изоляцией;			$T > 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T > 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$
– с полиэтиленовой изоляцией	$T > 110 \text{ }^{\circ}\text{C}$			$T > 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
2.	Электрические выключатели	$\Delta T > 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T > 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T > 145 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T > 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
3.	Электрические розетки	$\Delta T > 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T > 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T > 145 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T > 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$
4.	Открытые электрические контакты	$\Delta T > 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta T > 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T > 145 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T > 145 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Рис. 1 Проведение тепловизионного контроля электрошкафа



Рис. 2 Разогрев болтового контактного соединения на шине заземления в щите ввода квалифицируется как пожароопасный дефект. Требуется немедленного устранения

Следует сказать, что за время проведения апробации методики в детских садах и школах Раменского района было выявлено и устранено 53 пожароопасных дефекта.

Неоспоримыми преимуществами тепловизионного обследования являются: объективность и точность получаемых данных, безопасность (применяется бесконтактный метод), при его применении не требуются отключение электрооборудования и подготовка рабочего места. При этом метод высокопроизводителен, и к тому же он дает возможность практически мгновенно, «с первого взгляда», указать место дефекта, предварительно определить степень дефектности. Кроме этого метод отличается простотой документирования и возможностью определения дефектов на ранней стадии развития.

В результате было установлено, что тепловизор является эффективным средством оценки пожарной опасности электрооборудования. Он позволяет с достаточной степенью точности диагностировать состояние не только открытых элементов электрооборудования, таких как контактные соединения в электрических щитках и вводных щитах, но и состояние розеток и выключателей, которые закрыты корпусами и электрических проводок, выполненных различными способами, что является большим шагом вперед в вопросе обеспечения пожарной безопасности электрооборудования.

Предложенный метод тепловизионной диагностики является экспрессметодом оценки пожарной безопасности эксплуатируемого электрооборудования. Для более полной классификации состояния контактных соединений и определения степени их дефектности в зависимости от протекающего тока можно воспользоваться расчетным методом, представленным в Руководящем документе [2].

В соответствии с данным методом:

если $I_{\text{раб}} \geq 0,6I_{\text{ном}}$, то необходим пересчет по формуле:

$$T_{\text{ном}} = T_{\text{раб}} \cdot (I_{\text{ном}} / I_{\text{раб}})^2 \quad (1)$$

где $T_{\text{ном}}$ – пересчитанное значение температуры контактного соединения, °С;

$T_{\text{раб}}$ – измеренная температура контактного соединения, °С;

$I_{\text{ном}}$ – номинальное значение тока контактного соединения, А;

$I_{\text{раб}}$ – рабочее значение тока нагрузки, А.

Если $I_{\text{раб}} < 0,6I_{\text{ном}}$, то оценку состояния контактного соединения следует проводить по избыточной температуре. В качестве норматива при этом используется значение температуры $\Delta T_{0,5}$, пересчитанное к $0,5 I_{\text{ном}}$. Значение избыточной температуры определяется по формуле:

$$\Delta T_{0,5} = \Delta T_{\text{раб}} (0,5I_{\text{ном}} / I_{\text{раб}})^2 \quad (2)$$

где $\Delta T_{0,5}$ – избыточная температура контролируемого контактного соединения;

$\Delta T_{\text{раб}}$ – измеренное превышение температуры контролируемого контактного соединения.

Пересчитанное значение температуры $T_{\text{ном}}$ и значение избыточной температуры $\Delta T_{0,5}$ сравниваются с пороговыми.

В заключение следует сказать, что современный высокоточный тепловизор, при относительно доступной цене, представляет собой носимый компактный прибор, умещающийся в небольшом чемодане, не требующий охлаждения низкотемпературными жидкостями и высокой профессиональной подготовки. Важно сказать, что нормы тепловизионного контроля электрооборудования являются не только одними из наиболее эффективных на сегодняшний день, но еще и наименее затратными по времени и средствам.

Важным преимуществом применения тепловизионной методики на флоте является, на наш взгляд, возможность оперативной проверки состояния электрооборудования в процессе эксплуатации судна силами электрика или иного персонала корабля, прошедшего соответствующую подготовку. Кроме этого, тепловизор может быть полезен для измерения перегревов и в других агрегатах судна, например, перегревов подшипников и оболочек электродвигателей и т.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назаров А.А., Пехотиков В.А., Рябиков А.И., Грузинова О.И. Теоретические и практические аспекты оценки пожарной опасности электрических контактных соединений.
2. РД 153-34.0-20.363-99 Методика инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ.

REFERENCES

1. Nazarov A. A., Pekhotikov V. A., Ryabikov A. I., Gruzinova O. I. Teoreticheskie i prakticheskie aspekty otsenki pozharной opasnosti elektricheskikh kontaknykh soedineniy [Theoretical and practical aspects of the evaluation of fire risk of electrical contact connections].
2. RD 153-34.0-20.363-99 Metodika infrakrasnoy diagnostiki elektrooborudovaniya i VL [RD 153-34.0-20.363-99 Method for Infrared Inspection of Electrical Equipment and Overhead Lines].

УДК 621.311

БЕЗОПАСНОСТЬ ПЛАВАНИЯ СУДОВ С ЭЛЕКТРОДВИЖЕНИЕМ

Л.Н. Токарев, д-р техн. наук, профессор, СПбГЭТУ(ЛЭТИ), Санкт-Петербург, e-mail: tokset@yandex.ru
Д.А. Макаров, канд. техн. наук, ЗАО «ЧЭАЗ», Чебоксары, e-mail: mak-da@yandex.ru

В настоящее время в России идет проектирование и постройка судов с системами электродвижения. Однако обеспечению защиты входящих в их состав преобразователей частоты от коротких замыканий часто не уделяется должного внимания. В связи с этим, рассмотрение вопросов надежности и живучести систем электродвижения судов при аварии входящих в состав преобразователей частоты является актуальной задачей. В статье рассматриваются варианты построения систем электродвижения и входящих в их состав преобразователей частоты, анализируются факторы, влияющие на их надежность и живучесть, описаны случаи выхода из строя преобразователя частоты при коротком замыкании и при аварии силовых вентилей неуправляемого выпрямителя, даны рекомендации по повышению надежности и живучести систем электродвижения судов.

Ключевые слова: система электродвижения, судовое электрооборудование, преобразователь частоты, гребной электродвигатель

NAVIGATION SAFETY OF SHIPS WITH ELECTRIC PROPULSION

L.N. Tokarev, DSc, professor, St. Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, e-mail: tokset@yandex.ru
D.A. Makarov, PhD, JSC "ChEAZ", Cheboksary, e-mail: mak-da@yandex.ru

Nowadays, ships with electric propulsion are designed and constructed in Russia. However, the protection of ship frequency converters from short circuits is often not given due attention, making reliability and hardiness of ships with electric propulsion in case of frequency converters accidents an important task. The article considers variants of the construction of ship electric propulsion systems with frequency converters, analyzing factors influencing their reliability and hardiness and describing the frequency converter failure in case of a short circuit and in the event of a power valves accident of an uncontrolled rectifier, as well as giving recommendations on increasing the reliability and survivability of the electric propulsion systems.

Keywords: electric propulsion, ship electrical equipment, frequency converters, main propulsion motor

К настоящему времени российские судостроительные предприятия спроектировали и построили несколько судов с системами электродвижения, укомплектованных, большей частью, электрооборудованием иностранного производства. Электроэнергетические системы этих судов имеют напряжение до 960 В (действующее значение). На строящемся, самом мощном в мире, ледоколе типа ЛК-60 предусмотрено электрооборудование напряжением до 10 кВ.

В области безопасности плавания судов следует обратить внимание на две пока нерешенные и чрезвычайно серьезные проблемные задачи, требующие быстрого и исчерпывающего решения.

Одна из них относится к защите судна от коротких замыканий (КЗ) в звене постоянного тока силовых преобразователей частоты, управляющих частотой вращения гребных электродвигателей. Вторая – к отсутствию серийного отечественного производства основного электрооборудования систем электродвижения.

Рассмотрим задачу обеспечения защиты судна от короткого замыкания. Особая острота проблемы заключается в том, что уже построенные суда фактически плавают без защиты преобразователей, а, следовательно, и судна в целом.

На судах без электродвижения при коротком замыкании в каком-либо фидере электроэнергетической системы устройство защиты отключает этот фидер от главного распределительного щита. В результате часть потребителей лишается электропитания, но судно в целом продолжает функционировать. Даже при коротком замыкании в цепи статора одного из генераторов судовой электростанции система защиты отключает соответствующий секционный автомат, оставляя в работе неповрежденные генераторы. При этом особо важные потребители, например, рулевое устройство, насосы, обслуживающие работу главного двигателя, питание ходовых огней и др. автоматически переключаются на питание от оставшихся, неповрежденных генераторов. Судно продолжает движение и может, в частности, осуществить торможение за счет реверса.

На судах с электродвижением при коротком замыкании в цепях преобразователя частоты, обеспечивающего питание гребного электродвигателя, одновинтовое судно лишается возможности тормозиться за счет реверса винтов. В результате вся кинетическая энергия движущейся по инерции массы корпуса судна водоизмещением в тысячи тонн может неуправляемо преобразоваться в энергию катастрофических разрушений при столкновении с препятствием. В узкостях препятствием может быть, например, пассажирское судно. Лишенное тормозов, неуправляемое аварийное судно может столкнуться с любым другим судном или даже с портовым сооружением в условиях гавани.

И случай аварии такого рода уже имел место. На одном из судов с системой электродвижения, спроектированной российским предприятием, во время ходовых испытаний по неясным причинам выгорел конденсатор в звене постоянного тока преобразователя частоты. Один из двух гребных электродвигателей лишился электропитания, один из винтов судна перестал вращаться. Через некоторое время примерно то же самое произошло с преобразователем частоты системы электродвижения на другом борту того же судна. Судно лишилось возможности тормозиться и неуправляемо шло по инерции. Если бы на его курсе оказалось другое судно, произошла бы катастрофа.

В данном случае во избежание возможных аварийных ситуаций ходовые испытания проводились вдали от оживленных трасс. В порт судно привели буксиры.

На рис. 1 приведена схема системы электродвижения, изготовленной и установленной на нескольких судах, спроектированных разными ЦКБ. В составе преобразователей частоты системы предусмотрены неуправляемые выпрямители (V) в звене постоянного тока и инвертор (АИН) преобразователя частоты.

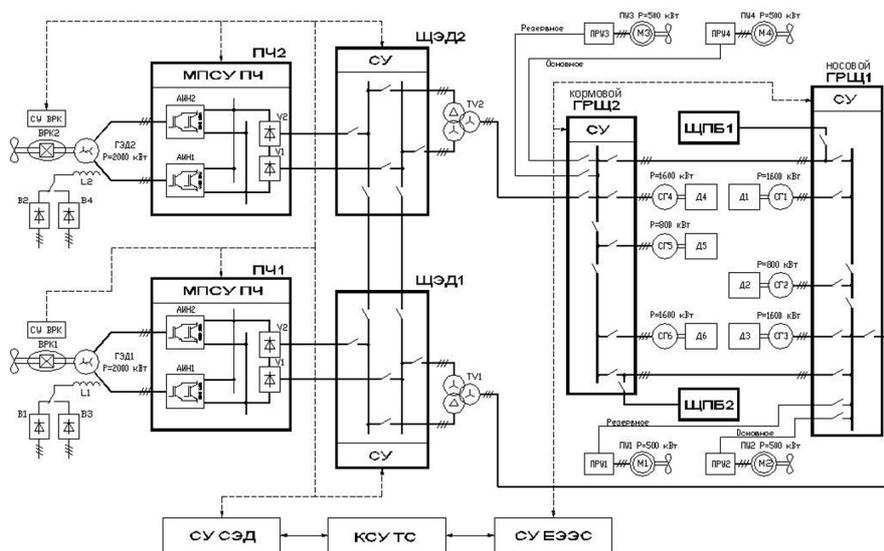


Рис. 1 Электроэнергетическая система судна с электродвижением:

- ГЭД – гребной электродвигатель; ВРК – винто-рулевая колонка; АИН – одноуровневый автономный инвертор; V – выпрямитель;
- ПЧ – преобразователь частоты; ЩЭД – щит электродвижения; МПСУ – микропроцессорная система управления; СУ – система управления; TV – трансформатор напряжения; ГРЩ – главный распределительный щит; ЩЦБ – щит питания с берега;
- СГ – синхронный генератор; Д – дизель; ПУ – подруливающее устройство; ПРУ – пускорегулирующее устройство; М – двигатель;
- СЭД – система электродвижения; КСУ ТС – комплексная система управления техническими средствами;
- ЕЭЭС – единая электроэнергетическая система

Неуправляемые выпрямители (V), показанные на рис. 1 в составе преобразователя частоты, не могут, в принципе, иметь защиту от короткого замыкания. В соответствии с техническими условиями на поставку силовые вентили звена постоянного тока преобразователей способны выдерживать перегрузку величиной не более 1,5 – 2 номинальных значений тока. Следовательно, при глухом коротком замыкании в звене постоянного тока одноуровневых преобразователей силовые вентили неуправляемых выпрямителей неизбежно выйдут из строя.

Теоретически перегрузка токами более, чем 1,5 – 2 номинальных значений допустима, но только в течение нескольких микросекунд. Защитных устройств, способных отключить силовые цепи за указанное время, не существует. Не существует и устройств, способных распознать возникновение тока короткого замыкания за время в несколько микросекунд и дать соответствующие сигналы на устройства, отключающие цепь КЗ. Даже при защите предохранителями их вольт-секундные характеристики располагаются по осям «время – ток» выше, чем у силовых вентилях большой мощности.

Но даже при наличии устройств защиты вентилях отключение преобразователя частоты от электростанции судна привело бы к тому, что одновинтовое судно лишилось бы возможности тормозиться.

Кроме сказанного выше, необходимо учитывать и то, что в примененных на нескольких судах одноуровневых преобразователях частоты в звене постоянного тока использованы конденсаторы очень большой емкости (в одну или две миллифарады). При коротком замыкании на выходе выпрямителя звена постоянного тока преобразователя указанные конденсаторы будут также замкнуты. Величина токов разряда и время процесса нарастания токов при КЗ будут таковы, что в точке короткого замыкания может произойти пожар или взрыв, вызванный очень быстрым выделением на активных сопротивлениях цепи короткого замыкания энергии, запасенной в конденсаторах.

Выход из строя преобразователя частоты может произойти не только при коротком замыкании, но и при аварии даже одного силового вентиля неуправляемого выпрямителя.

Решение проблемы защиты судов с электродвижением от коротких замыканий в преобразователях частоты возможно за счет применения многоуровневых (каскадных) преобразователей частоты. Такие преобразователи резко повышают надежность и живучесть системы и широко используются на Западе и в Японии. Отечественные каскадные преобразователи выпускаются серийно и в России. Например, Чебоксарский электроаппаратный завод серийно выпускает преобразователи мощностью до 10 МВт при напряжении 3, 6 и 10 кВ. Структурная схема каскадного преобразователя приведена на рис. 2.

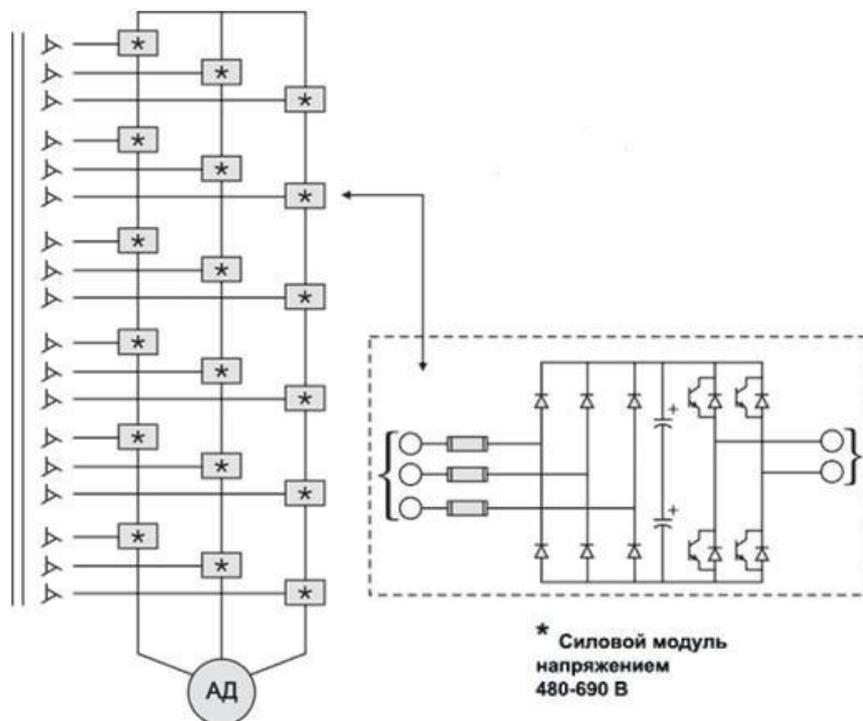


Рис. 2 Структурная схема каскадного преобразователя частоты:
АД – асинхронный двигатель.

Как известно, в каскадных преобразователях в каждой фазе трехфазной системы последовательно включены несколько однофазных выпрямителей и инверторов. В таком случае шестиуровневый преобразователь, например, состоит из 18 однофазных преобразователей с фильтрующими конденсаторами относительно небольшой емкости. При коротком замыкании одного из таких однофазных преобразователей короткозамкнутые цепи отключаются предохранителями. Разорванная цепь шунтируется контакторами или автоматами. Таким образом, при аварии любого из звеньев оно автоматически выводится из схемы при относительно незначительном снижении свойств преобразователя в целом. Для восстановления работоспособности системы, представленной на рис. 3, производится замена только одного из 18 элементов преобразователя системы электродвижения. Судно не лишается возможности двигаться и тормозиться.

На рис. 3 приведен внешний вид 800-киловаттного каскадного преобразователя.

Недостатком системы электродвижения с каскадным преобразователем является возможность аварии в виде короткого замыкания на зажимах асинхронного двигателя. С целью решения этой проблемы за рубежом уже применяются схемы с многообмоточными гребными двигателями. На рис. 4 приведена схема системы электродвижения с асинхронным двигателем, имеющим три трехфазных обмотки на статоре. Такое техническое решение структуры системы электродвижения вполне возможно и обоснованно.

Возможно, например, и такое конструкторское решение, которое заключается в разделении выпрямительного блока преобразователя частоты на несколько звеньев, питающихся от многообмоточного трансформатора. Схема такого выпрямительного блока представлена на рис. 5.

Если выпрямители каждого звена трансформаторно-выпрямительного блока включить последовательно, то вероятность выхода из строя всего преобразователя из-за аварии одного однофазного выпрямителя резко снижается. Закороченный выпрямитель одного звена, в котором произошло КЗ, отключается предохранителем или простым контактором или автоматом. Цепь с последовательно включенными выпрямителями восстанавливается, но с меньшим уровнем напряжения. Малое время отключения не позволит вызвать возгорание. Чем больше количество однофазных выпрямителей, тем меньше вероятность выхода из строя всего выпрямителя.

Перспективной представляется и приведенная на рис. 6 структура системы электродвижения с трехобмоточными и гребными электродвигателями и генераторами судовой электростанции.

Система электродвижения с трехобмоточными машинами обеспечивает не только живучесть, но и позволяет в несколько раз снижать напряжение в электроэнергетической системе. Это качество системы способствует и повышению живучести при авариях.

Для обеспечения безопасности плавания уже построенных одновинтовых судов с системой электродвижения, основанной на неуправляемых выпрямителях и одноуровневых инверторах, возможно также техническое решение, иллюстрируемое схемой на рис. 7.



Рис. 3. Каскадный преобразователь мощностью 800 кВт напряжением 6 кВ на стенде.

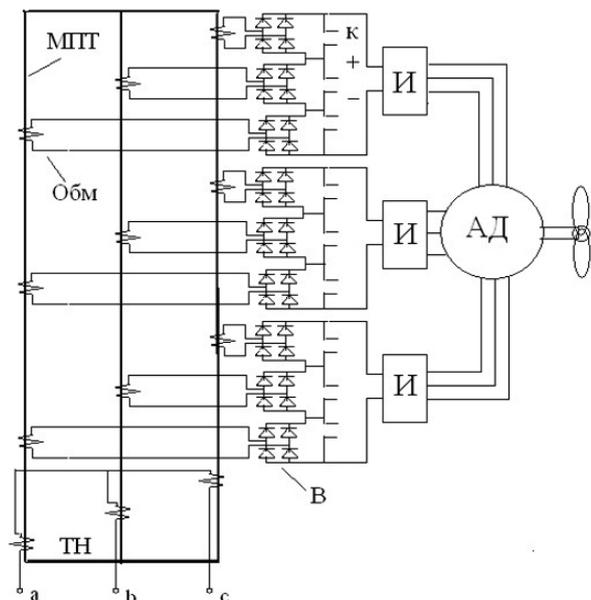


Рис. 4 Схема системы электродвижения с трехобмоточным гребным асинхронным двигателем:
АД – асинхронный двигатель; *И* – инвертор; *ТН* – трансформатор напряжения; *МПТ* – магнитопровод трансформатора, *Обм* – обмотки трансформатора, *В* – выпрямитель, *к* – контакты шунтирующего контактора

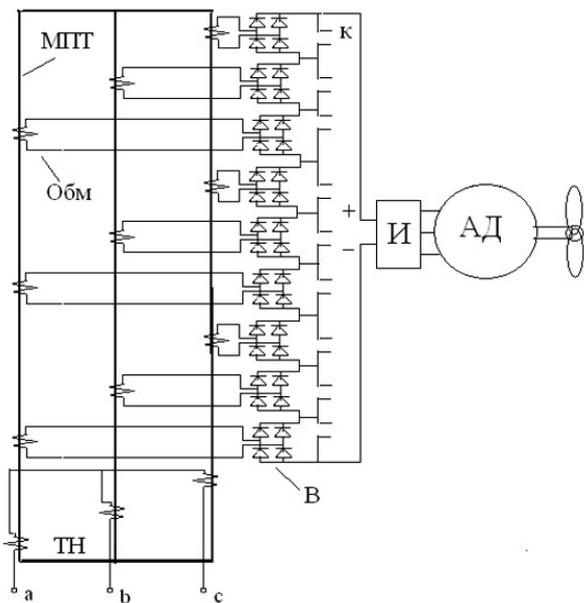


Рис. 5 Схема трансформаторно-выпрямительного блока с разделением на несколько звеньев, питающихся от многообмоточного трансформатора:

ТН – многообмоточный трансформатор; *В* – силовые вентили; *Обм* – обмотки трансформатора; *МПТ* – магнитопровод трансформатора; *И* – инвертор; *к* – контакты контакторов, *АД* – асинхронный двигатель

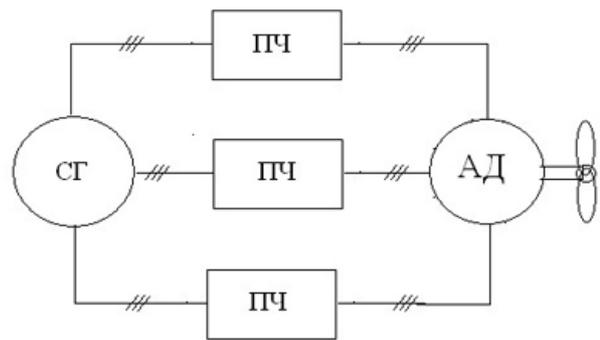


Рис. 6 Структура системы электродвижения с трехобмоточными и гребными электродвигателями и генераторами судовой электростанции:

СГ – синхронный генератор, *ПЧ* – каскадный преобразователь частоты, *АД* – гребной асинхронный электродвигатель

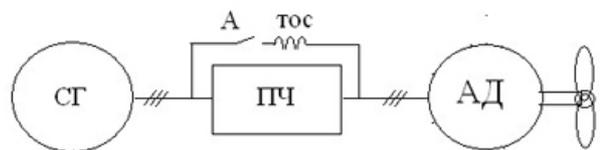


Рис. 7 Система электродвижения с шунтирующим реактором: *СГ* – синхронный генератор; *ПЧ* – преобразователь частоты; *ТОС* – токо-ограничивающий реактор; *А* – автомат; *АД* – гребной асинхронный электродвигатель

В такой системе при аварии преобразователя гребной электродвигатель переключается на питание непосредственно от ГРЩ электростанции. Естественно, что при этом частота вращения винта не регулируется, в режиме пуска двигателя будет иметь место большой провал напряжения. Но самым основным фактором будет возможность судну двигаться и менять направление движения. Регулировать скорость движения принципиально тоже можно путем импульсного включения и отключения автомата *А*.

Естественно, что в системе должны быть предусмотрены равные уровни номинальных напряжений генератора и гребного двигателя.

ВЫВОДЫ

1. Для исключения аварий судов, приводящих к потере хода, в системах электродвижения целесообразно применять преобразователи частоты с многоуровневыми (каскадными) преобразователями частоты с большим количеством уровней.

2. Наиболее живучей является система электродвижения с многостаторными гребными электродвигателями и генераторами судовой электростанции.

3. Для обеспечения строительства судов с электродвижением необходимо обеспечить отечественное высокорентабельное промышленное серийное производство каскадных преобразователей частоты и многостаторных электрических машин в морском исполнении мощными серийными заводами, способными сопровождать эксплуатацию электрооборудования в течение гарантийного периода, ремонт и модернизацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жемойдо В.С., Князев А.Н., Токарев Л.Н., Хайров Д.А. Создание отечественного судового электрооборудования. Санкт-Петербург, Северная звезда. 2013.

REFERENCES

1. Zhemoydo V.S., Knyazev A.N., Tokarev L.N., Khayrov D.A.. Sozdanie otechestvennogo sudovogo elektrooborudovaniya [Creation of native ship electrical equipment]. St. Petersburg, "Severnaya Zvezda" Publ. 2013.



НЕФТЕГАЗОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.644.07

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА ТРЕБОВАНИЙ ПРАВИЛ РЕГИСТРА К КОНСТРУКТИВНОМУ ОФОРМЛЕНИЮ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ТРАСС ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ И СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ, А ТАКЖЕ ВЫХОДОВ ТРУБОПРОВОДОВ НА БЕРЕГОВОЙ УЧАСТОК ТРАССЫ

А.И. Лапин, ООО «ВолгоградНИПИморнефть», Волгоград, e-mail: alapin@vnipimn.ru

А.В. Субботин, ООО «ВолгоградНИПИморнефть», Волгоград, e-mail: asubbotin@vnipimn.ru

В статье проведен анализ действующей российской и зарубежной нормативно-технической документации (НТД), правил иностранных классификационных обществ (ИКО) в части пересечений проектируемых морских подводных трубопроводов (МПТ) с ранее уложенными трубопроводами, силовыми кабелями и анализ пересечений МПТ с береговым участком трассы. Изучен опыт отечественных и зарубежных подрядных предприятий по проектированию и строительству пересечений. Разработан проект требований к пересечению МПТ с ранее уложенными трубопроводами и силовыми кабелями, а также выходов МПТ на береговой участок трассы, для включения в текст главы 8.2 части I «Морские подводные трубопроводы» Правил классификации и постройки морских подводных трубопроводов [6] и глав 3.5 и 3.7 Руководства по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов [7].

Ключевые слова: *нормативно-техническая документация, морской подводный трубопровод, подводный силовой кабель, пересечение подводных трубопроводов, выход подводных трубопроводов на береговой участок трассы, коффердам, горизонтально-направленное бурение*

DEVELOPMENT OF THE DRAFT REGISTER RULES REQUIREMENTS TO THE DESIGN OF CROSSING BETWEEN SUBSEA PIPELINES AND ELECTRIC CABLES AND PIPELINE LANDFALLS TO THE ONSHORE SECTION OF THE ROUTE

A.I. Lapin, LLC "VolgogradNIPImorneft", Volgograd, e-mail: alapin@vnipimn.ru

A.V. Subbotin, LLC "VolgogradNIPImorneft", Volgograd, e-mail: asubbotin@vnipimn.ru

The analysis of Russian and foreign normative and technical documentation (NTD), the existing rules of foreign classification societies (FCS) in part of crossing of the designed offshore subsea pipelines (OSP) with previously laid pipelines, electric cables and the analysis of shore crossings of the OSP routes are carried out in the research work. The experience of domestic and foreign contractors in the design, and construction of the said crossings has been studied. A draft of the requirements for crossing of the OSP with previously laid pipelines and electric cables and also the OSP landfalls to the shore section of the route has been developed for inclusion into the text of

Chapter 8.2, Part I of the Rules for the Classification and Construction of Subsea Pipelines [6] and Chapters 3.5 and 3.7 of Guidelines on Technical Supervision during Construction and Operation of Subsea Pipelines [7].

Keywords: normative and technical documentation, subsea pipeline, subsea electric cable, crossing of subsea pipelines, subsea pipelines landfall to the onshore section of the route, cofferdam, horizontal directional drilling

ВВЕДЕНИЕ

Морские трубопроводные системы – сложные технические объекты, работающие в различных природных условиях.

Ключевым вопросом проектирования морского подводного трубопровода (МПТ) является выбор и обоснование трассы трубопроводов, его основных конструктивных параметров, таких как материал труб, наружный диаметр и толщина стенки, способ монтажа, а также защита от коррозии, обеспечение устойчивости и других эксплуатационных характеристик.

Окончательную конструкцию МПТ в проекте выбирают после сравнительного технико-экономического анализа различных вариантов с учетом конкретных условий строительства и эксплуатации.

В процессе разработки проектной документации на строительство МПТ на участках пересечений с существующими трубопроводами/силовыми кабелями и выхода трубопроводов на берег перед проектировщиками возникает следующий ряд актуальных технических вопросов при определении:

- минимального расстояния в свету между проектируемыми и существующими трубопроводами/силовыми кабелями;
- минимального угла пересечения между проектируемыми и существующими трубопроводами/силовыми кабелями;
- расположения проектируемых и существующих трубопроводов/силовых кабелей при пересечении;
- способа пересечения береговой линии и т. д.

Все эти вопросы в принципе должны быть отражены в общегосударственной нормативной и технической документации (НТД), а именно:

- сводах правил (СП)
- строительных нормах и правилах (СНиП)
- государственных стандартах (ГОСТ).

В настоящее время в отечественной НТД практически отсутствуют требования к пересечениям трасс подводных трубопроводов и силовых кабелей, а также выходов МПТ на береговой участок трассы, поэтому требуется разработка дополнительных требований, для последующего включения в текст главы 8.2 части I «Морские подводные трубопроводы» Правил классификации и постройки морских подводных трубопроводов (Правил МПТ) [6] и глав 3.5 и 3.7 Руководства по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов (Руководства МПТ) [7].

Результаты работы планируется использовать при разработке проектной и рабочей конструкторской документации для МПТ, в процессе рассмотрения технической документации МПТ Регистром, а также для совершенствования Правил МПТ [6] и Руководства МПТ [7].

Внедрение результатов работы позволит повысить безопасность эксплуатации подводных трубопроводных систем различного назначения и улучшить качество оказания услуг Регистром, в том числе по классификации морских подводных трубопроводов.

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА ТРЕБОВАНИЙ. АНАЛИЗ НОРМАТИВНОЙ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

На первом этапе разработки, был выполнен анализ уже имеющихся требований к проектированию и строительству пересечений МПТ в отечественной и зарубежной НТД.

Анализ требований НТД включал в себя два типа деятельности:

- 1) сбор требований – изучение НТД;
- 2) анализ требований – определение, являются ли собранные требования неясными, неполными, неоднозначными или противоречащими друг другу.

Для проведения анализа требований общероссийской НТД были рассмотрены следующие нормативные документы:

- [1] СП 36.13330.2012;
- [2] СП 86.13330.2014;
- [3] СП 18.13330.2011;
- [4] ГОСТ Р 54382-2011;
- [5] ГОСТ Р ИСО 13623:20.

Были рассмотрены следующие зарубежные НТД и правила ИКО:

- [8] DNV-OS-F101;
- [9] ASME B31.4-2016;
- [10] BS 8010-3:1993;
- [11] ABS;
- [12] LR.

На основании анализа требований российской и зарубежной НТД, правил ИКО в части пересечений МПТ с коммуникациями, а также выходов трубопроводов на береговой участок трассы можно сделать вывод, что в отечественной НТД практически отсутствуют требования для проектирования и строительства пересечений МПТ с ранее уложенными трубопроводами, кабельными линиями и выхода трубопроводов на берег.

В зарубежной НТД и правилах ИКО недостаточно четко прописаны требования для проектирования и строительства пересечений МПТ с ранее уложенными коммуникациями и выходов трубопроводов на берег. Так же отсутствует выбор оптимального метода пересечения МПТ береговой линии.

Необходимость в разработке таких требований обусловлена увеличением объемов проектирования и строительства МПТ в районах Российского шельфа.

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА ТРЕБОВАНИЙ. АНАЛИЗ ОПЫТА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА ПЕРЕСЕЧЕНИЙ

Был проведен анализ принятых проектных решений строительства МПТ на участках пересечений береговой линии и уже построенными коммуникациями на реализованных морских проектах:

- 1) «Газопровод Северный поток (Nord Stream)» (акватория Балтийского моря) – в т. ч. проект пересечения проектируемых МПТ и существующих силовых кабелей;
- 2) «Обустройство месторождения «Ракушечное» (первая стадия освоения)» (акватория Северного Каспия) – в т.ч. проект пересечения проектируемых и существующих подводных МПТ.

Пересечение силовых кабелей.

Согласно рассмотренной проектной документации, основным методом пересечения действующих кабельных линий, является прокладка трубопроводов над действующими коммуникациями с устройством опор для обеспечения требуемого просвета между кабелями и трубопроводами.

Вид опор выбирается в зависимости от типа грунта морского дна в месте пересечения. В качестве опор, возможно, использовать как жесткие конструкции (бетонные маты, трубы из высокоплотного полиэтилена), так и гибкие конструкции (битумные матрасы, гравийные опоры).

Типовое пересечение МПТ с силовым кабелем показано на рис. 1.

Другие методы, такие как резка или погружение силового кабеля в грунт для обеспечения просвета между коммуникациями, проектом не рассматривались.

Пересечение трубопроводов.

Прокладку МПТ в основном планируют с исключением взаимного пересечения с подводными трубопроводами.

В России, в связи с тем, что освоение морского шельфа началось относительно недавно, а построенные трубопроводы «Голубой поток» и «Северный поток» не пересекали действующие трубопроводы на своем протяжении, отсутствует практика проектирования и строительства МПТ на участках пересечений с действующими МПТ.



Рис. 1 Пересечение силового кабеля с устройством бетонных опор

В 2020 году компания ПАО «ЛУКОЙЛ» планирует начать освоение месторождения Ракушечное в российском секторе Каспийского моря.

Проектом обустройства месторождения Ракушечное предусмотрено строительство заглубленных подводных трубопроводов 3 нитки (многофазный трубопровод, водовод и трубопровод газлифта) между ледостойкой стационарной платформой (ЛСП) месторождения Ракушечное и ЛСП месторождения им. В. Филановского.

Трассы проектируемых МПТ пересекают существующие заглубленные в грунт подводные трубопроводы:

- нефтепровод DN300 мм;
- газопровод DN400 мм.

Были рассмотрены три варианта возможных решений по сооружению пересечений трубопроводов:

- 1) вариант №1 – укладка в траншею проектируемых трубопроводов под существующими МПТ;
- 2) вариант №2 – подсадка существующих МПТ в траншею и укладка проектируемых трубопроводов над ними;
- 3) вариант №3 – укладка проектируемых трубопроводов под существующими МПТ методом горизонтально направленного бурения (ГНБ).

Каждый вариант был проанализирован и оценен на основании следующих аспектов:

- техническая осуществимость;
- воздействие на окружающую среду;
- воздействие на процесс эксплуатации существующих МПТ в ходе строительных работ;
- капитальные затраты;
- график строительства;
- степень проработки предлагаемого варианта сооружения пересечения.

По результатам рассмотрения вариантов пересечения подводных трубопроводов был принят вариант №1 – укладка проектируемых трубопроводов предусматривается под действующими трубопроводами.

Расстояние в свету проектом назначено:

- между проектируемым трубопроводом газлифта и действующим нефтепроводом – 3,0 м и действующим газопроводом – 2,6 м;
- между проектируемым водоводом и действующим нефтепроводом – 2,8 м и действующим газопроводом – 2,4 м;
- между проектируемым многофазным трубопроводом и действующим многофазным трубопроводом – 2,4 м и действующим газопроводом – 2,0 м.

Разработку грунта в районе пересечения подводных трубопроводов для предотвращения повреждения предполагается осуществить гидромонитором.

При помощи водолазов будут установлены опоры под существующими трубопроводами во избежание их провисания (рис. 2).

Укладка проектируемых трубопроводов с трубоукладочной баржи предусматривается методом протаскивания по дну траншеи при помощи тяговой лебедки.

Пересечение береговой линии.

Прибрежная полоса начинается со стороны моря, где прокладку МПТ с судов нельзя производить из-за недостаточной глубины.

На прибрежном участке трубопроводы подвергаются жесткому воздействию окружающей среды: волн и течений, ледовых образований.

Исходными данными для проектирования МПТ на участке пересечения береговой линии, являются, прежде всего, природно-климатические и экологические характеристики места производства работ, а также технологические параметры строительства.

Данные характеристики определяются на стадии инженерных изысканий.

В процессе разработки требований был обобщен опыт проектирования и строительства МПТ на участке перехода береговой линии по следующим проектам:

- 1) «Обустройство месторождения им. В. Филановского (первая стадия освоения)» (акватория Северного Каспия) – проект выхода на береговой участок с использованием траншеи;
- 2) «Арктический терминал круглогодичной отгрузки нефти Новопортовского месторождения» (акватория Обской губы Карского моря) – проект выхода на береговой участок с использованием коффердама;

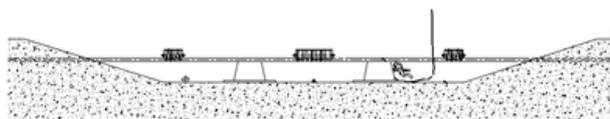


Рис. 2 Профиль расположения опор под существующими трубопроводами

3) «Обустройство Киринского газоконденсатного месторождения. Морской трубопровод от манифольда до берега» (акватория Охотского моря на шельфе острова Сахалин) – проект выхода на береговой участок с использованием коффердама;

4) «Система магистральных газопроводов Бованенково – Ухта. Подводный переход через Байдарацкую губу» (акватория Карского моря) – проект выхода на береговой участок с использованием коффердама;

5) «Строительство газопровода Джубга – Лазаревское – Сочи» – (акватория Черного моря) – проект выхода на береговой участок методом горизонтально направленного бурения (ГНБ);

6) «Обустройство газового месторождения Каменномысское море» (акватория Обской губы Карского моря) – проект выхода МПТ на береговой участок трассы с использованием метода ГНБ.

Во всех рассмотренных проектах переход береговой линии выполняется с заглублением трубопроводов в грунт. Величина заглубления назначалась в соответствии гидрогеологическими условиями перехода.

В зависимости от природных характеристик при пересечении трубопроводом береговой линии в рассмотренных проектах применялись следующие способы строительства:

- открытые земляные работы с устройством траншеи;
- открытые земляные работы с устройством шпунтовых ограждений на береговой линии и мелководье (коффердам);
- методом ГНБ, при котором трубопровод протаскивается через предварительно пробуренную скважину на прибрежном участке.

Согласно рассмотренным проектам, открытые земляные работы с разработкой траншеи применялись на участках с устойчивыми грунтовыми условиями, при которых размыв или заиливание дна и обрушение стенок траншеи было маловероятно.

Ширина подводной траншеи назначалась с учетом диаметра конструкции трубопровода с балластным покрытием, количеством прокладываемых ниток трубопровода, а также с учетом используемых землеройных механизмов и методом укладки трубопровода в траншею.

Основными землеройными машинами на переходе береговой линии с разработкой открытой траншеи являются экскаваторы с обратной лопатой, установленные на плавсредствах и механические земснаряды.

Укладка трубопровода на переходе береговой линии производится следующим методом. Плеть трубопровода, изготавливается на трубоукладочном судне и протягивают к берегу по дну заранее подготовленной траншеи с применением тяговой лебедки, установленной на берегу либо плетль изготавливают на береговой площадке и вытягивают в море по дну траншеи с помощью лебедки, установленной на трубоукладочном судне.

Пример укладки трубопровода протаскиванием в подготовленную траншею с трубоукладочного судна представлен на рис. 3.

Согласно рассмотренным проектам, разработка траншеи с устройством коффердама на переходе береговой линии применялась на участках со слабоустойчивыми грунтами.

Коффердам предназначен для проведения земляных работ по устройству траншеи, обеспечения защиты траншеи от разрушения в прибойной мелководной зоне, проведению сварочно-монтажных работ по стыковке сухопутного и подводного участков газопроводов с привлечением техники базирующейся на берегу.

Конструкция коффердама – оградительные шпунтовые стенки берегового участка траншеи с открылками в морской части, обеспечивающими выполнение дноуглубительных работ по устройству морского участка траншеи.

Глубина и ширина траншеи коффердама назначается так же, как и в обычном траншейном методе, при этом разработку траншеи, возможно, вести обычной сухопутной землеройной техникой.



Рис. 3 Укладка трубопровода в подготовленную траншею

Типовой коффердам представлен на рис. 4.

Из основных факторов, влияющих на выбор технологии ГНБ в проекте «Строительство газопровода Джубга – Лазаревское – Сочи», следует отметить высокую курортную значимость района строительства, а также то, что практически все побережье относится к заповедным и охраняемым территориям.

Строительство трубопровода методом ГНБ так же обусловлено наличием коренных пород с грядками на прибрежных участках, требующих заглубления трубопровода, а также необходимостью прокладки газопровода через значительное количество коммуникаций.

Еще один фактор – это высокий берег с высотой на некоторых переходах до 30 м и крутизной откоса склонов от 65 до 75°.

Применение метода ГНБ на участке перехода трубопроводов береговой линии по проекту «Обустройство газового месторождения Каменномыское море» также обусловлено наличием высокого берега с отвесным откосом, при этом береговой откос подвержен термоэрозийным процессам, возникновению оползней и обрушений. Поэтому проектом предусматривается прокладка трубопроводов со значительным заглублением для безопасной эксплуатации его на весь срок службы.

Пример траектории бурения скважины на прибрежном участке трассы представлен на рис. 5.



Рис. 4 Коффердам



Рис. 5 Пример траектории бурения скважины

ВЫВОДЫ

На основании проведенного анализа принятых решений в части проектирования и строительства пересечений МПТ с ранее уложенными трубопроводами, кабельными линиями и выхода трубопроводов на берег, а также проведенного анализа требований НТД, была выполнена разработка дополнительных требований, для последующего включения в текст главы 8.2 части I «Морские подводные трубопроводы» Правил МПТ [6] и глав 3.5 и 3.7 Руководства МПТ [7].

Основными дополнительными требованиями при пересечении являются:

1) требование по способу прокладки нового заглубленного в донный грунт МПТ на участке пересечения с действующими заглубленными МПТ следующими методами:

- над действующим трубопроводом траншейным способом с использованием землеройной техники;
- под действующим трубопроводом траншейным способом с использованием землеройной техники;
- под действующим трубопроводом методом ГНБ;

2) требование по прокладке укладываемого на морское дно проектируемого МПТ на участке пересечения с незаглубленными в донный грунт действующими МПТ над существующими трубопроводами;

3) требование о назначении при взаимном пересечении новых и действующих трубопроводов минимального расстояния по вертикали (в свету) не менее 0,5 м и угла пересечения не менее 60° и как можно ближе к значению 90°;

4) требование по установке опорных конструкции и других средств постоянного разделения, для исключения контакта между трубопроводами на весь срок их эксплуатации;

5) требование об оборудовании места пересечения проектируемого трубопровода магнитными маркерами;

- 6) требование об оборудовании в месте пересечения проектируемого трубопровода анодами;
- 7) требование об обязательном одобрении РС технической документации на пересечение коммуникаций;
- 8) требование о назначении при взаимном пересечении новых трубопроводов с силовыми кабелями напряжением до 35 кВ а так же кабелями связи минимального расстояния по вертикали (в свету) не менее 0,5 м и угла пересечения близким 90°;

9) требования об установке средств постоянного разделения между трубопроводом и кабелями для исключения контакта на весь проектный срок эксплуатации.

Основными дополнительными требованиями при пересечении береговой линии являются:

- 1) требование о заглублении МПТ в грунт в районе выхода на берег;
- 2) требование о расчете глубины заглубления МПТ с учетом размывов дна, песчаных наносов, ледовых условий, а также эрозионные процессы на береговом участке;
- 3) требования о выборе способа строительства при выходе трубопровода на берег такие как:
 - открытые земляные работы с устройством траншей;
 - открытые земляные работы с устройством шпунтовых ограждений на береговой линии и мелководье (коффердам);
 - методом ГНБ, при котором трубопровод протаскивается через предварительно пробуренную скважину на прибрежном участке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Необходимость разрабатываемых требований обусловлена отсутствием общероссийских НТД, регламентирующих проектирование и строительство пересечений трубопроводов, сооружаемых на морских акваториях.

2. Разрабатываемые требования планируются использовать при разработке проектной и рабочей конструкторской документации для МПТ, а также для совершенствования Правил и Руководства МПТ Регистра. В проектных и подрядных организациях при проектировании и постройке морских подводных трубопроводов, в ФАУ «Российский морской регистр судоходства» при рассмотрении технической документации.

3. Внедрение результатов работы позволит повысить безопасность эксплуатации подводных трубопроводных систем различного назначения, силовых кабелей и улучшить качество оказания услуг Регистром, в том числе по классификации морских подводных трубопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*. Свод правил СП 36.13330.2012. Утвержден Федеральным агентством по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству 25.12.2012. Введен – 01.07.2013;
2. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП III-42-80*. Свод правил СП 86.13330.2014. Утвержден Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ 18.02.2014. Введен – 01.06.2014;
3. СП 18.13330.2011 СНиП II-89-80* Генеральные планы промышленных предприятий. Актуализированная редакция (с изм. №1);
4. ГОСТ Р 54382-2011 Нефтяная и газовая промышленность. Подводные трубопроводные системы. Общие технические требования. Утвержден Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии 19.08.2011. Введен – 19.08.2011;
5. ГОСТ Р ИСО 13623:2009 Нефтяная и газовая промышленность. Системы трубопроводного транспорта. Зарегистрировано ФГУП «Стандартинформ», 29.01.2010;
6. Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов, 2017 г.;
7. Российский морской регистр судоходства. Руководство по техническому наблюдению за постройкой и эксплуатацией морских подводных трубопроводов, 2017 г.;
8. DNV-OS-F101 Submarine Pipeline Systems, October 2013;
9. ASME B31.4-2016 Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries;
10. BS 8010-3:1993 Code of practice for pipelines. Part 3. Pipelines subsea: design, construction and installation;
11. ABS Guide for Building and Classing Subsea Pipeline Systems, 2006 (Updated in February 2014) Copyright 2006 American Bureau of Shipping ABS Plaza Houston, TX 77060 USA;
12. LR Construction and Classification of Submarine Pipelines, 2008.

REFERENCES

1. Magistral'nye truboprovody. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.06-85*. Svod pravil SP 36.13330.2012 [Main pipelines. The updated version of SNiP 2.05.06-85*. Set of Rules SP 36.13330.2012]. Approved by the Federal Agency for Construction, Housing and Utilities (Gosstroy) 25.12.2012. Introduced – 01.07.2013. Moscow: Gosstroy, FAO "FCS" 2012, p. 99.
2. Magistral'nye truboprovody. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP III-42-80*. Svod pravil SP 86.13330.2014 [Main pipelines. The updated version of SNiP III-42-80*. Set of Rules SP 86.13330.2014]. Approved by the Ministry for Construction, Housing and Utilities of RF 18.02.2014. Introduced – 01.06.2014. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2014, p. 182.
3. SP 18.13330.2011 SNiP II-89-80* General'nye plany promyshlennykh predpriyatiy [SP 18.13330.2011 SNiP II-89-80* General layout plans of industrial enterprises]. The updated version (as modified №1).
4. GOST R 54382-2011 Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Podvodnye truboprovodnye sistemy. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Utverzhden Federal'nym agentstvom po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii 19.08.2011 [State Standard R 54382-2011 Oil and gas industry. Subsea pipeline systems. General technical requirements. Approved by the Federal Agency for technical regulation and metrology 19.08.2011]. Introduced – 19.08.2011. Moscow: Standartinform Publ., 2012, p. 273.
5. GOST R ISO 13623:2009 Neftyanaya i gazovaya promyshlennost'. Sistemy truboprovodnogo transporta [State Standard R ISO 13623:2009 Oil and gas industry. Pipeline transport systems]. Registered by FGUP "Standartinform", 29.01.2010. Registration number 4399/ISO, p. 93.
6. Rules for the classification and construction of offshore subsea pipelines. Russian Maritime Register of Shipping, 2017. (In Russian)
7. Guidance on technical supervision under construction and operation of offshore subsea pipelines. Russian Maritime Register of Shipping, 2017. (In Russian)
8. DNV-OS-F101 Submarine Pipeline Systems, October 2013.
9. ASME B31.4-2016 Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries.
10. BS 8010-3:1993 Code of practice for pipelines. Part 3. Pipelines subsea: design, construction and installation.
11. ABS Guide for Building and Classing Subsea Pipeline Systems, 2006 (Updated in February 2014) Copyright 2006 American Bureau of Shipping ABS Plaza Houston, TX 77060 USA.
12. LR Construction and Classification of Submarine Pipelines, 2008.

УДК 624.016. 67.11.59

ОЦЕНКА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ КРАНОВЫХ УЗЛОВ ЗАГЛУБЛЕННЫХ МОРСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Л.В. Муравьева, д-р техн. наук, АО ЦКБ «Коралл», Севастополь, e-mail: rfludmia@yandex.ru

В процессе эксплуатации систем подводных трубопроводов вибрационные процессы возникают в результате работы насосных агрегатов, включений запорной арматуры, аварийных отключений, внешних воздействий. При наличии на морском подводном трубопроводе кранового узла (подводной запорной арматуры) следует особо рассматривать сейсмостойкость этого участка трубопровода. Исследования показали высокий уровень напряжений в стенке трубы на участке соединения трубопровода и кранового узла. Сделан вывод о необходимости введения демпфирующих устройств крановых узлов морского трубопровода для обеспечения его сейсмостойкости.

Ключевые слова: морской подводный трубопровод, подводная запорная арматура, сейсмостойкость

SEISMIC STABILITY ASSESSMENT OF BLOCK VALVE STATIONS OF BURIED SUBSEA PIPELINES

L.V. Muravyeva, DSc, JSC CDB "Corall", Sevastopol, e-mail: rfludmia@yandex.ru

During operation of the offshore pipelines vibration processes occur as a result of pump plant running, shut-off valves activation, emergency shutdowns and external effects. If there is a crane unit (underwater block valve station) on the offshore pipeline, special consideration should be given to the seismic resistance of this section of the pipeline. Studies have shown a high level of stresses in the pipe wall of in the pipeline connecting section and the crane assembly. It has been concluded that it is necessary to introduce damping devices for the crane units of the offshore pipeline to ensure its seismic stability.

Keywords: offshore pipeline, offshore pipeline block valve stations, seismic resistance analysis

Трубопроводные системы транспорта природного газа, нефти и нефтепродуктов, в том числе морские подводные трубопроводы, становятся важным регулятором экономики и государственной безопасности, важной составляющей международной политики. Поэтому обеспечению их безопасной эксплуатации должно уделяться повышенное внимание со стороны национальных надзорных органов и классификационных обществ, как правило, привлекаемых для оказания услуг по техническому наблюдению за проектированием, постройкой и эксплуатацией морских трубопроводов.

Возможность аварий или инцидентов на морском подводном трубопроводе обуславливаются крайне широким спектром факторов, воздействующих на него со стороны окружающей среды и других объектов [1]. Что касается сейсмических воздействий, то анализ фактических данных о повреждениях трубопроводов при сильных землетрясениях показывает, что больше всего разрушений наблюдается в местах установки сложных узлов, манифольдов, отводов и т.д. Более того, прогнозировать сейсмические явления сложно, так как нарушения земной поверхности, порожденные землетрясением, могут неожиданно возникнуть на значительном удалении от очага землетрясения.

Сохранность трубопроводов при землетрясении зависит от силы и направления сейсмического воздействия, конструктивных особенностей крановых узлов трубопроводов, плотности грунтового основания, степени заземления трубопровода в грунт [2].

В Правилах классификации и постройки морских подводных трубопроводов (МПТ) [3] разработаны требования по сейсмостойкости линейной части МПТ, но обвязка трубопроводов также влияет на сейсмостойкость МПТ. В данной статье рассматриваются вопросы сейсмостойкости крановых узлов морских подводных трубопроводов, установленных на участках выходов трубопроводов на береговой участок.

Для трубопроводов в части сейсмических воздействий основную опасность представляют напряжения в стенках труб из-за взаимных перемещений сечений и сдвиги конструкций с окружающим грунтом вследствие прохождения через грунт сейсмических волн. Трубопроводы в сейсмических опасных районах следует прокладывать с расчетом на условные статические нагрузки, определяемые с учетом сейсмического воздействия, и на сейсмические воздействия, получаемые на основании анализа записей сейсмометрических станций (в виде акселерограмм) [3].

На участки трубопроводов, расположенные около сложных узлов, действуют силы, направленные продольно и нормально относительно их оси, изгибающие и крутящие моменты. Далее в настоящей статье проведен анализ коэффициентов податливости стыков трубопроводов при растяжении, сжатии и изгибе.

Разрушительные землетрясения силой 8 – 9 баллов характеризуется распространением сейсмических импульсов, для сооружения опасным считается «главное движение», характеризуемое волнами с периодами от 0,1 до 2,0 с.

За счет относительного смещения заглубленного трубопровода $u_0 - w$ появляется дополнительная упругая сила $k(u_0 - w)$, где k – коэффициент податливости стыка трубопровода и u_0 – наблюдаемое движение грунтов при землетрясении. Уравнение движения трубопровода получим в виде

$$m\ddot{w} = \pm k(u_0 - w) + m_{гр}\ddot{w}, \quad (1)$$

со знаком плюс в случае $m > m_{гр}$ и минус при $m < m_{гр}$ (m – масса трубопровода, $m_{гр}$ – масса грунта). Отсюда получаем, что

$$\overline{m} = |m - m_{гр}| \text{ и } |m - m_{гр}|\ddot{w} = k(u_0 - w).$$

Это своеобразный закон поперечного движения трубы в сейсмическом поле грунта. Он приближенно отражает сложное динамически взаимодействие неравномерно движущегося деформируемого грунта с

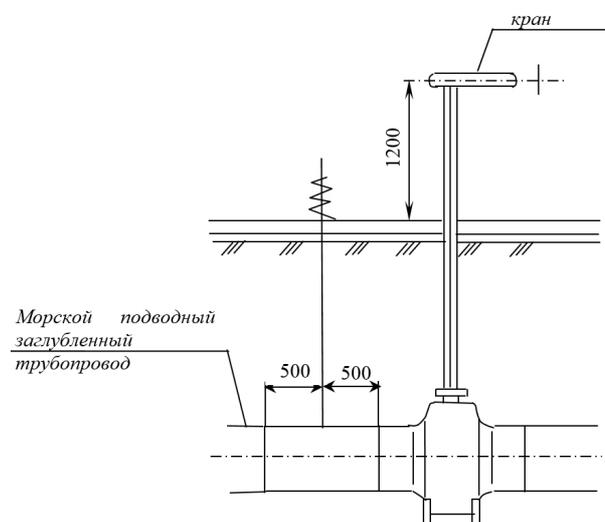


Рис. 1 Конструктивное решение приварного кранового узла, заглубленного в донный грунт морского трубопровода (в месте выхода на берег)

трубой. Закон становится вполне точным для труб, поперечная жесткость на сжатие которых совпадает с жесткостью грунта в объеме трубы [9].

Рассмотрим влияние податливости стыка трубопроводов от действия динамической нагрузки. Пусть $w - u_0 = w$, где w – относительное поперечное перемещение трубы, тогда из (1) имеем

$$\ddot{w} + p^2 w = -\ddot{u}_0, \text{ здесь } p^2 = \frac{k}{(m - m_{\text{гр}})} \quad (2)$$

Решение этого уравнения ищем в виде \tilde{w}

$$\tilde{w} = \tilde{w}^0 \cos pt + \frac{\dot{\tilde{w}}^0}{p} \sin pt - \frac{1}{p} \int_0^t \ddot{u}_0(\tau) \sin p(t - \tau) d\tau. \quad (3)$$

Для относительной скорости трубы в начальный момент $t = 0$ получим

$$\dot{\tilde{w}}^0 = \dot{w} = v_{0\text{тр}} - \dot{u}_0(0) = \frac{m_{\text{гр}} - m}{m} (\dot{u}_0(0)) \neq 0 \quad (4)$$

Динамические деформационные и прочностные характеристики грунтов оснований при отсутствии экспериментальных данных следует принимать согласно данным [4].

Согласно нормативным документам СП 36.13330. 2012 [4], СТО Газпром 2-2.1-249-2008 [2], расчет подземных трубопроводов и трубопроводов в насыпи на действие сейсмических нагрузок, направленных по нормали к продольной оси трубопровода, не производится.

Критериями прочности конструкции трубопровода являются эквивалентные напряжения, определяемые по критерию Мизеса [3]

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_h^2 - \sigma_h \sigma_1 + \sigma_1^2 + 3\tau^2}.$$

Например, суммарные напряжения в заглубленном трубопроводе $\varnothing 406$ от эксплуатационных нагрузок: внутреннее давление транспортируемого продукта, собственный вес трубопровода и акселерограммы равны

$$\sigma_{\text{max}} = (352 \div 389) \text{ МПа}$$

по результатам численного расчета в закреплении.

Одним из главных факторов, определяющих сейсмостойкость сложных систем заглубленных сооружений, является податливость соединений трубопроводов со сложными узлами и между собой. Для заглубленной в донный грунт системы сооружений из стальных труб, соединяемых сваркой, по требованиям [3, 4, 5] прочность сварного шва равна прочности основного металла труб.

При жестком соединении в узле ($x = y = z = 0$) соблюдаются кинематические условия непрерывности: не ломаются оси, не меняются углы. Для сейсмостойкости стальных сварных трубопроводов достаточно создать равнопрочные основному металлу стыки и провести соответствующие антисейсмические мероприятия [3]. Как будет показано ниже, сейсмостойкость крановых узлов трубопроводов существенно зависит от их конструктивных решений.

Определение коэффициентов упругости стыков позволяет оценить работу сложной системы «трубопровод – крановый узел». Далее проведен анализ коэффициентов податливости стыков трубопроводов при растяжении, сжатии, изгибе.

Рассмотрим деформации растяжения – сжатия соединения и выполним анализ продольных растягивающих напряжений от сейсмического воздействия в соединении. Соединения стальных труб должны быть рассчитаны на действие сейсмической волны, направленной вдоль их оси [4], из условия

$$[u_{\text{ст}}] \geq u_{\text{ст}} \quad (5)$$

Абсолютная деформация соединения $[u_{\text{ст}}]$ определяется по формуле (5) $u_{\text{ст}}$, где учитываются следующие характеристики сейсмического воздействия

$$u_{\text{ст}} = 1,5 A T_0^4 K_{\text{п}} n_{\text{НЛ}} (2l + C_p T_0)^{-1}, \quad (6)$$

здесь

A – коэффициент, значения которого для 7, 8 и 9 баллов следует принимать равными, соответственно: 0,1; 0,2 и 0,4 [4];
 T_0 – преобладающий период скорости сейсмических колебаний, определяемый по данным инженерно-сейсмологических исследований;

K_n – коэффициент повторяемости землетрясения п. 12.7.8 [4];
 n_H – коэффициент, учитывающий ответственность трубопровода, табл. 2.3 [4];
 l – длина секции трубы;
 F – площадь поперечного сечения трубопровода, м²;
 k_d – динамический коэффициент, значения которого определяются в зависимости от τ и λ по данным района прокладки:

$$\tau_0 = \frac{C_p T_0}{2l}, \lambda = \sqrt{\frac{\pi D_H k_x}{B_{пр}(1 - M^2)}} \quad (7)$$

Таблица 1

Значения максимальных скоростей и расчетных периодов сейсмических колебаний

Скорость распространения продольных волн C_p , м/с	5600 ÷ 2100	2100 ÷ 900	900 ÷ 600	600 ÷ 200	20 и менее
Преобладающий период скорости сейсмических колебаний T_0 , с 0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	

В формуле $M = C_p/a_T$, где a_T — приведенная скорость распространения волн в трубе

$$a_T = \sqrt{B_{пр}g/\gamma F}, \quad a = 0,266 \text{ м/с}; \quad (8)$$

здесь γ – удельный вес материала трубопровода, кН/м³;
 $B_{пр}$ – приведенная жесткость трубопровода (кН), модуль упругости стали E принят равным $0,20457 \times 10^6$ МПа, объемный вес – $\gamma = 78$ кН/м³;
 k_x – коэффициент сопротивления грунта продольным перемещениям трубопровода,
 g – ускорение силы тяжести.

Пример. При расчете деформаций соединения принимаем:

$C_p = 2000$ м/с ($T_0 = 0,3$ см. табл. 1 [4]), $D_H = 0,406$ м, l – длина одной секции трубы 12 м, грунтовые условия – супеси с объемным весом $\gamma = 18$ кН/м³. Учитывая геометрические характеристики разделки кромок сварного соединения при наружном диаметре трубы соответственно D_H , [3], $l_{ст}$, $\delta_{ст}$ – номинальные глубина и ширина сварного соединения (принимаем из $l_{ст} = 4,8$ мм, $\delta_{ст} = 21,5$ мм [3]), получаем

$$u_{ст} = 6,231 \times 10^{-5} \text{ м} = 0,062 \text{ мм.}$$

Коэффициент жесткости соединений труб при действии продольной силы K_N , кН/м, определяется из соотношений:

$$N = \pi D_H l G \gamma = K_N u, \quad (9)$$

где u – абсолютная деформация сдвига стыка;
 G – модуль сдвига окружающего грунта;
 K_N – коэффициент податливости стыка от продольной силы.

Учитывая прочностные характеристики трубопровода и условие прочности [3] запишем следующие соотношения

$$\sigma \cong q \frac{R}{h}, \quad \sigma = E \varepsilon, \quad E = \frac{h}{R} \sigma \quad (10)$$

Продольные растягивающие напряжения от сейсмического воздействия σ_c , определяются по

$$\sigma_c = 1,5 A T_0 B_{пр} K_H C_p^{-1} F^{-1} n_0, \quad (11)$$

где $B_{пр}$ – приведенная жесткость трубопровода, кН;
 E – модуль упругости материала трубопровода, кН/м²;
 l – длина одной секции трубы – 12 м;

$$\sigma_c = 394,785 \text{ кН/м}^2 = 0,395 \text{ МПа.}$$

Сравнение напряжений в трубопроводе проводилось на основе заданных значений напряжения сжатия, кольцевого напряжения и напряжения изгиба при сравнении с допустимыми пределами, указанными в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики металла труб

Группа прочности стали по API Spec. 5L	Предел текучести, МПа	Максимальное напряжение изгиба			
		Перегиб		Прогиб	
		% $\sigma_{тек}$	МПа	% $\sigma_{тек}$	МПа
X52	358	90	322	85	304
X65	448	90	403	85	381

Определяем изгибающие напряжения от сейсмического воздействия σ_m при действии изгибающих моментов, $\sigma_m = 4,496 \times 10^{-3} \text{ кН/м}^2 = 4,96 \times 10^{-6} \text{ МПа}$. Деформация стыка соединения при изгибе [$u_{ст}$] составляет $1,49 \times 10^{-9} \text{ м}$.

Были выполнены исследования напряжений в крановых узлах КЭ-модели [5].

Максимальные напряжения в крановом узле $\sigma_{max} = (203 \div 229) \text{ МПа}$ при 9-балльном сейсмическом воздействии.

Согласно [3, 4, 5] напряжения в прямолинейных заглубленных или находящихся в обваловке трубопроводах от действия сейсмических сил, направленных вдоль продольной оси трубопровода, определяются по формуле

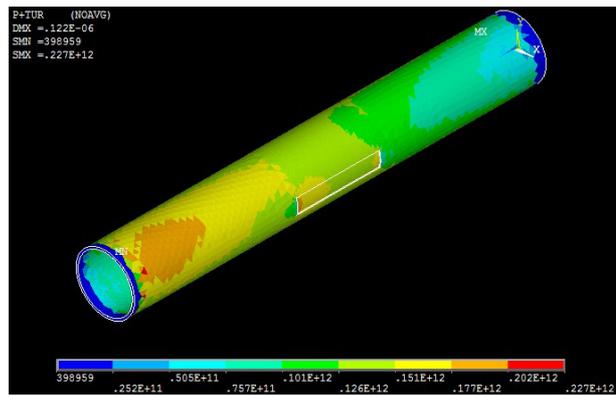


Рис. 2 Суммарные напряжения в подводном трубопроводе (береговой участок) от эксплуатационных нагрузок

$$\sigma_{пр.N} = \frac{\pm 0,04m_0k_0k_{II}a_cE_0T_0}{c_p}, \tag{12}$$

здесь m_0 - коэффициент защемления трубопровода в грунте, табл. 2.2 [4].

Учитывая заглубление подводного трубопровода определим амплитуду колебаний грунта на границе между поверхностным слоем и грунтом основания [5]

$$u_B = \frac{2 \cos \frac{pH}{c_1}}{\sqrt{\cos^2 \frac{pH}{c_1} + k^2 \sin^2 \frac{pH}{c_1}}}, \tag{13}$$

здесь, H – заглубление трубопровода, м;
 p – круговая частота сейсмической волны в грунте;
 c_1 – скорость сейсмической волны.

Если поверхностный слой более рыхлый по сравнению с грунтом основания, т.е. $k \ll 1$, то колебания усиливаются [6]. Величина pH/c_1 и может принимать значения от 0 до бесконечности. На это положение следует обращать внимание при сейсмических наблюдениях за колебаниями подземных слоев грунта.

Таблица 3
Напряжения в прямолинейных заглубленных или в обваловке подводных трубопроводах от действия сейсмических сил

Расчетные акселерограммы	Напряжение, МПа
8-балльная	284,28
9-балльная	568,56

В качестве варианта применения виброзащиты для рассматриваемых элементов подводных трубопроводных систем предлагается предусматривать комбинацию механических и гидравлических демпфирующих элементов.

Данные напряжения являются разрушающими, поэтому требуется применение конструктивных решений крановых узлов и их соединения с линейными частями трубопроводов с применением демпфирующих элементов. Кроме того, для обеспечения сейсмостойкости крановых узлов подводного трубопровода необходимо ввести в нормы по проектированию МПТ требования и критерии по контролю вибраций крановых и им подобных узлов подводных трубопроводных систем.

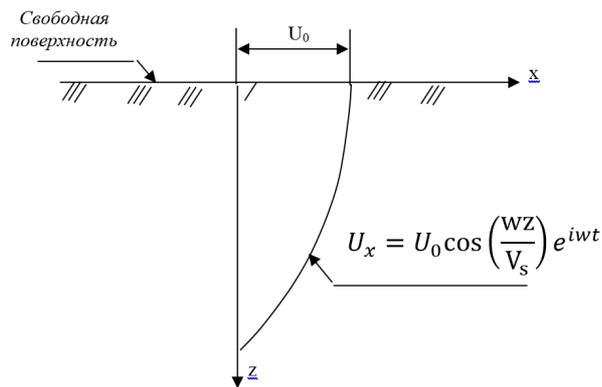


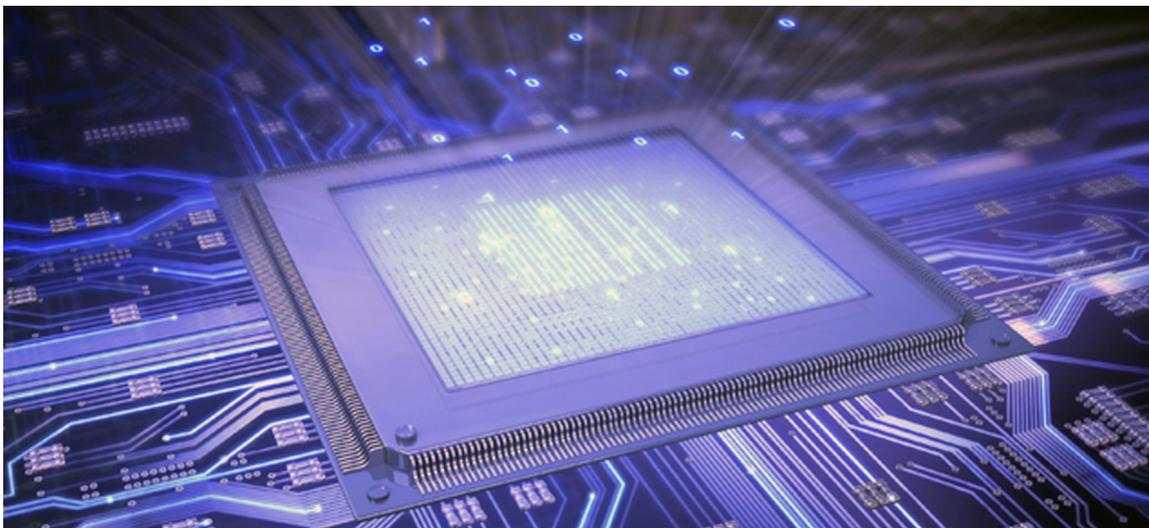
Рис. 3 Изменение перемещений грунта в зависимости от глубины

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ведомственные нормы: ВН 39-1.9-005-98. Нормы проектирования и строительства морского газопровода [текст]: нормативно-технический материал. – Москва: ИРЦ «Газпром», 1998. – 76 с.
2. Стандарт организации: СТО Газпром 2-2.1-249-2008. Строительство в сейсмических районах. [Текст]: нормативно-технический материал. - ИРЦ «Газпром», 2008. – 56 с.
3. Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов [текст]: Российский морской регистр судоходства - Санкт-Петербург: Российский морской регистр судоходства, 2017. – 164 с.
4. Свод правил: СП 36.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85* Магистральные трубопроводы) [Текст]: нормативно-технический материал. – Москва: [Приказ Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству (Госстрой)], 2013. – 88 с.
5. Муравьева Л.В.: Отчет НИР по договору № РС-13/2015/203-03503. – Санкт-Петербург: 2015. –35с.
6. Окамото, Ш. Сейсмостойкость инженерных сооружений [текст]/ Ш. Окамото. – Москва: Стройиздат, 1980. – 342 с.

REFERENCES

1. Vedomstvennye normy 39-1.9-005-98. Normy proektirovaniya i stroitel'stva morskogo gazoprovoda [Departmental Standards 39-1.9-005-98. Design and building standards for marine gas pipeline]. Moscow, Information and advertising center gas industry (ICGi), Gazprom, 1998, 76 p.
2. Industry Benchmark Gazprom 2-2.1-249-2008. Stroitel'stvo v seymicheskikh rayonakh. Normy proektirovaniya zdaniy [Industry Benchmark Gazprom 2-2.1-249-2008. Building in seismic regions. Building design standards]. Moscow, Information and advertising center gas industry (ICGi), Gazprom, 2008, 56 p.
3. Rules for the Classification and Construction of Subsea Pipelines. Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2017, 164 p. (In Russian)
4. Set of Rules 36.13330.2012 (Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.05.06-85* Magistral'nye truboprovody). Moscow, Gosstroy Publ., 2013, 78 p. (In Russian).
5. Otchet NIR po dogovoru № RS-13/2015/203-03503 [R&D report, contract № RS-13/2015/203-03503]. St. Petersburg, 2015, 35 p.
6. Okamoto Sh. Seysmostoykost' inzhenernykh sooruzheniy [Seismic stability of engineering structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980, 342 p.



ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК: 004.94

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ СУДОВОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А.А. Равин, д-р техн. наук, доцент, профессор, Санкт-Петербургский Государственный Морской технический университет (СПбГМТУ), Санкт-Петербург, e-mail: ravinlki@mail.ru

М.А. Максимова, канд. техн. наук, доцент, СПбГМТУ, Санкт-Петербург, e-mail: MaximovaMA@yandex.ru

Одним из важных информационных компонентов при прогнозировании фактической эксплуатационной надежности, формировании требований к системам аварийной защиты и диагностики, обосновании стратегии обслуживания является оценка технико-экономических последствий возможных отказов отдельных узлов технических систем. Применительно к стохастическим объектам, случайным образом изменяющих свое состояние во времени, действенным способом проведения соответствующих исследований является применение компьютерного имитационного моделирования. В качестве примера такого стохастического объекта в статье рассмотрена автоматизированная гидравлическая система, в состав которой входят накопительная цистерна с датчиками уровня, подпитывающие центробежные электронасосы, потребители, случайным образом изменяющие во времени запросы воды, и регулятор уровня воды в цистерне с дискретным алгоритмом действия. Программная оболочка модели предусматривает простой и удобный для пользователя способ настройки параметров и наглядное анимационное представление на экране процесса моделирования и его результатов. Выполненное моделирование различных типов отказов системы позволило выявить характерные нарушения нормальной работоспособности системы и оценить соответствующие техникоэкономические последствия.

Ключевые слова: стохастическая система, последствия отказов, имитационное моделирование

SIMULATION MODELING OF THE SHIP AUTOMATED HYDRAULIC SYSTEM FAILURES

A.A. Ravin, DSc, associate professor, professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: ravinlki@mail.ru

M.A. Maksimova, PhD, associate professor, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, e-mail: MaximovaMA@yandex.ru

One of the important information components in predicting the actual operational reliability, setting requirements for systems of emergency protection and diagnostics and substantiating the maintenance strategy is to assess the technical and economic consequences of possible failures in individual nodes of technical systems. When applied to stochastic objects, randomly changing their state in time, an effective way to conduct relevant research is the application of computer simulation modeling. As an example of such a stochastic object, the article describes an automated hydraulic system, which includes the storage tank level sensors, centrifugal pumps, consumers, randomly changing the queries of water in time, and discrete algorithm control of the water level in the tank. The software model provides a simple and convenient way for the user to configure settings, as well as intuitive animated on-screen representation of the modeling process and its results. Modeling different types of the system failures has made it possible to identify the characteristic disruption of normal system operability and to evaluate the relevant technical and economic consequences.

Keywords: stochastic system, the consequences of failures, simulation

ВВЕДЕНИЕ

В процессе разработки мероприятий, призванных обеспечить надежность эксплуатации судового энергомеханического оборудования, важное место занимает формирование перечня актуальных диагностических задач. Наряду с общепринятым способом расстановки приоритетности таких задач путем сопоставления вероятностей отказов отдельных элементов оборудования, полезно принимать во внимание и результаты анализа возможных технико-экономических последствий этих отказов. Одним из действенных способов изучения поведения в нештатных ситуациях стохастических объектов (характеристики которых могут случайным образом изменяться во времени), является имитационное моделирование [1–7].

1. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В качестве инструмента для проведения таких исследований может быть использована компьютерная модель, предусматривающая оперативную перестройку варьируемых параметров объекта и системы управления, например, модель гидравлической системы с дискретным алгоритмом автоматического управления, схема которой показана на рис. 1. Модель разработана в пакете FLASH MX 2004 с использованием языка ActionScript 2.0 [8, 9].

На рис. 1 показан фрагмент рабочего окна модели. Данная модель имеет анимацию, приведем пояснения к ее элементам:

- стрелка на изображении насоса появляется при его включении;
- зеленый цвет датчика уровня – есть вода в месте установки датчика, красный – воды нет;
- синий цвет потребителя – нет запроса воды, зеленый – запрос полностью удовлетворяется, красный – запрос удовлетворяется не полностью.

Система состоит из двух центробежных насосов (основного ЦБН1 и вспомогательного ЦБН2), которые через накопительную цистерну снабжают водой потребители трех типов с различными характеристиками.

Потребитель П1 в активной фазе запрашивает расход воды, заданный при настройке параметров модели, в пассивной фазе запрос отсутствует. Длительности активной и пассивной фаз случайно изменяются в заданных диапазонах в соответствии с равномерным законом распределения.

Потребитель П2 снабжается самотоком, т.е. его потребление зависит от заданного коэффициента расхода k и уровня воды в цистерне H :

$$G_2 = k\sqrt{H} \quad (1)$$

Потребитель П3 переключается с одного режима потребления на другой через заданные интервалы времени, но запрос на каждом из режимов устанавливается случайным образом в соответствии с нормальным законом распределения.

Алгоритм работы насосов:

- основной насос ЦБН1 включается при опускании уровня воды в цистерне до среднего датчика (ДСУ) и отключается при подъеме уровня до верхнего датчика (ДВУ);
- вспомогательный насос ЦБН2 включается при опускании уровня воды в цистерне до нижнего датчика (ДНУ) и отключается при подъеме уровня до среднего датчика (ДСУ).

Настройка параметров модели (расходов насосов, высоты установки датчиков уровня, параметров потребителей) осуществляется в меню, которые всплывают при наведении стрелки на соответствующий

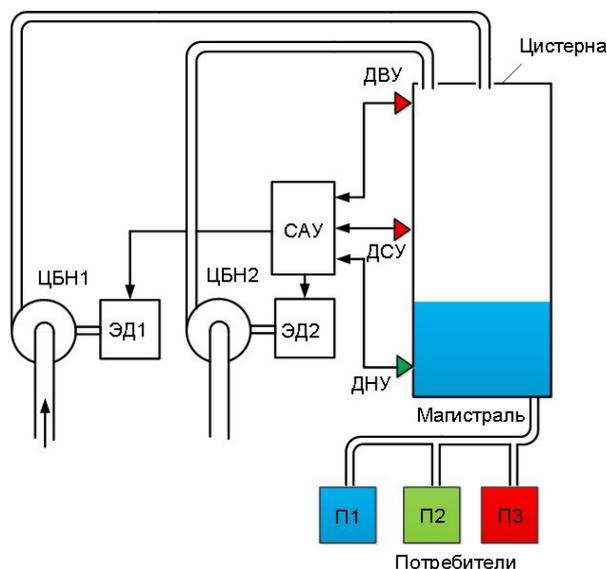


Рис. 1 Схема автоматизированной гидравлической системы (фрагмент рабочего окна модели)

элемент и нажатии на кнопку мышки. В процессе моделирования на экран монитора выводятся методом скользящего во времени окна графики расходов потребителей и насосов, а также уровня в цистерне. Для большей наглядности модели (она используется в учебном процессе) средствами анимации показывается включение насосов и изменение уровня в цистерне. Датчики изменяют окраску в зависимости от того, есть ли вода на уровне датчика, а потребители перекрашиваются в зависимости от режима (удовлетворяется запрос, не удовлетворяется запрос, нет запроса).

Текущее состояние системы можно регистрировать в любой момент времени копированием экрана. Результаты моделирования (суммарные объемы воды, перекачанной каждым из насосов и полученной каждым из потребителей, недопоставки воды, количество включений и коэффициенты использования насосов) выводятся в табличном виде при включении режима «Статистика».

2. РЕЖИМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование влияния на работоспособность системы отказов отдельных элементов (эта задача актуальна при формировании требований к составу и структуре диагностического обеспечения) выполнялась в соответствии с режимами, представленными в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Перечень моделируемых режимов

№	Режимы	
1	Исправное состояние системы	
2	Отказы насосов	Отказ основного насоса ЦБН1
3		Отказ дополнительного насоса ЦБН2
4	Отказы датчиков уровня	Отказ 1-го рода (отсутствие срабатывания) ДВУ
5		Отказ 2-го рода (ложное срабатывание) ДВУ
6		Отказ 1-го рода (отсутствие срабатывания) ДСУ
7		Отказ 2-го рода (ложное срабатывание) ДСУ
8		Отказ 1-го рода (отсутствие срабатывания) ДНУ
9		Отказ 2-го рода (ложное срабатывание) ДНУ
10	Разгерметизация гидравлической магистрали	

Таблица 2

Настройка параметров модели

Параметры	Режимы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Номинальный расход ЦБН1, м ³ /мин	7	0	7	7	7	7	7	7	7	7
Номинальный расход ЦБН2, м ³ /мин	6	6	0	6	6	6	6	6	6	6
Высота установки ДВУ, м	7	7	7	9	0	7	7	7	7	7
Высота установки ДСУ, м	4	4	4	4	4	9	0	4	4	4
Высота установки ДНУ, м	1	1	1	1	1	1	1	9	0	1
Номинальный запрос П1, м ³ /мин	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Максимальная продолжительность пассивной фазы П1, мин.	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Максимальная продолжительность активной фазы П1, мин.	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Коэффициент расхода П2, м ^{2,5} /мин	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3
Номинальный запрос П3, м ³ /мин	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
СКО запроса П3, м ³ /мин	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Длительность стабильного состояния П3, мин.	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

- Режимы 2, 3 (отказы основного и вспомогательного насосов): при максимальных запросах воды потребителями 1 и 3 возможно падение уровня в цистерне до нуля и частичная недопоставка воды потребителям (рис. 2 и табл. 3).

В табл. 3: ΔV и δV – абсолютные и относительные недопоставки воды.

- Режим 4: при заниженных запросах воды потребителями 1 и 3 возможно переполнение цистерны вследствие отсутствия сигнала на отключение ЦБН1.

- Режим 5: автоколебания основного насоса (рис. 3 и табл. 4).

В табл. 4: V – количество воды, перекачанной каждым из насосов; N – количество пусков насоса за

Таблица 3

Сводка поставок воды потребителям (опция «Статистика»)

	$V, \text{ м}^3$	$\Delta V, \text{ м}^3$	$\delta V, \%$
П1	49,6	1,1	2,1
П2	17,4	0	0
П3	54,7	2,5	4,4

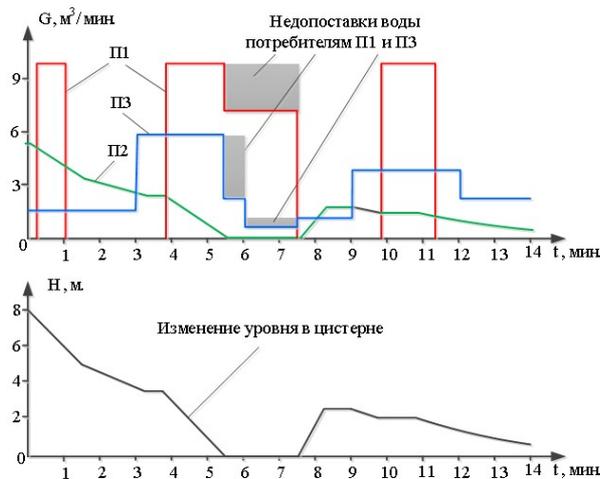


Рис. 2 Недопоставки воды потребителям при отказах насосов

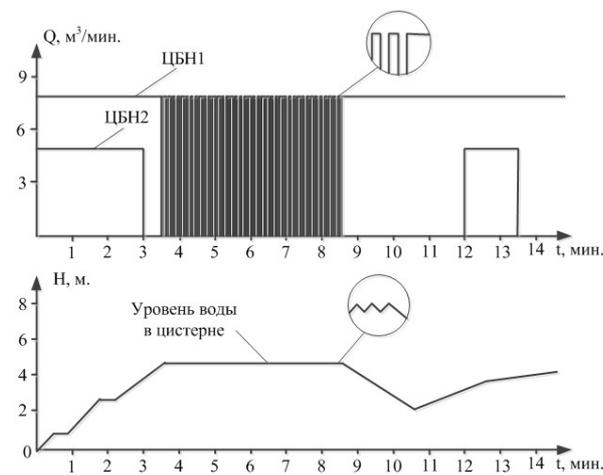


Рис. 3 Режим автоколебаний основного насоса

Таблица 4
Сводка режимов работы насосов
(применение опции «Статистика»)

	$V, \text{ м}^3$	N	$K_{И}, \%$
Н1	108,2	372	85,7
Н2	30,5	1	28,2

время моделирования; $K_{И}$ – коэффициент использования насоса (отношение длительности работы насоса к времени моделирования).

- Режим 6: отсутствие отключения дополнительного насоса – повышенный темп расходования ресурса вспомогательного насоса. При низком уровне запросов потребителей возможен перелив цистерны.

- Режим 7: не включается насос № 1, аварийный режим автоколебаний вспомогательного насоса, недопоставка воды потребителям.

- Режим 8: насос № 2 постоянно включен, независимо от уровня воды в цистерне (повышенный темп расходования ресурса).

- Режим 9: насос № 2 постоянно выключен. При высоком уровне запросов потребителей 1 и 3 возможна недопоставка воды.

- Режим 10: постоянная работа обоих насосов удерживает запас воды в цистерне при сравнительно небольших утечках. При значительной величине утечек воды через неплотность магистрали в сочетании с высоким уровнем запросов потребителей возможна недопоставка воды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что общим следствием отказов элементов рассмотренной гидравлической системы могут быть технико-экономические потери, связанные с недопоставкой воды потребителям, нерациональным расходом воды, повышенным темпом расходования ресурса и аварийными режимами работы насосов (режимы автоколебаний). Применение опции «Статистика» позволяет наряду с качественной оценкой последствий отказов отдельных элементов системы получить и количественные статистические данные, которые могут быть использованы для оценки эксплуатационной надежности стохастических объектов, ранжирования приоритетности диагностических задач и в других приложениях.

Проведенные исследования подтвердили эффективность применения имитационного компьютерного моделирования для исследования стохастических объектов, случайным образом изменяющих во времени свои параметры. Применение подобных методик и для более сложных технических объектов может быть полезным при определении характеристик, оптимальных с точки зрения надежной и безопасной эксплуатации этих объектов, и при формировании требований к системе защиты и диагностики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шеннон Роберт. Имитационное моделирование систем: искусство и наука. М.: Мир, 1978. 424 с.
2. Пытьев Ю.П. Методы имитационного моделирования информационно-измерительных систем. М.: МАИК Наука, 2004. 400 с.
3. Лоу А., Кельтон В. Имитационное моделирование [Simulation Modeling and Analysis]. СПб: Изд. Питер, 2004. 848 с.
4. Советов Б.Я., Яковлев С.А., Моделирование систем: Учеб. для вузов – 3-е изд., перераб. и доп. / М.: Высш. шк., 2001. 343 с.
5. Мышкис А.Д., Элементы теории математических моделей. 3-е изд., испр. М.: КомКнига, 2007. 192 с.
6. Максимей И.В. Имитационное моделирование сложных систем. Часть 1. Математические основы. Учебное пособие. / Минск: Изд. БГТУ, 2009. 263 с.
7. Духанов А.В. Медведева О.Н. Имитационное моделирование сложных систем. Владимир: Изд. Владим. гос. университета, 2010. 115 с.
8. Рейнхардт Роберт, Дауд Сноу. Macromedia Flasch MX 2004. Библия пользователя: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. 1312 с.
9. Macromedia Flasch MX 2004 ActionScript 2.0. Справочник разработчика: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. 896 с.

REFERENCES

1. Shannon Robert. Imitatsionnoye modelirovaniye sistem: iskusstvo i nauka [Simulation modeling: art and science]. Moscow, Mir Publ., 1978, 424 p.
2. Pytyev Yu.P. Metody imitatsionnogo modelirovaniya informatsionno-izmeritelnykh system [Simulation modeling methods of information-measuring systems]. Moscow, MAIK Nauka Publ., 2004, 400 p.
3. Lou A., Kelton V. Imitatsionnoye modelirovaniye [Simulation Modeling and Analysis]. St. Petersburg, Piter Publ., 2004, 848 p.
4. Sovetov B. Ya., Yakovlev S.A. Modelirovaniye sistem: Ucheb. dlya vuzov. 3-e izd., pererab. i dop [System modeling: Tutorial for university, the 3d ed.]. Moscow, Vyssh. shk., 2001, 343 p.
5. Myshkis A.D. Elementy teorii matematicheskikh modeley. 3-e izd., ispr. [Mathematical model theory elements, the 3d ed.]. Moscow, KomKniga Publ., 2007. 192 p.
6. Maksimey I.V. Imitatsionnoye modelirovaniye slozhnykh sistem. Chast 1. Matematicheskiye osnovy. Uchebnoye posobiye [Simulation Modeling of complex systems. Part I. Mathematical basis. Tutorial]. Minsk, BGТУ Publ., 2009, 263 p.
7. Dukhanov A.V. Medvedeva O.N. Imitatsionnoye modelirovaniye slozhnykh sistem [Simulation Modeling of complex systems]. Vladimir, Vladimir State University, 2010, 115 p.
7. Reynkhardt Robert, Daud Snou. Macromedia Flasch MX 2004. Bibliya polzovatelya: Per. s angl. [Macromedia Flasch MX 2004. User bible: translated from English]. Moscow, "Viliams" Publ., 2005, 1312 p.
8. Macromedia Flasch MX 2004 ActionScript 2.0. Spravochnik razrabotchika: Per. s angl. [Macromedia Flasch MX 2004 ActionScript 2.0. developer manual: translated from English]. Moscow, "Viliams" Publ., 2005, 896 p.

УДК 004.8:629.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОГРУЗКИ КРУПНОГАБАРИТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СТРОЯЩИХСЯ СУДОВ

Л.В. Кремлева, д-р техн. наук, профессор, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, e-mail: kremleva67@mail.ru
А.Е. Киселева, АО «ПО «Севмаш», Северодвинск, e-mail: aekiseleva@bk.ru

Выполнение транспортно-монтажных операций при погрузке оборудования в помещения строящихся судов должно обеспечивать минимальную длительность производственных циклов и маршрутов движения элементов оборудования при принятых ограничениях. В статье описывается методика моделирования процессов погрузки и выгрузки крупногабаритного оборудования в помещения корабля на основе принципа «реверсивной сборки» с использованием программного комплекса. Методика позволяет на этапе технологической подготовки производства формировать виртуальную компоновку помещений, траектории движения компонентов крупногабаритного оборудования при погрузке, последовательность операций и давать прогнозную оценку общей трудоемкости процесса. В статье также затрагиваются недостатки описываемой методики. Несмотря на это, разработанная методика может являться методологической основой при реализации имитационной модели технологических процессов погрузки крупногабаритного оборудования для оптимизации ресурсного обеспечения операций и снижения общей производственной трудоемкости.

Ключевые слова: моделирование, крупногабаритное оборудование, технологический процесс, технологическая операция, виртуальная компоновка, ЕВОМ, МВОМ

LOADING PROCESS MODELING FOR LARGE-SCALE EQUIPMENT OF SHIPS UNDER CONSTRUCTION

L.V. Kremleva, DSc, professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, e-mail: kremleva67@mail.ru

A.E. Kiseleva, JSC "PO "Sevmash", Severodvinsk, e-mail: aekiseleva@bk.ru

The performance of transport and installation operations when loading equipment into the spaces of ships under construction must ensure minimum duration of production cycles and routes of movement of the equipment elements under the adopted constraints. The article describes a method for simulating the processes of loading and unloading large-sized equipment into the spaces of a ship based on the principle of "reverse assembly" using the software. The method allows, at the stage of technological preparation of the production process, to simulate a virtual layout of premises, the movement trajectory for the components of large-sized equipment during loading, the sequence of operations, while providing a predictive estimate of the overall process labor intensity. The paper notes the shortcomings of the methodology, despite which it can become a methodological basis for the implementation of the simulation model of technological processes for loading large-sized equipment to optimize the resource support of operations and reduce the overall production complexity.

Keywords: modeling, large-sized equipment, technological process, technological operation, virtual layout, EBOM, MBOM

Погрузка и монтаж крупногабаритного оборудования в помещения строящегося корабля являются одними из важнейших этапов постройки судна, требующих использования современных методов организации и управления технологическим процессом. Выполнение транспортно-монтажных операций при погрузке оборудования должно обеспечивать минимальную длительность производственных циклов и маршрутов движения элементов оборудования при принятых ограничениях, обеспечивая при этом снижения общей технологической трудоемкости производства.

В настоящее время методам управления производственными процессами, основанными на компьютерном моделировании, уделяется повышенное внимание со стороны исследователей и специалистов в различных областях промышленности. Развитие компьютерного моделирования исследователи обычно связывают с имитационным моделированием (ИМ), которое широко используется при моделировании сложных технико-экономических систем [1, 2]. ИМ технологических процессов, а также поддерживающие их автоматизированные системы, являясь серьезным аналитическим средством и эффективным инструментом для оптимизации процедур управления при технологической подготовке производства, получили широкое распространение в различных отраслях промышленности. Так, в работах [3, 4] представлены результаты моделирования процесса сборки изделий аэрокосмической отрасли на уровне маршрутной и операционных технологий. В работах отмечается, что использование автоматизированных систем для имитации технологических процессов значительно сокращает трудоемкость производства, снижает общие затраты за счет исключения ошибок при планировании. В работах [5 – 7] приведены методология и результаты имитационного моделирования поточно-дискретных технологических линий в автомобилестроении с поддержкой трехмерных макетов технологического оборудования и средств технологического оснащения. Примеры эффективного применения ИМ при технологической подготовке производства в судостроении содержатся в [8 – 10]. Несмотря на то, что в мировой судостроительной практике накоплен положительный опыт применения систем имитационного моделирования технологических процессов, использование этих комплексов на предприятиях требует серьезного научно-методологического сопровождения. Связано это с тем, что имитационное моделирование по сравнению с другими видами математического моделирования имеет ряд специфических особенностей. Во-первых, это необходимость выполнения структурного анализа с разработкой методик и алгоритмов моделирования, отражающих динамический образ моделируемой системы [11]. Во-вторых, к специфике имитационных моделей следует отнести тот факт, что основными методами ее исследования является анализ результатов спланированного вычислительного эксперимента для оптимизации управляемых показателей [1].

Современные методы управления судостроительным производством охватывают широкий круг задач, начиная от управления постройкой заказов до управления предприятием на межцеховом и внутрицеховом уровнях [12, 13]. При использовании различных методов управления производственными процессами, в том числе и технологической подготовкой производства, основным инструментом планирования производства становятся технологические графики различного уровня, формируемые в результате анализа большого объема данных [10, 13]. Эти данные должны обладать целостностью, непротиворечивостью и согласованностью различных этапов производственного цикла строительства судна. Важнейшая роль при этом отводится обо-

снованию и контролю сроков выполнения технологических процессов, поставок и изготовления оборудования и средств технологического оснащения.

Анализ и поиск решений в условиях, когда необходимо определить наиболее выгодный с экономической точки зрения и технологически осуществимый вариант погрузки крупногабаритного оборудования в помещения строящегося корабля, возможен с помощью методов и систем компьютерного моделирования, поддерживающих геометрическое описание объектов моделирования и их движение в трехмерном пространстве. Поэтому основной целью выполненной работы являлась апробация методики имитационного моделирования на примере технологического процесса погрузки крупногабаритного оборудования в помещения строящегося судна с использованием программного комплекса. Это позволит на этапе технологической подготовки производства давать количественные оценки трудоемкости, ресурсоемкости и продолжительность ТП.

Как показано в работе [11], адекватность ИМ зависит от тщательности структурной декомпозиции процессов технологической подготовки производства. Поэтому для описания динамического аспекта методики имитационного моделирования был проведен анализ производственной технологической документации. Анализ показал, что основным документом-источником первичной информации о моделируемом процессе является перечень крупногабаритного оборудования (КГО). На его основе формируются:

- перечни конструкторской документации (КД) к построечным документам;
- графики постройки судна;
- графики покупки и изготовления КГО, крупногабаритных сборочно монтажных единиц (СМЕ) и изделий машиностроительной части (МСЧ) под стыковку судна;
- укрупненная схема компоновки помещений – чертеж общего вида.

На основе анализа технологической документации для различных проектов судов, а также изучения производственного опыта была разработана методика ИМ погрузочно-монтажных операций, представленная на рис. 1.

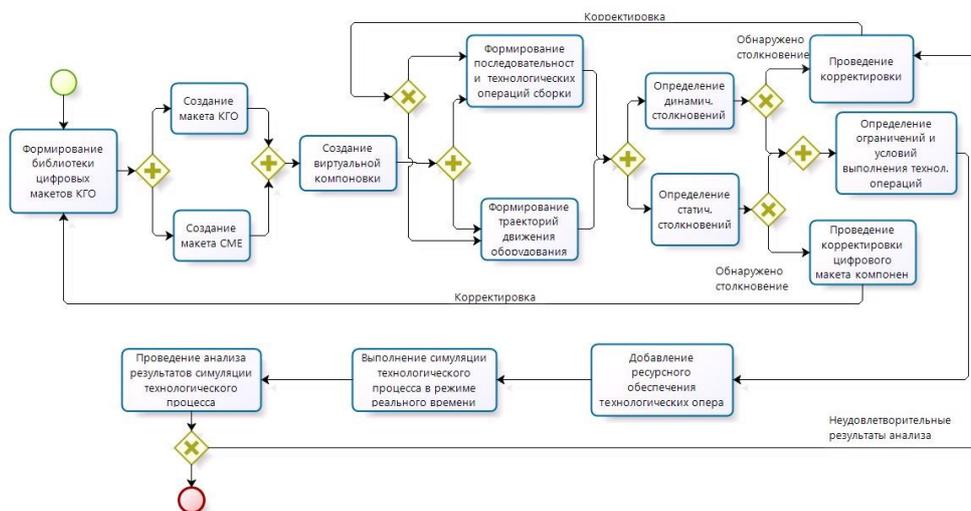
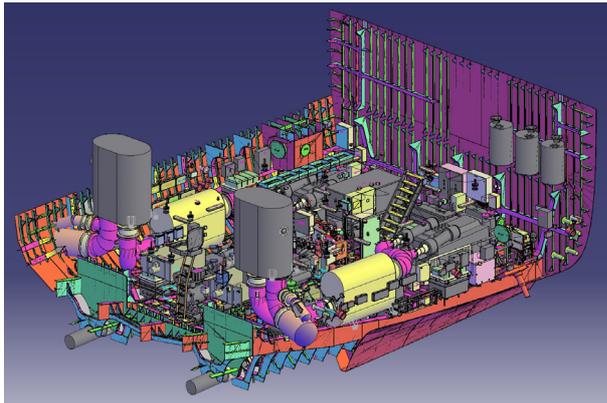


Рис. 1 Методика имитационного моделирования процессов погрузки крупногабаритного оборудования в помещения строящихся судов

На первом этапе моделирования, на основании схемы компоновки оборудования и перечня КГО, формируется 3D-сборка помещения корабля – виртуальная компоновка. Виртуальная компоновка – это электронная конструкторская модель помещения (Engineering Bill of Material – EBOM), отражающая структуру компонуемого помещения в виде иерархической структуры КГО, СМЕ и изделий МСЧ. При этом используются трехмерные модели помещения и электронные макеты отдельных единиц КГО, содержащие габаритные примитивы и кинематические законы движения. Компоненты EBOM формируемого помещения связаны друг с другом соотношением позиционирования путем наложения различных ограничений в среде модуля сборки (рис. 2). На основании дерева EBOM формируется библиотека технологических операций погрузки.

№ п/п	Наименование оборудования	Обозначение	Поз	Кол	Чертеж фундамента	Габариты (мм)			Масса (кг)	Работы установки	Примечание
						Л	В	Н			
13	Сепаратор Ду400/450 СВ	XXXX.635536.001-01	1	2		1080x500x930	34	МО, 225 мм.		12	
14	Нагреватель воздуха электросварочный НВЭ1-6.340-К СВ	XXXX.681936.009-06	1	2		775x676x556	110	МО, 221 мм.			
15	Воздухоохладитель ВО-63 СВ	XXXX.065174.017ТУ	1	1		560x711x964	336	МО, 220 мм.			
16	Электровыкатчик РСЦ2-100/63 СВ	XXXX.632512.122ТУ	1	2		1050x740x975	410	МО, 235 мм.			
17	Кондиционер центральный КИ-10/10 СВ	XXXX.632354.001ТУ XXXX.632353.001	33	1		830x715x1700	460	МО, 219 мм.			
18	Кондиционер центральный КИ-25/16 СВ	XXXX.632354.001ТУ XXXX.632354.003	1	2		1040x915x1700	710	МО, 230 мм.			
19	Кондиционер центральный КИ-25/10 СВ	XXXX.632354.001ТУ XXXX.632353.005	17	1		1040x915x1700	660	МО, 229 мм.			

а

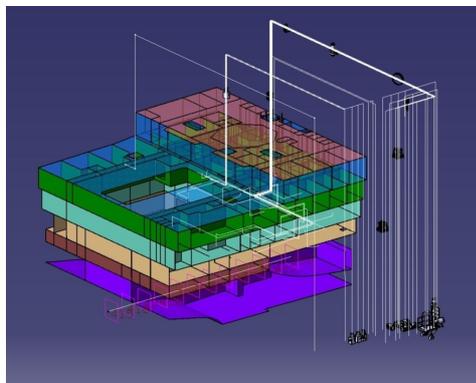


б

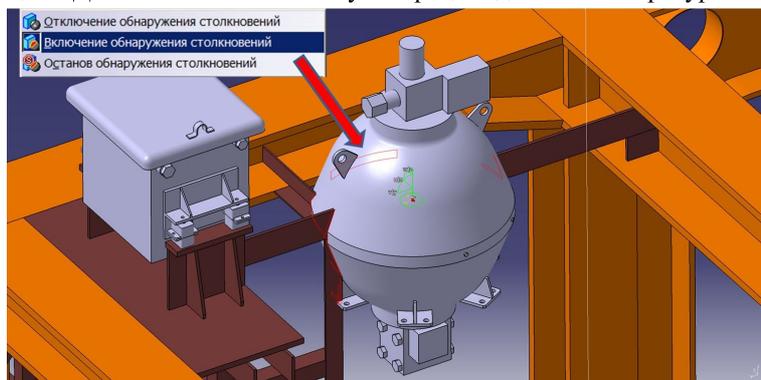
Рис. 2 Формирование виртуальной компоновки помещения строящегося корабля: перечень крупного оборудования (а), виртуальная компоновка (б)

проанализированы. Например, при столкновении с корпусными конструкциями необходимо изменить последовательность операций и ввести дополнительную операцию по демонтажу препятствующих конструкций или их части (вырезов) с последующим их восстановлением. Результатом этого этапа является созданная операционная технология с точным позиционированием оборудования, маршруты движения кранового оборудования, схемы технологических вырезов или демонтажа корпусных конструкций для погрузки. Затем на основании перечня КГО создается иерархическая библиотека технологических транспортных и монтажных операций, переходов и переделов.

На третьем этапе производится аналитическое планирование технологии погрузки КГО и определение технико-экономических показателей операций. Для этого в библиотеку операций добавляется ресурсное



а



б

Рис. 3 Принцип «обратной сборки» (а) и анализ статических столкновений при формировании траекторий движения (б)

В перечне КГО не указывается очередность погрузки оборудования на объект строительства. Поэтому иерархическая структура ЕВОМ должна отражать последовательность погрузки компонентов, то есть должна быть максимально приближена к технологической модели процесса (Manufacturing Bill of Materials, MBOM).

Этап формирования последовательности сборочных операций (рис. 1) использует принцип «обратной (реверсивной) сборки» [9], который позволяет поэтапно моделировать операции выгрузки, «вынимая» одну позицию КГО за другой. При этом формируют траектории движения грузоподъемного оборудования. Планирование, то есть упорядочение пространственных траекторий движения КГО, является одной из ключевых технологий виртуальной сборки. Формирование траекторий начинается с определения начальной и конечной точек. Затем добавляются промежуточные – контрольные точки. Позиции контрольных точек должны корректироваться постоянно, пока не будет получен рациональный путь. Затем генерируются все узлы реверсивной компоновки.

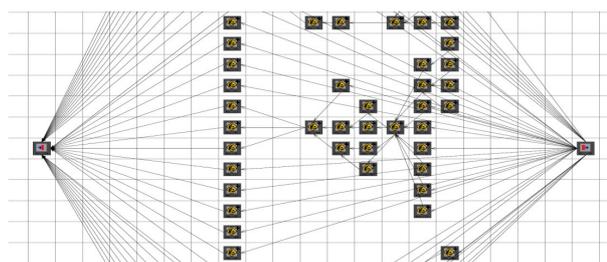
При создании траектории производится динамический и статический анализ столкновений элемента КГО (рис. 3) для выявления ограничений, связанных с наличием геометрических препятствий либо при движении компонента, либо при его позиционировании в место монтажа. Выявленные геометрические ограничения должны быть

обеспечение операций: состав и грузоподъемность кранового оборудования, потребность в рабочих, технические нормы времени. На этом этапе происходит запараллеливание операций с учетом порядка следования и временными рисками. В результате реализации этапа формируются диаграммы Перта и Ганта, которые и являются основными источниками для формирования оперативных производственных план-графиков.

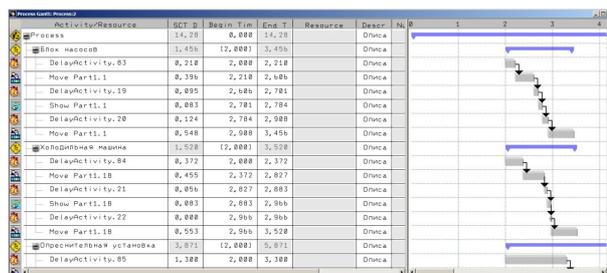
Результатом этого этапа является созданный технологический процесс выгрузки КГО в помещение корабля. На последнем этапе производится симуляция процесса во времени и определяются общая трудоемкость и ресурсоемкость процесса.

Несмотря на то, что приведенная выше методика позволяет определять «маршрут» погрузки оборудования внутри отсека, уточнять координаты и размеры технологических вырезов, определять и/или исключать дополнительные сопутствующие работы в процессе изменения сроков поставки оборудования, определять приоритет первоочередности закупки изделий и сроков поставки, она имеет существенный недостаток. Этот недостаток связан с тем, что алгоритм фактически построен на итерационном переборе вариантов последовательности операций, а, следовательно, результат его работы не будет оптимальным. Часто методы планирования вычислительного эксперимента также не приводят к оптимизированному варианту технологического процесса. Поэтому дальнейшие исследования целесообразно развивать в направлении использования при имитационном моделировании современных методов оптимизации. Задача разработки оптимального технологического процесса погрузки КГО с математической точки зрения относится к задачам многокритериальной оптимизации с геометрическими ограничениями в трехмерной постановке. При этом представляется целесообразным использование эволюционных методов оптимизации, обзор которых приведен в [14].

Таким образом, в результате выполненной работы разработана и апробирована методика компьютерного моделирования технологических процессов погрузки крупногабаритного оборудования строящихся судов с использованием программного комплекса, позволяющая на стадии технологической подготовки производства имитировать процесс выполнения погрузочно-монтажных работ и прогнозировать трудоемкость процесса и состав его ресурсного обеспечения.



а



б

Рис. 4 Диаграммы Перта (а) и Ганта (б), полученные в результате моделирования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лычкина Н.Н. Имитационное моделирование экономических процессов: учеб. пособие / Н.Н. Лычкина – Москва: Инфра-М, 2012. – 353 с.
2. Галочкин Д.А., Бурмистров Е.Г. Применение метода имитационного моделирования при подготовке сборочно-сварочного производства судостроительной верфи: монография. / Д.А. Галочкин, Е.Г. Бурмистров. – Н. Новгород: Изд-во Мастер плюс, 2013. – 151 с.
3. Mas F., Ríos J., Menéndez J.L. Conceptual Design of an Aircraft Final Assembly Line: A Case Study Key/ F. Mas, J. Ríos, J.L. Menéndez // Engineering Materials. – 2012. – vol. 502. – pp. 49-54.
4. Anselmetti B., Fricero B. Aid tool for the design of process and aircraft assembly lines/ B. Anselmetti, B. Fricero // Aerospace Science and Tech. – 2012. – vol. 23. – pp. 387 – 398
5. Salleha N., Kasolangb S., Mustakime M.A., Kuzaiman N.A. The Study on Optimization of Streamlined Process Flow Based on Delmia Quest Simulation in an Automotive Production System / N. Salleha, S. Kasolangb, M. A.Mustakime, N.A.Kuzaiman // Procedia Computer Science. – 2017. – vol. 105. – pp. 191 – 196. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.206> (Дата обращения: 23.02.2018).
6. Chai S., Luo S., Zhang L. Study On Simulation Of The Main Shaft Production Line/ S. Chai, S. Luo, L. Zhang // Advanced Materials Research. – 2012. – vol. 472 – 475. – pp. 2076 – 2079.
7. Saffar S., Jafar F. A., Jamaludin Z. Methodology on Investigating the Influences of Automated Material Handling System in Automotive Assembly Process/ S. Saffar , F. A. Jafar, Z. Jamaludin //IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – 114(1). – no.012053. Режим доступа: <https://doi.org/doi:10.1088/1757-899X/114/1/012053> (Дата обращения: 23.02.2018).

8. Caprace J.-D., Bair F., Losseau N., Rigo P. Minimization of Production Cost by use of an Automatic Cost Assessment Method and Simulation / J.-D. Caprace, F. Bair, N. Losseau, P. Rigo // *Journal of Harbin Engineering University*. – 2006. –vol. 27(2). – 399-408.
9. Li P., Cui J., Gao F., Wang Ch., Mao Y., Liao G. Research on the Assembly Sequence of a Ship Block Based on the Disassembly Interference Matrix/ P. Li, J. Cui, F. Gao, Ch. Wang, Y. Mao, G. Liao // *Journal of Ship Production and Design*. –2015 – vol.31(4). – pp.230-240. Режим доступа: <https://doi.org/10.5957/JSPD.31.1.140009> (Дата обращения: 20.03.2018)
10. Галочкин Д.А., Огнев Н.В., Бурмистров Е.Г. Организация потоковых процессов и разработка средств механизации основных производств верфи с использованием методов имитационного моделирования и законов производственной логистики / Д.А. Галочкин, Н.В. Огнев, Е.Г. Бурмистров // *Судостроение*. – 2013. – № 2. – С. 49-53.
11. Gómeza A., Masb F., Menéndezb J.L., Ríosa J. A Knowledge based Application for Industrialization/ A. Gómeza, F. Masb, J.L. Menéndezb, J. Ríosa // *Design Procedia Engineering*. – 2013. – vol. 63. – pp. 318 – 326. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.178> (Дата обращения: 20.03.2018)
12. Галочкин Д.А. Разработка генерального и технологического графиков постройки судна с учетом законов логистики / Д.А. Галочкин, Д.А. Бурмистров Е.Г.// *Вестник ВГАВТ*. Выпуск 31. – Н. Новгород: Изд-во ВГАВТ. – 2012. – 208 с.
13. Александров В.Л. Технология судостроения: учебник для ВУЗов/ В.Л. Александров [и др.]; под общ. ред. А.Д. Гармашева. – СПб.: Судостроение, 2003. – 342 с.
14. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. - СПб.: Питер, 2004. – 560 с.

REFERENCES

1. Lychkina N.N. Imitatsionnoe modelirovanie ekonomicheskikh protsessov: ucheb. posobie [Simulation Modeling of Economic Processes: Textbook. Allowance]. Moscow, Infra Publ., 2012, 353 p.
2. Galochkin D. A., Burmistrov E. G. Primenenie metoda imitatsionnogo modelirovaniya pri podgotovke sborochno-svarochnogo proizvodstva sudostroitel'noy verfi: monografiya [Application of the simulation method for preparing the assembly and welding production of shipyards: monograph]. N. Novgorod, Publishing Master plus, 2013, 151 p.
3. Mas F., Ríos J., Menéndez J.L. Conceptual Design of an Aircraft Final Assembly Line: A Case Study Key. *Engineering Materials*. 2012. vol. 502. pp. 49 – 54.
4. Anselmetti B., Fricero B. Aid tool for the design of process and aircraft assembly lines. *Aerospace Science and Tech*, 2012, vol. 23, pp. 387 – 398
5. Salleha N., Kasolang S., Mustakime M.A., Kuzaiman N.A. The Study on Optimization of Streamlined Process Flow Based on Delmia Quest Simulation in an Automotive Production System. *Procedia Computer Science*. 2017, vol. 105, pp. 191 – 196. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.206> (accessed 23.02.2018).
6. Chai S., Luo S., Zhang L. Study On Simulation Of The Main Shaft Production Line. *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 472 – 475, pp. 2076 – 2079.
7. Saffar S., Jafar F. A, Jamaludin Z. Methodology on Investigating the Influences of Automated Material Handling System in Automotive Assembly Process. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016. 114(1). no. 012053. Available at: <https://doi.org/doi:10.1088/1757-899X/114/1/012053> (accessed 23.02.2018).
8. Caprace J.-D., Bair F., Losseau N., Rigo P. Minimization of Production Cost by use of an Automatic Cost Assessment Method and Simulation. *Journal of Harbin Engineering University*. 2006. vol. 27(2). pp. 399 – 408.
9. Li P., Cui J., Gao F., Wang Ch., Mao Y., Liao G. Research on the Assembly Sequence of a Ship Block Based on the Disassembly Interference Matrix. *Journal of Ship Production and Design*. 2015, vol. 31(4), pp.230 – 240. Available at: <https://doi.org/10.5957/JSPD.31.1.140009> (accessed 20.03.2018)
10. Galochkin D.A., Ognev H.B., Burmistrov E.G. Organizatsiya potokovykh protsessov i razrabotka sredstv mekhanizatsii osnovnykh proizvodstv verfi s ispol'zovaniem metodov imitatsionnogo modelirovaniya i zakonov proizvodstvennoy logistiki [The organization of streaming processes and the development of means of mechanization of the shipyard's main production facilities using the methods of simulation and the laws of logistics production]. *Sudostroenie [Shipbuilding]*. 2013, vol. 2, pp. 49 – 53.
11. Gómeza A., Masb F., Menéndezb J.L., Ríosa J. A Knowledge based Application for Industrialization. *Design Procedia Engineering*. 2013. vol. 63. pp. 318-326. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.178> (accessed 20.03.2018)
12. Galochkin D.A. Razrabotka general'nogo i tekhnologicheskogo grafikov postroyki sudna s uchetom zakonov logistiki [Development of general and technological schedules of shipbuilding taking into account the laws of logistics.]. *Vestnik VGAVT. Vypusk 31 [The Bulletin Volga State University of Water Transport. Release 31.]*. N. Novgorod, Volga State University of Water Transport Publ., 2012, 208 p.
13. Aleksandrov V. L. Tekhnologiya sudostroeniya: uchebnik dlya VUZov [Technology of shipbuilding: textbook for high schools]. St. Petersburg, Shipbuilding Publ., 2003, 342 p.
14. Li K. Osnovy SAPR (CAD/CAM/CAE) [Fundamentals of CAD (CAD/CAM/CAE)]. St. Petersburg, Peter Publ.. 2004. 560 p.

УДК 658.5

ВНЕДРЕНИЕ БЕЗБУМАЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АО «ПО «СЕВМАШ»

В.И. Богданов, АО «ПО «Севмаш», Северодвинск, e-mail: vibogdanov@yandex.ru

Проект «Безбумажные технологии» – это интегрированная система, обеспечивающая оперативное рассмотрение всеми участниками проекта возникающих в процессе строительства проблем и принятие технических решений. Проект направлен на осуществление конструкторского сопровождения строительства в режиме «онлайн», а также оптимальное взаимодействие производственных цехов и отделов с инженерными службами предприятия. Для реализации проекта Проектно-конструкторским бюро акционерного общества «Производственное объединение «Северное машиностроительное предприятие» создан и постоянно развивается программный комплекс. Разработанный комплекс включает в себя следующие основные функции: выпуск конструкторской документации в электронном виде и управление изменениями в ней; регистрацию и контроль решения технических вопросов при строительстве заказов. Программный комплекс обеспечивает охват производственных цехов и инженерных служб на 100 %, объем конструкторской документации, управляемой при строительстве заказов, в количестве свыше 8,5 млн. экземпляров, объем решенных технических вопросов свыше 120 тысяч. Программный комплекс состоит из следующих систем: автоматизированная система управления конструкторской документации «БРИЗ – АСУ КД»; электронная книга вопросов «Меркурий»; электронная книга хозяев помещений «Гермес»; электронная картотека применяемости изделий; автоматизированная система учета корреспонденции «Олимп». По итогам выполненных работ основное увеличение производительности труда в ПКБ «Севмаш» достигнуто за счет использования информационных технологий.

Ключевые слова: информационные технологии, интегрированная система, автоматизация производственных процессов, программный комплекс

IMPLEMENTATION OF PAPERLESS TECHNOLOGIES AT JSC PO "SEVMASH"

V.I. Bogdanov, JSC PO "Sevmash" , Severodvinsk, e-mail: vibogdanov@yandex.ru

"Paperless Technologies" project is an integrated system providing prompt consideration of problems arising during construction by all project participants and solution of technical issues. The project purpose is the "online" implementation of the design support of construction and optimal interaction of production shops and departments with the engineering services of the enterprise. To implement the project, Sevmash Design Bureau has created and developed a software package. The complex includes the following main functions: release and management of design documentation changes in electronic form; registration and control of technical issues during ship building process. The software complex provides 100 % coverage of production departments and engineering services; more than 8.5 million copies of design documentation managed while ship building; over 120 thousand of technical issues solved. The software package consists of the following systems: automated control system for design documentation "BREEZE – ASUKD"; e-book of questions "Mercury"; e-book for designers, responsible for compartment arrangement "Hermes"; electronic product applicability file cabinet; automated correspondence registration system "Olympus". Based on the results of the work performed, the main increase in labor productivity at Sevmash Design Bureau was achieved due to the application of information technology.

Keywords: information technologies, integrated system, automation of production processes, software complex

Автоматизация производственных процессов и исключение ручного труда всегда являлась актуальной задачей для любой сферы деятельности. Человечество всегда стремится к высвобождению времени, затрачиваемого на выполнение поставленных задач, а в условиях рыночных отношений – и к сокращению финансовых и трудовых затрат, в том числе связанных с ошибками и переделками в результате человеческого фактора. В настоящей статье рассматривается интегрированная система управления конструкторской документацией при строительстве кораблей в АО «ПО «Севмаш».

Интегрированная система направлена на осуществление конструкторского сопровождения строительства кораблей в режиме «online», а также оптимальное взаимодействие производственных цехов и отделов с инженерными службами предприятия.

В целом система представляет собой программный комплекс, обеспечивающий автоматизацию конструкторско-технологических процессов и оперативное рассмотрение всеми участниками проектов возникающих в процессе строительства проблем и принятие технических решений.

Программный комплекс состоит из следующих систем (рис. 1):

- автоматизированная система управления конструкторской документацией «БРИЗ – АСУ КД»;
- электронная книга вопросов «Меркурий»;
- электронная книга заданий «Гермес»;
- электронная картотека применяемости изделий;
- электронное делопроизводство «Олимп».

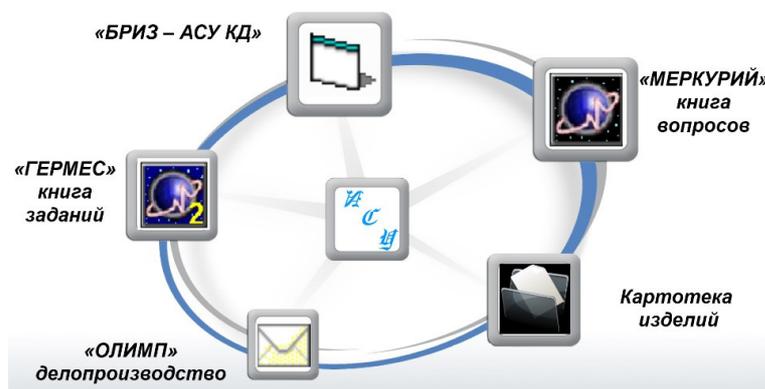


Рис. 1 Интегрированная система управления

Подробнее рассмотрим назначение каждой системы.

СИСТЕМА «БРИЗ – АСУ КД»

Система «БРИЗ – АСУ КД» предназначена для сокращения времени обработки конструкторской документации (КД), повышения оперативности при учете и сопровождении КД, сбора статистической информации о деятельности подразделений по работе с КД.

Ежемесячно в ПКБ «Севмаш» поступает от предприятий-проектантов, держателей подлинников и сторонних организаций в среднем около 3000 документов. Всем этим количеством необходимо управлять как в архиве ПКБ «Севмаш», так и в цеховых архивах. Существовавшая в 80-е годы прошлого века карточная система учета была заменена на автоматизированную систему управления КД в отдельной корпоративной сети, работающей на самописной операционной системе, с ограниченным количеством компьютеров, расположенных в отдельных помещениях.

С развитием информационных технологий используемое оборудование и программное обеспечение, в случае выхода из строя, восстановлению не подлежало. Внедрение автоматизированной системы управления конструкторской документацией «БРИЗ – АСУ КД» позволило устранить существующие недостатки, разместить систему на персональных компьютерах конструкторов и произвести слияние с электронным архивом.

Применение «БРИЗ – АСУ КД» позволило ускорить все виды обработки КД – регистрацию, проработку (входной контроль), рассылку, корректировку, аннулирование, запрос недостающей документации.

Использование «БРИЗ – АСУ КД» обеспечивает непрерывный контроль отработки документации, оперативно устраняет задержки по отработке и управлению КД.

Сегодня система управляет более 1,5 мил. архивных и порядка 7 мил. цеховых экземпляров. Система «БРИЗ – АСУ КД», интегрированная с электронным архивом, обеспечивает работу порядка 5 тысяч зарегистрированных работников предприятия.

ЭЛЕКТРОННАЯ КНИГА ВОПРОСОВ «МЕРКУРИЙ»

Электронная книга вопросов «Меркурий» усовершенствовала организационную систему управления техническими вопросами, которая обеспечила интерактивное общение производственных мастеров со специалистами инженерных служб, исключив из данного процесса участие руководящего состава и, как следствие, потерю времени на принятие технических решений.

Первая идея по созданию электронной книги возникла в 2008 году по результатам модернизации и передаче Индии тяжелого авианесущего крейсера «Адмирал Горшков». У работников производства возникало огромное количество технических вопросов к инженерным службам предприятия. Для этого на корабле присутствовали бумажные книги вопросов к службам, которые ежедневно «носили» в проектно-

конструкторское бюро и научно-технологическое управление, что доставляло значительные неудобства как основным рабочим, так и работникам инженерных служб, а именно периодическое отсутствие книг на рабочих местах, длительное время доведения вопроса до конструктора, технолога, достигавшее порой 2 дней. Указанные неудобства вызвали необходимость создания электронной книги вопросов «Меркурий» для передачи вопросов специалистов цехов, У КП, строителей к инженерным службам предприятия.

Электронная книга позволяет вести учет вопросов специалистов цехов верфи и управления качества продукции (У КП) к инженерным службам в отношении конструкторской и технологической документации, ответов инженерных служб, а также контролировать сроки решения вопросов, накапливать статистические данные для анализа качества документации и эффективности подготовки производства.

С развитием электронной книги были проведены соответствующие доработки для возможности передачи вопросов и ответов в конструкторские бюро проектантов, находящиеся в Санкт-Петербурге, что привело к существенному ускорению процесса строительства кораблей.

Цели применения системы включают:

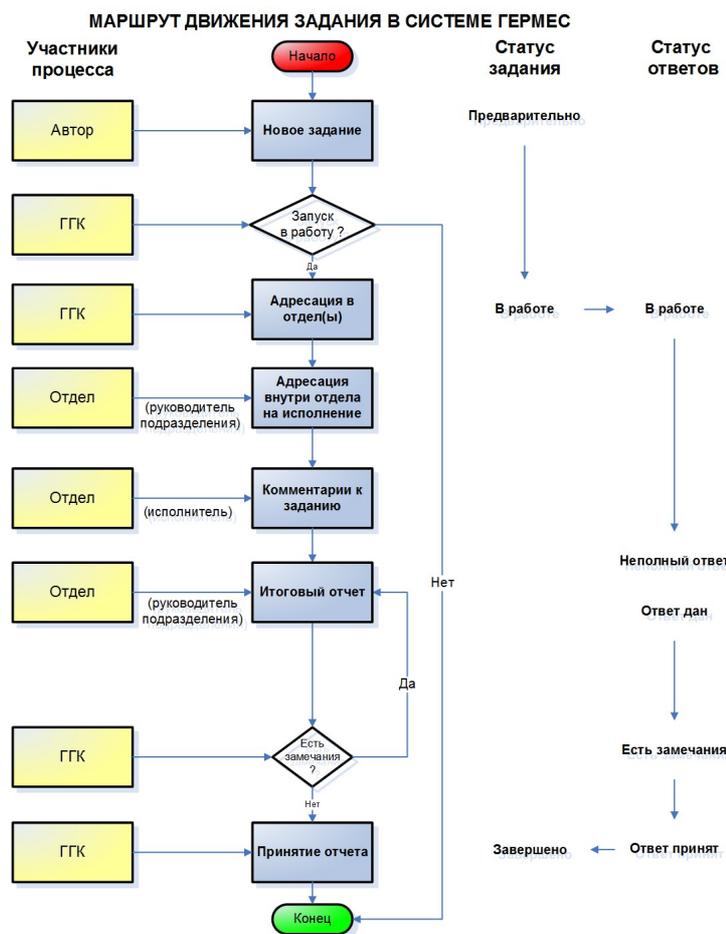
- создание удобной информационной среды для взаимодействия специалистов цехов и инженерных служб предприятия;
- сокращение непроизводительного расходования рабочего времени;
- создание эффективного инструмента контроля руководителями сроков и качества решения вопросов;
- сокращение бумажного документооборота;
- ускорение доведения принятых решений до специалистов цехов предприятия;
- накопление данных для анализа качества проектной конструкторской и технологической документации.

ЭЛЕКТРОННАЯ КНИГА ЗАДАНИЙ «ГЕРМЕС»

Электронная книга заданий «Гермес» (рис. 2) кардинально изменила систему планирования проектно-конструкторского бюро «Севмаш» (ПКБ «Севмаш»).

Существовавшая бумажная система планирования в ПКБ «Севмаш» имела статус оперативного и перспективного значения. Если перспективный план имел единую форму, то оперативные планы формировались различными способами и на различных бланках, что усложняло систему уведомления исполнителей и контроля выполнения поставленных задач. Отсутствовала полная «картина» загрузки и организация распределения работ между исполнителями с учетом срочности выполнения заданий.

Процедура перспективного планирования выглядела следующим образом: начальники отделов, получив бумажные планы, делали копии и раздавали начальникам секторов, те в свою очередь, руководителям групп и т.д., пока исполнитель не получал запланированные задания со сроком выполнения от месяца до года. Оперативные планы формировались по мере выпуска распорядительных документов, приказов начальников структурных подразделений, общества и корпорации на различных бланках со сроком выполнения от одного дня до двух недель. Для исключения такой



ГГК – группа главного конструктора

Рис. 2 Безбумажная система планирования

трудоемкой и продолжительной процедуры была разработана система, позволяющая включить в себя все бумажные планы.

Современная система по сравнению с существовавшим бумажным планом исключила потерю времени на «хождение бумаг по коридорам» и создала все условия для формирования заданий в электронной среде. Электронная книга позволяет вести непрерывное планирование работ для решения текущих вопросов и выполнения задач конструкторской подготовки производства. Самым главным преимуществом книги «Гермес» является уведомление по электронной почте всех участников процесса по формированию и выполнению заданий.

Целями применения системы «Гермес» являются:

- создание удобной информационной среды для взаимодействия специалистов подразделений ПКБ «Севмаш», сокращение непроизводительного расходования рабочего времени;
- ускорение доведения производственных вопросов до специалистов ПКБ «Севмаш»;
- создание эффективной системы контроля заместителями начальника ПКБ «Севмаш» и заместителями главного конструктора сроков и качества отработки заданий подразделениями-исполнителями;
- сокращение бумажного документооборота за счет представления информации в электронном виде.

ЭЛЕКТРОННАЯ КАРТОТЕКА

Электронная картотека позволяет вести учет заказываемого оборудования и выявлять несоответствия между спецификациями чертежей (верфи и изделий машиностроения) и ведомостями заказа изделий.

Предприятие-проектант в первую очередь направляет в АО «ПО «Севмаш» заказную документацию для формирования бюджета и графика закупок, а затем рабочую конструкторскую документацию для формирования графика строительства кораблей. Разработчиками заказной и рабочей документации у проектантов являются разные люди и, соответственно, возникает вероятность несоответствия номенклатуры и количества необходимого оборудования и изделий.

По мере формирования электронной картотеки на этапах выпуска документации работник ПКБ «Севмаш» контролирует несоответствия и выполняет мероприятия, направленные на их устранение. При согласовании контрактных документов картотека автоматизированно подготовит справку о соответствии (несоответствии) номенклатуры и количества заказываемых изделий.

Кроме того, в работе конструктора постоянно появляется необходимость проверки наличия оборудования в заказной ведомости, применяемости и количества на заказ. Существовавшая система (бумажная картотека) не позволяла оперативно ответить на эти вопросы. Поэтому при разработке системы было принято решение объединить бумажные картотеки в единую базу. В результате конструктор получил возможность, не покидая своего рабочего места, в любой момент времени получить всю необходимую информацию: количество, позицию и номер заказной ведомости, применяемость, а также наличие в ЗИП.

Целями применения картотеки являются:

- создание эффективной системы контроля наличия в ведомостях заказа изделий необходимого оборудования в требуемом количестве;
- выявление несоответствий по номенклатуре и количеству заказываемого оборудования между спецификациями чертежей и ведомостями заказа;
- ускорение уведомления отдела закупок о необходимости либо о приостановке закупки оборудования;
- определение конструктором применяемости изделий по установочным чертежам, а также их наличие в ЗИП.

ЭЛЕКТРОННОЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВО «ОЛИМП»

Электронное делопроизводство «Олимп» (рис. 3) позволяет вести учет входящей и исходящей документации ПКБ «Севмаш» и распорядительных документов.

В ПКБ «Севмаш» ежегодно поступает более 20 000 служебных писем от цехов и отделов, 20 000



Рис. 3 Электронное делопроизводство

факсов, писем внешних организаций и 2 000 распорядительных документов и приказов. При этом исходящая корреспонденция составляет более 50 000 внутривозвратных служебных писем и 20 000 внешних документов (факсы, бумажные и электронные письма).

Электронная система учета пришла на смену бумажному документообороту в 2002 году с поэтапным внедрением. На сегодняшний день электронное делопроизводство – это полноценно работающая система учета всей корреспонденции с приложенными сканированными копиями и указателями адресации писем исполнителям. Автор служебного письма, адресованного в ПКБ «Севмаш», не теряя времени на поиск исполнителя, через систему определяет фамилию конструктора и напрямую решает с ним производственные вопросы.

С развитием системы «Олимп» добавлен статус «контроль», обеспечивающий мониторинг продвижения выполнения работ с возможностью простановки отметки об их выполнении.

Цели использования системы включают:

- учет всей переписки, выполняемой специалистами ПКБ «Севмаш»;
- размещение электронных файлов служебных писем и распорядительных документов;
- контролирование выполнения служебных писем с пометкой «контроль».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение следует отметить, что интегрированная система управления автоматизировала следующие задачи:

1. контроль разработки конструкторской документации, выпускаемой предприятиями-проектантами и специалистами АО «ПО «Севмаш»;
2. формирование документов (перечней) для предъявления представителю заказчика;
3. контроль задействования корпусного насыщения;
4. корректировка конструкторской документации на этапах строительства и испытаний судов;
5. учет заказываемого оборудования и материалов для технического обеспечения строящихся заказов;
6. учет использования материалов для изготовления изделий машиностроения и конструкций на заказе;
7. контроль выполнения директивных и производственных заданий, выполняемых в ПКБ «Севмаш»;
8. учет и контроль заказываемого оборудования по результатам корректировок конструкторской документации.

Объединение посредством электронного документооборота процессов формирования и корректировки конструкторской документации, заказа и учета материалов для изготовления изделий и конструкций, контроля выполнения производственных заданий, учета и контроля заказываемого оборудования позволяет решить задачу оптимизирования затрат при строительстве кораблей.

Система взаимодействия в электронной среде помимо сокращения затрат времени на информационный обмен между работниками цехов и инженерными службами нивелирует психологические издержки сотрудников, исключая необходимость установления личных контактов и возможность возникновения конфликтных ситуаций.

Таким образом можно сделать вывод, что создана удобная информационная среда интерактивного общения специалистов производственных цехов и подразделений с инженерными службами предприятия, что привело к сокращению непроизводительного расходования рабочего времени приблизительно на 20 %, уменьшению бумажного документооборота на 50 % и в 10 раз ускорило процедуру доведения принятых решений до производства.

ПРАВИЛА ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЕЙ

1.1 Материал статьи должен являться оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, соответствовать профилю журнала. Он должен содержать информацию, подтверждающую актуальность и практическую значимость исследования, а также информацию о внедрении его результатов.

1.2 Авторы несут личную ответственность за то, что текст статьи не содержит материалов:

- рекламного характера;
- содержащих государственную тайну;
- публикация которых приведет к нарушению действующего законодательства РФ в сфере защиты информации и интеллектуальной собственности.

1.3 В тексте статьи может быть указан источник финансирования выполненных исследований.

1.4 К материалу должна быть приложена рецензия (отзыв) за подписью рецензента, имеющего ученую степень и опыт работы по данному научному направлению. Формат рецензии доступен на интернет-сайте журнала (<http://www.rs-class.org/ru/register/research/ntsb/>). Статьи для аспирантов должны быть подписаны их научным руководителем.

1.5 Материалы для публикации в журнале предоставляются авторами на безвозмездной основе.

1.6 Общие требования к оформлению материалов.

1.6.1 Объем материалов в электронном виде должен составлять не более 20000 печатных знаков. В этот объем включаются таблицы, схемы, диаграммы и т. д., а также изображения в виде иллюстраций.

1.6.2 Статья должна содержать следующую информацию:

- заглавие на русском и английском языках, точно отражающее содержание статьи (не более 120 печатных знаков);
- фамилию, имя, отчество авторов приводятся полностью. Количество указанных авторов статьи не должно превышать 4 чел;
- сведения об авторах: по каждому из авторов должны быть приложены на русском и английском языках подробные сведения — ученые степень и звание, должность, место работы (принятое в уставе организации официальное название), город, телефон и адрес электронной почты автора;
- индекс УДК;
- аннотацию, в которой четко определены основные цели, задачи, содержание и результаты проведенного исследования, возможности его практического применения. Приводится на русском и английском языках. Объем от 100 до 250 слов;
- ключевые слова: 8 — 10 слов/словосочетаний, наиболее полно отражающих тему статьи. Недопустимо использование слов общего характера (например, — проблема, решение). Предоставляются на русском и английском языках (Key words). Ключевые слова по возможности не должны повторять термины заглавия и аннотации, а должны использовать термины из текста статьи и термины, определяющие предметную область, а также включать другие важные понятия, позволяющие облегчить и расширить возможности нахождения статьи средствами информационно-поисковой системы;
- основной текст статьи: общие принципы построения статьи могут варьироваться в зависимости от тематики и особенностей проведенного исследования. Рекомендуется выделять в тексте статьи постановку задачи, описание методов решения, анализ результатов и выводы. Если имеется перевод статьи на английский язык, желательно его представить;
- список литературы.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДОСТАВЛЕНИЮ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

2.1 Список литературы обязательно оформляется в двух вариантах: на кириллице и на латинице. Список литературы на кириллице приводится в конце статьи, оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-2003. Библиографические ссылки оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008.

2.2 Кириллические названия в списке литературы транслитерируются на латиницу. Для автоматизации процесса транслитерации можно воспользоваться программным обеспечением, которое доступно по адресу www.translit.ru (в раскрывающемся списке «Варианты» выбрать вариант BGN).

2.3 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на статьи из журналов.

2.3.1 Для русскоязычных статей рекомендуются следующие схемы библиографической ссылки:

.1 полное описание статьи:

- авторы (транслитерация);
- заглавие статьи (транслитерация);
- [перевод заглавия статьи на английский язык в квадратных скобках];
- название русскоязычного источника (транслитерация);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;

.2 описание статьи только с переводом заглавия статьи на английский язык:

- авторы (транслитерация);
- перевод заглавия статьи на английский язык;
- название русскоязычного источника (транслитерация и курсив);
- [перевод названия источника на английский язык];
- выходные данные с обозначениями на английском языке, либо только цифровые;
- указание на языке статьи (In Russ.) после описания статьи.

Предлагаемая схема:

Author A.A., Author B.B., Author C.C., Author D.D. Title of article. Title of Journal, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49 – 53.

Пример:

Byzov A.L., Utina I.A. The centrifugal effects on amacrine cells in the retina of frog. *Neirofiziolgia [Neurophysiology]*. 1971; (3): 293–300. (In Russ.)

2.3.2 Число авторов не ограничивается тремя, а указывается, по возможности, все или в разумных пределах.

2.3.3 Заглавие статьи не берется в кавычки.

2.3.4 Год ставится за заглавием журнала.

2.3.5 Название источника выделяется курсивом. Применение курсива для названия источника очень важно, т. к. исполнение одним шрифтом заглавия статей и источника в русскоязычных ссылках часто приводит к ошибочному их представлению в системах цитирования.

2.4 Основные стандарты для предоставления ссылок в латинице на другие виды изданий.

2.4.1 Рекомендуется следующая схема описания монографии (книги, сборника):

- автор(ы) монографии;
- название монографии (транслитерация и курсив);
- [перевод названия монографии в квадратных скобках];
- выходные данные: место издания на английском языке — Moscow, St. Petersburg; издательство на английском языке, если это организация (Moscow St. Univ. Publ.), и транслитерация, если издательство имеет собственное название с указанием на английском, что это издательство: GEOTAR-Media Publ., Nauka Publ.;
- количество страниц в издании.

Пример: Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred [Dynamics of multiphase media]*. Moscow, Nauka Publ., 1987. Pt. 1, 464 p.

2.5 Примеры описаний литературных источников в латинице.

2.5.1 Описание статьи из электронного журнала:

Kontorovich A.E., Korzhubaev A.G., Eder L.V. [Forecast of global energy supply: Techniques, quantitative assessments, and practical conclusions]. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2006, no. 5. (In Russ.) Available at: <http://www.vipstd.ru/gim/content/view/90/278/>. (accessed 22.05.2012).

2.5.2 Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. [Experimental study of the strength of joints "steelcomposite"]. *Trudy 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., Mullagalina I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi" [Proc.*

6th Int. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"]. Moscow, 2007, pp. 267 – 272. (In Russian).

Нежелательно включать только переводное название конференции, так как оно при попытке найти эти материалы идентифицируется с большим трудом.

2.5.4 Описание переводной книги:

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. Vibration problems in engineering. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. Kolebaniia v inzhenernom dele. Moscow, 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 незначащих формулировок.

Сокращенные и условные обозначения, кроме общеупотребительных, применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме.

В аннотации не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста аннотации определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), должен быть от 100 до 250 слов.

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ТЕКСТА

4.1 Редактор – MS Word.

4.2 Шрифт: Times New Roman, размер шрифта – 14, цвет – черный, начертание – обычное. Интервал между строками – 1,5; абзацный отступ – 1,25; ориентация – книжная; поля – 2 см со всех сторон. Текст должен быть выровнен по ширине. Красные строки обязательны.

4.3 Разделы статьи (кроме «Введение» и «Выводы») нумеруются арабскими цифрами. Допускается не нумеровать разделы (заголовки), служащие лишь для акцентирования тем в небольшом тексте.

4.4 Нумерация пунктов и в списках — арабскими цифрами.

4.5 Ссылки на источник в списке литературы нумеруются арабскими цифрами и приводятся в тексте в квадратных скобках.

4.6 Подстрочные примечания (вынесенные из основного текста в конец полосы) связываются с текстом сносками в виде арабских цифр и нумеруются в пределах каждой отдельной полосы (страницы). Цифры набираются на верхнюю линию шрифта.

4.7 Кавычки оформляются символами «...» для наименований, набранных кириллицей, и символами "..." для наименований, набранных латиницей.

5. ОФОРМЛЕНИЕ ФОРМУЛ, ТАБЛИЦ И ИЛЛЮСТРАЦИЙ

5.1 Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation 3.0 (MS Word) или символьным шрифтом. Вставки формул в виде картинок любого формата не допускаются. Размер кегля для формул – 12. Формулы, если их больше одной и если на них есть ссылки, нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках по правому краю полосы.

5.2 Таблицы, если их больше одной, должны быть пронумерованы. Таблицы должны иметь заголовок, если только они не следуют сразу за текстом, однозначно определяющим их содержание. Номер таблицы и заголовок размещаются над таблицей. Таблицы должны быть выполнены в MS Excel или MS Word и встроены в текст статьи. Вставка таблиц в виде картинок любого формата не допускается. Размер кегля для таблиц – 11.

5.3 Иллюстрации (рисунки), если их больше одной (одного), должны быть пронумерованы и иметь подпись (если только содержание иллюстрации не понятно однозначно из предшествующего текста). Графические и фотоматериалы должны быть представлены в форматах JPEG, TIFF, быть качественными и иметь разрешение не менее 300 dpi.

6. РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ СТАТЕЙ

6.1 Текст статьи в электронном виде следует направлять непосредственно в научно-исследовательский отдел Главного управления Регистра (ГУР) на имя главного редактора журнала.

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 в научно-исследовательский отдел 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. 50/51

Редакционная коллегия журнала

Редактор *А.В. Спиленко*
Компьютерная верстка *С.С. Лазарева*
Дизайн концепции *М.В. Батракова*

Подписано в печать 29.06.18. 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/