

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

ПОЛЯРНАЯ МЕХАНИКА

**Сборник докладов
VI Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием**

23-24 марта 2023 г.

Нижний Новгород 2023

УДК 629+624+517+519.6+551
ББК 22.16+22.25+26.22+38+39
П 546

П 546 Полярная механика: сб. докл. VI Всероссийской научно-практ. конф. с международным участием; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексева. – Нижний Новгород, 2023. – 175 с.

Сборник содержит тексты докладов VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Полярная механика», проходившей в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексева 23-24 марта 2023 г.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ:

А.А. Куркин (председатель, НГТУ), **И.Л. Благовидова** (ЦКБ «Коралл»),
А.Т. Беккер (ДВФУ), **С.В. Головин** (ИГиЛ СО РАН),
И.Н. Ельцов (ИНГГ СО РАН), **А.Е. Жуков** (ответственный секретарь, НГТУ),
Н.В. Калинина (НГТУ), **М.В. Китаев** (ДВФУ),
В.М. Козин (ИМиМ ДВО РАН), **Н.В. Никитин** (СПбГМТУ),
К.Е. Сазонов (КГНЦ), **О.Е. Суров** (ДВФУ), **А.В. Тумасов** (НГТУ),
С.Н. Хрунков (главный редактор, НГТУ)

Рецензенты:

доктор технических наук *А.А. Миронов*,
доктор физико-математических наук *С.И. Герасимов*

УДК 629+624+517+519.6+551
ББК 22.16+22.25+26.22+38+39

ISBN 978-5-502-01740-4

© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексева, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	5
Сазонов К.Е. Возникновение морской ледотехники в России. В.И. Арнольд-Алябьев...	5
Калинина Н.В. Научная школа «Корабельная ледотехника» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева	10
Секция 1. СУДОСТРОЕНИЕ, ЛЕДОВАЯ ХОДКОСТЬ СУДОВ И НАВИГАЦИЯ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ.....	16
Кочнев Ю.А., Роннов Е.П. Вопросы устойчивости судов, работающих при отрицательных температурах.....	16
Балашов М.Г. Ледокольная насадка для самостоятельного перемещения судов во льдах.....	21
Морозов В.П., Гладышев Н.С. Особенности гибких ограждений амфибийных экранопланов.....	27
Добродеев А.А. Особенности измерений ледового сопротивления судов в ходе модельных испытаний.....	33
Романов А.Д., Романова Е.А., Макаров В.С. Особенности подледной навигации в условиях Арктики.....	39
Москвичева Ю.А., Зуева Е.В. Специальные спасательные средства на воздушной подушке.....	42
Ларина Е.М. Оптимизация основных проектных характеристик транспортных судов активного арктического плавания.....	45
Касьянов В.С., Родькина А.В., Крамарь В.А. Дизайн-проект универсального подводного аппарата.....	50
Москвичева Ю.А., Зуева Е.В. Анализ экспериментальных исследований по функционированию ледокольных платформ на воздушной подушке.....	53
Булатов В.В., Владимиров И.Ю., Ильичева М.А. Дальние поля на поверхности раздела ледяного покрова и глубокой жидкости от движущегося источника.....	58
Секция 2. ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АРКТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ.....	62
Родькина А.В., Крамарь В.А., Иванова О.А. Предпосылки создания методики исследования потенциала судостроительных сталей в районе переменной ватерлинии для океанотехнических объектов, эксплуатирующихся в условиях чистой воды и льда	62
Иванова О.А., Благовидова И.Л. Формирование комплекса решений при проектировании технических средств, осуществляющих морское разведочное бурение в ледовых условиях.....	66
Фальмонов Е.В. Инновационные решения в области судостроения и судоходства для замерзающих рек и Арктики.....	71

Веселов В.А., Китаев М.В., Суров О.Э. Методика испытаний ледостойких защитных покрытий.....	82
Большев А.С., Фролов С.А., Харсеев А.Е., Розов И.О. Расчет прочности основания арктической ветроэнергетической установки при действии экстремальных внешних нагрузок.....	87
Чемакина Т.Л., Ефремова Л.С. Влияние геодинамических факторов района эксплуатации на аварийность стационарных морских сооружений.....	98
Романов А.Д., Романова Е.А., Макаров В.С. Разработка воздухонезависимой энергетической установки для необитаемого подводного аппарата.....	102
Малюк В.В. Долговечность бетона в агрессивных средах класса XF4. Проектирование и прогнозирование.....	105
Вириц Р.А., Ларионова В.Н., Токарева М.А. Численное моделирование фильтрации жидкости в пороупругом льду.....	111
Кокоулина М.В., Куркина О.Е., Куркин А.А. Особенности гидрологических условий в Охотском море, влияющих на характеристики внутренних волн.....	115
Секция 3. ЛЕДОВАЯ МЕХАНИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	121
Козин В.М., Верещагин В.Ю. Исследования напряженно-деформированного состояния заснеженного ледяного покрова от действия движущейся нагрузки.....	121
Филимонов М.Ю., Ваганова Н.А. Моделирование распространения нестационарных тепловых полей на кустовых площадках северных нефтегазовых месторождений.....	126
Стурова И.В., Ткачева Л.А. Поведение плавающего ледяного покрова при движении внешней нагрузки и наличии сдвигового течения в жидкости.....	129
Гусева Е.К., Голубев В.И., Муратов М.В., Петров И.Б. Создание моделей для численного решения прямых задач сейсморазведки в условиях вечной мерзлоты.....	135
Голубев В.И., Епифанов В.П., Гусева Е.К., Петров И.Б., Халид В. Численные и экспериментальные исследования реологии льда при динамическом воздействии.....	141
Конов Д.С., Муратов М.В., Гусева Е.К., Петров И.Б. Численное исследование тающего ледового острова на устойчивость под воздействием механической нагрузки.....	145
Добродеев А.А., Родионов Н.Ю., Сазонов К.Е. Новые виды модельного эксперимента, разработанные в ледовом бассейне Крыловского центра.....	150
Исаева Е.С., Уварова Т.Э. Обзор методик по определению толщины льда.....	155
Большедворова М.А., Уварова Т.Э. Методы повышения прочности и износостойкости льда.....	159
Васильев Н.К. Ледяные композиты. Исследования и достижения последних лет.....	163
Глазырин В.П., Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н. Исследование поведения льда при ударных и взрывных нагрузках.....	169
АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....	174

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 629.12; 656.61; 620.1.08

DOI: 10.46960/polmech_2023_5

К.Е. Сазонов^{1,2}

ВОЗНИКНОВЕНИЕ МОРСКОЙ ЛЕДОТЕХНИКИ В РОССИИ. В.И. АРНОЛЬД-АЛЯБЬЕВ

Крыловский государственный научный центр, г. Санкт-Петербург,
²Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
г. Санкт-Петербург

Рассмотрена жизнь и деятельность одного из пионеров развития морской ледотехники в России – Владимира Ивановича Арнольд-Алябьева (1896–1942). На основании анализа результатов архивных поисков и разрозненных библиографических источников предпринята попытка восстановить основные этапы деятельности этого ученого. Показано, что занявшись изучением ледяного покрова Балтийского моря в связи с потребностью обеспечения зимней навигации в Ленинградском порту, В.И. Арнольд-Алябьев постепенно перешел к изучению морского льда как материала, особенностей формирования ледяного покрова и выявлению закономерностей в его развитии. Показан вклад В.И. Арнольд-Алябьева в различные разделы современной морской ледотехники.

Ключевые слова: В.И. Арнольд-Алябьев, ледяной покров, ледокол, толщина льда, прочность льда.

Введение

Морская ледотехника – новая техническая дисциплина, описывающая особенности взаимодействия технических объектов со льдом. Ее развитие началось с созданием первых ледоколов во второй половине XIX в. и продолжается до сих пор. Первые научные труды, обобщающие результаты наблюдения за работой ледоколов, были опубликованы российскими учеными и инженерами В.И. Афонасьевым, Р.И. Рунбергом, С.О. Макаровым и А.Н. Крыловым еще до Октябрьской революции.

После революции всплеск всеобщего интереса к арктическим исследованиям, включая морскую ледотехнику, произошел в связи с деятельностью Главного управления Северного морского пути, созданного 17 декабря 1932 г. Однако развитие морской ледотехники активно продолжалось в 20-е годы прошлого века, в том числе и благодаря деятельности В.И. Арнольда-Алябьева. Работы в области ледотехники, преимущественно морской, он активно продолжал до самой смерти в блокадном Ленинграде в 1942 г.

В данной работе авторы на основании рассмотрения литературных источников и некоторых архивных данных делают попытку рассмотреть вклад В.И. Арнольда-Алябьева в морскую ледотехнику, а также попытаться восстановить его биографию.

Основные этапы жизни В.И. Арнольда-Алябьева

Владимир Иванович Арнольд родился 5 мая 1896 г. Его родителями были коллежский секретарь Иван Николаевич Арнольд и его жена Александра Николаевна. Запись о рождении В.И. Арнольда была сделана в метрической книге Сиворицкой Никольской церкви Царско-сельского уезда Санкт-Петербургской губернии (ЦГА СПб Ф.Р-2881. О.3. Д.64. Л.2).

Отец В.И. Арнольда Иван Николаевич был известным ученым ихтиологом [1]. Анализ трудов В.И. Арнольда-Алябьева показывает, что он в течение всей своей жизни поддерживал хорошие отношения с отцом, привлекая отца к своим работам по льду, а также использовал в своих работах фотографии, сделанные отцом в его экспедициях.

В.И. Арнольд с 20.06.1906 по 31.05.1914 гг. прошел полный восьмиклассный курс в гимназии им. Александра I и получил аттестат зрелости (ЦГА СПб Ф.Р-2881. О.3. Д.64. Л.5). В 1914 году он подает прошение о зачислении его в число студентов Санкт-Петербургского университета на математическое отделение физико-механического факультета. К этому заявлению были приложены фотографии, которые на данный момент являются единственными изображениями В.И. Арнольда. На заявлении В.И. Арнольда стоит печать, подтверждающая его зачисление в университет (ЦГИА СПб Ф.14 О.3 Д.65135.Л.3,4). Однако в университете В.И. Арнольд учился не долго. Начавшаяся Первая мировая война вызвала прилив патриотических настроений практически во всех слоях российского общества. Уже в 16 октября 1914 г. он пишет заявление в ректорат с просьбой передать его документы в Николаевское военное инженерное училище, однако, по неизвестным нам причинам, он не был принят в это училище. 5 декабря 1914 г. В.И. Арнольд подает прошение об исключении из числа студентов университета и передаче его документов в Михайловское артиллерийское училище, куда он был зачислен юнкером в декабре (ЦГИА СПб Ф.14 О.3 Д.65135.Л.28).

Далее в биографии В.И. Арнольда-Алябьева практически отсутствуют точно установленные факты. Мы можем делать лишь некоторые предположения. С началом войны все военные училища России перешли на укороченный восьмимесячный курс обучения. Поэтому в середине 1915 г. В.И. Арнольд должен был получить чин прапорщика и назначение в воинскую часть, где находился В.И. Арнольд с 1915 по 1918 гг. нам не известно.

В конце 1918 г. он подает прошение о восстановлении в числе студентов университета. Однако в списках студентов он не значится. В своем отзыве на кандидатскую диссертацию В.И. Арнольда-Алябьева почетный академик Ю.М. Шокальский указывает, что с 1918 г. «В.И. Арнольд-Алябьев работал по технической линии, главным образом по железно-дорожной, что ему дало знакомство с разными механизмами, между прочим, тогда же им было издано руководство по кислородно-ацетиленовой сварке металлов». Тогда же он подал прошение о зачислении в число студентов Института инженеров путей сообщения (ЦГА СПб Ф.Р-2881. О.3. Д.64. Л.1). Можно предположить, что необходимость зарабатывать на жизнь не дала возможность В.И. Арнольду учиться ни в университете, ни ИИПС, тем более, что в конце 1919 г. он женился на Вере Ивановне Лебедевой (ЦГА СПб, Ф.6143. О.1. Д.1888, Л.116). Скорее всего, он посещал занятия как вольнослушающий. Учитывая его дальнейшую специализацию можно также предположить, что он посещал занятия в Географическом институте, созданном 1 сентября 1918 г. Именно в этом институте была кафедра гидрологии суши и моря.

На рубеже 20-х годов XX в. В.И. Арнольд принял двойную фамилию. Так, в книге [1], посвященной навигации 1922-1923 гг., во введении он упоминается под двойной фамилией, а в журнале заседаний комиссии по изучению ледокольной компании в Ленинградском порту от 27 ноября 1923 г он указан под обычной фамилией.

В 1921–1922 гг. В.И. Арнольд-Алябьев руководит исследовательской партией, которая по заданию Российского гидрологического института проводит описание озер Кургаловского полуострова. Это была его первая научная работа, описание которой было представлено в нескольких публикациях, наиболее значимой из них является работа [2]. При выполнении этих изысканий Арнольд-Алябьев проявил себя как вполне сложившийся исследователь, обладающий умением организовывать и руководить крупными работами. Анализ опубликованных им на эту тему работ демонстрирует обширные знания и компетентность автора (судя по ссылкам в работах).

Во время исследования озер Кургаловского полуострова произошло знакомство В.И. Арнольда-Алябьева с морским льдом, который скоро станет основным объектом его научных исследований. Зимой 1922 г. исследовательской партией было проведено изучение и описание морского льда у побережья полуострова в зоне шириной до 10 миль. Результаты были изложены в работе [3].

В самом начале 20-х годов прошлого века начинается работа В.И. Арнольд-Алябьева в

Ленинградском морском порту по обеспечению зимней навигации, которая продолжалась примерно 10 лет, возможно и более. Он руководил гидрометеорологическими и ледовыми наблюдениями. Организованная им структура была довольно тесно связана с Главной геофизической обсерваторией и подчинялась различным гидрометеорологическим ведомствам.

В работах Арнольда-Алябьева можно выделить три основные темы: физико-географическое описание ледяного покрова, в основном Балтийского моря; изучение особенностей работы ледоколов во льдах и обеспечение их безопасности и изучение физико-механических свойств льда.

Физико-географическому описанию льда посвящена значительная часть публикаций В.И. Арнольд-Алябьева в 20-х годах прошлого века. Итог этой деятельности был подведен в докладе, прочитанном на II Всесоюзном гидрологическом съезде в 1929 г. [4, 5]. В результате этих работ были предложены способы описания ледяного покрова, разработаны опросники для наблюдателей и прочее. Многие из разработанных тогда используются до сих пор. Большое внимание Арнольд-Алябьев уделял организационным вопросам, связанным с получением оперативной информации о состоянии ледяного покрова Балтийского моря. Такую информацию можно было получить только при взаимной заинтересованности всех Балтийских стран, поэтому налаживанию международных связей им уделялось большое внимание. Тогда же им был предложен специальный код для передачи сообщений [6].

В 30-х годах прошлого века в сфере интересов В.И. Арнольд-Алябьева оказались и арктические моря. Он принял участие в ряде арктических экспедиций. В этих экспедициях он исследовал, в том числе, и строение ледяного покрова полярных морей. Эти исследования нашли отражение в его работах [7, 8]. Он предложил способ определения толщины ледяного покрова с борта судна при его движении и разработал устройство для его осуществления (а.с. № 52860, 1938). Также он занимался измерениями торосистых образований [9].

Ряд статей посвящен описанию работы ледоколов. Наибольший интерес представляют работы [10, 11]. В первой из указанных работ подробно описаны способы работы ледоколов во льдах, проанализировано влияние формы корпуса на ледовые качества, рассмотрены конструктивные особенности ледоколов, а также высказаны соображения об оценке эффективности ледоколов. Во второй работе проведен разбор ледовых аварий в Финском заливе. Особое внимание автор уделил воздействию ледовых сжатий. Он предложил расчетную схему, в которой попытался учесть различие в механических свойствах льда по толщине, обусловленные изменением температуры слоев льда по вертикали.

Наибольший интерес представляет деятельность В.И. Арнольд-Алябьева по изучению физико-механических свойств льда. Изучения прочностных свойств льда были им начаты еще в 1923 г., в дальнейшем он проводил такие исследования практически всю жизнь. Б.П. Вейнберг в работе [12] отмечал, что львиная доля экспериментов по определению прочностных свойств льда, выполненных до 1936 г., осуществлена Арнольдом-Алябьевым. Результаты этих исследований представлены в работах [13, 14] и др. Арнольд-Алябьев изучал также влияние различных факторов на прочность льда, например, химического состава [15]. Особо необходимо упомянуть об исследовании влияния пористости льда на его свойства. Для изучения влияния этого фактора им был разработан специальный прибор и методика его использования, позволяющие в экспедиционных условиях измерять пористость льда [16]. Этот прибор получил довольно широкое распространение, например, он использовался в исследованиях на пароходе «Челюскин», в настоящее время этот прибор также находит применение.

В.И. Арнольд-Алябьев был пионером в исследованиях трения льда по стали [17]. Он исследовал трение кубических образцов льда по судовой стали и получил значения коэффициентов трения покоя и при движении. Показал большое влияние на величину коэффициента наличия лакокрасочного покрытия на судовой поверхности. Эта работа вызвала определенный интерес и была переведена на английский язык. Можно считать, что с нее начались многочисленные экспериментальные и теоретические исследования трения льда по различным поверхностям.

В.И. Арнольд-Алябьев много работал в экспедиционных условиях. Сначала на Балтийском море, а затем и в Арктике. Имеется информация о нескольких его арктических экспедициях. В августе 1929 г. и в мае-июне 1930 г. он ходил в Арктику на исследовательском судне «Персей». В одной из этих экспедиций изучалось воздействие термита (порошкообразная смесь алюминия с оксидами железа, при сжигании выделяет большое количество тепла) на лед.

В феврале-марте 1932 г. он участвовал в экспедиции на ледоколе «Красин». В этой экспедиции им были выполнены исследования: прочности льда на перелом (74 испытания); рыхлости и солености. Для определения химического состава льда было взято около 40 проб и 6 проб механических включений в лед, которые привезены для анализа в лабораторных условиях. Кроме этого, были проведены попутные ледовые наблюдения для составления карты профилей льда по ходу ледокола «Красин» и велись метеорологические наблюдения.

Наиболее длительная экспедиция была выполнена на ледокольном пароходе «Малыгин» в июле-сентябре 1934 г. В этой экспедиции В.И. Арнольд-Алябьев был руководителем. Результаты исследований изложены в работе [8].

Летом 1939 г. В.И. Арнольд-Алябьев становится кандидатом географических наук. Отзывы на его диссертацию прислали такие известные ученые, как Ю.М. Шокальский, Б.П. Вейнберг и В.В. Тимонов. В своем отзыве почетный академик Ю.М. Шокальский, подводя итог деятельности Арнольд-Алябьева, отмечал его: «...постоянное, энергичное стремление к постановке дела исследования ледового покрова настоящим научным путем. Во многих частностях работ автору несомненно принадлежит почин дела» (ЦГА СПб Ф. Р-4331 Оп.30 Д.25).

Последнее место работы В.И. Арнольд-Алябьева – доцент географического факультета Ленинградского педагогического института. Он преподавал гидрологию. Однако пока еще не удалось выяснить причину смены им места работы, но он продолжал заниматься ледовыми проблемами. Заключительным аккордом его деятельности в области морской ледотехники стало участие в коллективной монографии [18], которая является фундаментальной сводкой результатов исследований до 1940 г. В ней им написана глава «Формы образования ледяного покрова водоемов» и параграф «Таяние ледяного покрова».

Заключение

В столь краткой работе невозможно достаточно полно изложить все аспекты жизни и творчества В.И. Арнольд-Алябьева. Автор старался описать лишь наиболее важные, по его мнению, моменты. Подводя итог, можно сделать вывод о том, что Арнольд-Алябьев является одним из создателей морской ледотехники в России. Даже приведенный выше краткий обзор его работ показывает, что им в той или иной степени были затронуты или впервые поставлены практически все вопросы, решением которых морская ледотехника занимается до сих пор.

Библиографический список

1. Изучение ледокольного дела в морских портах СССР // Труды Научно-технического комитета НКПС. – 1925. – Вып. V. – 215 с.
2. Арнольд-Алябьев, В.И. Опыт описания Кургаловского полуострова // Известия Российского географического общества, 1924. Т. LVI. – С. 5-54.
3. Арнольд-Алябьев, В.И. К вопросу о ледяном режиме Финского залива и исследование его в зиму 1921–1922 года. Записки по гидрографии, 1923. Т. XLVII. – С. 197-207.
4. Арнольд-Алябьев, В.И. Результаты пятилетних ледовых и гидрологических исследований с русских ледоколов в Финском заливе // Труды II Всесоюзного гидрологического съезда, 1929.
5. Арнольд-Алябьев, В.И. Ледовые условия Балтийского моря и их изучение // Труды Ленинградского отделения Всесоюзного научного и инженерного общества водного транспорта, 1938. Т. II – III. – С. 85-116.

6. Арнольд-Алябьев, В.И. Объединенный шифр для ледовых извещений Балтийского моря. Записки по гидрографии, 1926. Т. 51. – С. 281-289.
7. Арнольд-Алябьев, В.И. Об измерении толщины льда с борта на ходу // Метеорология и гидрология, 1938. – № 11/12.
8. Арнольд-Алябьев, В.И. Мощность, строение и полостность льда Карского моря по данным экспедиции на л/п «Малыгин» в 1934 году // Труды Арктического научно-исследовательского института, 1938. – Т. 110. – С. 57-81.
9. Арнольд-Алябьев, В.И. Об измерении торосов // Записки по гидрографии / В.И. Арнольд-Алябьев, 1937. – № 1. – С. 93-97.
10. Арнольд-Алябьев, В.И. Ледоколы, их работа и особенности // Морской сборник. – 1926, №2. – С. 49-78.
11. Арнольд-Алябьев, В.И. Ледовые аварии в Балтийском море и борьба с ними // Морской сборник. – 1928. – № 4. – С. 162-181.
12. Вейнберг, Б.П. Изучение свойств льда в свете освоения трассы Северного морского пути // Бюллетень Арктического института. – 1936. – №8-9. – С. 369-375.
13. Арнольд-Алябьев, В.И. Исследование прочности льда Финского залива в 1923, 1927 и 1928 гг. // Известия Главной геофизической обсерватории. – 1929. Вып. I.
14. Арнольд-Алябьев, В.И. О прочности льда Баренцева и Карского морей // Проблемы Арктики. – 1939. – № 6. – С. 21-30.
15. Арнольд-Алябьев, В.И. К вопросу о химизме льда Финского залива в связи с изучением его прочности // Известия института физико-химического анализа АН СССР. – 1933. – Т. IV.
16. Арнольд-Алябьев, В.И. Определение полостей во льду и приборы для этой цели // Известия Главной геофизической обсерватории. – 1930. – Вып. 4.
17. Арнольд-Алябьев, В.И. Трение скольжения льда по стали // Журнал технической физики. – 1937. – Т. 7. – Вып. 8.
18. Вейнберг, Б.П. Лед / Б.П. Вейнберг. – М.-Л.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1940. – 524 с.

УДК 629.124

DOI: 10.46960/polmech_2023_10

Н.В. Калинина

**НАУЧНАЯ ШКОЛА «КОРАБЕЛЬНАЯ ЛЕДОТЕХНИКА»
НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА им. Р.Е.АЛЕКСЕЕВА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород

Приведены обстоятельства, способствовавшие зарождению Нижегородской школы корабельной ледотехники, кратко описаны основные этапы, направления и результаты теоретических и экспериментальных исследований. Указаны основные направления научной работы школы в настоящее время.

Ключевые слова: корабельная ледотехника, теоретические и экспериментальные исследования разрушения льда, продление навигации, взаимодействие судов со льдом, ледовая ходкость судов, ледовый опытовый бассейн.

Научная школа, связанная с исследованиями ледопроеходимости судов и продлением навигации, зародилась в НГТУ в 70-е годы XX в. Этому способствовали следующие обстоятельства:

1) активное освоение Северного морского пути, строительство новых (в том числе атомных) ледоколов, прогнозируемое освоение нефтегазовых месторождений на Арктическом шельфе;

2) увеличивающиеся объемы перевозок на речном транспорте требовали продления навигации на замерзающих водных путях.

Это потребовало новых подходов к проектированию и эксплуатации судов ледового плавания, а также новых научных исследований в этой области.

Первой «ласточкой» исследований ледопроеходимости речных ледоколов была работа участника ВОВ, сотрудника горьковского политехнического института М.С. Яковлева, защитившего кандидатскую диссертацию в 1963 г. Дальнейшие научные исследования вопросов ледовой ходкости завершились защитой кандидатских диссертаций в 1969 г. В.А. Зуевым и в 1973 г. М. Е. Рабиновичем (рис. 1, рис. 2, рис. 3).



Рис. 1. М.С. Яковлев



Рис. 2. В.А. Зуев



Рис. 3. М.Е. Рабинович

Стремительное развитие научных исследований и опытно-конструкторских работ в области корабельной ледотехники началось с 1976 г. и обусловлено большим объемом хозяйственных договоров с предприятиями судостроительной отрасли. В это время под руководством В.А. Зуева активно начали свою научную деятельность выпускники кораблестроительного факультета Е.М. Грамузов и А.В. Саватеев, выпускник Комсомольского-на-Амуре политехнического института Ю. А. Двойченко. В 1980 году В.А. Зуев был избран заведующим ка-

федрой «Судостроение» Политехнического института и возглавил Нижегородскую школу ледотехники.

Работы в области ледотехники были сформулированы в виде самостоятельных и достаточно мощных взаимосвязанных направлений, без развития которых всю проблему охватить было достаточно сложно.

1. Теоретические и экспериментальные исследования разрушения ледяного покрова.

Несмотря на значительные успехи в развитии исследований по напряженно деформированному состоянию конструкций и механике разрушения, вопросы о проломе льда при взаимодействии его с судами не были решены. Сотрудниками ГПИ были проведены многочисленные опыты на моделях и в полевых условиях, выполнены теоретические исследования, в результате которых были разработаны основы теории разрушения льда.

2. Теоретические и экспериментальные исследования физического моделирования взаимодействия судов со льдом.

В этом направлении велись поиски новых материалов для имитации битого и сплошного льда для проведения модельных испытаний в опытовых ледовых бассейнах. Разработана новая технология проведения испытаний и пересчета результатов на натуре. В это время на территории политехнического института был спроектирован и построен ледовый опытовый бассейн, признанный Госкомитетом по науке и технике уникальным оборудованием (БЛ №28 от 08.07.1997), где проводились испытания моделей судов ледового плавания.

3. Разработка основ теории проектирования ледокольных судов на воздушной подушке.

В 1981 году впервые в нашей стране на кафедре «Судостроение» начались научные исследования принципиально новых способов разрушения льда и продления навигации с использованием технологий движения судов на воздушной подушке (методы изгибно-гравитационного резонанса и давления).

В это время ЦНИИ Морского флота (г. Ленинград) заказало НГТУ большую опытно-конструкторскую работу по исследованию, проектированию, постройке и испытаниям натурального макета ледокольной платформы на воздушной подушке.

Для выполнения поставленных задач на кафедру было принято новое пополнение выпускников Кораблестроительного факультета: В.М. Рыбаков, В. В. Князьков, В. Б. Беляков, М. Б. Дехтяр и другие, высокий творческий потенциал и энтузиазм которых, вместе со «старожилыми» Е. М. Грамузовым, Ю. А. Двойченко и А. В. Саватеевым, оказали неоценимый вклад в развитие научных исследований.

Были проведены многочисленные модельные испытания в ледовом бассейне, часть испытаний крупномасштабной модели была проведена на льду реки Волга (рис. 4), контрольные прогонки модели были проведены в ледовом бассейне ААНИИ.



Рис. 4. Испытания ледокольной платформы на воздушной подушке

Натурный макет ЛПВП был построен в Горьковском филиале №1 ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. Совместные испытания на Горьковском водохранилище подтвердили высокую эффективность нового способа разрушения льда, хотя и выявили ряд конструктивных недостатков.

Работа по проектированию, строительству и испытаниям ледокольной платформы на воздушной подушке была отмечена золотой медалью ВДНХ (В.А. Зуев, А.В. Саватеев, С. Г. Мохонько).

Положительный результат исследований разрушения ледяного покрова платформами на воздушной подушке послужил выполнению новой ОКР для НГТУ по проектированию и созданию промышленного образца ЛПВП (Заказчик - ЦНИИ Морского флота). Техническое предложение разработала кафедра «Судостроение», технический проект создан КБ «Вымпел» совместно с кафедрой. Строительство опытного образца проводил Октябрьский судостроительно – судоремонтный завод. Испытания ЛПВП – 107П «Горос» проводились в 1992–1993 гг. и были признаны успешными. Эта платформа была экспонатом международной выставки «Великие реки» г. Н. Новгород в 1993 г. На ледокольную платформу этого проекта (ЛПВП -107 П) получен патент на промышленный образец.

Теоретические и экспериментальные работы дали основы теории взаимодействия судов на воздушной подушке со льдом и их проектирования. Получено более 15 патентов и авторских свидетельств РФ.

4. Разработка способов, устройств и систем разрушения ледяного покрова с подводных объектов.

Проведены модельные испытания погружения и всплытия энергетического модуля во льдах. По результатам работы получено три патента и авторское свидетельство.

5. Исследование взаимодействия ледоколов и судов ледового плавания со льдом, разработка методов оптимизации проектных характеристик ледоколов, оптимизация тактики движения ледоколов в тяжелых льдах.

Разработаны методика по выбору оптимальных проектных характеристик и формы корпуса ледоколов, методика по выбору оптимальной тактики движения ледоколов набегам в тяжелых ледовых условиях, когда толщина ледяного покрова превышает предельную толщину, преодолеваемую непрерывным ходом. Оптимальная тактика движения ледоколов в суровых Арктических условиях позволяет автоматизировать труд судоводителя и одновременно снизить эксплуатационные затраты. Получен Евразийский патент и разработки отмечены медалями на Всероссийской и Международной выставках.

Сотрудники кафедры «Судостроение» принимали участие в различных целевых программах Правительства РФ, Министерства РФ, связанных с проектированием и эксплуатацией судов ледового плавания. В целевой комплексной программе Министерства высшего образования «Лед» кафедра «Судостроение» была определена головной, а В.А. Зуев – руководителем всей программы. В программе, кроме НГТУ, принимали участие Волжская государственная академия водного транспорта, Дальневосточный, Комсомольский-на-Амуре, Калининградский и Санкт-Петербургский морской технический университеты.

В период с 1978 по 1995 гг. в НГТУ регулярно выпускался межвузовский сборник научных трудов «Теория, прочность и проектирование судов, плавающих во льдах» (Ответственный редактор – В.А. Зуев). В сборнике публиковали свои статьи сотрудники перечисленных ранее университетов, а также ЦНИИ Морского флота, АНИИ, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова.

В 1992 г. Госкомитет по делам науки высшей школы организовал научное опытно-конструкторское бюро при НГТУ (Постановление №13 от 20.01.1992).

Приказом комитета (№29-4 от 26.03.1992) руководителем НОКБ назначен заведующий кафедрой «Судостроение» В.А. Зуев. Позднее НОКБ изменило организационную форму и стало структурным подразделением НГТУ – Научное опытно – конструкторское бюро «Лед –НН» (НОКБ «Лед-НН»).

Основные хозяйственные и госбюджетные работы НОКБ «Лед-НН» за последние 10 лет были выполнены: по экспериментальным модельным исследованиям сопротивления в ледовых условиях различных судов и ледоколов, морских ледостойких стационарных плат-

форм; разработке технологии разрушения льда с использованием платформ на воздушной подушке.

Успешно реализованы проекты по грантам Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ):

- №19-08-00820 «Разработка способа физического моделирования разрушения ледяного покрова с применением модели льда из гранул полиэтилена высокого давления» (2019-2021);
- грант РФФИ и Государственного фонда естественных наук Китая №20-508-53049/20 «Влияние движущейся с малой скоростью системы распределенных давлений на разрушение ледяного покрова» (2020-2022).

По результатам многолетних научных исследований, по ледовой тематике защищены 22 кандидатские диссертации и три докторские диссертации: В. М. Козиным (1993 г.); В. А. Зуевым (1996 г.), Е. М. Грамузовым (2008 г.).

По результатам исследований, проведенных участниками научной школы «Корабельная ледотехника», опубликовано около 400 работ, в том числе монографии:

- Зуев В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. –Л.: Судостроение, 1986. – 207 с.
- Зуев, В.А. Использование судов на воздушной подушке для разрушения ледяного покрова / В.А. Зуев, В.А.Козин. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1988. – 128 с.
- Зуев, В.А. Разрушение ледяного покрова / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, Ю.А. Двойченко // НТО им. акад. А.Н. Крылова. Волжско-камское межобл. правление: матер. по обмену опытом., 198. Вып. 2.– С. 79.
- Ионов, Б.П. Ледовая ходкость судна / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.
- Козин, В. М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова. Изобретения и эксперименты / В. М.Козин. – М., 2007. – 355 с.
- Ионов, Б.П. Проектирование ледоколов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов, В.А. Зуев. – СПб.: Судостроение, 2013. – 512 с.

За время работы школы было получено более 20 патентов и авторских свидетельств.

В настоящее время **основные направления научной работы Нижегородской ледотехники:**

- разработка методов и технологий проведения модельных испытаний в ледовом бассейне и пересчета результатов испытаний на натуре;
- разработка новых материалов и технологий физического моделирования взаимодействия судов со льдом при модельных испытаниях;
- разработка основ теории проектирования ледокольных судов на воздушной подушке;
- проведение фундаментальных исследований разрушения ледяного покрова при действии вертикальных нагрузок;
- разработка математических моделей и пакетов прикладных программ взаимодействия судов со льдом в нестационарных условиях;
- исследование и проектирование ледокольных платформ на воздушной подушке;
- экспериментальные исследования ходкости ледоколов и судов ледового плавания в условиях продленной навигации.

В настоящее время сотрудники кафедры «Кораблестроение и авиационная техника» участвуют в программе стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» и исследования ведут в рамках стратегического проекта СП4 «Технологии проектирования высокоавтоматизированных наземных и водных транспортных средств» при поддержке гранта РНФ «Экспериментально-теоретическое исследование полуэмпирических моделей взаимодействия судов со льдом» № 22-19-00376.

На данный момент продолжается работа по моделированию взаимодействия судов с

ледяным покровом. Наиболее распространенными методами исследования ледовой ходкости судов являются модельный эксперимент и расчетные методики. Модельный эксперимент в опытовом ледовом бассейне остается актуальным. Трудности моделирования взаимодействия моделей судов с моделью льда общеизвестны. Постоянно ведутся поиски моделей сплошного и битого льда (рис. 5 – рис. 8), технологии проведения модельных испытаний и методы пересчета на натуру (рис. 9, рис. 10).



Рис. 5. Модельный лед в виде треугольных плиток полиэтилена



Рис. 6. Модельный лед в виде гранул полиэтилена

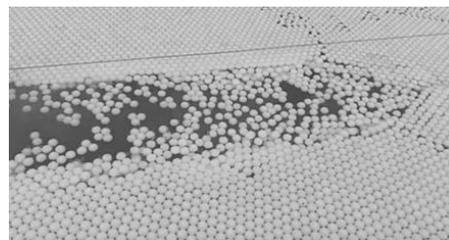


Рис. 7. Модельный лед композитной структуры



Рис. 8. Модельный лед естественной наморозки



Рис. 9. Испытания модели судна в битом льду



Рис. 10. Испытания модели ледокола в сплошном льду

Значительный объем работ, связанный с освоением Арктики, требует непрерывного расширения начатых научных исследований. Для этой цели в 2020 г. была запущена в работу новая морозильная камера, приобретено приборное оборудование, разработан проект модернизации ледового бассейна с динамометрической системой буксировки моделей.

Исследования и работы, проводимые по направлению «Корабельная ледотехника», тесно связаны с кораблестроительным образованием в НГТУ.

В настоящее время кафедра «Кораблестроение и авиационная техника» тесно сотрудничает с АО КБ «Вымпел» и АО ЦКБ «Лазурит». В АО КБ «Вымпел» организована базовая кафедра. С АО ЦКБ «Лазурит» заключен договор о сетевом взаимодействии. Прочные связи установлены со многими судостроительными предприятиями и организациями. Обмен сту-

дентами и стажерами, а также совместные научные исследования проходят с Харбинским Инженерным Университетом.

В НГТУ по инициативе АО КБ «Вымпел» и АО ЦКБ «Лазурит» по направлению 26.04.02 «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» с 2013 г. введена образовательная программа «Проектирование судов и морских сооружений, эксплуатирующихся в ледовых условиях». Магистры выполняют курсовые проекты, научно-исследовательскую работу и выпускные квалификационные работы, связанные с проектированием и эксплуатацией судов ледового плавания и ледоколов. Активно участвуют в качестве исполнителей в различных проектах и НИР кафедры.

В 2018 г. образовательная программа прошла внешнюю экспертизу на соответствие международным критериям европейского образования и выдан сертификат международного образца (рис. 11).

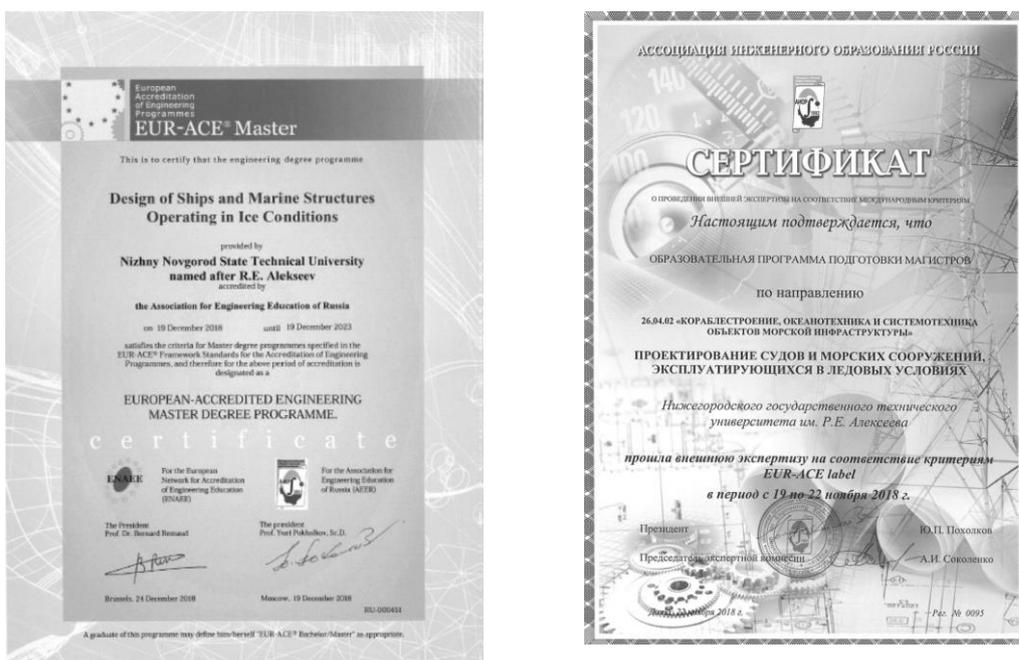


Рис. 11. Сертификат на соответствие международным критериям европейского образования и о прохождении внешней экспертизы

Имеющийся у коллектива научный задел позволит продолжить исследования и получить новые результаты в области корабельной ледотехники.

Секция 1**СУДОСТРОЕНИЕ, ЛЕДОВАЯ ХОДКОСТЬ СУДОВ
И НАВИГАЦИЯ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ**

УДК 629.12

DOI: 10.46960/polmech_2023_16

Ю.А. Кочнев, Е.П. Роннов**ВОПРОСЫ ОСТОЙЧИВОСТИ СУДОВ, РАБОТАЮЩИХ
ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Волжский государственный университет водного транспорта,
г. Нижний Новгород

В эксплуатации судно может попасть в условия, выходящие за пределы, нормируемые Правилами классификационных обществ. В таком случае потеря остойчивости может быть наиболее опасным явлением, развивающимся с высокой скоростью и имеющей наибольшие последствия с точки зрения ущерба как грузу, так и членам экипажа. Различные правила имеют в своем составе допущения и погрешности используемых методик, которые в совокупности с различными эксплуатационными факторами, например, ошибками судоводителя, повышают вероятность развития аварии. В статье предложена методика учета нормируемых и не нормируемых факторов, влияющих на остойчивость и показаны численные значения снижения уровней остойчивости при её использовании.

Ключевые слова: судно, остойчивость, нормируемые и ненормируемые факторы.

Правила классификационных обществ, осуществляющих свою деятельность на территории Российской Федерации, предъявляют свои требования к остойчивости судов без учета какого-либо запаса. То есть допускается равенство кренящих и допускаемых моментом у судов, поднадзорных Российскому классификационному обществу (РКО) [1], или равенство «площадей а и b» при проверке остойчивости по Правилам Регистра судоходства [2]. Подобная схема расчёта основного критерия остойчивости или критерия погоды, сконструированного отчасти искусственным образом, имеет место и в Правилах других классификационных обществ. Для судна в условиях шторма это означает, что допускается, в том числе, равенство фактических углов наклона в условиях качки и динамического действия ветра и угла опрокидывания или заливания.

Однако эксплуатация сопряжена с действием на судно ряда случайных внешних факторов, например, скорость порыва ветра будет выше, чем регламентировано Правилами, судно попадёт на волну, имеющую большую высоту, чем предусмотрено его классом, или судоводитель совершит недопустимый Правилами плавания манёвр в условиях качки, кроме того, ряд характеристик судна рассчитывается с оговорённой точностью. Всё это может привести к тому, что при изначально соответствующей Правилам остойчивости судна в предельном состоянии, в реальных условиях приведёт к развитию аварии. Таким образом, необходимо наличие некоторого запаса, который мог бы нивелировать перечисленные отклонения.

Анализ национальных и международных требований [4] к остойчивости показал, что во всех нормах отсутствует в прямом виде такой запас по основному критерию или критерию погоды. Однако косвенно в ряде требований он имеет место, а именно:

- требования к диаграмме статической остойчивости заключаются в нормировании минимального значения максимального плеча, угла заката и площади, ограниченной диаграммой, как раз в диапазоне рабочих опасных углов крена. То есть нормируется работа восстанавливающего момента, что обеспечивает определённый запас остойчивости судна, позволяющий судить о дальнейшем выполнении или невыполнении основного критерия и дополнительных требований;
- в дополнительных требованиях запас остойчивости определяется ограничением допустимых углов меньшими значениями по сравнению с действительными углами заливания;
- в Кодексе остойчивости судна в неповреждённом состоянии [3] говорится, что «...на всех этапах перевозки должен обеспечиваться достаточный запас остойчивости с учетом увеличения веса...»;
- в [2, 3] и в ряде других нормативных документах ограничивается допустимый угол по основному критерию, что по своей трактовке так же является требованием о необходимости запаса остойчивости.

Из всех перечисленных возможных запасов (или их отсутствия) в настоящее время учитывается только достаточный уровень остойчивости при возможном обледенении судна.

Анализируя действующие нормы Российского Классификационного Общества к грузовым судам класса М-СП, которые по своим характеристикам могут эксплуатироваться в условиях низких температур в северных морях России, можно выделить, так называемые, нормируемые факторы, то есть допустимые погрешности расчётных методик Правил РКО [1, 5], к которым относится:

- допущение не проводить опыт кренования при нормируемых изменениях значений водоизмещения порожнем и центра тяжести в указанных пределах;
- допущение не корректировать результаты проверки остойчивости при изменении водоизмещения порожнем и центра тяжести в указанных пределах при модернизации и ремонте судна;
- допустимая точность проведения опыта кренования;
- допущение не учитывать малые цистерны в корпусе судна;
- допущение не учитывать остатки жидких грузов.

Следует отметить, что, на наш взгляд, наличие в Правилах этих допущений оправдано, так как каждый из них, как показали расчёты, в отдельности несущественно влияет на остойчивость. Введение требования по их учету излишне усложнит методику проверки остойчивости.

Вторая группа факторов, связанная с реальными условиями эксплуатации, может включать:

- выполнение циркуляции в условиях волнения и порывистого ветра;
- динамический рывок буксирного каната на буксируемых судах;
- смещение сыпучего груза на нормируемый угол под действием качки на грузовых судах, перевозящие навалочные и насыпные грузы.

Оценка влияния перечисленных нормируемых и ненормируемых факторов выполнена по показателю соотношения уровней остойчивости

$$\gamma = \frac{K_p}{K_\sigma},$$

где K_p – расчётное значение соотношения допускаемых и кренящих моментов, полученных при проверке остойчивости с учетом суммирования нормируемых и не нормируемых факторов; K_σ – базовое значение соотношения допускаемых и кренящих моментов, полученных в соответствии с действующими Правилами [1].

Расчётное значение соотношения действующих на судно моментов определяется по скорректированному значению водоизмещения и координаты центра тяжести судна [6]:

$$D_p = D + \sum_{i=1}^n dD_i,$$

$$z_{gp} = z_g + \sum_{i=1}^n dz_{gi},$$

где D , z_g – проектные значения водоизмещения и аппликаты центра тяжести судна; dD_i , dz_{gi} – i -е приращение водоизмещения и аппликаты центра тяжести судна [6]; n – число учитываемых отклонений.

Выполненный анализ влияния отдельных эксплуатационных факторов на остойчивость речных судов показал, что наибольшие отклонения расчётного значения допускаемых и восстанавливающих моментов возникают при учете кренящего момента в эволюционный период циркуляции по методике, приведённой на рис. 1.

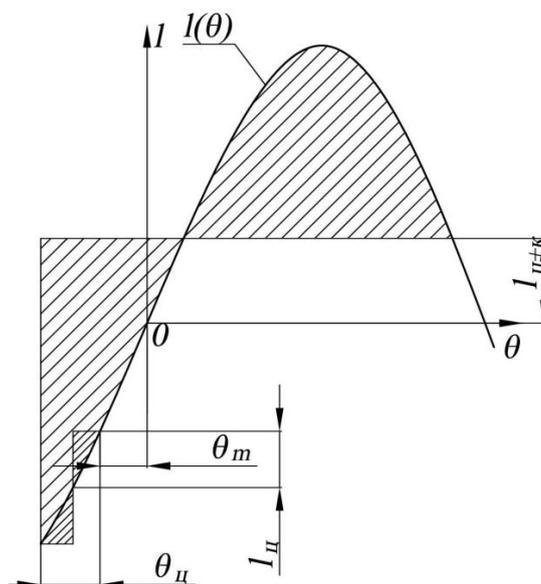


Рис. 1. Определение плеча допускаемого момента при совместном действии на судно качки и момента от циркуляции или динамического действия буксирного каната

Плечо кренящего момента на циркуляции определяются по формуле

$$l_y = \frac{M_y}{D_p},$$

где M_y – кренящий момент в эволюционный период циркуляции в соответствии с Правилами РКО [1].

Расчёты остойчивости для судна с главными размерениями сухогруза класса М-СП типа Балтийский при обледенении его корпуса, палуб и надстроек в соответствии с нормами Правил Российского классификационного общества [1] и воздействии дополнительных нормируемых и ненормируемых факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сопоставление уровня запаса остойчивости для судна с учетом нормируемых и не нормируемых факторов

Характеристика	Трюмный груз		Палубный груз	
Водоизмещение	3149	3253	3149	3253
Аппликата центра тяжести	3,64	3,64	4,97	4,97
Приращение водоизмещения	-	104	-	104
Приращение центра тяжести	-	0,05	-	0,04
Плечо кренящего момента	0,013	0,012	0,019	0,019
Плечо восстанавливающего момента	0,334	0,280	0,08	0,06
Соотношение допускаемых и кренящих моментов	25,7	23,3	4,2	3,2
Снижение уровня остойчивости	1,1		1,3	

Анализ результатов расчётов, приведённый в таблице, показывает, что для грузового судна с относительно низким положением центра тяжести и обладающим высоким начальным уровнем остойчивости даже при обледенении снижение уровня остойчивости при учете нормируемых и не нормируемых факторов не велико и составляет порядка 10%. В то же время судно, обладающее изначально низким соотношением допускаемых и кренящих моментов, например, при наличии палубного груза, более существенно реагирует на возможное изменение водоизмещения, положение центра тяжести и учет циркуляции при проверке остойчивости по основному критерию.

Показатели остойчивости судна, работающего при низких температурах, могут быть дополнительно ухудшены тем обстоятельством, что плотность льда не постоянна и повышается при понижении температуры окружающего воздуха и увеличении солёности воды, из которой он формируется [7], что, в принципе, следовало бы учитывать в расчёте. Однако ни в Правилах РКО [1], ни в кодексе остойчивости [3] характеристики льда не указываются, а обговаривается только его масса, приходящаяся на один квадратный метр.

Несмотря на то, что рассмотренные суда не теряют остойчивость, судоводителю следует учитывать фактически возможные значения характеристик судна, так как помимо рассмотренных влияющих факторов, могут наблюдаться отличия, например, в скорости ветра в акватории, и, как следствие, в условном расчётном его давлении.

Библиографический список

1. Российское Классификационное Общество. Правила классификации и постройки судов (ПКПС): [Электронный ресурс]. – М.: Российское классификационное общество, 2022. URL: <https://rfclass.ru/assets/Uploads/PKPS.pdf?t=321> (дата обращения 27.01.2022)
2. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть IV. Остойчивость: [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: Российский Морской Регистр Судоходства, 2023. URL: <https://lk.rs-class.org/reg-book/getDocument2?type=rules3&d=CF4F5671-615C-43C2-AAD7-FAE8A0AE638F&f=2-020101-152-4> (дата обращения 27.01.2022)
3. Международный кодекс остойчивости судов в неповреждённом состоянии 2008 года. СПб.: Изд-во ЦНИИМФ, 2009. – 402 с.
4. Кочнев, Ю. А. Нормирование запаса остойчивости в международных и национальных требованиях / Ю. А. Кочнев, Е. П. Роннов, И. А. Гуляев // Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве: сб. докл. Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 105-летию со дня рождения Р.Е. Алексева, Нижний Новгород, 16–17 декабря 2021 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, 2021. – С. 24-27.
5. Виноградов, В.Н. Анализ влияния случайных параметров судна / В. Н. Виноградов,

- Н. В. Ивановский, Д. А. Новоселов // Морские технологии: проблемы и решения - 2018: сборник трудов по материалам научно-практических конференций преподавателей, аспирантов и сотрудников ФГБОУ ВО «КГМТУ», Керчь, 16–27 апреля 2018 года / Федеральное агентство по рыболовству; Керченский государственный морской технологический университет. – Керчь: ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет», 2018. – С. 88-105.
6. Кочнев, Ю. А. Анализ уровня запаса остойчивости судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания / Ю. А. Кочнев, Е. П. Роннов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2022. – № 3(52). – С. 37-46. – DOI 10.24866/2227-6858/2022-3/37-46.
7. Рогачко, С.И. Введение в ледотехнику: учеб. пособие / С.И. Рогачко. – Одесса, 2008. – 79 с.

М.Г. Балашов

ЛЕДОКОЛЬНАЯ НАСАДКА ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СУДОВ ВО ЛЬДАХ

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь

Рассмотрены льды морские и речные, суда ледового плавания. При эксплуатации различных судов в осенне-весеннее время, когда поверхность рек, озер, морей может покрываться льдом, возможно применение ледокольных насадок. В работе выполнено предварительное проектирование такой ледокольной насадки для буксирных судов ледового и не ледового плавания для самостоятельного преодоления ледовых полей с толщиной льда до одного метра, определение основных размерений и характеристик, применительно к определенному типоразмеру судов, ее конструкция и общее расположение.

Ключевые слова: судно ледового плавания, ледокольная насадка.

Введение

Россия – крупнейшее арктическое государство. Своей историей и основными жизненными интересами она связана с Арктикой, с Севером и реками.

В настоящее время к районам Крайнего Севера относится более 60% территории России. Здесь добывается 95% газа, 75% нефти, 90% олова, основная часть золота и алмазов. 8% россиян, проживающих на территории Крайнего Севера, производят 1/5 национального дохода и обеспечивают почти 2/3 валютных поступлений. Вдоль судоходных рек расположено много крупных населенных пунктов и большинство рек шесть месяцев в году скованно льдом.

Ледокольные насадки совместно с буксирами могут обеспечить самостоятельное плавание во льдах толщиной до одного метра без помощи ледоколов судов не ледового класса в ледовых условиях. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: определение типоразмеров судов; определение главных размерений и основных характеристик насадки; конструкции корпуса; общего расположения. Проект ледокольной насадки для продления навигации и высвобождения ледоколов для проводки судов.

Ледовая обстановка в арктических, замерзающих неарктических морях и замерзающих реках нестабильна вследствие большого разнообразия льдов, которое обуславливается такими природными факторами, как ветер, течения, температурные режимы замораживания и таяния льда и т. п. Согласно существующей в настоящее время классификации, морские льды различают по возрасту, строению, разреженности, подвижности и размерам льдин. Дрейфующий (подвижный) лед различается, кроме того, по сплоченности.

Морской лёд. Лёд, образовавшийся в море (океане) при замерзании воды. Замерзание воды с солёностью, равной средней солёности Мирового океана происходит при температуре около $-1,8^{\circ}\text{C}$. Плотность (от 0,85 до 0,94 г/см³). Из-за малой плотности льда льдины возвышаются над поверхностью воды на $1/7-1/10$ их толщины. Таяние морского льда начинается при температуре выше $-2,3^{\circ}\text{C}$. По сравнению с пресноводным он труднее поддается раздроблению на части и более эластичен.

Солёность. В среднем солёность льда в четыре раза ниже солёности образовавшей его воды, колеблясь от 0 до 15 промилле (в среднем 3–8 ‰) [1].

Плотность. Морской лёд является сложным физическим телом, состоящим из кристаллов пресного льда, рассола, пузырьков воздуха и различных примесей. Соотношение составляющих зависит от условий льдообразования и последующих ледовых процессов и влияет на среднюю плотность льда. Так, наличие пузырьков воздуха (пористость [3]) значительно уменьшает плотность льда. Солёность льда оказывает на плотность меньшее воздействие, чем

пористость. При солёности льда 2 промилле и нулевой пористости плотность льда составляет 922 килограмма на кубический метр, а при пористости 6 процентов понижается до 867. В то же время при нулевой пористости увеличение солёности с 2 до 6 промилле приводит к увеличению плотности льда только с 922 до 928 килограммов на кубический метр [4].

Особенность речного льда заключается в том, что ледообразование происходит при движении воды. По мере понижения температуры воздуха усиливается перемешивание воды. Поверхностный слой охлаждается, плотность воды увеличивается. Охлажденная вода опускается ко дну, а на ее место поднимается более теплая вода из нижних слоев. Такой процесс может продолжаться до тех пор, пока вся толща воды не охладится до температуры $+4^{\circ}\text{C}$, при которой плотность воды достигает максимального значения. После этого дальнейшее охлаждение происходит лишь в приповерхностном слое. Температура водной поверхности опускается ниже нуля, и начинается процесс ледообразования. Зародившиеся на поверхности воды кристаллы льда растут вниз, часть из них выклинивается, а оставшиеся утолщаются. Ледяной покров приобретает столбчатую структуру.

При замерзании воды в условиях сильного перемешивания, быстрого охлаждения и наличия большого количества центров кристаллизации растут изометричные кристаллы неправильной формы с отсутствием четко выраженных граней и беспорядочной ориентировкой их осей. Лед такой структуры образуется на реках с быстрым течением.

Классификация. Различают лёд естественного нарастания (ровный лёд) и льды нагромождения (ропак, торосы).

По размерам лёд разделяют: на крупные ледяные поля, протяжённостью более 2 км, обломки полей – от 2 км до 200 м, крупнобитый лёд – от 200 до 20 м, мелкобитый лёд – меньше 20 м.

По возрасту различают: весенний лёд, образовавшийся весной, перед текущим летом, и обладающий наименьшей прочностью и наибольшей солёностью; годовалый, или однолетний, лёд, образовавшийся осенью предыдущего года и обладающий большой прочностью и толщиной, пониженной солёностью; многолетний лёд, просуществовавший зиму, лето и следующую зиму, обладает большой прочностью и малой солёностью.

Ледокол – это самоходное судно для ледокольных операций в условиях замерзающих бассейнов рек, морей и океанов, выполняет ряд задач: прокладка канала для других судов; буксировка крупных осколков льда (расчистка); спасение в условиях ледового плена; ликвидация ледовых перемычек на маршрутах; доставка грузов в места не доступные другим судам; обеспечение научных, промышленных и военных операций (см. табл. 1).

Таблица 1

Ледоколы и их характеристики

№	Название	Длина, м	Ширина, м	Высота борта, м	Осадка, м
1	Таймыр	151,8	29,2	15,2	8,1
2	Вайгач	151,8	29,2	15,2	8,1
3	Ямал	150	30	17,2	11,08
4	50 лет Победы	159,6	30	17,2	11
5	Советский Союз	150	30	17,2	10
6	Александр Санников	121,	26	11,5	8
7	Дудинка	86,5	21,2	9,5	6,9
8	Владивосток	119,4	27,5	12,4	8,5
9	Юрий Лисянский	67,7	18,28	8,3	6,05
10	Ермак	134,8	26		11
11	Адмирал Макаров	134,8	26		11
12	Магадан	88,49	21,17	10,5	6,5
13	Кару	74,1	17,4		6,3

При движении в сплошных льдах ледокол разрушает лед следующим образом. Ледокол наползает на ледяной покров и продавливают его форштевнем. По мере продвижения

вперед, во время которого дифферент на корму увеличивается, в контакт со льдом вступает носовая часть корпуса ледокола, ломающая лед. При этом наблюдаются небольшое рыскание и изменение крена, связанные с неодновременностью ломки льда левым и правым бортами. За кормой ледокола остается канал: у краев – крупные льдины, к средней части их размеры уменьшаются, и в середине – «ледяная каша». Непосредственно за кормой ледокола в зоне действия струй воды, отбрасываемых винтами, образуется полоса чистой воды.

Таблица 2

Транспортные суда

№	Название	Длина, м	Ширина, м	Высота борта, м	Осадка, м
1	Гейар Алиев	139,6	16,5	6	4,6/3,6
2	Челси 4	131,8	16,5	5,5	3,99/3,6
3	Механик Хачепуридзе	134,2	16,5	6,4	4,09/3,6
4	Проект RST34	137,14	16,9	8,1	4,7/3,6
5	Проект 001RSG01	88,12	12,3	5,8	3,02
6	Григорий Малов	138,3	16,5	5,5	4,1/3,6
7	Проект 05074М	135	16,5	5,5	3,75/3,6
8	Проект 006RSD02	133	16,5	6	4,6/3,6
9	Проект РЭФ-675	115,5	13		7
10	Проект 00120	111,2	13,48	6,2	4,5
11	Проект 931	63,5	10,02		4,48
12	Игорь Ильинский	132,7	19,62	8,8	6,88
13	Проект 159 (Александр Фадеев)	129,42	19,24	10,43	5,08/7,51

К числу характерных режимов плавания судов во льдах относятся: непрерывное движение в сплошных льдах; разрушение льда набегам; движение в канале за ледоколом; движение в дрейфующих льдах; сжатие во льдах.

Непрерывное движение в сплошных льдах. Этот режим характерен для ледоколов и частично для судов активного ледового плавания, причем устойчивость непрерывного движения для каждого конкретного судна зависит от толщины и прочности ледяного покрова. Разрушение льда набегам является характерным режимом работы ледокола в том случае, если он не в состоянии двигаться во льду непрерывным ходом. Наибольшие ледовые нагрузки возникают, когда ледокол, ударившись о лед, не разрушает его, а производит только местное смятие кромки ледяного поля. Движение в канале – один из основных режимов плавания судов под проводкой ледоколов. При этом корпус судна подвергается ударам об обломки льдин, заполняющие канал, а также о кромки канала.

Ледокольная насадка предназначена для перемещения судов во льдах без сопровождения ледокола, в разреженных однолетних арктических льдах при их толщине до 1 м. Насадка швартуется к носовой части судна и работает как ледокол, создавая канал сводный от льда, за счет того, что насадка шире судна.

Описание архитектурно-конструктивного типа

Форма корпуса упрощенных обводов с большим количеством прямолинейных плоскостей. Проектируемая насадка имеет ледокольную форму носовой оконечности. Корма «Л-образной» формы (вид сверху) с установленными по внутренней части корпуса кранцами. На виде бок корма транцевая на левой и правой половине корпуса. Машинно-котельное отделение расположено в носовой оконечности.

Насадка имеет твердый балласт, балластные и топливные цистерны. Систему подогрева балластных цистерн. Энергетическую установку для обеспечения балластировки и якорно-швартовочных операций. На палубе рабочая грузовая стрела-манипулятор, якорный шпиль и якорь в носовой оконечности. По внутреннему контуру установлены швартовые лебедки.

Разработка теоретического чертежа

При разработки теоретического чертежа ледокольной насадки были исследованы суда, перемещающиеся по северному морскому пути. За основу брались суда средних размеров и серийные суда. Составлен список с основными характеристиками этих судов (см. табл. 2). Из списка были рассчитаны средние значения размеров судов (табл. 3).

Таблица 3

Средние значения размеров

Ширина, м	Осадка, м	Высота борта, м
18	5-6	8

Главные размеры ледокольной насадки были определены на основании общих положений и требований к проектированию судов ледового класса, исходя из размеров транспортных и ледокольных судов (табл. 4).

Таблица 4

Предельные значения параметров формы корпуса ледового плавания

Параметр формы корпуса	Категории ледовых усиления				
	Arc8, Arc9	Arc7, Arc6	Arc5	Arc4	Ice1, Ice2, Ice3
φ , не более	25°	30°	45°	60°	—
α_0 , не более	30°	30°	40°	40°	50°
β на расстоянии 0,05L от носового перпендикуляра, не менее	45°	40°	25°	20°	—
β на мидель-шпангоуте, не менее	15°	—	—	—	—

В ходе всех требований был разработан теоретический чертеж (см. рис 1) с главными размерами:

Главные размерения ледокольной насадки

- длина наибольшая 34 м;
- ширина 22,6 м;
- ширина входа 13,8 м;
- осадка 5 м;
- высота борта 8,2 м;
- водоизмещение 1449,8 т.

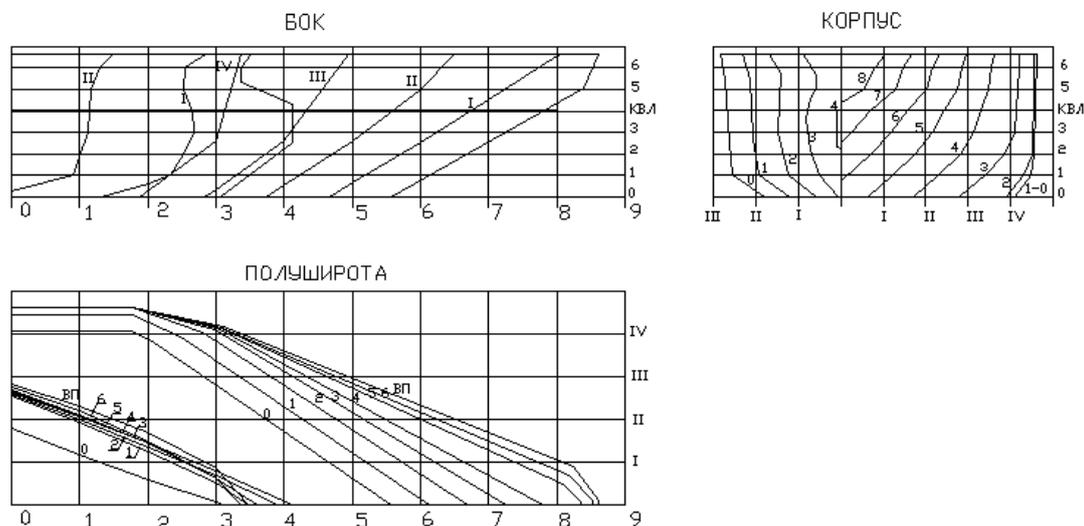


Рис. 1. Теоретический чертеж ледокольной насадки

После выполнения расчетов конструкции корпуса [4] судна был построен чертеж мидель-шпангоута ледокольной насадки 1-го и 5-го шпангоута (см. рис. 2).

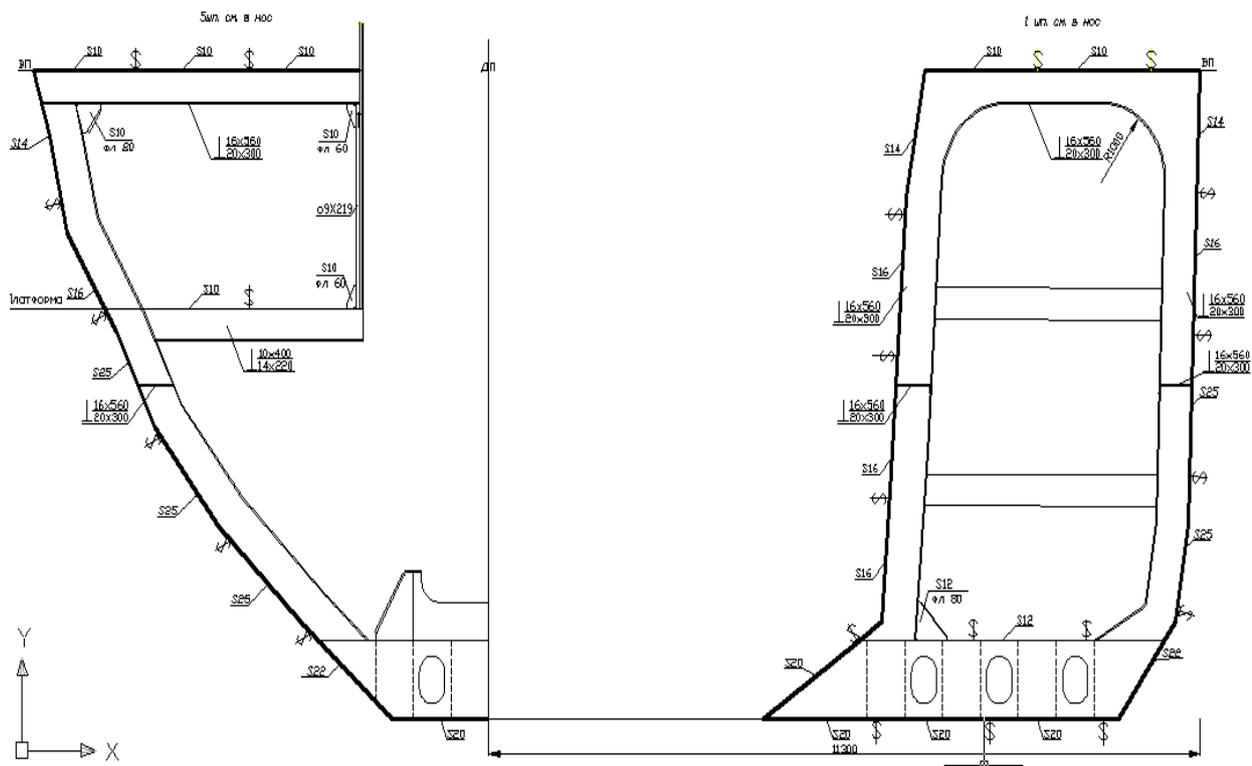


Рис. 2. Мидель-шпангоут ледокольной насадки

Судовые устройства и системы

На ледокольной насадке имеется якорное устройство, швартовное, систему подогрева балластных цистерн, дизель-генератор.

Работа всех устройств и систем обеспечивается собственной электроэнергетической установкой на базе дизель-генератора. Якорное устройство представлено одним якорем, установленным в носовой оконечности на левом борту. Выемка якоря и якорь-цепи выполняется с помощью якорно-швартовного шпиля. Швартовное устройство представлено двумя комплексами. Первый обеспечивает швартовку насадки как плавучего средства к берегу или другим плавучим объектам. Представлен кнехтами, ключами, установленными вдоль бортов, и буксирным кнехтом и ключом, установленным в ДП. Второй – служит для швартовки к проводимому судну. Представлен кнехтами, динамическими лебедками и большой динамической лебедкой, установленной в ДП. Между корпусами устанавливаются кранцы для избежания повреждения корпуса.

Спасательное устройство – спасательными кругами, установленными вдоль внешних бортов. Рулевое устройство отсутствует. На насадке установлен система подогрева балласта, для обеспечения работы в условиях низких температур.

Общее расположение

Ледокольная насадка цельнометаллическая, Л-образной формы. Форштевень имеет наклон 30 град., ахтерштевень в виде двух транцев (левого и правого бортов) вертикальных. На верхней палубе расположены якорно-швартовное устройство, спасательное, трап-сходня для перехода на проводимое судно, рубка для перехода на нижние палубы и платформы.

Ниже верхней палубы расположены балластные цистерны, помещение дизель-генератора, насосов, пост управления балластной системой.

На кормовой оконечности ледокольной насадки устанавливаются пневматические кранцы.

Эксплуатация ледокольной насадки осуществляется путем швартовки ее к проводимому судну. Швартовка выполняется в следующей последовательности: установка проводимого судна на акватории (кормовым закреплением на точке); подвод насадки с помощью буксиров к судну; насадка балластируется под посадку судна; заводится швартовный трос с главной центральной лебедки, с ее помощью производится подтягивание насадки к судну; заводятся швартовы с бортовых (внутренних бортов) лебедок на кнехты бака (полубака) судна; заводятся продольные шпринты на транцевые лебедки для надежного закрепления судна и насадки; окончание работы по соединению, перевод работы ДГ в режим ожидания.

Выводы

В работе был описан концепт-проект ледокольной насадки для грузовых и пассажирских судов ледового и не ледового плавания для самостоятельного преодоления ледовых полей с толщиной льда до 1 метра. В ходе работы были определены главные размерения насадки, ее конструкция корпуса, статика, ходкость и выполнено общее расположение.

Планируется выполнить масштабную модель судна и провести серию модельных экспериментов для уточнения геометрии насадки, кинематики совместного движения и оценки полученных решений.

Библиографический список

1. Морские инженерные сооружения / Р.В. Борисов [и др.]. – СПб.: Судостроение, 2003. – 535 с.
2. Гундобин, А.А. Судовые бортовые були / А.А. Гундобин, М.Т. Чашков. – Л.: Судостроение, 1986. – 88с.
3. Дубровский, В.А. Многокорпусные суда / В.А. Дубровский. – Л.: Судостроение, 1978. – 304 с.
4. Правила Российского морского Регистра судоходства. Правила классификации и постройки судов. – М.: Транспорт, 2018. – 513 с.

В.П. Морозов, Н. С. Гладышев

ОСОБЕННОСТИ ГИБКИХ ОГРАЖДЕНИЙ АМФИБИЙНЫХ ЭКРАНОПЛАНОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород,
Филиал ПАО «ОАК» – НАЗ «Сокол», г. Нижний Новгород

Создание амфибийных экранопланов может стать одной из перспективных задач развития скоростного транспорта. На примере сравнения типов гибкого ограждения выполнен анализ, который в значительной мере объясняет применение на экранопланах ограждения баллонного типа.

Ключевые слова: экраноплан, шасси на воздушной подушке, гибкое ограждение, классический тип, баллон, анализ.

Введение

Использование гибкого ограждения (ГО) воздушных подушке (ВП) на скоростных судах с динамическим принципом поддержания, к которым можно отнести и экранопланы, не является чем-то новым. Одним из первых в мире гибких ограждений является ограждение воздушной подушки баллонного типа, смонтированное на легком учебном самолете УТ-2. Шасси на воздушной подушке для этого самолета разработано выдающимися советскими учёными и инженерами Надирадзе и Ефремовым [1].

Исследование

В настоящей работе делается попытка сравнительного анализа двух видов гибких ограждений, применяемых на амфибийных СВП и экранопланах, и выяснения причин, которые привели к установке на экранопланах именно баллонного вида ГО.

Существенный толчок развитию гибких ограждений судов на воздушной подушке (СВП) дал экспериментальный аппарат SRN-1, созданный в Англии в 1957–1958 гг. со струйной периферийной завесой зоны ВП. Установка по периметру платформы резиновой юбки существенно улучшила мореходность и ходкость этого аппарата. В Англии работы по совершенствованию гибких ограждений ВП имели системный характер, результаты исследований которых хорошо отражены в прессе [2, 3]. В 60–70 годы прошлого века аналогичные исследования по гибким ограждениям СВП велись в СССР, в США, Франции и других странах. Достаточно быстро разработчики СВП отказались от протяжённых воздухопроводов в жестких корпусах и передали функции соплового ресивера надувному баллону, закреплённому по периметру аппарата.

Установившийся на большинстве амфибийных СВП классический тип ограждения в большинстве вариантов имел двухъярусное по высоте ограждение, состоящее из верхнего ресивера и навешенными на его днище съёмными элементами (рис. 1, а). Воздух от нагнетателя, расположенного в жёстком корпусе СВП, подавался по одному или нескольким каналам в ресивер, из которого через ряд отверстий в днище подавался в съёмный элемент и из него в камеру ВП. Для легких СВП использовался более открытый ресивер (рис. 1, б). Первая схема (рис. 1, а) обычно называлась монолитом, вторая (рис. 1, б) полумонолитом. Важнейшим элементом классического типа ГО являлось секционирование ВП на отдельные зоны, что обеспечивало остойчивость (неопракидываемость) СВП при движении, маневрировании и на стопе при работающей ВП.

Конструкция гибких ограждений состояла в основном из плоских прорезиненных полотнищ, скроенных в соответствии с расчётной геометрией ГО. Силовой основой полотнищ

была ткань из нейлоновых, или капроновых нитей, а эластомерным покрытием – различные виды резины, каучука, полиуретана. Как правило, покрытие спекалось с тканью с двух сторон методом каландрирования. Стыковые швы и кромки тканей при сборке ГО заделывались резиновыми накладками.

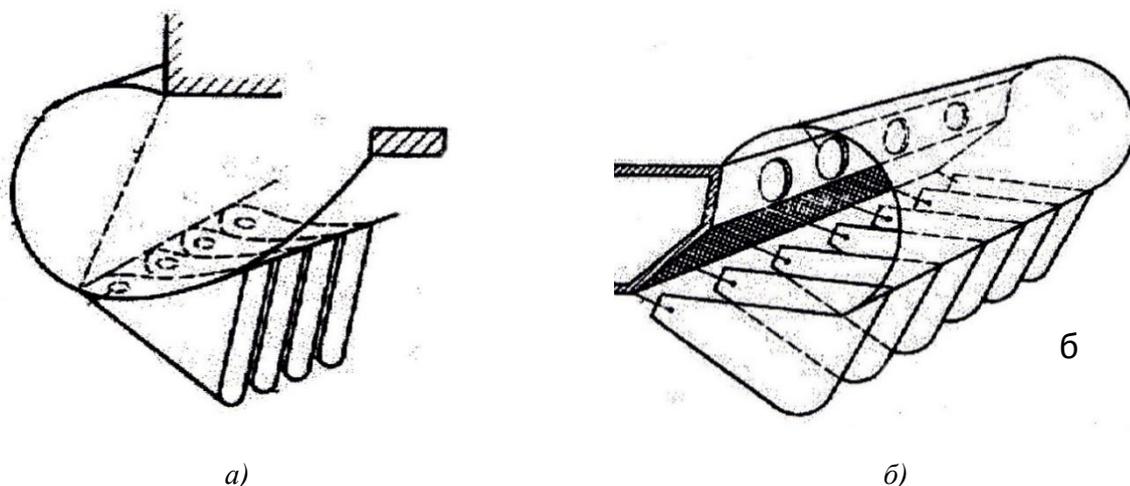


Рис. 1. Классическая схема ГО и её упрощенная схема для легких СВП:
а – схема ГО – «монолит»; *б* – схема ГО «полумонолит»

Целью отработки ГО, назовём его условно классическим или «английским типом», было обеспечение:

- 1) высокой проходимости, т.е. способности СВП преодолевать более высокие неровности и не зависеть от состояния грунта,
- 2) хороших гидродинамических качеств для достижения заданной ходкости,
- 3) уменьшения сопротивления движению на грунте,
- 4) остойчивости СВП при всех режимах движения,
- 5) ремонтпригодности, т.е. быстрой замены или ремонта повреждённых участков ограждения,
- 6) малой зависимости формы ограждения от низких температур,
- 7) более высокого ресурса для всех секций и участков ограждения.

Требования к гибким ограждениям экранопланов связаны с их эксплуатационными характеристиками. Представляется важным, чтобы современный экраноплан мог эксплуатироваться на реках и озерах круглогодично, включая межсезонье. Второй важной характеристикой экранопланов является возможность осуществлять погрузку-выгрузку пассажиров на береговых грунтовых или снежных площадках и обслуживаться на берегу в специализированных центрах. Эти задачи наиболее эффективно могут решаться с помощью организации ВП каким-либо способом и обязательным применением гибкого ограждения. Ссылки на экраноплан «Орлёнок», который также можно назвать амфибийным, не состоятельны по причине невозможности круглогодичной эксплуатации и базирования на грунтовых площадках.

Наконец, важной, третьей особенностью экранопланов является тот факт, что гибкое ограждение большую часть маршрута не контактирует с подстилающей поверхностью, водной, грунтовой или снежной. Эта особенность влечёт повышенные требования к аэродинамическому и гидродинамическому совершенству ограждений.

Именно эти особенности привели специалистов ЦКБ по СПК к исследованию на моделях и стендах, а потом и опытной апробации на пилотируемых моделях комбинированного ограждения зоны ВП экранопланов, состоящего из продольных элементов ограждения в виде герметичных пневмобаллонов и поперечных элементов в виде носовых и кормовых щитков, убираемых в полете. Следует отдать должное группе сотрудников ЦКБ по СПК под руковод-

ством ведущего специалиста В.И. Шадрина, которые в первой половине 70 годов прошлого века начали проектные исследования экранопланов с камерным способом создания ВП и впервые применили на моделях гибкие ограждения ВП. По инициативе Р.Е. Алексева в период с 1975 по 1980 гг., и позднее, уже без него, до 1990 г. в ЦКБ по СПК велись интенсивные научные и опытно-конструкторские исследования гибких ограждений с целью их адаптации с экранопланами и экспериментальной проверки на моделях, стендах и опытных образцах. «Демонстратором» технологий в то время стала самоходная пилотируемая модель СМ-9 (рис.2), на которой многие новые конструкции баллонетов отрабатывались в натуральных условиях. Успешные результаты исследований позволили применить ограждение баллонного типа на экранопланах «Волга-2» и «Акваглайд», выпускаемых малой серией.



Рис. 2. Экспериментальный исследовательский экраноплан СМ-9

Воздушная подушка создавалась поддувом воздуха от воздушного винта в кольцевой насадке. Баллонеты играли роль боковых гибких ограждений ВП, кормовым ограждением являлся закрылок центроплана.



Рис. 3. Амфибийный экраноплан «Тунгус»

Впоследствии в 90-х годах прошлого столетия и более поздних годах эти наработки широко применялись в новых проектах СВП нижегородских конструкторов («Стрелец», «Север-2/4», «Пегас», «Хивус-4/6», «Марс-600», «Марс-2000» и др), в которых использовалось ГО баллонного вида. Все виды гибких ограждений экранопланов и СВП нижегородской школы состояли из продольных герметичных (безрасходных) пневмобаллонов, как правило,

обтекаемого вида, и носовых и кормовых секций различной конструкции. В частности, на лёгких СВП носовой секцией являлся обычный фартук, а кормовой – надувной мешок. В экранопланах при использовании проточного метода создания ВП (поддува воздуха под крыло от воздушных винтов) ограждение носовой секции не ставилось, а роль кормового ограждения играли закрылки крыла.

На ряде проектов экранопланов использовался камерный способ создания ВП, в котором воздух от отдельного нагнетателя (раздельной силовой установки ВП) подавался либо по крыло, либо под фюзеляж экраноплана. В этом случае применялось носовое гибкое, или упруго эластичное ограждение, как, например, на экспериментальном экраноплане «Тунгус» (рис. 3).

Баллонеты, помимо роли боковых элементов гибкого ограждения выполняли функции водоизмещающих поплавков, элементов поперечной и продольной остойчивости, амортизаторов случайных касаний и посадочного удара, опорных элементов при стоянке на грунте, тормозных лыж.

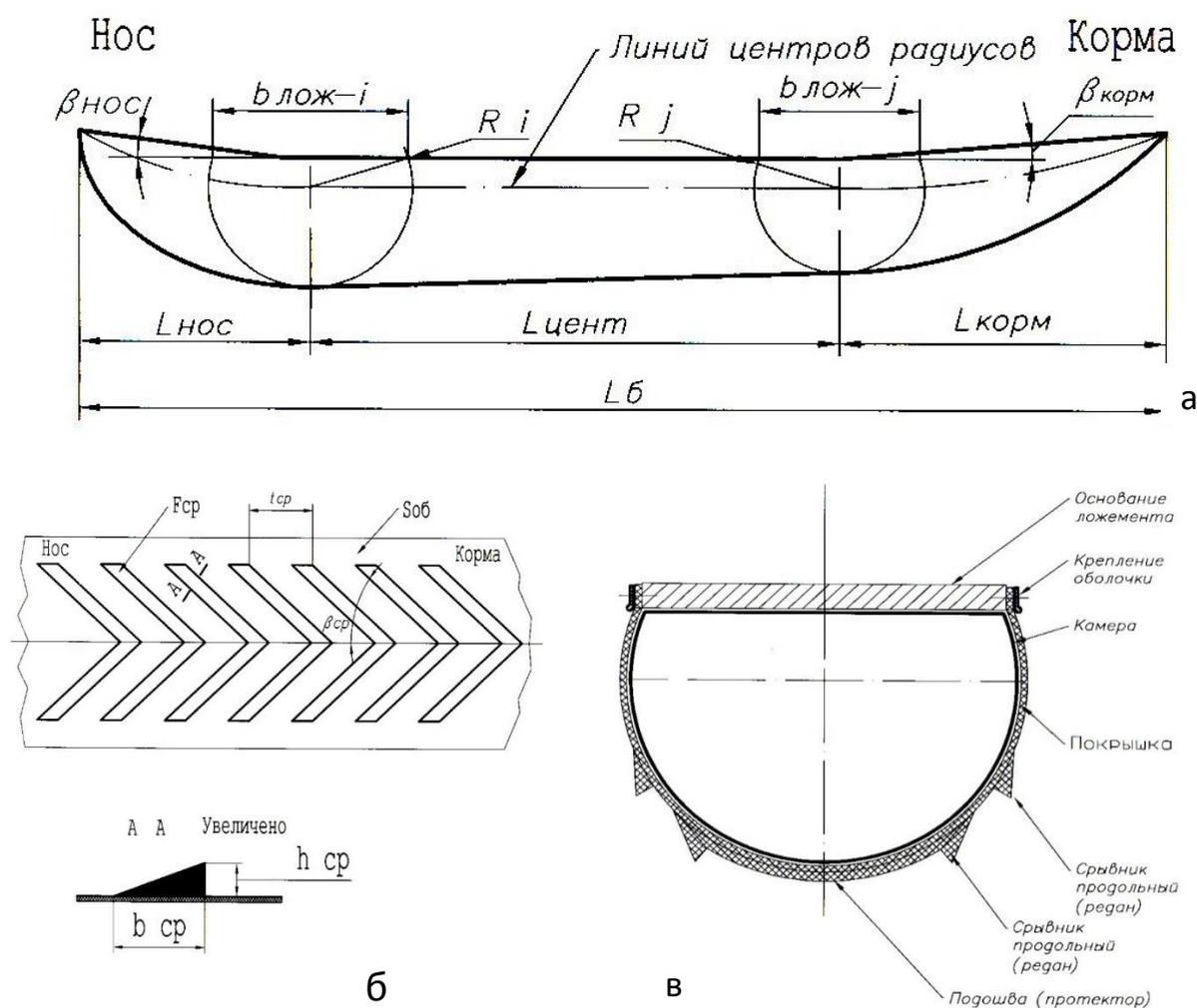


Рис. 4. Геометрические параметры баллонета и его конструкция (сечение)

Круглое тело пневмобаллона и плавные аэродинамические обводы совершенно не отвечали гидродинамическим требованиям. Решение этой задачи потребовало значительного времени и сил. В начальный период исследований баллонет представлял собой мощную покрывку, к которой болтами крепились металлические реданы (как правило, носовой, центральный вблизи центра масс, и кормовой). Внутри покрывки вставлялась лёгкая резиновая камера. По мере исследований и конструкторской проработки с различными материалами

основы (тканей) и матрицы (покрытия ткани) появились практически бесшовные монолитные конструкции пневмобаллонов обтекаемой формы со специальной полиреданной системой срывников и прочной подошвой от истирания. Общая геометрия пневмобаллона показана на рис. 4, а, система срывников на рис. 4, б, а рабочее сечение конструкции на рис. 4, в. На экранопланах ЦКБ по СПК, например «Волга-2», использовались в качестве силовой основы технический капрон, покрытия – полиуретан. Для защиты подошвы от истирания применялись дополнительные слои полиуретана, в некоторых случаях в комбинации с дополнительными полотнищами более прочной ткани. Полосы реданов выполнялись из полиуретана и наклеивались на нижнюю поверхность пневмобаллона обычно в полусыром виде. Высота реданов варьировалась, в среднем, от 15 до 20 мм, шаг реданов от 150 и до 300 мм.

Изготовление покрышек в ЦКБ по СПК выполнялось на болване, выполненном по точным теоретическим чертежам баллонета. Технология изготовления предусматривала многие совмещённые операции и представляла собой непрерывный производственный цикл.

В дальнейшем многие малые предприятия ушли от этой трудоёмкой технологии и для своих лёгких, и даже тяжелых СВП использовали метод плоского раскроя из готовых прорезиненных лодочных тканей типа Виниплан или CoverTech. На покрышки также наклеивались реданы, изготавливаемые промышленным способом.

Несмотря на то, что ГО для СВП и экранопланов предназначались для разных типов аппаратов, при разных условиях эксплуатации сравним их наиболее важные достоинства и недостатки в табличном виде (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение достоинств и недостатков ГО СВП и экранопланов

Параметр или характеристика	Двухрусное ГО классического типа для СВП	Баллонное ограждение для экранопланов, включая поперечные элементы ограждения ВП
1	2	3
Масса ограждения, включая все секции, отнесённая к общей массе аппарата	Больше	Меньше
Стоимость ограждения	Больше	Меньше
Соппротивление на спокойной воде	Одинаково	Одинаково
Соппротивление на волнении (около горба сопротивления)	Меньше	Больше*
Соппротивление на неровном грунте	Меньше	Больше
Соппротивление на снегу	Одинаково	Одинаково
Высота преодолеваемых препятствий	Зависит от высоты ГО	Зависит от высоты ГО
Максимальная скорость	Меньше	Больше
Остойчивость аппарата	Меньше	- Больше - Значительно больше за счет крыльевых поплавков
Замыв элементов ГО и опрокидывание аппарата	Чаще	Реже
Ресурс ограждения по фрикционному износу	Меньше	Больше**
Ресурс ограждения из-за флаттера оболочек	Меньше	Больше
Частота разрыва оболочек	Больше	Меньше**

чек/потери элементов ГО		
<i>Окончание табл. 1</i>		
1	2	3
Общий ресурс ГО отнесённый к ресурсу аппарата	Низкий	Высокий**
Влияние низких температур	Отрицательное - смерзаемость оболочек приводит к потере формы ГО и ВП	Низкое, малозначительное
Ремонтопригодность	Лучше, за счёт съёмных элементов нижнего яруса	Хуже, требуется снимать всю покрывку
Пылезащита ограждения	Плохая	Хорошая

* с учётом поддува под крыло аппарата,

** учитывается меньшее время движения экраноплана по грунту.

Вывод

Проведенный анализ опирается на историю развития и особенности конструкций типов гибкого ограждения. Опираясь на приведенный ранее анализ (см. табл. 1), можно констатировать, что для амфибийных экранопланов предпочтительнее применять ограждение баллонного типа, так как в целом оно в большей мере удовлетворяет высоким эксплуатационным характеристикам.

Библиографический список

1. Шавров, В.Б. История конструкций самолетов в СССР 1938–1950 гг. / В.Б. Шавров. – 2-е изд., исправ. – М.: Машиностроение, 1988. – 568 с.
2. Стентон, Джонс. Разработка гибких ограждений для аппаратов на воздушной подушке // Обзор конструкций и эксплуатационных характеристик: докл. на собрании в Королевском институте судостроения в Лондоне, 27 марта 1968 г.), ВЦП: [пер. с англ.]. 1968. – 98 с.
3. Демешко, Г.Ф. Проектирование судов. Амфибийные суда на воздушной подушке: учебник: в 2-х кн. Кн. 2 / Г.Ф. Демешко. – СПб.: Судостроение, 1992. – 329 с.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ЛЕДОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СУДОВ В ХОДЕ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

¹ Крыловский государственный научный центр, г. Санкт-Петербург,

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
г. Санкт-Петербург

Расчет предельной ледопроеходимости судна тесно связан с вопросом оценки точности измерений ледового сопротивления корпуса, разрушающего лед. Традиционные методы оценки погрешности косвенных измерений этой характеристики судна дают достаточно консервативную оценку, практическое использование которой недопустимо. Решение сложившейся проблемы оценки неопределенности измерений ледового сопротивления возможно путем детального рассмотрения всех измеряемых характеристик судна и среды, в которой оно движется при проведении экспериментальных исследований.

В данной работе представлены результаты многократных буксировочных испытаний эталонной модели судна в сплошном ровном льду ледового бассейна ФГУП «Крыловский государственный научный центр». На основе полученных данных изучена погрешность результатов измерений основных свойств льда и ледового сопротивления судна и рассмотрены возможные пути ее снижения.

Ключевые слова: неопределенность, ледовый бассейн, модельные испытания, ледовое сопротивление, физико-механические свойства льда, погрешность измерений.

Введение

На сегодняшний день отсутствует международное единое мнение по вопросу неопределённости измерений ледового сопротивления судов, полученных в ходе модельных испытаний в ледовом опытовом бассейне. В рамках существующих рекомендаций Международного Комитета Опытных Бассейнов (МКОБ) дано лишь определение общей погрешности измерений ледового сопротивления. Это геометрическая сумма погрешностей используемого измерительного оборудования и случайной погрешности [1]. Учет влияния случайной погрешности на результат измерений возможен лишь на основании анализа всей совокупности случайных погрешностей в рассматриваемом модельном эксперименте.

Искусственный лед, используемый в ледовых бассейнах, создается на основе концепции, что разрушение ровного ледяного покрова происходит тем же образом, что и при взаимодействии реального объекта исследований с натурным льдом. К примеру, разрушение ледяного покрова судами преимущественно происходит от изгибных напряжений. Для проверки адекватности модели льда натурному ледяному покрову используются стандартные, предложенные на секции ледовых проблем МАГИ (Международная ассоциация гидравлических исследований), методы измерений его физико-механических свойств [2].

Таким образом, оценка погрешности должна выполняться не только при измерении ледового сопротивления, но и по результатам определения толщины ледяного покрова, прочности льда на изгиб и сжатие, плотности льда, модуля Юнга, коэффициента трения между льдом и корпусом. Не маловажной особенностью анализа результатов модельных испытаний в ледовом бассейне является их коррекция, обусловленная отсутствием возможности точного воспроизведения заданных физико-механических свойств льда в эксперименте [3].

Основы поиска неопределённости в ходе экспериментальных исследований

Как правило, расчет всех составляющих погрешности и внесение поправок в каждое из измерений по результатам проведения модельных испытаний в ледовом бассейне не дает представления о неопределённости полученного результата. Результат измерения после внесения в него поправки на известные систематические эффекты остаётся только оценкой значения измеряемой величины. Это обусловлено наличием случайных эффектов, не изученных в настоящее время, а также неточностью поправки результата на систематические эффекты. Причин возникновения таких эффектов несколько, но основными являются:

- неточность знания влияния особенностей моделированного льда на результат измерений и неточное измерение величин, характеризующих его физико-механические свойства;
- субъективная систематическая погрешность, вносимая специалистом лаборатории при проведении измерений по существующим методикам определения физико-механических свойств льда;
- неточные знания физических констант при обработке результатов модельных испытаний;
- изменчивость в повторных наблюдениях при, казалось бы, неизменных условиях измерений, в первую очередь, температурных.

К примеру, в работе [4] показаны результаты изучения одной из таких причин, а именно, изменчивости основных физико-механических свойств моделированного льда типа FG в ходе модельных испытаний. Исследования проведены на примере моделированного ровного ледяного покрова при постоянной температуре воздуха в ледовой камере, равной -6°C , а также после ее понижения до -12°C на один час. Полученные результаты показали, что в ходе экспериментов при поддержании постоянной температуры воздуха на уровне -6°C изменения прочности льда при изгибе и сжатии отсутствуют. При этом наблюдается изменение упругих свойств ледового поля, которое выражено в увеличении модуля Юнга в пределах 5% после каждого часа проводимого эксперимента. Также была выявлена закономерность изменения основных физико-механических свойств ледового поля при осуществлении дополнительной подморозки в ходе эксперимента. Воздействие температуры -12°C в течение одного часа приводит к двукратному увеличению модуля упругости ледового поля и, соответственно, росту прочности льда при изгибе, по оценкам на основе экспериментальных данных, в пределах 20%. Существенные изменения прочности льда при сжатии вследствие воздействия столь низких температур не обнаружены. Ее рост не превысил 7%.

В настоящем докладе затронут вопрос получения достаточных знаний о влиянии особенностей моделированного льда на результат измерений. Для решения поставленной задачи в ледовом бассейне Крыловского Центра ежегодно проводятся модельные испытания эталонной модели ледокольного судна в заданных ледовых условиях при неизменных параметрах создания моделированного льда. В ходе экспериментов выполняются измерения физико-механических свойств ледяного покрова и буксировочные испытания голого корпуса модели. Далее в работе приведен результат анализа подобных экспериментов, выполненных за последние несколько лет.

Погрешность измерений физико-механических свойств льда

Практика проведения модельных испытаний в ледовом бассейне показывает, что основные физико-механические свойства моделированного льда не могут быть одинаковыми как в одном намороженном на всю площадь бассейна ледяном поле, так и нескольких полях, созданных по единой методике, но в разное время. Это обусловлено особенностями создания моделированного ледяного покрова и формирования его прочностных свойств, в первую очередь из-за высокой гомологической температуры льда. В ледовом бассейне Крыловского Центра для проведения модельных испытаний возможно использование столбчатого льда, но преимущественно используется технология приготовления гранулированного (fine-grained) льда [5]. Для приготовления льда по данной технологии необходимо распылять соленую воду в атмосфере бассейна, предварительно охлажденной до температуры ок. 25°C ниже нуля. Требуемая толщина ледяного покрова достигается заданием нужного количества циклов

намораживания. Для придания этому слою заданных свойств используется специальный температурный режим, включающий фазы сохранения, упрочнения и термообработки.

Для оценки погрешности результатов экспериментальных исследований в ледовом бассейне были проанализированы данные буксировочных испытаний эталонной модели ледокольного судна в шести ледовых полях, приготовленных по единой методике за период с 2019 по 2022 гг. Во всех случаях задаваемая толщина льда составляла 47 мм, а прочность льда на изгиб 23 кПа.

Процесс разрушения эталонной моделью моделированного ледяного покрова соответствует классической физической картине взаимодействия корпусов ледоколов со льдом. Взаимодействие модели с кромкой ледяного покрова приводит к возникновению вертикального усилия, разрушающего лед. Вступающие в контакт со льдом борта корпуса также разрушают лед изгибом на отдельные сектора.

Таким образом, одним из основных параметров льда, который должен быть определен в ходе модельных испытаний судов в ледовом бассейне, является прочность ровного ледяного покрова на изгиб. Измерения были выполнены путем разрушения консольных балок на плаву. Консоль вырезается непосредственно в ледяном покрове и остается скрепленной с ним одним из своих концов. Нагрузка на свободный конец консоли осуществляется сверху вниз. В рассматриваемых экспериментах размер консольных балок в среднем составил 1:3:7 (толщина льда h_l , ширина балки b , длина балки l). Расчет прочности льда на изгиб осуществлялся по рекомендованной ИТТС формуле:

$$\sigma_f = \frac{6Pl}{bh_l^2}, \quad (1)$$

где P – максимальное значение усилия, Н.

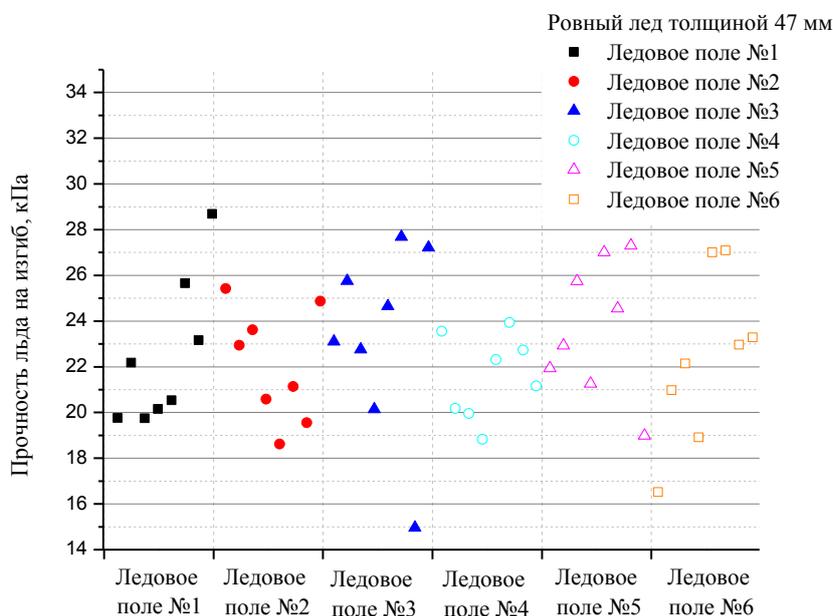


Рис. 1. Результаты многократных измерений прочности ровного льда на изгиб

Анализ полученных данных был выполнен после проверки результатов измерений по критерию Шовене, которая осуществлялась для каждого выполненного измерения. По результатам выборки, шесть измерений из тех, что представлены на рис. 1, далее в работе не рассматривались. Оценка случайной погрешности расчета прочности льда на изгиб была определена, с учетом выражения (1):

$$\varepsilon_{\sigma_f} = \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2}, \quad (2)$$

где Δl , Δb и Δh являются абсолютными погрешностями измерений линейных размеров консольной балки (длины, ширины и толщины); ΔP – погрешностью измерений нагрузки при ее разрушении.

Относительная погрешность результатов расчета прочности льда на изгиб составила примерно 34%. В отличие от многих других характеристик моделированного льда, прочность на изгиб определяется по результатам расчетов, в которые входит четыре независимо измеренных параметра. При этом относительная погрешность измерения линейных размеров консолей составляет около 10-15% и она обусловлена не инструментальной погрешностью, а погрешностью процедуры подготовки консольных балок и особенностями их ломки. Таким образом, их линейные размеры являются случайной величиной, повлиять на которую путем совершенствования методики измерений практически невозможно.

Случайная погрешность измерений толщины моделированного льда была выполнена как для каждого ледового поля в отдельности, применительно к результатам измерений вдоль кромки канала, так и для всех полученных данных по шести ледовым полям. Для результатов измерений вдоль кромки ледового канала величина погрешности колебалась в диапазоне от 3 до 5%. По результатам 42 измерений толщины льда в местах разрушения консольных балок, полученные во всех рассматриваемых шести ледовых полях, относительная погрешность составила 6,5%.

На основании результатов проведенного анализа и опыта эксплуатации ледового бассейна можно сделать вывод, что снижение погрешности в измерениях толщины моделированного льда возможно только при строгом соблюдении условий его приготовления. Методов бесконтактного измерения толщины льда, способных обеспечить высокую точность, не более плюс-минус 0,5 мм, пока не существует. Измерения толщины льда осуществлялись вдоль кромки канала, образованного моделью судна, путем извлечения образцов и их дальнейшего обмера с помощью линейки. Ледовый бассейн, как комплекс инженерных систем, которые его составляют, является инерционной системой. Поэтому небольшие отклонения в температуре воздуха и воды при создании моделированного льда исключить практически невозможно. Именно эта причина может служить основной предпосылкой к появлению расхождений в результатах измерений толщины льда по данным промеров для консольных балок.

Погрешность измерения ледового сопротивления

Расчет погрешности ледового сопротивления по данным модельных испытаний с использованием традиционного подхода показывает, что она получается крайне большой. Основными причинами может быть малое число задаваемых скоростей движения модели на ограниченной стенками бассейна длине моделированного ледового поля и отличие зависимости ледового сопротивления от скорости от линейной функции, которая чаще всего применяется при анализе результатов модельных испытаний.

Таблица 1

Сравнение относительной погрешности измерений ледового сопротивления модели для измеренных значений и с учетом корректировок по толщине и прочности льда

Скорость буксировки модели, м/с	Относительная погрешность измерений ледового сопротивления, %	Относительная погрешность измерений ледового сопротивления с учетом корректировки данных по толщине льда, %	Относительная погрешность измерений ледового сопротивления с учетом корректировки данных по толщине и льда прочности на изгиб, %
0,9	14,81	14,87	37,74
0,5	10,06	11,14	34,97

0,3	12,61	11,69	35,50
0,2	10,04	10,76	36,28
0,1	8,01	10,40	36,22

Проверка данного утверждения была выполнена на основе измерений ледового сопротивления буксировочной модели ледокольного судна, взятой за эталон. Длина модели составляет 4,84 м, ширина 1,02 м, осадка 0,372 м. В каждом из шести рассмотренных в данной работе ледовых полей проведены буксировочные испытания в сплошном ровном льду на скоростях движения модели 0,9 м/с, 0,5 м/с, 0,3 м/с, 0,2 м/с и 0,1 м/с. Результаты расчета погрешности измерений ледового сопротивления показаны в табл. 2.

При выполнении корректировки результатов изменений ледового сопротивления по толщине льда заметного роста погрешности не обнаружено. Для скорости буксировки 0,3 м/с даже получено ее снижение. Такой результат обусловлен тем, что точность воспроизведения требуемой толщины льда в ледовом бассейне достаточно высока. При этом погрешность ледового сопротивления по результатам его корректировки по толщине льда преимущественно снижается. Как результат, можно констатировать, что погрешность измерений ледового сопротивления, откорректированного по толщине льда, для скоростей буксировки модели, на которых преимущественно определяется предельная ледопробитость судов, составляет ~10%. Этот результат хорошо коррелирует с оценками погрешности такого рода экспериментов, представленных в разделе 7.5-02.04-02.5 Рекомендаций Международного Комитета Опытных Бассейнов [1] и работе Derradji-AouatA [6].

Как показали расчеты, результаты которых приведены ранее, относительная погрешность косвенных измерений прочности льда на изгиб достаточно велика. К тому же, при корректировке данных по прочности льда на изгиб в расчетах суммарной погрешности, дважды происходит корректировка измерений по толщине льда. Это связано с тем, что толщина льда входит в формулу для расчета прочности льда на изгиб. Все ранее обозначенные факторы приводят к тому, что относительная погрешность измерений ледового сопротивления тоже значительно возрастает. При этом необходимо учитывать, что формула расчета корректировки результатов измерений сопротивления по прочности льда на изгиб не подразумевает внесения существенных изменений в результирующее значение. Таким образом, целесообразно оценивать погрешность результатов модельных испытаний буксировочных моделей судов лишь на основе измерений ледового сопротивления, откорректированных по толщине моделированного льда.

Заключение

Проведённые исследования показали, что случайная погрешность определения ледового сопротивления по данным буксировочных испытаний не превышает 15% для широкого диапазона скоростей движения модели. Было обнаружено, что на скоростях движения, близких к тем, на которых определяется предельная ледопробитость судов, случайная погрешность снижается и составляет не более 12%.

Один из основных путей снижения погрешности при проведении модельных испытаний в ледовом бассейне тесно связан с разработкой новых средств измерений физико-механических свойств льда, в первую очередь его толщины. Не менее важным является также контроль свойств льда на всем протяжении движения модели, а не только в выбранных нескольких точках по площади бассейна. Эта задача неразрывно связана с развитием бесконтактных методов определения свойств льда, с целью сокращения времени на эту процедуру. Также на снижение погрешности может повлиять разработка обоснованного подхода в выборке данных для анализа ледового сопротивления. Он может включать в себя более глубо-

кое изучение изменений во времени ледового сопротивления при движении модели. Непосредственной целью указанных действий должно стать обоснование способа обработки первичных данных, включая установление оптимальной выборочной статистики.

Библиографический список

1. Experimental uncertainty analysis for ship resistance in ice tank testing. International Towing Tank Conference (ITTC) – Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02.04-02.5. – 2005. – 16 p.
2. Test methods for model ice properties. International Towing Tank Conference (ITTC) – Recommended Procedures and Guidelines. – 7.5-02.04-02, 2021. – 19 p.
3. Resistance tests in ice. International Towing Tank Conference (ITTC) – Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-02.04-02.1. – 2017. – 8 p.
4. Добродеев, А.А. Изменчивость физико-механических свойств моделированного льда гранулированного типа в ходе эксперимента // Морские интеллектуальные технологии. – 2022. – №2(2). – С. 29–36. — DOI:1.37220/МИТ.2022.56.2.038
5. Современные гидродинамические лаборатории / В. О. Борусевич [и др.]. – СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2019. – 316 с.
6. Derradji-Aouat, A. Experimental uncertainty analysis for ship model testing in the ice tank // Proceedings of the 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, Office of Naval Research, St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada. – 2004.

А.Д. Романов, Е.А. Романова, В.С. Макаров

ОСОБЕННОСТИ ПОДЛЕДНОЙ НАВИГАЦИИ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород

Показаны особенности подледной навигации в высоких широтах и, в частности, подо льдом. Приведены примеры реализованных проектов. Предложен вариант подводной навигации автономных необитаемых аппаратов в группе с использованием гидростатов ретрансляторов и подводного звукового канала.

Ключевые слова: воздухонезависимая энергетическая установка, необитаемый подводный аппарат, механизм изменения плавучести, подводный звуковой канал, глайдер, гидростат.

Одним из сложнейших вопросов подледного плавания является возможность точной навигации. Так, в работах [1, 7] показаны особенности навигации подо льдом. Для определения собственного положения под водой автономные необитаемые аппараты обычно используют инерциальную навигационную систему, которая, кроме набора акселерометров, может включать в себя, например, доплеровский лаг [2, 3]. При этом наличие ошибок в данных приводит к ошибкам в определении местоположения, которые накапливаются в процессе счисления пути.

В работе [4] представлено техническое решение для высокоточного позиционирования подводных аппаратов. Оборудование районов исследования навигационными гидроакустическими системами с донными маяками-ответчиками затруднено, к тому же срок активного существования донных маяков-ответчиков ограничен, а их выставка (замена) в ледовых условиях весьма проблематична. На рис. 1 показана сеть донных станций, дрейфующих и ледовых буев и подводных аппаратов проекта АСОВАР

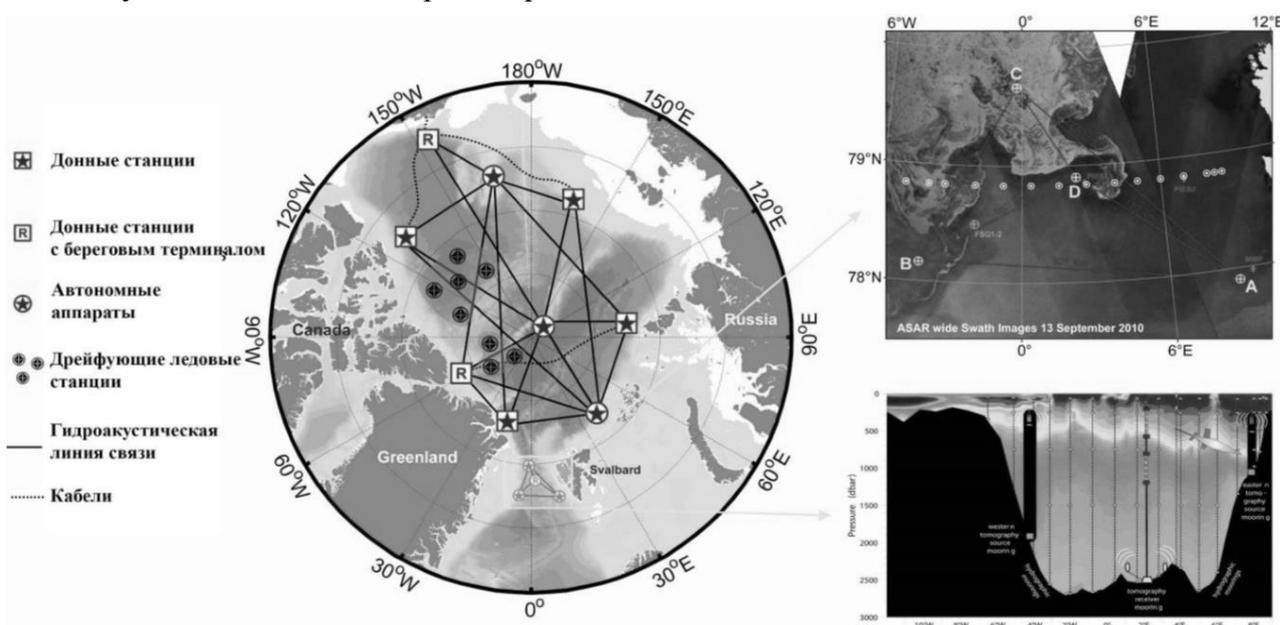


Рис. 1. Система донных станций в Арктике

Однако в условиях канального распространения звука в море возможно определение собственных координат аппаратом, находящимся на глубине подводного звукового канала.

При этом использование дрейфующих трансиверов антенны представляет собой намного менее затратную задачу, однако, срок работы оборудования и обеспечиваемые точности позиционирования существенно ниже.

Использование астронавигационных средств затруднительно из-за погодных условий и также предполагает всплытие во льдах. С аналогичными сложностями сталкиваются и при применении спутниковых навигационных систем, которые ограничено применимы в условиях сплошного ледового покрова. Однако в ряде работ, например, [5], предложены способы подледной обсервации подводных аппаратов в Арктическом бассейне.

Новые, качественные улучшения в области подводной навигации может дать функционирование автономных необитаемых аппаратов в группе. Так, в статье [6] рассмотрены особенности информационного обмена между автономными необитаемыми подводными аппаратами при их функционировании в группе. Рассмотрены наиболее сложные задачи навигации, координации и реконфигурации аппаратов в группе, решение которых невозможно без информационного обмена. Предложены алгоритмы с использованием информационного обмена между аппаратами. В работе [7] показано, что в подводной сетевидной системе группа автономных необитаемых подводных аппаратов осуществляет мониторинг морской среды, время их функционирования ограничено энергозапасом. То есть степенью энергообеспеченности во многом определяется и степень общей надежности как автономного аппарата, комплекса, так и всей информационно-измерительной системы в целом.

Подводный аппарат как классической схемы, так и глайдер оборудованный воздушно-независимой энергетической установкой [9], будет располагать большим запасом энергии, по сравнению с вариантом, основанным на применении аккумуляторных батарей. Что обеспечит большее время работы и/или большую дальность подводного хода.

Оснащение гидростата подобной установкой и использование его как ретранслятор сигналов навигационной системы, что позволит увеличить точность позиционирования аппарата. При этом аппарат оборудован сенсорами, обеспечивающими прием сигналов на значительном удалении от источника и собственной системой, обеспечивающей более точное определение собственного положения малыми подводными аппаратами, действующими в данном районе. Аппарат оборудуется системой сенсоров, позволяющих через определенное время определять свое местоположение по данным акустических станций, например, при пересечении подводного звукового канала.

Группа глайдеров, действующих в одном районе с гидростатом(и), обеспечивающими более точное местоположение глайдеров, которые не могут быть оборудованы сенсорами, обеспечивающими прием подводных сигналов на большом удалении.

Библиографический список

1. Глухов, Ю. А. Прямая и обратная задачи на небольших расстояниях / Ю. А. Глухов, Л. А. Заяц // Записки по гидрографии. – 2000. – № 250. – С. 43–47.
2. Жирабок, А.Н. Построение и экспериментальные исследования системы счисления пути малогабаритного автономного необитаемого подводного аппарата с аккомодацией к ошибкам в показаниях датчиков / А.Н. Жирабок [и др.] // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2015. – Т. 6. – С. 464-469.
3. Рылов, Н.И. Ключевые проблемы технологии создания и практического использования автономных необитаемых подводных аппаратов / Н.И. Рылов [и др.] // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2007. – Т. 2. – С. 4-17
4. Кебвал, К.Г. Комбинированная система гидроакустического позиционирования с короткой и длинной базой: экспериментальные результаты / К.Г. Кебвал, А.Г. Кебвал // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2013. – Т. 5. – С. 195-206.
5. Алексеев, С. П., Денесюк, Е. А., Катенин, В. А. Пат. № 2295808 на изобретение «Способ подледного приема спутниковых навигационных систем и устройство для его осуществления» // Приоритет изобретения: 2007 г.

6. Мартынова, Л.А. Обмен информацией между автономными необитаемыми подводными аппаратами при их взаимодействии в группе // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2018. – № 11-12 (125-126). – С. 135-144.
7. Мартынова, Л.А. Метод повышения эффективности функционирования группы анпа в сетевидной системе / Л.А. Мартынова, Г.Г. Безрук // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2017. – № 7-8 (109-110). – С. 97-104.
8. Сагалевиц, А.М. Методика глубоководных погружений в условиях сплошного ледового покрова // Океанология. – 2016. – Т. 56. – № 3. – С. 491-498.
9. Чернышов, Е. А. Разработка тепловыделяющего элемента на основе высокометаллизированного безгазового топлива / Е. А. Чернышов, А. Д. Романов, Е. А. Романова // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2015. – № 6(105). – С. 74-81. – EDN VKEBSF.

УДК 629.124.8.039

DOI: 10.46960/polmech_2023_42

Ю.А. Москвичева, Е.В. Зуева

СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПАСАТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород

Приводится анализ факторов риска аварий на нефтегазовых платформах, выявляются характерные особенности этих аварий с указанием последствий. Представляется краткий обзор типов техники и оборудования для спасения экипажей с оценкой целесообразности и возможности их использования с учетом дополнительных внешних факторов. Описаны условия для предполагаемой эксплуатации спасательной техники в Арктических районах. Обоснована актуальность комплексного подхода по решению проблемы по обеспечению безопасности работы на нефтегазовых платформах.

Выявляются принципиально важные характеристики для судов, спасающих экипажи, которые необходимо учитывать при постановке задачи проектирования. Предлагается использовать специальные суда на воздушной подушке для спасения экипажей морских нефтегазовых платформ в аварийных ситуациях.

Даются рекомендации по проектированию таких судов.

Ключевые слова: Арктический шельф, морские нефтегазовые платформы, аварийные ситуации, суда на воздушной подушке, спасение экипажей, безопасность на шельфе, спасательные средства.

Согласно энергетической стратегии РФ до 2030 г., добыча нефти и газа на шельфе Арктических, Дальневосточных и южных морей является наиболее перспективным направлением [1]. Постоянно создаются новые нефтегазовые платформы со значительным количеством экипажа. Суровые климатические и природные условия, связанные с отрицательными температурами воздуха, значительными ветро-волновыми явлениями, сложной ледовой обстановкой, приводят не только к осложнению их функционирования, но и к ограничению применения традиционных способов обеспечения безопасной работы буровых установок и спасению их экипажей в аварийных условиях.

Разведка и разработка нефтяных и газовых месторождений относится к сфере производственной деятельности повышенной опасности.

Негативные факторы, возникающие при эксплуатации морских буровых установок, зачастую имеют катастрофические последствия, поскольку темпы выделения энергии высоки, а возможности локализации и ликвидации аварий ограничены. Катастрофы на морских буровых платформах (МБП) могут сопровождаться большими человеческими жертвами и травматизмом из-за ограниченности территории платформы и трудностей эвакуации обслуживающего персонала. Отличительными особенностями аварий на морских площадочных объектах являются скоротечность развития аварийных процессов, связанных с выбросом углеводородов и их горением в условиях плотного размещения оборудования.

По данным [2] в мире за 30 последних лет произошло более 20 крупных аварий, приведших к гибели морских буровых установок, при которых погибло около 1000 человек. При этом нанесен многомиллиардный финансовый ущерб, нарушена экологическая безопасность. Практически каждый инцидент заканчивался тем, что платформа или уничтожалась, или становилась непригодной для восстановления и дальнейшей эксплуатации. Поэтому любые затраты на обеспечение безопасной эксплуатации морских платформ являются оправданными.

Наиболее частыми причинами аварий являются затопление платформ, разрушение в штормовых условиях или столкновениях, неконтролируемые выбросы нефти, пожары и взрывы, ледовые воздействия при подвижке ледяных полей.

Известные способы спасения экипажей в условиях зимней Арктики (спасательные шлюпки, плоты) практически бесполезны. Необходимо учитывать также, что возникающие аварии быстротечны, поэтому возможность спасения редко проходящими судами, к тому же, с малой скоростью, проблематичны. Погодные условия и дальность расположения вертолетных баз ограничивают возможность использования вертолетов в качестве спасательных средств.

Для эффективного выполнения спасательных функций при авариях на Арктических нефтегазовых платформах предлагается использовать специальные амфибийные суда на воздушной подушке, штатно расположенные на буровых платформах.

При проектировании таких судов необходимо учитывать следующее:

- Скорость и автономность судов должна быть достаточной для доставки экипажей на промежуточную или штатную базу;
- Пассажировместимость спасательных судов должна обеспечивать эвакуацию экипажа;
- Должна быть обеспечена проходимость спасательных судов в условиях ледовых нагромождений и торосов, сплошного и битого льда, участков чистой воды;
- Должна быть обеспечена остойчивость этих судов без секционирования гибкого ограждения (которое легко может разрываться обломками льда), а также при условиях перехода со льда на воду и наоборот;
- Должен быть обеспечен быстрый запуск судовых двигателей в условиях отрицательных температур;
- Приемлемая обитаемость;
- Применение материала гибкого ограждения, обеспечивающего в Арктических условиях достаточную прочность, упругость, морозостойкость и слабую адгезию со льдом.

Для обеспечения приведенных требований можно предположить следующие рекомендации при разработке технического задания на проектирование спасательных судов на воздушной подушке:

- Высоту гибкого ограждения следует принимать с учетом ледовых условий на маршруте. Ориентировочная высота ГО – $1,0 \div 1,2$ м;
- Скорость движения судна ~ 40 км/ч со снижением в условиях сильной заторошенности;
- Пассажировместимость: $30 \div 36$ человек;
- Форма и размеры гибкого ограждения увязывается с формой корпуса.

Наши исследования [3; 4], показали возможность обеспечения остойчивости без секционирования воздушной подушки со съёмными гибкими элементами коленообразного типа. Гибкое ограждение балонетного типа малопригодно для Арктических условий. В качестве материала гибкого ограждения целесообразно использовать «Виниплан» (Arctic). По результатам наших исследований, коэффициент трения этого материала по гладкому льду $\sim 0,065 \div 0,070$;

- В условиях отрицательных температур воздуха для быстрого запуска двигателей целесообразно использовать авиационные газотурбинные двигатели (в том числе, и отработанные в авиации). После длительного отстоя их запуск составляет несколько минут. Их работа с выбросом теплого воздуха позволит предотвратить обмерзание корпуса и гибкого ограждения;
- Количество спасательных судов и их размещение на платформе должно соответствовать количеству членов экипажа платформы;
- В качестве движителей целесообразно использовать воздушные винты регулируемого шага.

В качестве примера приведены разработанные основные характеристики спасательного судна на воздушной подушке:

- Длина расчетная, м..... 15,2
- Ширина расчетная, м..... 7,8
- Водоизмещение полное, т..... 17,0
- Высота ГО, м..... 1,0
- Пассажировместимость, чел... 40
- Полная мощность, кВт..... 480
- Скорость на тихой воде, км/ч.. 50
- Дальность плавания, км..... 300
- Давление в ВП, кПа..... 2,6

Библиографический список

1. Адамянц, П.П. Проектирование и освоение морских нефтегазовых месторождений. ООО «ЦентрЛитНефтеГаз» / П.П. Адамянц. – М., 2005.
2. Лисанов, М.В. Анализ риска аварий на опасных производственных объектах морских нефтегазовых месторождений / М.В. Лисанов, В.В. Симакин // Освоение ресурсов нефти и газа Российского шельфа: материалы II международной конференции ROOGD – 2008. – С. 20-51.
3. Зуев, В.А. Использование судов на воздушной подушке для разрушения ледяного покрова / В.А. Зуев, В.М. Козин. – Владивосток: Изд. ДВГУ, 1998.
4. Демешко, Г.Ф. Проектирование судов. Амфибийные суда на воздушной подушке: в 2-х т. / Г.Ф. Демешко. – СПб., 1998.

Е.М. Ларина

ОПТИМИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПРОЕКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНЫХ СУДОВ АКТИВНОГО АРКТИЧЕСКОГО ПЛАВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород

Создание судов активного арктического плавания – это комплексная задача, требующая новых идей и современного подхода. Предложена математическая модель оптимизации проектных характеристик судов активного ледового плавания исходя из критерия оптимальности. Представлены уравнения проектирования, входящие в математическую модель. Рассмотрены ограничения оптимизируемых параметров и дополнительные требования при проектировании.

Ключевые слова: судно арктического плавания, судно-снабжения, математическая модель, критерий оптимизации.

В арктическом регионе РФ сосредоточены огромные запасы природных ресурсов (нефть, газ, уголь и пр.). Для их добычи, бесперебойной транспортировки, а также для обеспечения безопасной работы буровых установок, необходим ледокольный и ледоколо-транспортный флот.

Для обеспечения потребностей предприятий и государства в надежном транспортном и грузовом флоте, а также для поддержки судостроительных предприятий, Правительством РФ была принята Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2035 г., согласно которой предусмотрено строительство около 250 морских транспортных судов, более 250 судов и единиц морской техники вспомогательного и технического флотов, 90 научно-исследовательских судов, 24 ледоколов, 44 судов - снабжения и обеспечения, а также около 150 судов и морской техники для освоения шельфовых месторождений [1].

Задача по исследованию состава флота и выбора водоизмещения и скорости судов достаточно широко исследована рядом авторов [2]. Задача же по выбору проектных характеристик таких судов недостаточно изучена.

В состав арктического флота в основном входят ледоколы, суда обеспечения, танкеры, суда-газовозы. Все эти суда можно отнести к транспортным судам активного арктического плавания. Поэтому встает вопрос о разработке способов выбора главных размерений таких судов, которые бы обеспечили оптимальную работу судна исходя из выбранного критерия оптимальности. В качестве критерия оптимальности может быть принят минимум приведенных затрат. Из всех типов судов арктического плавания рассматриваются суда обеспечения, так как потребность в них наиболее высока.

В настоящий момент главные размерения судов ледового плавания назначают, опираясь на статистические данные или на судно – прототип [3]. Такой подход позволяет выбрать размерения судна, однако сложно предположить, будут ли выбранные таким образом главные размерения оптимальными.

Более целесообразным является решение задачи выбора главных размерений судна на основе критерия оптимальности и совместного решения системы уравнений теории проектирования судов. Для этого необходимо составить модель оптимизации проектных характеристик судна по экономическому критерию, т.е. совокупность зависимостей между характеристиками, параметрами и данными, с одной стороны, и основными показателями, от которых определяются критерии экономической эффективности – с другой [4, 5].

В качестве объекта оптимизации рассматривается судно арктического плавания и математическая модель оптимизации его характеристик.

Математическая модель включает в себя [4, 5]:

- $\overline{C}(C_1, C_2, C_3 \dots C_n)$ – вектор параметров на проектирование (класс судна, дедвейт, скорость на чистой воде, скорость в предельных льдах, автономность, число членов экипажа);
- $\overline{X}(X_1, X_2, X_3 \dots X_n)$ – вектор оптимизируемых параметров (размерения L, B, T , коэффициент общей полноты δ);
- систему ограничений $G_j(\overline{X}, \overline{C}) \geq A_j, j = 1..m$ – включающую аналитические уравнения проектирования (уравнение плавучести, уравнение масс, уравнение ходкости, уравнение остойчивости, уравнение вместимости, требование к высоте надводного борта, начальной остойчивости и параметрам диаграммы остойчивости – система уравнений и неравенств (1));
- ограничения на компоненты вектора искомых характеристик $x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}$ (осадка, ширина корпуса, и т.д.);
- целевую функцию $Z(\overline{X}, \overline{C})$.

Совместная система уравнений имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} F \rightarrow \min, \\ D = k_{\rho} \rho \delta L B T, \\ D = \frac{(m_{04} + m_{09})N + m_{07} + m_{13}}{1 - p_{01} - p_{02} - p_{03} - p_{05} - p_{11} - p_{121}} + m_{14} + m_{15} + k_{\rho T} \cdot A \cdot 24 \cdot 10^{-3} N, \\ N_e = \frac{N_R}{\eta_S \eta_D}, \\ h_1 = \frac{\alpha^2}{11,4\delta} \frac{B^2}{T} + 0,5 \left(\frac{\alpha}{\delta} \right)^{0,5} T - z_g, \\ k_c (1 + s_H) \frac{D}{\rho} \left(\frac{H}{T} \right)^{\frac{\alpha}{\delta}} = b_1 B H + b_2 L + b_3 D + b_4 N + b_5 N_{\rho} + b_6 A N + b_7 N_{\text{сп}}, \\ H - T \geq F_{\min}, \\ h_0 \geq h_{0\min}, \\ l_{\max} \geq 0,25, \\ \theta_{l\max} \geq 30^{\circ}, \\ \theta_{\text{зак}} \geq 60^{\circ}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где F – целевая функция (приведенные затраты);

D – водоизмещение проектируемого судна, т;

L, B, H, T – длина, ширина, высота борта и осадка судна, м;

N_e – мощность главного двигателя, кВт;

α, δ – коэффициенты общей полноты и по КВЛ;

z_g – фактическое возвышение центра тяжести судна, м;

h – фактическое значение начальной метацентрической высоты, м;

F_{\min} – фактическое значение надводного борта судна, м.

Для решения данной задачи целесообразно использовать метод прямого перебора. Это вызвано тем, что заранее неизвестна форма функции цели. Кроме того, в данной задаче всего

четыре параметра оптимизации (размерения L , B , T и коэффициент общей полноты δ) и решение ее не вызовет затруднений.

Для определения коэффициентов в системе уравнений используются данные по судам прототипам, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики судов-прототипов

№ п/п	Наименование	Год построения	Ледовый класс	$L \times B \times T$, м	L/B , В/Т	DW , т	D , т	Скорость на чистой воде, уз	Мощность, МВт	Пределная толщина льда, м
1	Ледокольное судно обеспечения «Витус Беринг» пр.Р-70201	2013	Icebreaker6	99,2×21,7×7,9	4,6 2,7	3950	9800	-	13	1,7
2	Ледокольное судно обеспечения "Геннадий Невельской" Пр. Aker ARC 121	2017	Icebreaker6	100,0×21,7×7,6	4,6 2,9	3000	2984	16	13	1,5
3	Ледокольное судно обеспечения «Александр Санников» пр. Aker ARC 130A	2017	Icebreaker 8	121,7×26,0×7,6	4,7 3,2	3400	3400	16	21,5	2,0
4	Научно-исследовательское судно «Академик Терешников» Пр.22208	2012	Arc 7	133,6×23,0×8,5	5,8 2,7	-	6336	16	16,8	1,1
5	Многоцелевое судно «Астролябия»	2018	Icebreaker5	72,0×16,0×5,2	4,5 3,1	3000	-	12	4×1,6	-
6	Многоцелевой ледокольный буксир пр. Aker ARC 104	2010	A1 super (Arc5)	63,7×16,4×2,9	3,9 5,7	-	-	-	7,1	0,9
11	MPSV06M аварийно-спасательное судно	2022	Icebreaker6	79,88×18,41×6,52	4,3 2,8	1343	581 8	15	11,0	1,0
12	MPSV07 Многофункциональный буксир-спасатель	2022	Arc5	66,27×15,5×4,5	4,3 3,4	585	309 4	15	4,0	-
13	Судно снабжения ледового класса Sanaborg	2012	A1 super (Arc5)	65,85×14,0×2,5	4,7 5,6	969	-	12,5	2×3,5	0,9

Для учета ледовых подкреплений в зависимости от ледовой категории можно использовать зависимость измерителя корпуса оборудованного от класса судна. Данная зависимость может быть получена также по судам прототипам.

Представленный подход к определению главных размерений судов ледового плавания позволяет получить оптимальный вариант судна, при этом критерий оптимизации может быть выбран любой другой.

На рис. 1 представлена укрупненная блок-схема задачи определения оптимальных характеристик судна арктического плавания.

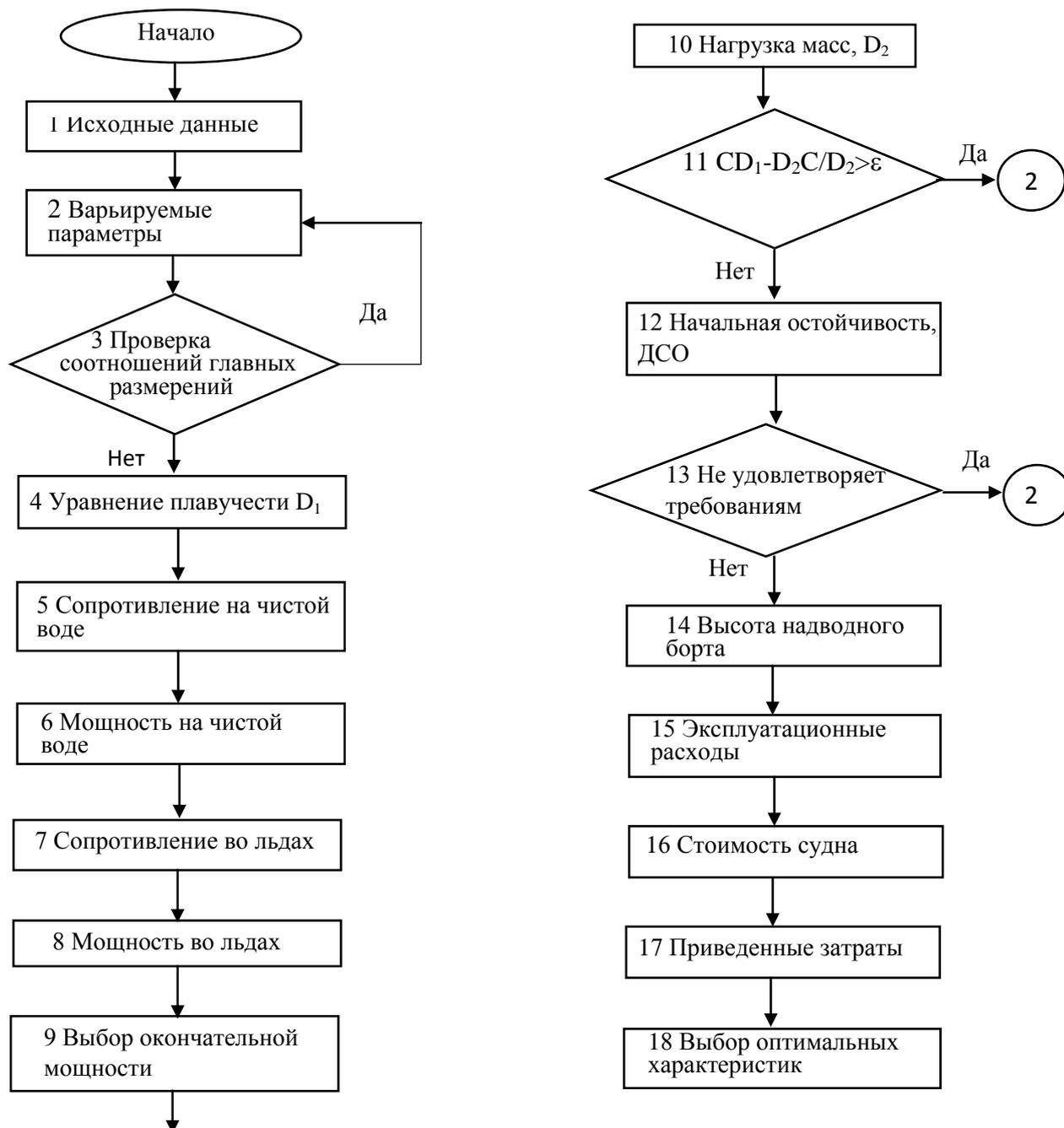


Рис. 1. Блок-схем оптимизации основных проектных характеристик судна арктического плавания

Библиографический список

1. Распоряжение правительства Российской Федерации от 28 октября 2019 года № 2553-р. Электронный ресурс URL: <http://government.ru/docs/38218/>
2. Буянов, А. Оценка потребности в транспортных судах ледового плавания для обеспечения грузопотока в акватории Северного морского пути до 2030 г. Часть I, II // Специализированный научно-практический журнал «Логистика» . – 2021. – №9. – С. 35-40.
3. Сазонов, К.Е. Теоретические основы плавания судов во льдах: монография / ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова / К.Е. Сазонов. – СПб., 2010. – 274 с.
4. Ионов, Б.П. Проектирование ледоколов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов, В.А. Зуев. – СПб.: Судостроение, 2013. – 512 с.
5. Гайкович, А. И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов: в 2 т. Т 2. Анализ и синтез системы «Корабль» / А. И. Гайкович. – СПб.: Изд-во НИЦ МОРИН-ТЕХ, 2014. – 872 с.

В.С. Касьянов, А.В. Родькина, В.А. Крамарь

ДИЗАЙН-ПРОЕКТ УНИВЕРСАЛЬНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь

Предложен дизайн-проект универсального подводного аппарата для научно-исследовательских и туристических целей. Выполнено моделирование корпуса подводного аппарата, которое сможет конкурировать с другими похожими разработками, имея над ними ряд преимуществ, проанализирован внутренний и внешний рынок, проработана 3D модель элементов конструкций корпуса. Дальнейшая проработка данного аппарата позволит создать физическую модель и провести экспериментальные исследования в опытовом бассейне.

Ключевые слова: подводный туризм, научно-технический задел, обитаемый подводный аппарат (ОПА), инновации, конструкторская документация.

Согласно стратегии «Развитие внутреннего и въездного туризма в Российской Федерации (2019–2025 годы)», социально-экономическая система России вступила в новый этап своего развития, внешнее выражение которого состоит в росте показателей темпов экономического восстановления, стабилизации показателей инфляции, возрождении инвестиционной активности, изменении потребительских настроений в сторону отечественных производителей. В таких условиях туризм может быть определен новым эффективным инструментом социально-экономического развития Российской Федерации [1].

Подводный туризм популярен во всём мире. Везде, где есть доступ к водоёму, озеру, морю и океану существуют дайвинг клубы, а в некоторых – подводные музеи. По всему миру насчитывают более 20 регионов подводного туризма. Основными регионами данной отрасли являются акватории Красного и Средиземного морей, Тихий и Индийский океан, Юго-Восточная Азия, Карибское море, а также побережье Австралии. В России и мире существует большое количество мест, подходящий под данные критерии. Подводный туризм прогрессирует с каждым днем, а последователи прибавляются тысячами. При использовании ОПА для подводного туризма решается основная проблема классического подводного туризма (дайвинга) – обучение дайвингу [2]. Оно является технологически сложным на всем периоде обучения и даже после его окончания требует высокой внимательности и физической подготовки от туриста; в то время как туризм в подводном аппарате не предъявляет таких жестких требований, благодаря чему в современное время может быть доступен широкому числу туристов.

Анализ рынка показал, что среди конкурентов, производимые США – AURORA-3 [3], OceanPearl – 2 [4], C-Researcher 2 [5]. Помимо этого, исследовательские компании в основном покупают те модели, производители которых представляют набор инструментов, пригодных для выполнения деликатных задач в исследованиях. Для исследовательских и археологических целей компании предоставляют дополнительные модификации: маломасштабный телеуправляемый необитаемый подводный аппарат (ТНПА) для осмотра затонувших судов, сбор образцов, функции батиметрии, гидролокатор с нижним проникновением и боковым сканированием, а также возможности 3D-сканирование – все это может быть установлено на данном подводном аппарате. Планируемый к созданию Cetus обходит их как по показателям характеристик: скорости, вместимости и автономности, так и будет дешевле в производстве. Подводный аппарат можно выделить фаворитом, так как имеет хорошее соотношение массы к скорости, в отличие от других, а также может брать большее количество человек на борту [6]. В связи с тем, что производство будет находиться на территории Российской Федерации, ремонт изделия будет стоить в два раза меньше, чем у конкурентов..

Вместе с тем, был проведен анализ и рынка беспилотных подводных аппаратов, где было получено, что глобальный рынок подводной робототехники будет расти совокупными ежегодными темпами роста на 13,5 % с 2018 по 2025 год и к 2025 г. достигнет 6,74 млрд долл. США. Это связано с растущим внедрением робототехники в оборонные и охранные приложения, помимо исследовательских, разные страны инвестируют в эту технологию для того, чтобы быть впереди [7].

В судостроении промышленный дизайн играет важную роль, где поднимается вопрос не только эстетики, но также удобства и безопасности. Президент ОСК Алексей Рахманов отметил, что повышение конкурентоспособности продукции, выпускаемой корпорацией, невозможно без изменения подходов к дизайну, внешней и внутренней архитектуре кораблей и судов. В перспективе взаимодействие по вопросам промышленного дизайна планируется с научно-образовательным центром «Морские науки, технологии и региональные экосистемы» [8], а ОСК станет индустриальным партнером.

В связи с ростом требований по совершенствованию конструкции, производимых в России и мире подводных аппаратов, повышению уровня безопасности, надежности и эксплуатационных качеств, была разработана модель в форме дельфина (рис. 1, рис. 2), соответствующая данным требованиям [9].

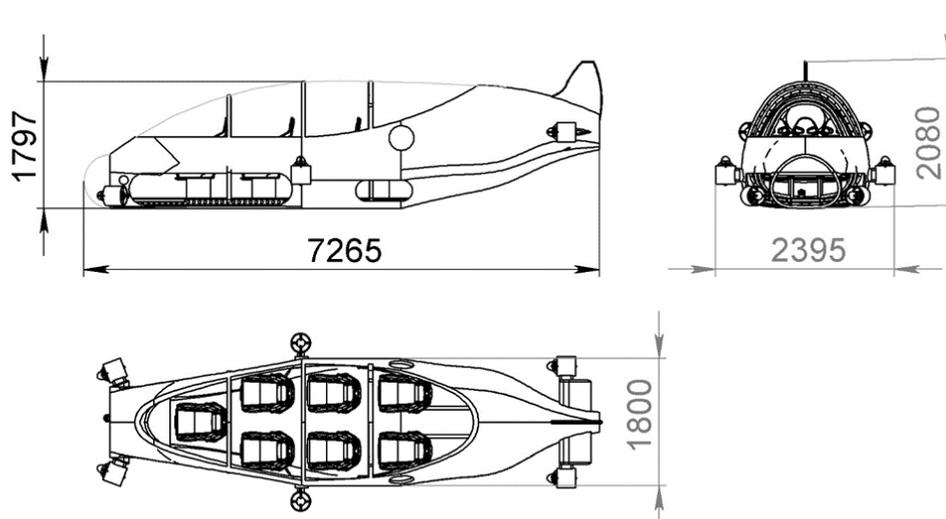


Рис. 1. Дизайн-проект разрабатываемого обитаемого подводно аппарата «Cetus»

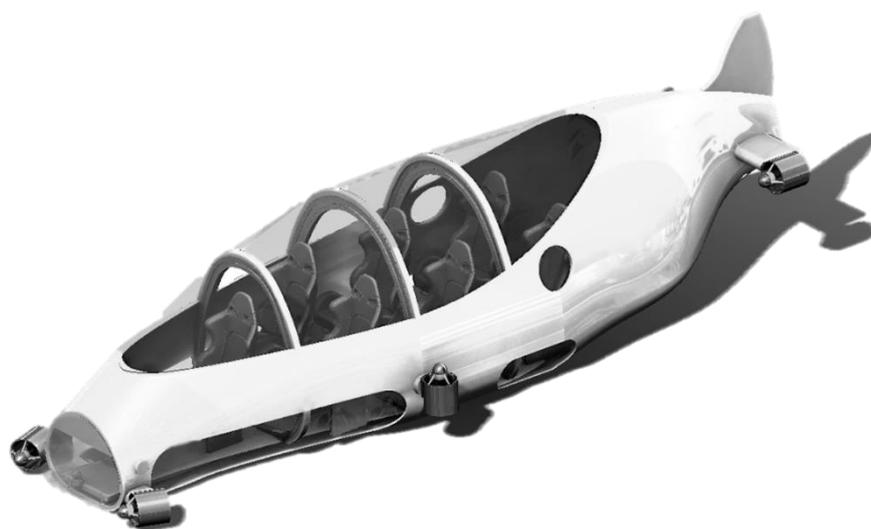


Рис. 2. Дизайн-проект 3D разрабатываемого обитаемого подводно аппарата «Cetus»

В качестве материала для изготовления корпуса подводного аппарата выбран алюминий-магний-сплав АМг-5. Сплав характеризуется сочетанием удовлетворительной прочности, хорошей пластичности, очень хорошей свариваемости, коррозионной стойкости и высокой усталостной прочностью [10]. Панорамная крыша и иллюминаторы выполнены из оргстекла (ПММА). Данный материал имеет ряд преимуществ, позволяющих использовать его в подводном аппарате: малая теплопроводность, высокая светопропускаемость 92 %, устойчивость в химических средах, имеет электроизоляционные свойства и подлежит утилизации.

Основные характеристики Cetus:

- ОПА вмещает на борту 7 человек (1 пилот, 6 пассажиров);
- вес - 5332 кг;
- скорость - 5 узлов;
- глубина погружения - до 250 м;
- автономность - до 10 ч.

Заключение

В ходе исследования был разработан конкурентоспособный аппарат для подводного туризма. Для него описана конструкторская документация, созданы чертежи и подобраны материалы корпуса. Решены задачи по анализу внутреннего и внешнего рынка подводного туризма – занятие нового развивающегося сегмента рынка, создание проектной базы для проектирования гражданских подводных аппаратов и развитие внутреннего и внешнего туризма в Российской Федерации, разработан дизайн-проект и 3D модель туристического ОПА. Дальнейшие исследования в области проектирования ОПА целесообразно проводить в направлениях инновационных (полимерных, комбинированных) материалов и их использования в качестве основного материала конструкции корпуса и обшивки. Научно-исследовательские цели включают в себе сбор информации о рельефе дна, о строении верхнего слоя осадков, о наличии на дне предметов и препятствий, изучении потенциальных месторождений полезных ископаемых.

Библиографический список

1. Развитие внутреннего и въездного туризма в Российской Федерации (2019-2025 годы). – М., 2019.
2. Цыганков, А.А. Геология дна океана / А.А. Цыганков. – М.: Издательство Бурятского государственного университета Улан-Удэ, 2019. – 333 с.
3. SEAMagine [Электронный ресурс] <https://www.seamagine.com/mini-submarine-2-person.html>
4. AURORA - 4 [Электронный ресурс] <https://www.seamagine.com/AURORA-4.html>
5. C-Researcher 2 [Электронный ресурс] <https://www.future rider/C-Researcher-2>
6. Войтов, Д.В. Подводные обитаемые аппараты / Д.В. Войтов. – М.: Наука и техника, 2002. – 335 с.
7. Агеев, М.Д. Автономные подводные роботы: система и технологии / М.Д. Агеев. – М., 2005. – 398 с.
8. Программа инновационного развития АО «ОСК» на период 2020-2024 годы» (далее - Программа) разработана во исполнение исполнения решений Правительственной комиссии по модернизации экономики и инновационному развитию России от 22 октября 2018 г. (протокол № 2) и утверждена 4 сентября 2020 года Советом директоров АО «ОСК». – М., 2020.
9. Боженков, Ю.А. Самоходные обитаемые подводные аппараты / Ю.А. Боженков. – М.: Судостроение, 1986. – 264 с.
10. Пантов, Е.Н. Основы теории движения подводных аппаратов / Е.Н. Пантов, Н.Н. Махинин, Б.Б. Шереметов. – М.: Судостроение, 1973. – 217 с.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ФУНКЦИОНИРОВАНИЮ ЛЕДОКОЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород

Описаны результаты экспериментальных работ по использованию ледокольных платформ на воздушной подушке (ЛПВП) разных проектов при различных условиях окружающей среды, таких как скорость ветра, толщина снежного покрова, и в разнообразных режимах по скорости и давлению в воздушной подушке (ВП). Определены основные факторы влияния на эффективность эксплуатации ЛПВП для рассматриваемых примеров. Установлены результаты предельных скоростей хода, толщины разрушаемого льда и ширины ледового канала, приведены примеры размеров обломков льда, образующихся в процессе эксплуатации. Также выявлены некоторые особенности взаимодействия ЛПВП с поверхностью льда. Комплексный обзор имеющихся трудов и экспериментальных исследований в сфере применения ледокольных платформ на воздушной подушке для прокладки ледового канала и увеличения продуктивности функционирования ледоколов сужает область проблематики в решении вопросов проектирования, ставя более конкретные задачи.

Ключевые слова: ледокольная платформа на воздушной подушке, разрушение ледяного покрова, гибкое ограждение, анализ экспериментальных исследований, испытания ледокольных платформ, прокладка ледового канала, ледовые испытания, сплошной лед, обломки льда.

Развитие судостроения и судоходства в ледовых условиях предполагает освоение нетривиальных технологий, изучение новых способов прокладки ледового канала и поиск более эффективных методов борьбы со льдом. Прогресс в технических областях знаний невозможен без применения экспериментальной части исследований, анализ которой дает всестороннее представление об эффективности применения новых технологий, помогает выявить слабые стороны и проблемы в элементах систем и наметить пути дальнейшего совершенствования. Традиционный способ ломки льда с помощью ледоколов не теряет своей актуальности, однако применение специализированных приспособлений и техник дает возможность достигать более впечатляющих результатов, при этом снижая стоимость эксплуатации. Одним из перспективных направлений увеличения эффективности работы ледоколов являются ледокольные платформы на воздушной подушке.

Принцип работы ледокольной платформы основывается на использовании собственной силы тяжести льда, ЛПВП чаще всего функционирует в сале с разными видами судов, прежде всего с ледоколами. Упоминания о применении метода давления были представлены ещё в конце XX в. в Канаде, США, Финляндии и СССР [1, 3, 5, 6, 7].

Одна из известнейших ЛПВП – «АСТ – 100» еще в 1972 году показала на испытаниях эффективность нового способа давления для разрушения льда [5, 7]. Однопалубное судно имело среднее расположение надстройки, корпус имел прямоугольную форму, по его периметру располагались воздухопроводы. Мощность нагнетательного комплекса составляла 1100 кВт и позволяла разрушать лед толщиной 70 см [3, 5, 8].

Испытания платформы «АСТ – 100» проводились в сале с ледоколом «А. Genry» мощностью 2600 кВт, во льдах толщиной 37-42 см, состав двигался со скоростью 8,9 уз. Отметим, что ледокол без платформы не мог преодолевать лед толщиной более 30 см [5]. Эко-

номическая эффективность доказана уменьшением расхода топлива при использовании ЛПВП, которое составило 573 л в час [1], в сравнении с расходом одного ледокола в 723 л в час [4] при одинаковой толщине льда и скорости.

Диаграмма ледопроеходимости ледокола «А. Генгу» и состава ледокола с ЛПВП «АСТ – 100» приведена на рис. 1 [3].

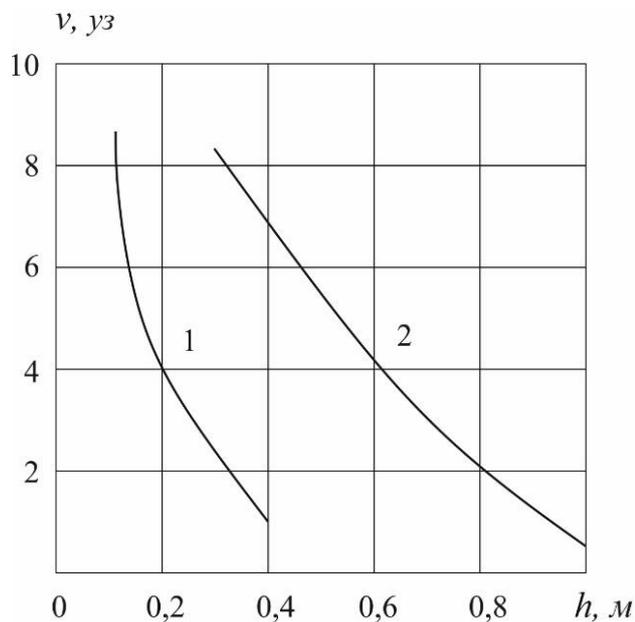


Рис. 1. Диаграмма ледопроеходимости ледокола «А.Генгу - 1» и состава с «АСТ – 100 – 2»

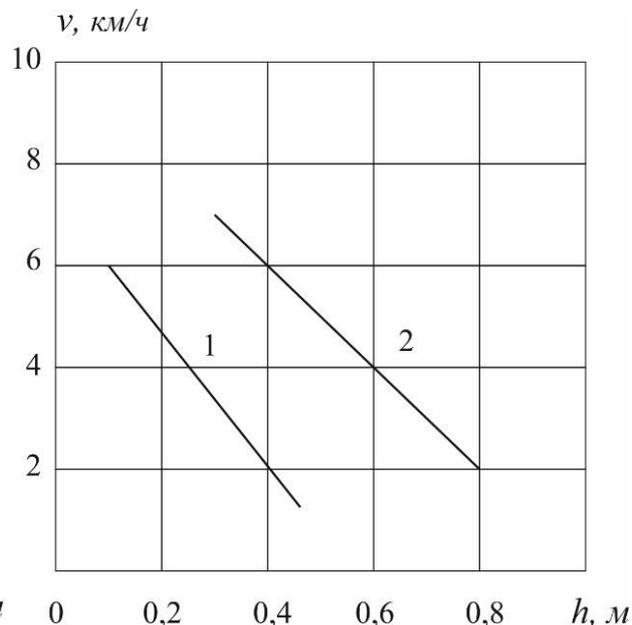


Рис. 2. Диаграмма ледопроеходимости ледокола «Ока-1» и состава с ЛПВП «Торос – 1»

Первоначально для создания воздушной подушки использовались два дизель-вентилятора мощностью 2х540 кВт при 1800 об/мин. В процессе модернизации были заменены вентиляторы, в корпусе платформы был сделан вырез под нос ледокола, а в кормовом вырезе установили ледоразводящий клин, целесообразность которого подвергается критике. Характерно, что все последующие модернизации платформы не вносили существенных изменений в конструкцию.

Достаточное количество испытаний было проведено с ЛПВП «АСІВ» [6]. Работая в счале с ледоколом «А. Генгу», буксиром «Zaunder Keip», и ледоколом «Louisst. Laurent», платформа показала эффективность в три раза выше, чем у ледоколов без платформы, прокладывая ледовый канал во льду толщиной до 1,0 м [5, 6]. При неизменной площади воздушной подушки, диагональное расположение платформы с толкачем привело к увеличению ширины ледового канала.

Испытания, проводимые в США и Канаде, показали, что в качестве толкающего судна вполне уместно использование неспециализированного для этих работ судна, так, например, проводились ледовые испытания ЛПВП «Iceator - I» с танкером «ImperialSt. Clare» [8].

Широкую известность получила спроектированная в НГТУ совместно с ЦКБ «Вымпел» натурная модель ЛПВП – 102П, испытания которой внесли огромный вклад в изучение ледокольных качеств судов данного типа [1]. Испытания проводились на Горьковском водохранилище в счале с ледокольным буксиром «Озерный – 206» на ровном льду и на поле льда с нагромождением отдельных льдин. Присоединение к буксиру ледокольной платформы увеличило ширину получаемого канала с 12 до 22 м со сплоченностью в 6-7 баллов вместо 9-10 баллов, которые были без ЛПВП. Скорость состава достигала 7 км/ч, в то время как буксир без платформы продвигался по льду толщиной 0,8 м только набегая со скоростью 250 м/ч [1]. Исключительная маневренность и поворотливость состава, при которой цирку-

ляция в сплошном льду совершалась в пределах судового хода, добавила дополнительные поводы для дальнейших разработок.

Опытная ЛПВП – 107 П «Торос» также спроектированная общими усилиями ЦКБ «Вымпел» и НГТУ участвовала в испытаниях в счале с буксиром «МБ» и с ледокольным буксиром «Ока» и продемонстрировала эффективность разработки. Диаграммы ледопроеходимости ледокола «Ока» и состава с ЛПВП показаны на рис. 2. Скорость прокладки ледового канала при толщине льда 40 см с ЛПВП была выше почти в 7 раз, чем без неё [1]. Опыты показали также экономическую эффективность способа, при которой в разы снижается стоимость ледокольной работы. Фрагмент испытания ЛПВП «Торос» в счале с ледоколом «Ока» представлен на рис. 3.

Более современная полунатурная модель ЛПВП (пр. 00702) спроектированная НГТУ и ЦКБ «Вымпел», построенная при участии Крыловского государственного научного центра испытывалась в 2014 г. в счале с ледокольным буксиром «Калашников». Толщина льда в районе испытаний составляла до 0,45 м. а сплоченность льда в ледовом канале составила 7 баллов. Корпус судна выполнен из сплава АМГ [9]. Фрагмент испытаний ЛПВП – 00702 представлен на рис. 4.

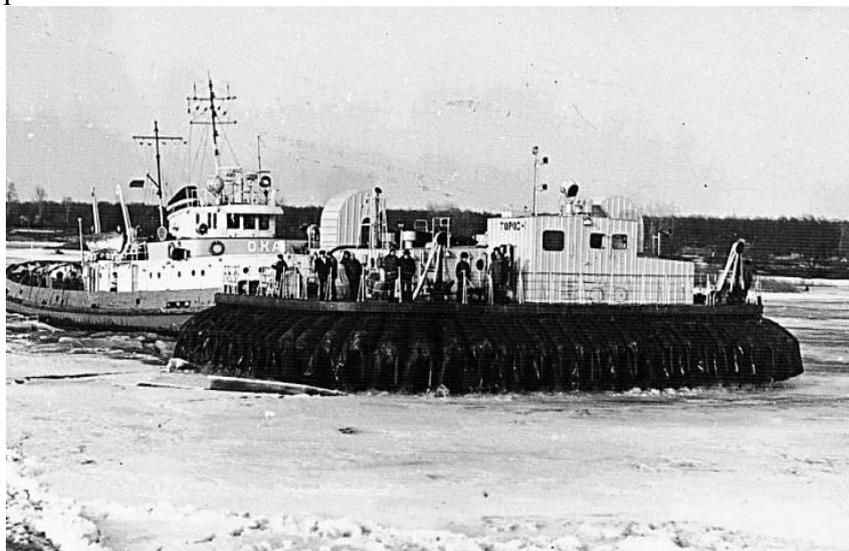


Рис. 3. Фрагмент испытаний по разрушению льда в счале с ледоколом «Ока» (пр. 16)



Рис. 4. Счаливание ЛПВП с буксиром [2]

В результате обзора экспериментальных испытаний ЛПВП, выполненных в России и за рубежом, было установлено:

- влияние толщины снежного покрова при использовании ЛПВП на скорость ее движения (на примере состава ЛПВП «АСІВ») ощутимо при значениях 30-60 см [6]. При условиях, пока толщина снега не достигает 30 см, он не оказывал воздействия на скорость движения [5];
- выявлено влияние силы ветра на скорость хода состава ЛПВП - АСІВ с ледоколом «А. Genry». Попутный ветер силой в 2-3 балла оказал положительное влияние, позволив развить скорость движения состава до 5,4 уз. Замечено, что при той же частоте вращения гребного вала, но уже при встречном ветре на обратном пути разогнать состав удалось лишь до 4,2 уз [5, 6];
- определено влияние массы судна и давления в воздушной подушке на скорость хода. На примере ЛПВП «АСІВ» при больших массе и давлении скорость зафиксирована ниже. При давлении в ВП 7 кПа и массе судна 200 т была достигнута скорость на 2 уз больше, чем в ходе испытаний судна массой 264 т и давлении в ВП 9 кПа;
- выявлено падение давления в воздушной подушке при движении судна массой 264 т с давлением в ВП 9 кПа во льду толщиной 50 см при достижении скорости в 4 уз. Разрушение ледяного покрова в этих условиях происходило уже далеко под подушкой. Определена максимальная скорость движения в 6,5 уз;
- наблюдалось, что ширина проложенного канала всегда была больше ширины «АСТ – 100» и «АСІВ» [5, 6], в среднем достигая 30 м. Для более толстого льда при движении с небольшой скоростью ширина проделанного канала уменьшалась;
- отмечено уменьшение брызгообразования на скоростях хода 4-5 уз. Разрушение льда при этом осуществлялось внутри гибкого ограждения, а не перед судном, как при движении ЛПВП на небольших скоростях при начальном разрушении ледяного покрова;
- наблюдалось уменьшение размеров обломков разрушаемого льда при увеличении скорости хода состава. Так, при прокладке канала во льдах толщиной 60 – 65 см с небольшими скоростями размер обломков достигал 3,5 м. При движении с большей скоростью во льду толщиной 35 см размер обломков льда не достигал более 1,5 м [1, 6];
- продемонстрированы высокие показатели маневренности при работе во льдах составов с ЛПВП. Радиус циркуляции судна при испытаниях составлял ~ 1,5 длины судна при движении во льдах толщиной 40 см. Для ледокольных операций маневренные качества являются важными факторами эффективности работы, определяющими качество и расширяющие диапазон эксплуатации;
- определены наиболее эффективные источники воздуха повышенного давления для ЛПВП, в качестве которых предлагается использовать центробежные вентиляторы. При относительно малых расходах, они позволяют получать необходимое для работы давление. В зависимости от условий эксплуатации можно применять один воздуходуватель либо несколько, включая их в одну воздухопроводную сеть.

Установленные выводы дают почву для дальнейших исследований в области изучения разрушения льда способом давления, и намечает вектора развития технологий на воздушной подушке.

Библиографический список

1. Зуев, В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.
2. Зуев, В.А. Оценка сопротивления ледокольных платформ на воздушной подушке / В.А. Зуев, А.В. Саватеев // Проектирование, теория и прочность судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. / Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 1992. – С. 43-49.

3. Ball, M.A. Continuing Advances with Air Cushion Icebreaker // Proc. of the 10-th Canadian Symposium on Air Cushion Technology, Ottawa, Canada, Jan 1977. – P. 105-120.
4. Edwards, R.Y. Model Tests in Support of ALEXANDER HENRY/ACT-100 Concept Development R.Y. / Edwards, R. Abdelnour // ARCTEC CANADA LIMITED Final Report 122C, January, 1977.– P. 217-234.
5. Edwards, R.Y. Results of Full Scale Field Trials of ACT-100 with CCGS ALEXANDER HENRY / R.Y. Edwards, J.R. Nadreau, M. Dunne // ARCTEC CANADA LIMITED Final Report 150C, October, 1976.
6. Mirkham, P. Canadian Coast Guard ACIB 1982/83 / P.Mirkham, J.T. Laframboise // Canadian Aeronautics and Space Jour. 1984. V.30,no 4, Dec. – P. 311-329.
7. Suyder, J.C. Iceator-1. The Air Cushion Icebreaker J.C. / Suyder, Ball // Paper OTC 3no2, presented at the 9-th offshore Technology Conference. Huston, USA. May 1977. – P. 289-297.
8. Wade, R.G. Air Cushion Technology in Icebreaking Hovering // Craft and Hydrofoil, 1975. – Vol 14. – №8. – P. 20-23.
9. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка технологии разрушения льда с использованием платформ на воздушной подушке с апробацией на действующем макете». Часть 6. «Результаты испытаний действующего образца ЛПВП в натуральных ледовых условиях»/ научн. рук. В. А. Зуев; Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2014. – 250 с.

УДК 532.5:551.465

DOI: 10.46960/polmech_2023_58

В.В. Булатов¹, И.Ю. Владимиров², М.А. Ильичева³**ДАЛЬНИЕ ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА И ГЛУБОКОЙ ЖИДКОСТИ ОТ ДВИЖУЩЕГОСЯ ИСТОЧНИКА**¹ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва,² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва,³ МГУ им.М.В. Ломоносова, г. Москва

Решена задача о построении асимптотик дальних полей волновых полей, возникающих на границе раздела льда и бесконечно глубокой жидкости при обтекании локализованного источника. Получено интегральное представление решения и с помощью метода стационарной фазы построено асимптотическое представление решения для сверхкритических режимов волновой генерации.

Проведено сравнение точных и асимптотических результатов, и показано, что асимптотики вдали от источника позволяют описать амплитудно-фазовую структуру дальних волновых полей.

Ключевые слова: ледяной покров, возвышение поверхности раздела, дальние поля.

Характерным природным фактором полярных районов Мирового океана и замерзающих морских акваторий является наличие ледяного покрова. Плавающий ледяной покров, определяющий динамическое взаимодействие между океаном и атмосферой, влияет на динамику не только морской поверхности, но и подповерхностных вод [1-4]. В общем движении по вертикали участвует как ледяной покров, так и вся масса жидкости под ним. Волновые процессы под ледяным покровом проявляются в его деформации, которая зависит от физико-механических свойств льда. Воздействием волн можно объяснить такие явления, как образование трещин в сплошных ледяных полях, разрушение льда в прикромочных зонах, взламывание припая.

Изучение волновых процессов в море с плавающим ледяным покровом актуально для изучения его реакции на различные гидродинамические возмущения, движущиеся средства, процессы распада ледяных полей в интересах судоходства, а также совершенствования методов дистанционного зондирования поверхности ледяного покрытия. Современное состояние проблемы и подробный обзор работ содержится в [3, 4]. В природных условиях причинами деформации ледяной поверхности могут быть, например, импульсные и периодические изменения давления, подводные источники различной физической природы, движущиеся по льду нагрузки постоянной и переменной интенсивности [2, 5, 6]. Обычно предполагается, что ледяной покров является сплошным, то есть его горизонтальные масштабы превышают длины возбуждаемых волн [3, 7-10]. Ледяной покров при достаточно естественных условиях моделируется тонкой упругой пластиной, деформации малы и пластина является физически линейной [3, 4]. В дальнейшем для проведения прогнозных расчетов возмущений ледяного покрова можно подбирать параметры использованной модели так, чтобы приблизить смоделированную волновую систему к реально наблюдаемым в природных условиях картинам возмущения поверхности льда [5, 6].

Целью настоящей работы является решение ранее не рассматриваемой задачи о построении асимптотик дальних полей возмущения ледяного покрова, возбуждаемых локализованным источником в потоке однородной жидкости бесконечной глубины.

Рассматривается поток идеальной бесконечно глубокой жидкости, который обтекает точечный источник мощности q ($q = \text{const}$). Сверху течение ограничено ледяным покровом толщины h . Горизонтальная плоскость $\xi\eta$ совпадает с невозмущенной границей раздела

жидкости плотности ρ_0 и льда плотности ρ_1 . Скорость потока направлена вдоль оси ξ и равна V , источник расположен в точке $(0,0,z_0)$, $z_0 < 0$. Обозначим через $\varphi(\xi, y, z)$ установившийся во времени потенциал возмущений скорости: $\nabla\varphi = (u, v, w)$, и через $\eta(\xi, y)$ – установившуюся величину возвышения поверхности раздела жидкости и ледового покрова. Тогда $(V + u, v, w)$ – вектор скорости произвольной частицы жидкости.

В линейном приближении математическая постановка задачи формулируется следующим образом [3, 7, 8]:

$$\left(\Delta + \frac{\partial^2}{z^2}\right)\varphi = q\delta(\xi)\delta(y)\delta(z - z_0), \quad (1)$$

$$\frac{D\varphi}{Dt} + g\eta - C\Delta\eta + B\Delta^2\eta + A\frac{D^2\eta}{Dt^2} = 0, z = 0, \quad (2)$$

$$\frac{D\eta}{Dt} = \frac{\partial\varphi}{\partial z}, z = 0, \quad (3)$$

$$\varphi \rightarrow 0, z \rightarrow -\infty, \quad (4)$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial\xi^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \frac{D}{Dt} = V\frac{\partial}{\partial\xi}, A = \frac{h\rho_1}{\rho_0}, B = \frac{Eh^3}{12\rho_0(1 - \nu_0^2)}, C = \frac{\sigma h}{\rho_0},$$

где g – ускорение свободного падения; E – модуль Юнга льда; ν_0 – коэффициент Пуассона; σ – начальное напряжение.

Характерные значения этих величин в морских условиях равны [1,2]: $\rho_0 = 1025 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\rho_0 = 0.9\rho_1$, $E = 3 \cdot 10^9 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$, $\nu_0 = 0.3$, $\sigma = 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$.

Из двух граничных условий (2)-(3) можно получить одно условие для φ :

$$\frac{D^2\varphi}{Dt^2} + g\frac{\partial\varphi}{\partial z} - C\Delta\left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) + B\Delta^2\left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) + A\frac{D^2}{Dt^2}\left(\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) = 0, z = 0. \quad (5)$$

В терминах Фурье образа потенциала $\Phi(\mu, \nu, z)$ задача (1),(4),(5) формулируется следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2\Phi}{z^2} - k^2\Phi &= q\delta(z - z_0) - \\ -\mu^2V^2\Phi + (g - Ck^2 + Bk^4 - A\mu^2V^2)\frac{\partial\Phi}{\partial z} &= 0, z = 0, \\ \Phi \rightarrow 0, z \rightarrow -\infty, k^2 &= \mu^2 + \nu^2. \end{aligned}$$

Решение этой задачи имеет вид

$$\begin{aligned} \Phi &= -\frac{(\mu^2V^2 \sinh kz + kP \cosh kz) \exp(z_0)}{kR}, z_0 < z \leq 0, \\ \Phi &= -\frac{(\mu^2V^2 \sinh kz_0 + kP \cosh kz_0) \exp(z)}{kR}, z < z_0, \\ P &= g + Ck^2 + Bk^4 - A\mu^2V^2, R = -\mu^2V^2 + kP. \end{aligned} \quad (6)$$

Тогда из (3), (6) Фурье образ возвышения Ψ можно представить в виде

$$\Psi = -\frac{iqV\mu \exp(kz_0)}{(Ak + 1)b(\mu, \nu)}, \Omega(k) = \frac{k(g + Ck^2 + Bk^4)}{Ak + 1}, b(\mu, \nu) = \Omega^2(k) - \mu^2V^2.$$

Здесь $\Omega(k)$ – дисперсионное соотношение для волн в неподвижной жидкости под ледовым покровом [3,7]. Тогда выражение для возвышения имеет вид

$$\eta(\xi, y) = \frac{-iqV}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-ivy) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\mu, \nu)}{b(\mu, \nu)} \exp(-i\mu\xi) d\nu d\mu, f(\mu, \nu) = \frac{\mu \exp(kz_0)}{Ak+1}. \quad (7)$$

Решение в форме (7) представляет сложную в вычислительном плане задачу из-за возникающих в расчетных формулах сингулярностей. Основной вклад в (7) будет определяться полюсами подынтегральной функции, расположенными на действительной оси. Эти два полюса (дисперсионные кривые) $\mu = \pm\mu_1(\nu)$ находятся из решения уравнения $b(\mu, \nu) = 0$, то есть $\mu^2 V^2 = \Omega^2(\sqrt{\mu^2 + \nu^2})$. Это уравнение имеет действительные корни лишь при выполнении условия $V > V_* = \Omega(k_*)/k_*$, где k_* – единственный положительный корень уравнения: $2ABk^5 + 3Bk^4 + Ck^2 - 2Agk - g = 0$ [3, 7].

Далее предполагается, что $V > V_*$, поскольку только в этом случае источник генерирует в набегающем потоке волновые возмущения [9, 10]. Тогда для суммарного вклада вычетов $\mu = \pm\mu_1(\nu)$ можно получить

$$\eta(\xi, y) = \frac{-iqV}{4\pi} \int_{L_+(\alpha)} \frac{f(\mu, \nu)}{G(\mu, \nu)} \cos(\mu\xi + \nu y) d\nu, G(\mu, \nu) = \frac{\partial b(\mu, \nu)}{\partial \mu}, \mu = \mu_1(\nu) \quad (8)$$

где $L_+(\alpha)$ – та часть дисперсионной кривой $\mu = \mu_1(\nu)$, для которой проекция вектора групповой скорости на направление S_α положительно, то есть выполнено следующее неравенство: $(V - \Omega'(k) \frac{\mu}{k}) \cos(\alpha) - \Omega'(k) \frac{\nu}{k} \sin(\alpha) > 0$. Это условие (условие излучения) означает, что волновая энергия распространяется наружу от источника возмущений.

Асимптотика интеграла (8) при $r \rightarrow \infty$ вычисляется методом стационарной фазы

$$\eta(\xi, y) \approx -\frac{qV}{4\pi\sqrt{2\pi r|D(k)|}} \frac{\mu_1(k) \exp(kz_0) \cos(\Psi)}{(Ak+1)T},$$

$$T = (\Omega(k)\Omega'(k) \frac{\mu_1(k)}{k} - \mu_1(k)V^2) \cos(\alpha) + \Omega(k)\Omega'(k) \frac{\nu_1(k)}{k} \sin(\alpha),$$

$$D(k) = (-\mu_1'(k)\nu_1''(k) + \nu_1'(k)\mu_1''(k))((\mu_1(k))^2 + (\nu_1(k))^2)^{-3/2},$$

$$\Psi = \mu_1(k)\xi - \nu_1(k)y + \frac{\pi}{4} \text{sign}(D(k)),$$

$$k = k_0(\alpha), \mu_1(k) = \frac{\Omega(k)}{k}, \nu_1(k) = \sqrt{k^2 + (\Omega(k)/k)^2},$$

где $k_0(\alpha)$ – единственный корень уравнения $\mu_1'(k)\cos(\alpha) - \nu_1'(k)\sin(\alpha) = 0$, функции $\mu_1(k), \nu_1(k)$ – определяют параметрическое (с параметром k) представление правой ($\nu \geq 0$) ветви дисперсионной кривой $\mu_1(\nu)$; $D(k)$ – ориентированная кривизна ветви $(\mu_1(k), -\nu_1(k))$, то есть левой ($\nu \leq 0$) половины дисперсионной кривой $\mu_1(\nu)$.

В работе с помощью метода стационарной фазы построены асимптотические решения, описывающие динамику волновых пакетов, возбуждаемых на поверхности ледяного покрова при обтекании локализованного источника потоком бесконечно глубокой жидкости. Построенные асимптотики дальних полей дают возможность эффективно рассчитывать основные характеристики волновых возмущений, и, кроме того, качественно анализировать полученные решения, что важно для правильной постановки математических моделей волновой динамики. Полученные асимптотические результаты с различными значениями входящих в них физических параметров позволяют провести оценку характеристик возмущений ледяного покрова, наблюдаемых в реальных океанических условиях. Построенные в работе асимптотики позволяют рассчитывать дальние волновые поля, в том числе, и от нелокальных источников возмущений различной физической природы.

В результате проведения модельных многовариантных расчетов по асимптотическим формулам смоделированная волновая система может быть приближена к наблюдаемым в натуральных условиях волновым картинам, что позволяет оценить физические параметры реальных источников возбуждения волн в морской среде с ледовым покрытием. Поэтому по-

лученные асимптотические результаты дают возможность определить основные характеристики начальных возмущений, варьируя модельные значения исходных параметров.

Таким образом, математические модели волновой генерации на поверхности раздела морской воды и льда могут быть не только верифицированы, но и использованы для проведения прогнозных оценок.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ грант 23-21-00194.

Библиографический список

1. Поверхностные и внутренние волны в арктических морях. – СПб.: Гидрометеоздат, 2002.
2. Morozov, E. G. Oceanic internal tides. Observations, analysis and modeling / E. G. Morozov. – Berlin: Springer, 2018.
3. Букатов, А.Е. Волны в море с плавающим ледяным покровом / А.Е. Букатов. – Севастополь: ФГБУН МГИ, 2017.
4. Ильичев, А.Т. Уединенные волны в моделях гидродинамики / А.Т. Ильичев. – М.: Физматлит, 2003.
5. Булатов, В.В. Волны в стратифицированных средах / В.В. Булатов, Ю.В. Владимиров. – М.: Наука, 2015.
6. Свиркунов, П.Н. Фазовые картины диспергирующих волн от движущихся локализованных источников / П.Н. Свиркунов, М.В. Калашник // УФН. – 2014. – Т. 184. – № 1. – С. 89-100.
7. Савин, А.С. Пространственная задача о возмущениях ледяного покрова движущимся в жидкости диполем / А.С. Савин, А.А. Савин // Изв. РАН. МЖГ. – 2015. – №5. – С. 16-23.
8. Ильичев, А.Т. Эффективные длины волн огибающей на поверхности воды под ледяным покровом: малые амплитуды и умеренные глубины // ТМФ. – 2021. – Т. 28. – №3. – С. 387-408.
9. Dinvay, E. Fully dispersive models for moving loads on ice sheets / E. Dinvay, H. Kalisch, E.I. Parau // J. Fluid Mech. – 2019. – V. 876. – P. 122-149.
10. Стурова, И.В. Движение нагрузки по ледяному покрову с неравномерным сжатием // Изв. РАН. МЖГ. – 2021. – №4. – С. 63-72.

Секция 2

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АРКТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

УДК 629.5:620.197.5

DOI: 10.46960/polmech_2023_62

А.В. Родькина, В.А. Крамарь, О.А. Иванова

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛА СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ В РАЙОНЕ ПЕРЕМЕННОЙ ВАТЕРЛИНИИ ДЛЯ ОКЕАНОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ ЧИСТОЙ ВОДЫ И ЛЬДА

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь

Предложен метод оптимизационных мероприятий для организации выбора типа защиты от коррозионно-механических разрушений в районе переменной ватерлинии. Выполнено моделирование поверхностного слоя стали для условий непрерывного погружения в модельный раствор морской воды и района переменной ватерлинии океанотехнических объектов.

Результаты микроскопии показали существенную разницу в структуре и составе поверхностного слоя в зависимости от моделируемых условий.

Дальнейшее изучение полученного элементного состава и снимков микроскопии позволит разработать методику компьютерного анализа данных на основе системы технического зрения или с применением интеллектуальных подходов для прогнозирования потенциала судостроительных сталей на различных этапах воздействия морской воды с целью усовершенствования методов защиты от коррозии.

Ключевые слова: метод анализа иерархий, коррозионно-механические разрушения, переменная ватерлиния, микроскопия, океанотехнические объекты, защита от коррозии.

Основными направлениями реализации «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г.» [1] является освоение газовых месторождений Обской губы, развитие Новопортовского нефтегазоконденсатного и Бованенковского газоконденсатного минерально-сырьевых центров, освоение Тамбейской группы месторождений и подготовка к освоению шельфовых месторождений, развитие судостроительной и судоремонтной промышленности.

Большинство объектов судостроительной отрасли строится из различных категорий углеродистой стали и эксплуатируется в морской воде – агрессивной среде различной солёности. Данные факторы провоцируют скорость и интенсивность протекания коррозионных процессов. Анализ существующих видов дефектов наружной обшивки морских судов и океанотехнических объектов, образовавшихся в результате коррозии, показал, что скорость ее протекания, как с внутренней, так и наружной сторонам обшивки судна, составляет приблизительно 0,025–0,125 мм/год [2] в зависимости от условий, в которых эксплуатируется данное судно или океанотехнический объект, что соответствует равномерной поверхностной коррозии и не учитывает локальные дефекты [3].

Воздух, растворенный в морской воде, значительно ускоряет процесс коррозии, благодаря чему участки металлической конструкции, расположенные у поверхности воды, корродируют значительно сильнее, чем на глубине. Район периодического смачивания (район переменной ватерлинии) начинается несколько ниже среднего уровня малой воды и заканчивается над ним на высоте в 1,5–2 раза превышающей расстояние от этого уровня до отметки

ее нижней границы. Диапазон простираения этого района зависит от приливно-отливных условий, номинальной высоты волны, а также от воздействия ледового покрова в условиях холодного климата. Особое внимание при проектировании океанотехнических объектов уделяется району переменной ватерлинии (ПВЛ), так как скорость протекания коррозии в этом районе является самой активной, из-за следующих факторов: солёность морской среды; скорость воздушных потоков; скорость течения морской среды; протяженность района ПВЛ; высота морских волн.

Арктическая зона не является исключением в связи с активной циклонической деятельностью и безледовым периодом (условия чистой воды) от 40 до 90 %, так высота района переменной ватерлинии в Чукотском море может составлять 11 м [4], в Баренцевом море – 4 м [5], в Карском море и море Лаптевых – 2,5 м [6, 7], в Восточно-Сибирском море – 2 м [8]. Также следует учитывать возможность возникновения района переменной ватерлинии в условиях формирования ледового покрова и в условиях льда при взламывании припая.

В зависимости от характера коррозии и условий ее протекания в тех или иных условиях применяются различные методы защиты корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений. Выбор того или иного способа определяется его эффективностью в данном конкретном случае, а также экономической целесообразностью. Одним из самых распространённых способов борьбы с интенсивной коррозией сталей в районе ПВЛ является применение коррозионно-стойких сталей [9], отличающихся высокой устойчивостью к коррозионным процессам. Цинкосодержащие лакокрасочные покрытия являются наиболее распространёнными и легкодоступными защитными материалами [10]. Также для защиты океанотехнических объектов применяется гальваностегия – покрытие металлической поверхности тонким слоем другого металла [11]. Одним из современных и перспективных типов защиты района ПВЛ океанотехнических сооружений является защита с применением изоляционной ленты (системы защитных кожухов) – иностранного [12] и отечественного производства [13]. Электрохимическая защита наложенным током позволяет использовать в самых широких интервалах потенциал и ток защиты, в ней заложены возможности регулирования параметров защиты, в том числе и автоматического. Эффективность такой защиты, в отличие от покрытий, не зависит от времени эксплуатации [3, 14–15].

Определение наиболее эффективного типа защиты морских объектов в районе ПВЛ от коррозионно-механических разрушений выполнено с помощью метода анализа иерархий (МАИ) [16] относительно следующих критериев: износостойкость; область применения; стоимость; инновационность; доступность. Результаты исследования показали, что наиболее эффективным типом защиты от коррозионно-механических разрушений океанотехнических объектов и морских робототехнических комплексов является система защитных кожухов. При этом наибольший вклад в выбор данного типа защиты составил критерий «износостойкость», который определяет степень противостояния защиты агрессивному воздействию внешней среды.

Специфика установки системы защитных кожухов заключается в нанесении многослойного покрытия, включающего в себя три элемента: 1) антикоррозионный праймер или пасту, обеспечивающую заполнение всех неровностей на поверхности конструкции; 2) ленту; 3) защитный кожух. Данная особенность резко сокращает численность океанотехнических объектов, для которых система защитных кожухов может быть использована, а именно, весьма сложно будет применить ее для стационарных оснований или самоподъемных плавучих буровых установок в случае ферменного исполнения опорного основания (колонн).

Сложно обеспечить необходимую плотность прилегания кожухов при их применении для защиты района переменной ватерлинии морских судов или океанотехнических объектов, имеющих монолитное стальное основание. В качестве альтернативы для таких объектов, исходя из результатов проведенного исследования, можно рекомендовать к применению электрохимическую защиту. Однако в дальнейших исследованиях следует изучить эффектив-

ность ее применения на участках смоченной поверхности района переменной ватерлинии, но не имеющих с водой непосредственного контакта в конкретный момент времени.

Учитывая особенности района переменной ватерлинии, необходимо детально изучить эффективность применяемых методов защиты, в частности – электрохимической защиты наложенным током. Для достижения поставленной цели были проведены исследования судостроительной конструкционной легированной стали на современном, быстром, эффективном и универсальном настольном сканирующем электронном микроскопе PhenomProX с интегрированной системой энергодисперсионного микроанализа. Для проведения микроскопического исследования (микроскопии) используется специально подготовленный образец микрошлиф. Перед исследованием образец фиксируется на предметном столике и размещается в специальном держателе, затем держатель с образцом устанавливается в рабочее пространство микроскопа. Микроскоп закрывается и в рабочем пространстве создается среда вакуума с помощью встроенного мембранного вакуумного насоса.

Для определения элементного состава в точке используется встроенный программный пакет Element Identification. Проведение исследования каждого образца выполнялось в пяти масштабах увеличения (100, 1000, 2000, 5000, 10000) и в трех-пяти точках различных монохромных оттенков полученных снимков. При проведении исследования после моделирования коррозионных процессов района переменной ватерлинии количество применяемых масштабов и точек может быть изменено в случае невозможности получения четкого изображения при высоком уровне увеличения и невозможности достижения требуемой четкости изображения. Время получения информации об элементном составе в отдельной точке составляет 10–250 мс, сохраняется информация о спектре материала в каждой точке, изображение образца, полученное с помощью детектора обратно рассеянных электронов, и изображение, содержащее информацию обо всех элементах.

Проведенная микроскопия позволила выявить разницу качественного и количественного элементного состава смоделированного поверхностного слоя, образующегося в результате взаимодействия стали с морской водой и влажной окружающей средой (в случае моделирования района переменной ватерлинии).

Изучение полученного элементного состава и снимков микроскопии определяет перспективу дальнейших исследований, а именно разработку методики компьютерного анализа данных на основе системы технического зрения или с применением интеллектуальных подходов с целью создания способа защиты океанотехнических объектов в районе переменной ватерлинии, особенностью которого является использование специального анодного узла, как защитного элемента, работающего на основе построения прогнозных оценок защитного потенциала с помощью нейросетевого моделирования для точного выбора защитного потенциала с учетом ювенильной поверхности.

Применение данного способа защиты позволит предотвратить коррозионно-механические разрушения корпусных конструкций морских судов и плавучих технических сооружений, проектируемых для арктических морей и эксплуатирующихся в условиях чистой воды и в условиях льда.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01321, <https://rscf.ru/project/22-29-01321/>.

Библиографический список

1. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечение национальной безопасности на период до 2035 г. – М., 2016.
2. Семенова, И.В. Коррозия и защита от коррозии / И.В. Семенова, Г.М. Флорианович, А.В. Хорошилов; под ред. И.В. Семеновой. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ФИЗМАТ-ЛИТ, 2010. – 416 с.

3. Kramar, V. Analysis Technology and Cathodic Protection for Hull Structures of Ships and Floating Facilities / V. Kramar [et al.] // *Inventions* 2021, 6, 74. <https://doi.org/10.3390/inventions6040074/>
4. Лоция западной части Чукотского моря, Берингова пролива и северо-западной части Берингова моря (№ 1120), ГУНиО, – 1999. – 240 с.
5. Лоция Баренцева моря, часть II (№ 1112), ГУНиО, Санкт-Петербург. – 2006. – 496 с.
6. Лоция Карского моря, часть II (№ 1115), ГУНиО, – 2001. – 296 с.
7. Лоция моря Лаптевых (№ 1118), ГУНиО, – 2009. – 300 с.
8. Лоция Восточно-Сибирского моря (№ 1119), ГУНиО, – 1998. – 208 с.
9. РД 31.28.10–97 Комплексные методы защиты судовых конструкций от коррозии. – М.: ЦНИИМФ, 1997. – 169 с.
10. Зеленская, А.Д. Функциональное цинкосодержащее лакокрасочное покрытие по металлу / А.Д. Зеленская, Н.В. Федякова, А.В. Павлов. – Текст: непосредственный // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2020. Т. XXXIV. – № 7.
11. Тамаров, М.А. Неорганическая химия / М.А. Тамаров. – М.: Медицина, 1974. – 226 с.
12. Маркович, Р. А. Коррозия и методы защиты зоны переменного смачивания металлоконструкций гидротехнических сооружений эстакадного типа / Р. А. Маркович, М. К. Кан, С. В. Михайлов // *Гидротехника*. – 2014. – № 4 (37).
13. Производство оборудования для электрохимической защиты <https://pss.ru/>
14. Rodkina Anna, Ivanova Olga, Kramar Vadim, Dushko Veronika, Zhilenkov Anton, Chernyi Sergei, Zinchenko Elena, Zinchenko A. Simulation and selection of a protection types in the design stage of ships and offshore structures. *Brodogradnja*. – 2022. –Vol. 73. – No. 2. – С. 59–77. DOI: <https://hrcak.srce.hr/file/399416>
15. Xing, S.H. Optimization the quantity, locations and output currents of anodes to improve cathodic protection effect of semi-submersible crane vessel / S.H. Xing, Y. Li, H.Q. Song, Y.G. Yan, M.X. Sun // *Ocean Engineering*. – Elsevier Ltd., 2016. – Vol. 113. – pp. 144–150. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.12.047>
16. Саати, Т. Аналитическое планирование. Организация систем: [пер. с англ.] / Т. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.

ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСА РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИХ МОРСКОЕ РАЗВЕДОЧНОЕ БУРЕНИЕ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

¹АО «Центральное конструкторское бюро «Коралл», г. Севастополь,

²Севастопольский государственный университет, г. Севастополь

С целью определения необходимого типа буровых установок для осуществления круглогодичного разведочного бурения в условиях льда в работе выполнен анализ лицензионных участков Арктической зоны Российской Федерации по глубинам морей, ледовым условиям, минимальным температурам воздуха. Рассмотрены реализованные и концептуальные проекты стальных и железобетонных буровых платформ, плавучих и с опорой на грунт.

Разработаны матрицы сравнения для всех анализируемых типов технических средств, выявлены преимущества и недостатки, определены наиболее перспективные типы, для которых выполнена оценка глобальных внешних нагрузок для условий рассматриваемых лицензионных участков.

Определена перспектива дальнейших исследований, заключающаяся в разработке новых концептуальных подходов к проектированию буровых платформ для расширения сезона бурения и круглогодичного разведочного бурения в условиях Арктики.

Ключевые слова: анализ, ледовые воздействия, буровая платформа, глубина моря, параметры дрейфа, определение сценариев.

Освоение Арктики является одним из направлений «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» [1, 2]. В рамках данного направления необходимо решение задач по эффективной разведке и освоению морских месторождений углеводородов на Российском Арктическом шельфе. Поэтому проблема создания морских технических сооружений для разведки и освоения нефтегазовых месторождений Арктического шельфа является современной и актуальной.

Главной целью работы является формирование комплекса проектных решений по морским ледостойким нефтегазовым сооружениям, обеспечивающим разведочное бурение в максимально возможном временном диапазоне с перспективой круглогодичной эксплуатации, что особенно важно на фоне растущей интенсивности освоения Арктики.

Для выбора типа буровой установки, обеспечивающей круглогодичное разведочное в Арктической зоне РФ, были рассмотрены и проанализированы лицензионные участки по глубинам моря, ледовым условиям, минимальным температурам воздуха. На основании выполненного анализа лицензионных участков было определено, что наибольшей их части есть участки с глубинами порядка 60 м, а анализ данных по минимальным температурам воздуха для арктических морей показал, что минимальная температура составляет от – 45 до – 50 °С.

Также, для определения типа буровых установок были рассмотрены реализованные и концептуальные проекты стальных и железобетонных ледостойких буровых платформ, способных осуществлять бурение в суровых климатических условиях. Стальные мобильные буровые установки – опирающиеся на грунт и плавучие буровые установки, с якорной системой удержания и динамическим позиционированием [3].

До настоящего времени бурение разведочных скважин на арктическом шельфе России осуществлялось самоподъемными, полупогружными буровыми установками и буровыми судами, работающими только в период «чистой» воды, то есть в безледовый период.

Для диапазона глубин до 30 м и диапазона глубин 20-60 м были рассмотрены стальные мобильные буровые установки, опирающиеся на грунт – погружного типа и самоподъемные плавучие буровые установки.

Авторами работы проанализированы реализованные и концептуальные проекты морских погружных буровых установок с прямоугольным и квадратным кессонным корпусом (например, «SDC», «Приразломная»); с коническим основанием (типа «Нерпа»); с одноопорным и многоколонным основанием и самоподъемные буровые установки.

Также в работе были рассмотрены плавучие буровые установки с якорной системой удержания и системой динамического позиционирования – ППБУ, т.е. полупогружные плавучие буровые установки на понтонах; осесимметричные буровые установки и буровые суда (в судовом корпусе и с комбинированной формой корпуса). Некоторые типы рассмотренных буровых ледостойких буровых установок представлены на рис. 1 и рис. 2.

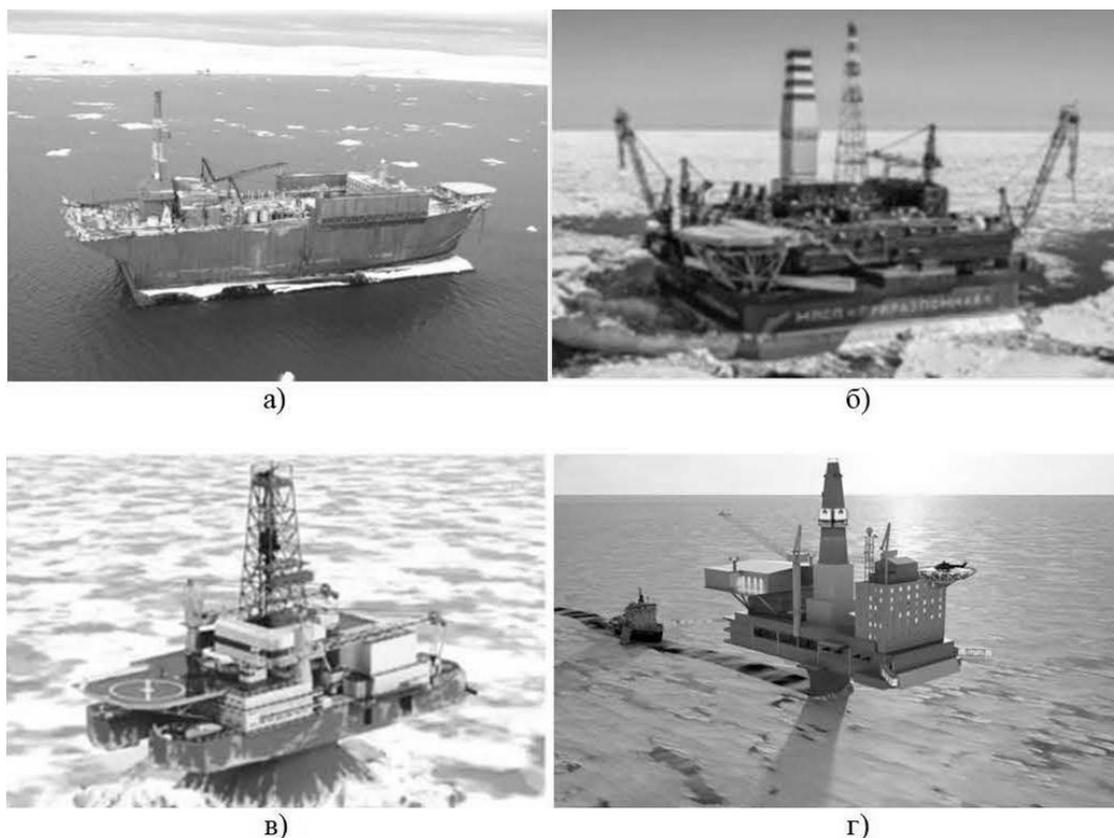
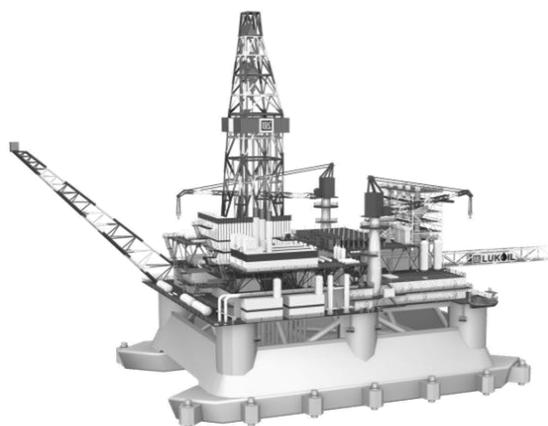


Рис. 1. Мобильные буровые установки, опирающиеся на грунт:

а – кессонного типа «SDC»; *б* – кессонного типа «Приразломная»;
в – с коническим основанием «Нерпа»; *г* – монопод (концепт компании Kvaerner)



**Рис. 2. Плавучая буровая установка ЛСП-1
для месторождения в Каспийском море**

Учитывая реальный опыт эксплуатации и концептуальные проекты ледостойких буровых установок, предназначенных для эксплуатации в ледовых условиях, был выполнен более детальный анализ для оценки их применимости на арктическом шельфе России, на основании которого выявлены преимущества и недостатки как стальных, так и железобетонных буровых установок.

Выявлено, что апробированность концепции погружных стальных буровых установок с опорой на грунт отсутствует для глубин более 30 м.

На больших глубинах у платформ, опирающихся на грунт – кессонного типа, значительно увеличиваются массогабаритные характеристики. Кроме того, несимметричность корпуса кессонного типа с прямоугольным основанием приводит к эксцентриситету приложения ледовых нагрузок.

Концепции стальных буровых установок с конической опорным основанием, опирающихся на грунт, имеют меньшие массогабаритные характеристики. Для данной концепции также отсутствуют вибрации при воздействии циклических нагрузок. Однако в процессе постановки на грунт и всплытия из-за небольшой площади ватерлинии возникает дефицит остойчивости.

В результате анализа существующих проектов (в том числе концептуальных) железобетонных погружных буровых установок определено, что на глубинах до 25-30 м их использование будет не эффективно. Применение железобетонных погружных установок с многоколонным основанием на малых глубинах осложняется воздействием значительных ледовых нагрузок; большой транспортной осадкой. При погружении и всплытии на глубинах более 50 м наблюдается дефицит остойчивости, а отрыв от грунта является недостаточно контролируемым процессом. Для железобетонных платформ типа монопод погружение будет производиться со значительным дифферентом. Устойчивость такого типа платформ в особо сложных льдах обеспечивается за счет использования забойных свай, а малый диаметр колонны позволяет бурить только одну скважину. Кроме того, габаритные размеры железобетонных буровых установок осложняют снабжение и эвакуационные меры персонала из-за значительного возвышения верхней палубы над уровнем.

Таким образом, на основании анализа существующих типов стальных и железобетонных буровых установок, опирающихся на грунт, разработана матрица сравнения (см. табл. 1), выявлены преимущества и недостатки, определены более перспективные типы платформ, для которых выполнена оценка глобальных внешних нагрузок, для условий рассматриваемых лицензионных участков, по методике СП 38.13330.2018 [4]. В табл. 1 приведена матрица сравнения рассмотренных вариантов погружных буровых установок кессонного типа, многоопорных и типа монопод.

Для платформ, опирающихся на грунт типа СПБУ (самоподъемных плавучих буровых установок) и плавучих буровых установок, также были разработаны матрицы сравнения.

Анализ, выполненный по существующим типам плавучих буровых установок, показал, что они способны работать в широком диапазоне глубин 60–1500 м и более. Данный тип буровых установок отличается высокой мобильностью, в том числе в ледовых условиях, эти сооружения обеспечивают конструктивную защиту райзера корпусом. Полупогружные и осесимметричные буровые установки характеризуются стабильностью на волнении. Однако все плавучие буровые установки имеют ограничения по держашей способности систем удержания, поэтому для принятия окончательного решения необходимо проведение модельных испытаний с целью уточнения держашей способности системы удержания [5, 6].

Для самоподъемных плавучих буровых установок глубина моря в точке постановки оказывает существенное влияние на характеристики платформы, поскольку с увеличением глубины постановки возрастают волновые и ледовые нагрузки на опоры, увеличиваются изгибающие моменты, действующие на опоры, увеличивается опрокидывающий момент, действующий на платформу в целом. Для самоподъемных буровых установок необходимо разработать специальную конструкцию защиты райзера, а также для них необходимо дополнительное снабжение, т.е. наличие мобильной базы обеспечения.

Таблица 1

Матрица сравнения рассмотренных погружных буровых установок

Критерии	Название буровых установок							
	SDC	Квадратный погружной кессон	Коническое основание	Нерпа	Морская ледостойкая буровая установка МЛБУ	Монопод «Kvaerner»	Condriil	Arctic S
Масса, т	81 000	63500	48 000	23840	56550	229 424	277 000	48 400
Габаритные размеры корпуса, м:								
длина, ширина,	202	105	115	91,2	115	140	124,2	100
высота борта	53	105	115	91,2	115	105	159,4	100
	27,5	48	46	41	41	16	13,5	38,5
Размеры корпуса на уровне ВЛ (LxB), м	162x53	80x80	30x30	48x48	70x70	26,0*	28,8-18,0*	83*
Глубина воды, м	7 - 24	до 30	до 30	9 - 20	7 - 27	20 - 50	20 - 60	до 25,5
Температура (рабочая/отстой)	-40 °С	-40 °С -60 °С	-40 °С -60 °С	-40 °С	-40 °С -60 °С	-50 °С	-45 °С	-40 °С
Проработанность концепции								
Устойчивость при воздействии льда								
Остойчивость при погружении/ всплытии								
Контролируемый отрыв от грунта								
Автономность по технологическим запасам								
Минимальная транспортная осадка, м								

Примечания:

1. * Указан диаметр, м;

2. Проработанность концепции:

	работоспособность подтверждена реализованными объектами со сходными характеристиками
	отсутствуют реализованные проекты со сходными техническими решениями;

3. Устойчивость при воздействии льда:

	обеспечивается круглогодично без дополнительных мероприятий,
	обеспечивается круглогодично на прочных грунтах,
	обеспечивается в ограниченных ледовых условиях на прочных грунтах,
	обеспечивается круглогодично при использовании свайного фундамента;

4. Остойчивость при погружении и всплытии:

	обеспечивается во всем диапазоне осадок,
	обеспечивается при создании незначительного дифферента,
	стойчивость обеспечена при погружении одной из оконечностей до момента касания с грунтом;

5. Контролируемый отрыв от грунта:

	работоспособность подтверждена реализованными объектами со сходными характеристиками,
	может быть обеспечен при использовании технических решений по преодолению присоса со стороны грунта,
	заявленные в документации разработчика критерии требуют дополнительной проверки с учетом конкретных условий месторождения;

6. Автономность по технологическим запасам:

	запасы на бурение одной и более скважины без дополнительного пополнения,
	запасы на бурение одной скважины без дополнительного пополнения,
	требуется дополнительное пополнение запасов,
	частое пополнение запасов;

7. Транспортная осадка:

	около 5 м,
	от 5 до 10 м,
	свыше 10 м

Результаты работы показали, что наиболее перспективной концепцией буровых установок с опорой на грунт является буровая установка со стальным коническим основанием для диапазона глубин до 25-30 м, для диапазона глубин от 20 и более 60 м – платформа с железобетонным многоопорным основанием. Данные технические сооружения имеют апробированное и надежное решение для круглогодичного бурения в условиях Арктики.

Однако существует ряд вопросов, которые необходимо учитывать при проектировании. Например, сложности при транспортировке на малых глубинах, неопределенность при отрыве от грунта. Кроме того, значительные по величине внешние нагрузки в условиях Арктики, действующие на сооружения, а также в большинстве случаев сложные инженерно-геологические условия требуют разработки специальных технических решений для конструкций опорных оснований, направленных на обеспечение устойчивости.

Библиографический список

1. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, Указ № 642 от 01.12.2016 г. – М., 2016.
2. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, Указ № 642 от 01.12.2016 г. – М., 2016.
3. Bellendir, E. N. Stability Analysis of an Artificial Island Structure Designed for Developing the Gas Field / E. N. Bellendir, O.M. Finagenov, V. B. Glagovsky // Proceedings of 21th International Offshore and Polar Engineering Conference, issued in Maui, Hawaii. USA. 2011. – P. 1023-1028.
4. СП 38.13330.2018 «СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)». – М.: Минстрой России, 2018.
5. Фадевнин, Г.А., Освоение континентального шельфа морей с ледовым покровом / Г.А.Фадевнин, А.В. Родькина, О.А. Иванова // Proceedings of Azerbaijan State Marine Academy №2, 2017, ISSN 2220-1025. – Баку, 2017. – Вып. №2. – С. 93–96.
6. Ленский, В.Ф. Перспективные концепции технических средств для освоения глубоководных акваторий арктических морей / В.Ф. Ленский, А.Г. Махмутов, М.В. Ковалев, И.Л. Благовинова, А.С. Тертышникова // RAO/CIS Offshore 2017: труды. – СПб.: Химиздат, 2013. – С. 153.

Е. В. Фальмонов

ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ СУДОСТРОЕНИЯ И СУДОХОДСТВА ДЛЯ ЗАМЕРЗАЮЩИХ РЕК И АРКТИКИ

Волжский государственный университет водного транспорта,
г. Нижний Новгород

Рассмотрены вопросы инновационных решений в области судостроения и судоходства для замерзающих рек.

Ключевые слова: концепция развития судоходства, технология прокладки нового канала, суда новой конструкции, ледокольный колесный движительно-рулевой комплекс.

1. Противоречия технологии проводки судов в Арктике

Сформировавшаяся в прошлом концепция развития судоходства в Арктике, отдававшая приоритет ледоколам, которые должны прокладывать канал во льдах и проводить за собой транспортные суда, не обладающие достаточной мощностью и прочностью для самостоятельного движения, с появлением в Арктике супертанкеров типа «ЯМАЛМАКС» шириной 50 м и ледопроеходимостью 2,1 м *устарела*. Дело в том, что ширина корпуса по ВЛ современных грузовых судов достигла 64 м, а действующих атомных ледоколов – 30 м, строящихся – 33, проектируемых пр. 10510 «Лидер» – 46 м, а количество мощных ледоколов не может быть большим из-за их огромной строительной стоимости (вместо одного «Лидера» можно построить 6 супертанкеров, а вместо двух ледоколов типа «Арктика» – 5 танкеров «ЯМАЛМАКС»). Проведённые в мае-июне 2020 г. сравнительные рейсы по СМП танкеров «ЯМАЛМАКС» с ледокольной проводкой и без показали практически одинаковую скорость и время движения [14].



Рис. 1. Атомный ледокол «50 лет Победы» и танкер «ЯМАЛМАКС»

Чтобы исключить это противоречие нужно применить суда новой конструкции и новые технологические и организационные решения ледокольно-транспортной работы в Арктических морях.

Необходимо обратить вред в пользу: лёд, который сегодня является препятствием, ис-

пользовать для повышения эффективности, скорости ледокольного судна и для создания и поддержания чистого канала шириной более 50 м, дать гарантию безопасности даже для судов, не имеющих ледового класса, обеспечить выход нескольких караванов в сутки из начального пункта маршрута. Нужен канал, как река с ледовыми берегами, и это возможно.

2. Способ прокладки и очистки ледового канала с применением судна новой конструкции

Традиционная технология прокладки ледового канала винтовым ледоколом имеет недостатки, которые не позволяют резко повысить эффективность ледокольной работы.

Предлагается свободный от этих недостатков новый способ прокладки и очистки ледового канала с применением судна новой конструкции.

По предлагаемому способу разрушение льда и очистка канала осуществляются закреплёнными на оконечности судна ледового плавания специальными ледокольными гребными колёсами, симметричной относительно ДП конструкции, с отдельно управляемым приводом, с радиальными объёмными прочными плицами винтовой формы, установленными под углом к оси колеса, образующими Ледокольный колёсный движительно-рулевой комплекс (ЛКДРК).

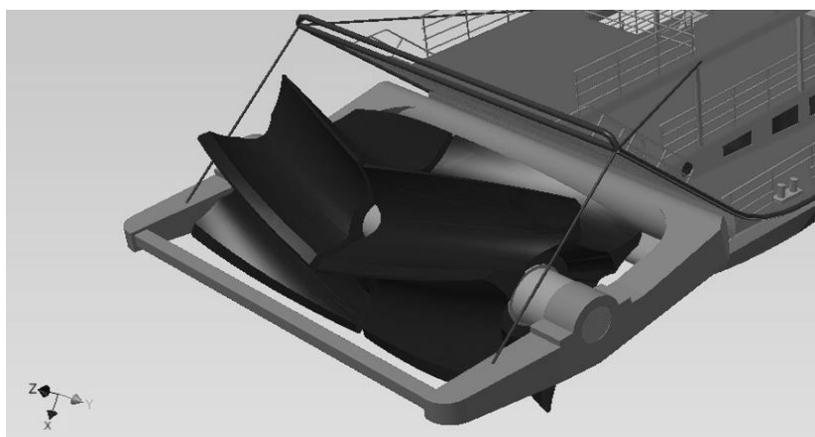


Рис. 2. Ледокольный колёсный движительно-рулевой комплекс ЛКДРК

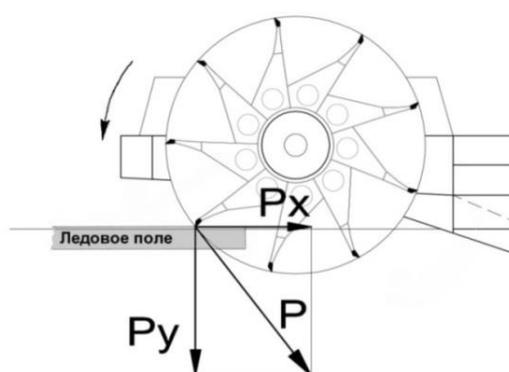


Рис. 3. Схема взаимодействия плицы ледокольного гребного колеса со льдом:

P_x – на движение; P_y – на разрушение льда

При осуществлении предлагаемого способа будет наблюдаться ряд положительных эффектов:

1. При движении колёсами на лёд разрушение льда ледокольными гребными колёсами происходит в основном деформацией среза, что, согласно расчёту, даёт снижение энергозатрат на прокладку канала в 1,5 – 2 раза в сравнении с традиционной технологией.

2. Гребные колёса при прокладке канала кормой взаимодействуют с массой воды, но основной импульс движения обеспечивают судну в результате контакта с твёрдым телом – льдом в момент его разрушения. Скольжение движителя уменьшается, а КПД возрастает. На рис. 3 показано распределение сил.

3. При возрастании сопротивления и падении скорости гребное колесо на чистой воде способно удвоить упор на единицу мощности [9]**, что обеспечивает судну повышенную динамику (разгон – торможение).

4. При вращении колёс, плицы, имеющие площадь, соизмеримую с площадью поперечного сечения подводной части корпуса, создают разрежение воды под кромкой льда, чем обеспечивается снижение энергозатрат на обрушение кусков льда при ударе следующей плицей.

5. Срезанные плицей куски льда притапливаются и, благодаря винтовой форме плиц, с большой массой воды перемещаются в стороны под кромку ледяного поля. Ледовый канал свободен от обломков льда.

6. Для эффективной прокладки канала по предлагаемому способу ледокольные гребные колёса должны иметь диаметр около 10 заданных толщин льда и иметь ширину движительного комплекса, равную заданной ширине канала, но больше ширины корпуса судна. В этом случае исключается трение корпуса о лёд, образование ледовой чаши. Гладкость обшивки ледового пояса, форма носа, от чего зависит ледопроечность традиционного ледокола, при использовании предлагаемого способа практически не имеют значения.

7. Окружная скорость наружной кромки лопасти ледокольного гребного колеса примерно в 10 раз превышает скорость судна, чем обеспечивается ударное взаимодействие плицы со льдом (эффект гильотины).

8. Предлагаемый способ позволяет преодолевать ледовые заторы на реках, в отличие от традиционных ледоколов, которые, подминая лёд, набивают его под корпус, садятся на него и теряют возможность движения. Форма корпуса и водоизмещение являются второстепенными характеристиками.

9. На чистой воде судно будет двигаться как заднеколёсное, обеспечивая повышенную динамику, а острая носовая оконечность (по требованию удифферентовки) даст корпусу судна необходимые мореходные качества.

10. Осмотр и ремонт колёс и элементов привода может осуществляться без докования судна.

При движении на чистой воде оконечность с гребными колёсами будет кормовой, а при прокладке канала судно идёт колёсами вперёд. В обоих случаях судно управляется изменением соотношения числа оборотов правого и левого колеса.

Конструкция Ледокольного колёсного движительно-рулевого комплекса (ЛКДРК) и привод гребных колёс

Обеспечить прокладку и очистку канала при меньших затратах энергии и большей надёжности позволит колёсный движительно-рулевой комплекс по российскому патенту №2225327 [15]. Гребные колёса прочной конструкции с винтовыми объёмными плицами могут быть рассчитаны на взаимодействие со льдом. Являясь поверхностным движителем, гребные колёса, встречая непреодолимое препятствие, не будут испытывать разрушающих нагрузок, а инерция судна будет погашена изменением дифферента при выкатывании колёс на поверхность льда.

Рама КДРК может быть жёстко закреплённой на транце корпуса, а может иметь шарнирное соединение, что даст возможность уменьшить вибрацию корпуса при работе колёс во льду, возможность сохранять оптимальное их заглубление при изменении эксплуатационной осадки, повысить надёжность и отказаться от балласта при движении порожнём.

* Алферьев, М.Я. Судовые движители / М.Я. Алферьев. – М.: Изд-во «Водный транспорт» 1938. – 497 с.

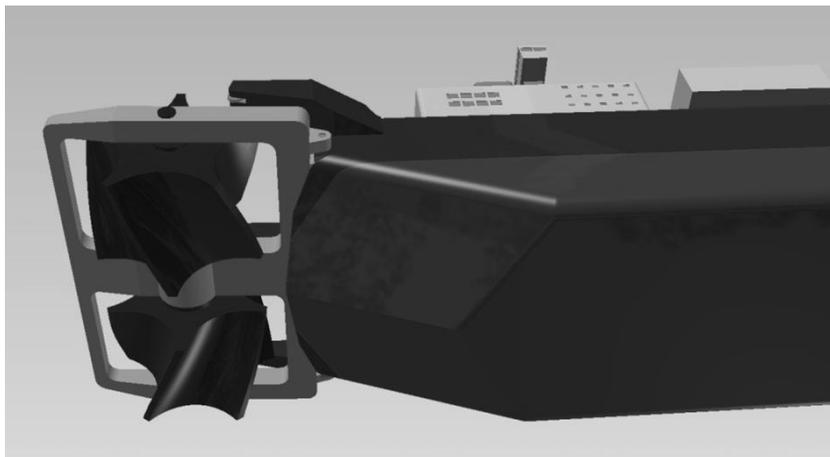


Рис. 4. Ледокольный колёсный движительно-рулевой комплекс танкера

Поскольку гребные колёса КДРК ледового класса напоминают по форме косозубую фрезу, суда с подобным устройством предлагается называть **ледофрез**.

Прочность гребных колёс, привода, рамы обеспечиваются по расчёту на ожидаемые нагрузки. Конструкция гребных колёс выполняется аналогично корпусу судна в районе ледового пояса с усилением кромки плиц.

3. Сравнение ледопроеходимости ледофреза и ледокола. Физическая модель взаимодействия ледофреза со льдом

Для сравнения ледового сопротивления ледокола и ледофреза был выполнен расчёт по полуэмпирической формуле Д.Д. МаксUTOва [1], который показал, что в рабочем диапазоне скоростей и толщин льда эффективность ледофреза выше, чем у ледокола той же ширины примерно в полтора - два раза.

Движение в сплошных льдах носом вперёд при предельных толщинах с устойчивой минимальной скоростью характеризуется циклическими пиковыми значениями дифферента длительностью несколько секунд. Кинетическая энергия массы судна расходуется на создание дифферента, вертикальной проламывающей силы, и на преодоление трения льда, заклинивающего корпус.

Величину проламывающей силы наклонным форштевнем можно оценить по формуле, которую предложил М.К. Таршис [6].

При движении колёсами вперёд картина будет иной. Колёса, поворачиваясь, будут плицами контактировать с поверхностью льда на расстоянии от кромки льда, равном расстоянию между плицами или меньшем, и оказывать нарастающее давление, вплоть до величины, необходимой для разрушения льда. Давление плиц будет нарастать за счёт подъёма колёс (если рама ЛКДРК имеет шарнирное крепление), или возникающего дифферента (при жёстком креплении рамы к корпусу). Причём при вращении колёс вокруг точки опоры, составляющие силы P_x и P_y (см. рис. 3) будут возрастать. P_x – за счёт перемещения точки контакта в нижнюю точку окружности колеса, а P_y – за счёт действия силы веса ЛКДРК. Физическая модель взаимодействия ледокольных гребных колёс со льдом при предельных его толщинах (примерно 0,1 диаметра) и с минимальной устойчивой скоростью представляется как шагающее колесо, поднимающееся на льдину и опускающееся при её разрушении, в основном деформацией среза.

Этот процесс при вращении колёс начинается с точечной нагрузки в районе ДП от углов винтовых кромок плиц, (при установившемся движении эта нагрузка будет ударной), затем нагрузка нарастает, и кромка плицы срезает кусок льда шириной 0,7-0,9 расстояния между плицами и длиной как плица. В отличие от проламывания льда форштевнем, когда для наползания на кромку нужна кинетическая энергия, ледокольный КДРК может разрушать лёд без разгона судна. Проламывающая лёд сила это вертикальная составляющая силы взаимодействия форштевня ледокола или плицы ледокольного колеса со льдом.

Расчёт проламывающей силы колёс, выполненный для ледокольного буксира-толкача «ЛБТК600», показывает, что её максимальная величина может быть меньше веса ЛКДРК. Это позволяет сделать важный вывод: ледопробитость ледофрезы может не зависеть от его водоизмещения.

В настоящее время планируется строительство 15 танкеров типа «ЯМАЛМАКС» на заводе «Звезда» по заказу «Роснефти», строительство 15 танкеров на верфи «Новатек», планирует заказывать такие суда «Росатомфлот», строить будет Китай. Скоро в Арктике их будет десятки.

Применение данного способа и конструкции на транспортных судах с размерениями «ЯМАЛМАКС» позволит без повышения мощности довести их ледопробитость до 3–3,5 м и обеспечить круглогодичное и регулярное движение этих судов по СМП без ледоколов со средней скоростью в зимний период не ниже 10–12 узлов, а в летний 18 узлов, использовать их для проводки других судов с большей скоростью по чистому каналу.



Рис. 5. Танкер СПГ, оборудованный ЛКДРК – ледофрез «Иван Кулибин»

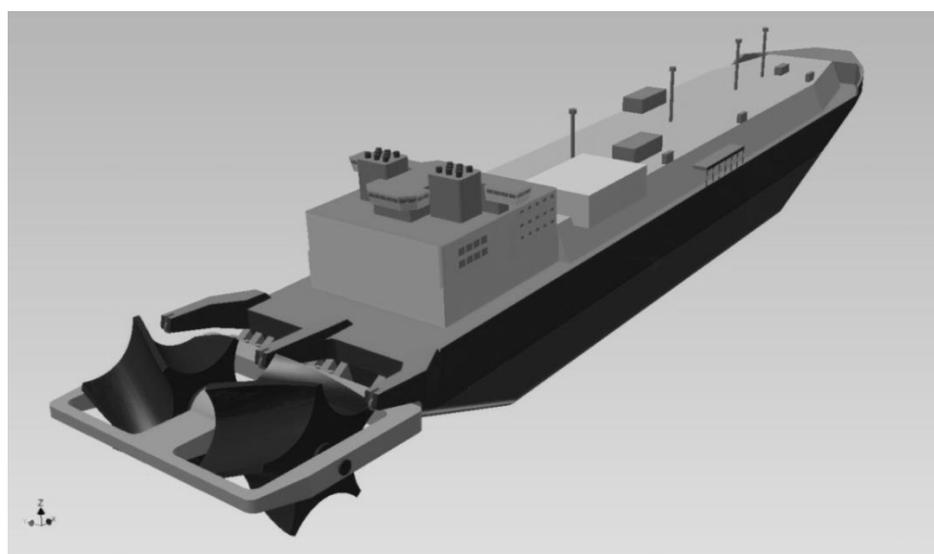
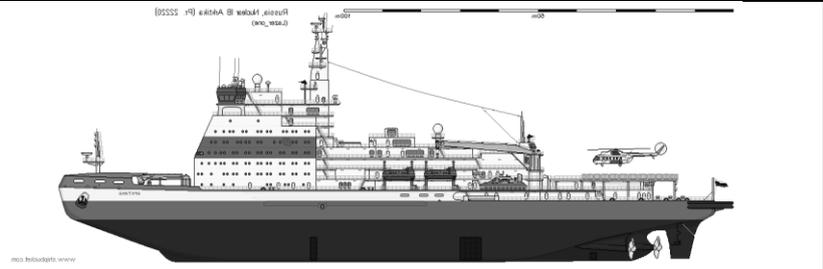


Рис. 6. Танкер СПГ – ледофрез «Иван Кулибин», вид на корму

Таблица 1

Сравнительная таблица характеристик танкера-ледофреза и ледоколов

			
		<p>Танкер-ледофрез «Иван Кулибин»,</p> <p>Ледокол пр.10510 «Лидер»,</p> <p>Ледокол пр.22220 «Арктика»</p> <p>(изображены в одном масштабе)</p>	
			
Характеристики	Ледокол «Лидер»	Ледокол «Арктика»	Танкер «Иван Кулибин»
Строительная стоимость	120 млрд руб.	50 млрд руб	20 млрд руб.
Размерения LxVxHxT, м	209x46x18,9x13	173,3x33x15,2x10,5	327x50x26,5x13
Водоизмещение	70674 т	33540 т	132000 т
Мощность на движителе	120 МВт (Ядерная ЭУ)	60 МВт (Ядерная ЭУ)	45 МВт (Топливо СПГ)
Скорость, узлы/толщина льда, м	23/0; 12/2; 2/4	22/0; 2/2,9	19/0; 19/0,5; 12/1,5; 2/3,5
% битого льда в канале	90%	90%	10%
Ширина канала, м	48	35	54
Грузовместимость	---	---	172600 куб м СПГ

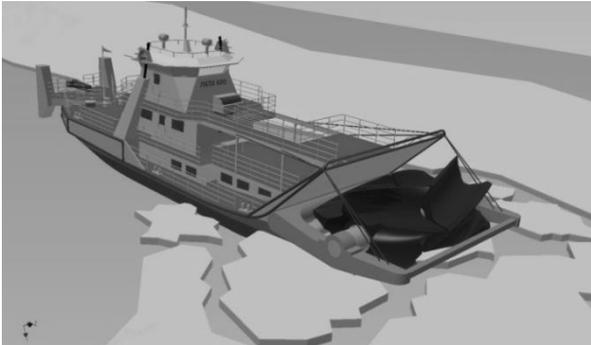
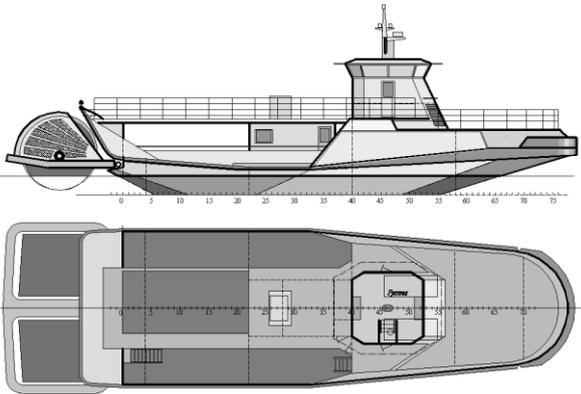
Положительный эффект от применения ЛКДРК для ледокольной работы (в сравнении с винтом):

1. Снижение потребной удельной мощности в 1,5-2 раза;
2. Обеспечение чистого ледового канала;
3. Уменьшение минимальной потребной осадки до 2-2,5 расчётных толщин льда вместо 6;
4. Повышение надёжности;
5. Возможность отказа от балласта в рейсе порожнём;
6. Контакт ледокольного колеса со льдом повышает КПД движителя и скорость судна;
7. Ширина транспортного судна не ограничена возможностями линейного ледокола;
8. Отпадает необходимость приобретения импортных «Азиподов»;
9. Возможность осмотра и ремонта ДРК без докования;
10. Отработка технологии работы ЛКДРК обеспечит дальнейшее применение её на реках и шельфе.

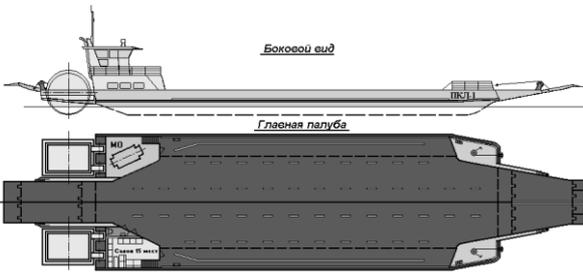
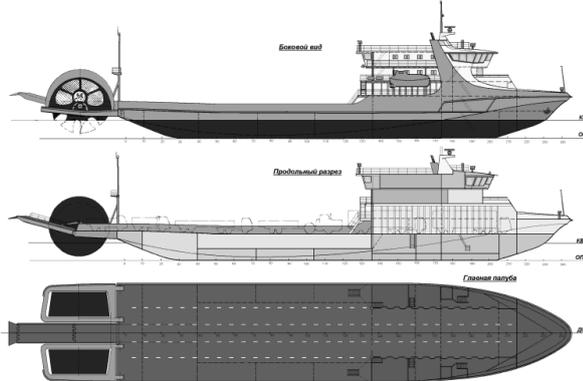
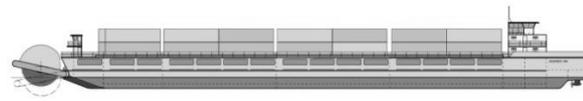
Эффективность предлагаемого способа и конструкции объясняется физическими свойствами льда, имеющего прочность на срез в разы более низкую, чем на изгиб и взаимодействием при движении ледокольного гребного колеса со льдом, при котором возрастает его КПД и удельная тяга на единицу мощности. При толщине льда менее 1-2% диаметра гребного колеса скорость танкера-ледофреза по сравнению с чистой водой не только не снизится, но может возрасти примерно на 1-1,5 узла. Проверить, так ли это, можно, если провести испытания модели в ледовом бассейне и построить и испытать колёсное речное судно.

Таблица 2

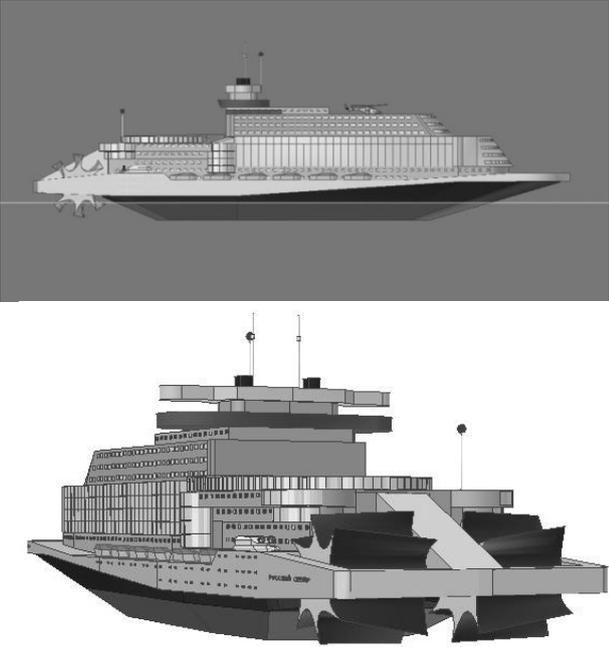
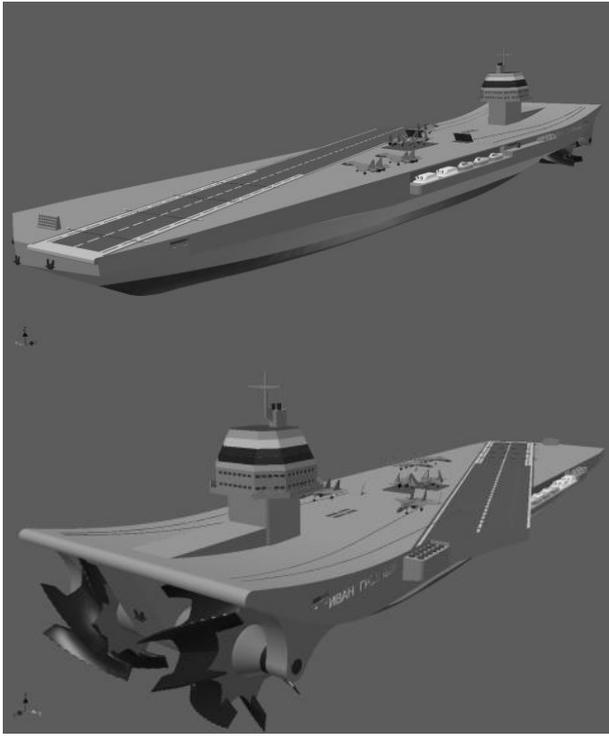
Архитектурно-конструктивные типы ледокольных судов - ледофрезов

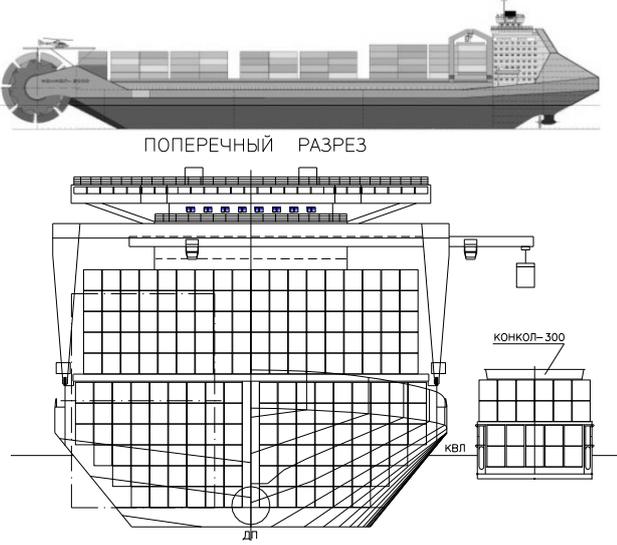
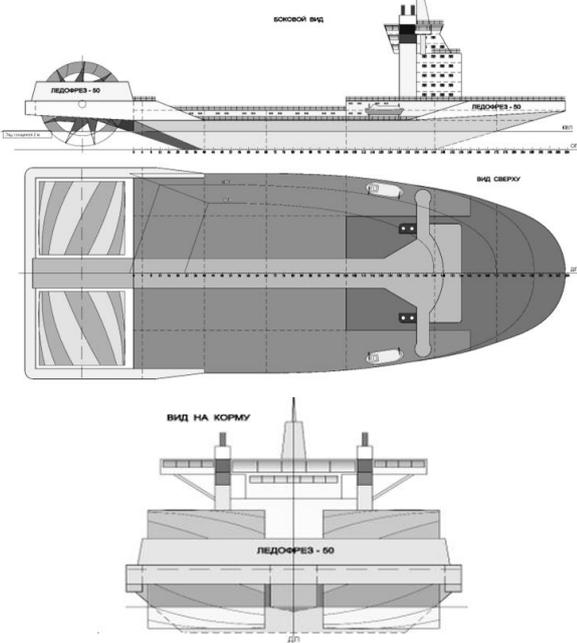
1	2
<p style="text-align: center;">Ледокольный буксир-толкач колесный «ЛБТК 600»</p> 	<p><i>Назначение: Буксировочные операции толканием на реках в условиях продлённой навигации</i></p> <p>Длина габаритная, м 34,0 Длина по КВЛ, м 24,9 Ширина габаритная, м 11,1,0 Ширина по КВЛ наибольшая, м 8,8 Высота габаритная, м 8,8 Высота борта, м 1,7 Осадка по КВЛ, м 1,2 Мощность ЭУ, кВт. 2 x 315 Экипаж, чел. 7 Скорость на глубокой воде, км/ч 18 Класс по Правилам Российского Речного Регистра «Р 1,2 А» - лед 40 Группа по Санитарным правилам - первая Тип движительно-рулевого комплекса Ледокольный Колесный ДРК с электромеханическим приводом</p>
<p style="text-align: center;">Ледокольный буксир колесный «ЛБК 400»</p> 	<p><i>Буксировочные операции на рейдовой акватории</i></p> <p>Длина габаритная, м 29,8 Длина по КВЛ, м 20,0 Ширина габаритная, м 9,0 Ширина по КВЛ наибольшая, м 7,6 Высота габаритная, м 8,6 Высота борта, м 1,5 Осадка по КВЛ, м 1,0 Мощность ЭУ, кВт. 2 x 200 Экипаж, чел. 2 Класс по Правилам Российского Речного Регистра «Р 1,2 А» - лед 20 Группа по Санитарным правилам - третья Тип движительно-рулевого комплекса колесный ДРК с электромеханическим приводом Скорость на глубокой воде, км/час 17</p>
<p>Паром колесный ледокольный «ПКЛ-200» - натурная модель морского ледофреза</p>	<p><i>Назначение: круглогодичная речная переправа</i></p> <p>Длина габаритная, м 65,3 Длина по КВЛ, м 42,7 Ширина габаритная, м 15,0 Ширина по КВЛ, м 10,1 Высота борта, м 1,8 Высота от ОП до ВНЧ, м 9,3</p>

Продолжение табл. 2

1	2
	<p>Осадка по КВЛ, м 1,0 Мощность ЭУ, кВт 660 Экипаж, чел. 2 Скорость хода, км/ч, не менее 18 Грузоподъемность, т 200 Тип движительно-рулевого комплекса – Ледокольный Колесный ДРК Привод гребных колес - электромеханический Класс по Правилам Российского Речного Регистра «Р1,2 (лед 30) А» Группа по Санитарным правилам третья</p>
<p>Автомобильно-пассажирский паром-ледокол</p> 	<p><i>Назначение: круглогодичная переправа в акваториях разряда «О» и «М»</i></p> <p>Длина габаритная, м 92,8 Длина по КВЛ, м 69,0 Ширина габаритная, м 16,4 Ширина по КВЛ, м 15,0 Высота борта, м 4,4 Высота от ОП до ВНЧ, м 18,6 Осадка по КВЛ, м 3,0 Мощность ЭУ, кВт 2x1000 Экипаж, чел. 17 Скорость хода, км/ч, не менее 22 Грузоподъемность, т 350 Тип движительно-рулевого комплекса – Ледокольный Колесный ДРК Привод гребных колес - электромеханический Класс по Правилам Российского Речного Регистра «М-Пр3,0 (лед 80) А» Группа по Санитарным правилам первая</p>
<p>Речной колёсный контейнеровоз «КОНКОЛ-300»</p> 	<p><i>Назначение: Перевозка контейнеров по сибирским рекам с выходом в порты СМП</i></p> <p>Длина габаритная, м 128,40 Длина по КВЛ, м 116,70 Ширина габаритная, м 16,50 Ширина по КВЛ, м 16,00 Ширина по колёсам, м 15,00 Высота борта, м 4,10 Высота от ОП габаритная, м 15,50 Осадка по КВЛ, м 2,40 Мощность ЭУ, МВт 1,4 Скорость на чистой воде, узлов около 9 Ледопробиваемость, м 0,3 Вместимость по 20-футовым контейнерам 308 Спальных мест для экипажа 20 Спальных мест для пассажиров 12 Класс Российского Речного Регистра «МПр Лёд 30» Тип ДРК – Ледокольный Колесный ДРК Привод гребных колес электромеханический</p>

Продолжение табл. 2

1	2
<p>Ледокольно - пассажирское колесное судно ледофрез «РУССКИЙ СЕВЕР»</p> 	<p><i>Назначение: перевозка пассажиров и проводка крупнотоннажных судов по трассе Северного Морского Пути</i></p> <p>Длина габаритная, м 188,0 Длина по КВЛ, м 130,0 Ширина габаритная, м 53,0 Ширина по КВЛ, м 44,0 Ширина по гребным колесам, м 46,0 Высота борта, м 11,0 Осадка по КВЛ, м 6,0 Мощность ЭУ, кВт 20000 Водоизмещение расчетное, т около 20000 Пассажировместимость, чел. 1200 Экипаж, чел. 200 Скорость в чистой воде, узлы 18 Скорость, узлы, при толщине льда 0,5 м 15 1,0 м 11 1,5 м 8</p> <p>Тип движительно-рулевого комплекса – Ледокольный Колесный ДРК</p>
<p>Авианосец для Арктики «ИВАН ГРОЗНЫЙ»</p> 	<p><i>Назначение – охрана северных морских территорий России и проводка судов в Арктике</i></p> <p>Длина габаритная, м 300,0 Длина по КВЛ, м 248,4 Ширина габаритная, м 86,2 Ширина по КВЛ, м 50,0 Ширина по гребным колесам, м 54,0 Высота борта, м 28,8 Осадка по КВЛ, м 9,0 Мощность на валах, МВт 2x30 Скорость в чистой воде, узлы 22 Скорость, узлы, при толщине льда 0,5 м 22 1,5 м 19 3,5 м 8</p> <p>Тип ДРК – Ледокольный Колесный ДРК Ледопробитность, м 3,8</p>

1	2
<p style="text-align: center;">Арктический колёсный контейнеровоз ледофрез «КОНКОЛ-4000»</p> 	<p><i>Назначение: Перевозка контейнеров по трассе СМП и проводка караванов</i></p> <p>Длина габаритная, м 255,00 Длина по КВЛ, м 212,70 Ширина габаритная, м 58,00 Ширина по КВЛ, м 49,60 Ширина по колёсам, м 50,00 Высота борта, м 16,80 Высота от ОП габаритная, м 58,30 Осадка по КВЛ, м 10,00 Мощность ЭУ, МВт 60 Скорость на чистой воде, узлов около 20 Ледопроходимость, м 3,5 Вместимость по 20-футовым контейнерам 4000 Спальных мест для экипажа 50 Спальных мест для пассажиров 50 Класс Российского Морского Регистра КМАrc 7» Тип ДРК – Ледокольный Колесный ДРК Привод гребных колес электромеханический</p>
<p style="text-align: center;">«ЛЕДОФРЕЗ – 50»</p> 	<p><i>Назначение: проводка крупнотоннажных судов в акваториях замерзающих портов путем прокладки и очистки канала шириной 50 м</i></p> <p>Длина габаритная, м 146,4 Длина по КВЛ, м 99,4 Ширина габаритная, м 57,6 Ширина по КВЛ, м 48,3 Ширина по гребным колесам, м 50,0 Высота борта, м 8,0 Осадка по КВЛ, м 5,0 Мощность ЭУ, кВт 20000 Экипаж, чел. 30 Скорость в чистой воде, узлы 18 Скорость, узлы, при толщине льда 0,5 м 15 1,0 м 11 1,5 м 8 Тип ДРК – Ледокольный Колесный ДРК Ледопроходимость, м 2,0</p>

Библиографический список

1. Максудов, Д.Д. Сопротивление движению транспортных судов в сплошных льдах // Труды АНИИ. – 1973. – Т. 309. – С. 27-34.
2. Шиманский, Ю.А. Условные измерители ледовых качеств судна // Труды АНИИ. – 1938. – Т. 130. – С. 5-19.
3. Каштелян, В.И. Сопротивление льда движению судна / В.И. Каштелян, Н.Н. Позняк, А.Я. Рывлин. – Л.: Судостроение, 1968.
4. Рывлин, А.Я. Испытание судов во льдах // А.Я. Рывлин, Л.Е. Хейсин. – Л.: Судостроение, 1980.

5. Бронников, А.В. Суда ледового плавания, особенности проектирования / А.В. Бронников. – Л., ЛКИ, 1984.
6. Таршис, М.К. Ледовое сопротивление судов: сб. науч. тр. / Мурманск. Высшее мореходное училище, 1957. Вып. 1. С. 88-89.
7. Морские вести России [Электронный ресурс]// Ледокол XXI века или ржавый утюг? - Режим доступа: <http://www.morvesti.ru/tems/detail.php?ID=55563>
8. Neftegaz.ru [Электронный ресурс]// Для Арктик СПГ – 2 специально построят 17 газозовов Режим доступа: <https://neftegaz.ru/news/Suda-i-sudostroenie/453482-dlya-arktiki-spg-2-spetsialno-postroyat-17-gazovozov/>
9. Алферьев, М.Я. Судовые движители / М.Я. Алферьев. – М.: Мин. Речного флота СССР, 1947.
10. sudostroenie.info [Электронный ресурс] // Россия и Китай создают "Морской арктический транспорт" Режим доступа: <http://sudostroenie.info/novosti/27034.html>
11. Korabel.ru [Электронный ресурс]// В ОСК предложили строить круизные суда ледового класса для арктического туризма. Режим доступа: https://www.korabel.ru/news/comments/v_osk_predlozhili_stroit_kruiznye_suda_ledovogo_klassa_dlya_arkticheskogo_turizma.html?utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com
12. ТЭКНО///блог [Электронный ресурс]// Увеличение судоходства по СМП может вызвать “цепную реакцию” в Арктике. Режим доступа: https://teknoblog.ru/2018/08/29/92347?utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com
13. RUhot [Электронный ресурс]// Колёсные суда нового поколения. Инновационные решения проблем судоходства на мелеющих реках и в ледовой обстановке. Режим доступа: <https://www.ruhot.net/video/KD0PoDBDP0/kolesnye-su.html>
14. Научный журнал «Российская Арктика» [Электронный ресурс]// Сравнение самостоятельного движения и движения под проводкой ледокола газозовов типа «Yamalmax». Режим доступа: <https://russian-arctic.info/info/articles/oceanology/sravnenie-samostoyatel'nogo-dvizheniya-i-dvizheniya-pod-provodkoy-ledokola-gazovozov-tipa-yamalmax/>
15. Пат. №2225327 РФ. Колёсный движительно-рулевой комплекс / Фальмонов Е.В. от 30.11.2021.
16. Фальмонов, Е.В. Пат. № 2669486 РФ. Колёсный движительно-рулевой комплекс с поворотными плицами / Фальмонов Е.В. от 26.07.2017.
17. Фальмонов, Е.В. Альтернативный способ прокладки и очистки канала во льдах и конструкция судна ледового плавания, 2015. – С. 14-19.
18. Фальмонов, Е.В. Колёсные суда ледового плавания, Июль. – М., 2019. – С. 3-12.
19. Фальмонов, Е.В. Колесный ледокол-ледофрез // Речной транспорт (XXI в.). – 2013. – №6. – С. 28-33.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ЛЕДОСТОЙКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

В судостроении для защиты корпусов судов широкое распространение получили лакокрасочные защитные покрытия, которые влияют на надежность и долговечность корпусных конструкций. У ледоколов и судов ледового плавания степень износа подводной части корпуса в районе ледового пояса велика, что приводит к коррозионно-эрозионному разрушению листов наружной обшивки, снижению ледопроеходимости, повышенному расходу топлива и увеличению объема доковых ремонтных работ. Для таких судов используют специальные ледостойкие защитные покрытия, предназначенные не только для защиты корпуса от повышенного износа, но и снижающих трение о лед.

Таким образом, коэффициент трения о лед является одним из важных показателей, характеризующих свойства и эффективность ледостойких покрытий. В статье рассмотрены основные положения методики испытаний ледостойких защитных покрытий, предназначенной для определения коэффициента трения скольжения о лед.

Ключевые слова: суда ледового плавания, ледостойкие защитные покрытия, коэффициент трения, методика испытания.

Для защиты наружной обшивки ледоколов и судов ледового плавания применяют специальные защитные ледостойкие лакокрасочные покрытия (ЛЛКП), предотвращающие износ корпуса и снижающие трение о лед. ЛЛКП подлежат обязательной сертификации классификационными обществами. В отечественной практике перечень, условия и критерии испытаний ЛЛКП регламентируются Российским морским регистром судоходства (РМРС) и приведены в Правилах классификации и постройки морских судов, часть XIII «Материалы» [1] (см. табл. 1).

Для основных видов испытаний (1 - 6) существуют стандартизированные методики и оборудование для проведения испытаний. Тогда как испытания ЛЛКП с целью определения коэффициента трения скольжения о лед являются сравнительно новым видом внедренным в Правила РМРС по результатам НИР [2].

Условия испытаний следующие:

- температура окружающей среды – 20°C;
- относительная влажность окружающего воздуха не более 85%;
- атмосферное давление 1 бар.

Образцы для испытаний должны иметь размеры 250×130×3 (±0,5) мм. Образцы предварительно выдерживают при температуре (- 20 ± 2)°C не менее 15 мин.

Для оценки устойчивости результатов испытания проводятся для трех панелей для каждого типа покрытия со скоростями 120, 150 и 180 мм/мин при трех вариантах вертикальной нагрузки (распределенной равномерно по образцу), принимаемой в диапазоне от 2 до 5 масс испытываемой панели.

На данный момент разработано множество разновидностей экспериментальных установок, позволяющих определять фрикционные свойства материалов, но у большинства из них имеется ограничение по температуре проведения испытаний (не менее 10°C), что не соответствует условиям проведения испытаний ЛЛКП. С этой целью разработаны программное обеспечение, оснастка и экспериментальная установка для определения коэффициента трения скольжения о лед (рис. 1). Полный комплекс оборудования для проведения испытаний включает:

- климатическую камеру;
- лабораторную установку;
- датчики температуры, давления и влажности;
- видеозаписывающее устройство;
- емкость для дистиллированной воды;
- образцы с покрытием;
- грузы;
- ПК с установленным программным обеспечением.

Таблица 1

Виды испытаний ЛЛКП [1]

№ п/п	Наименование показателя	Значение			
		Группа 1 для ледоколов		Группа 2 для судов ледовых классов	
		Класс I	Класс II	Класс I	Класс II
1	Долговечность согласно стандарту ИСО 12944-6 для категории коррозионной активности Im2 в соответствии со стандартом ИСО 12944-2	большая		большая	
2	Адгезия, определяемая методом решетчатых надрезов согласно стандарту ИСО 2409 или методом крестообразных надрезов согласно стандарту ИСО 16276-2 после испытаний на стойкость к воздействию низкой температуры в зависимости от толщины и типа ледостойкого покрытия	не более 3 баллов		не более 3 баллов	
3	Адгезионная прочность согласно стандарту ИСО 4624	Более 16 МПа	Более 10 МПа	Более 10 МПа	Более 8 МПа
4	Стойкость к истиранию после 1000 циклов испытаний на абразиметре Табера (колесо CS-17)	не более 80 мг	не более 120 мг	не более 120 мг	не более 160 мг
5	Прочность при ударе согласно стандарту ИСО 6272	не менее 5 Дж		не менее 5 Дж	
6	Стойкость к катодному отслаиванию согласно стандарту ИСО 15711 (метод А) для покрытий, совместимых с катодной защитой	менее 5 мм после 3 мес. испытаний, менее 8 мм после 6 мес. испытаний		менее 5 мм после 3 мес. испытаний, менее 10 мм после 6 мес. испытаний	
7	Коэффициент трения скольжения о лед	не более 0,05	не более 0,08	не более 0,05	не более 0,08

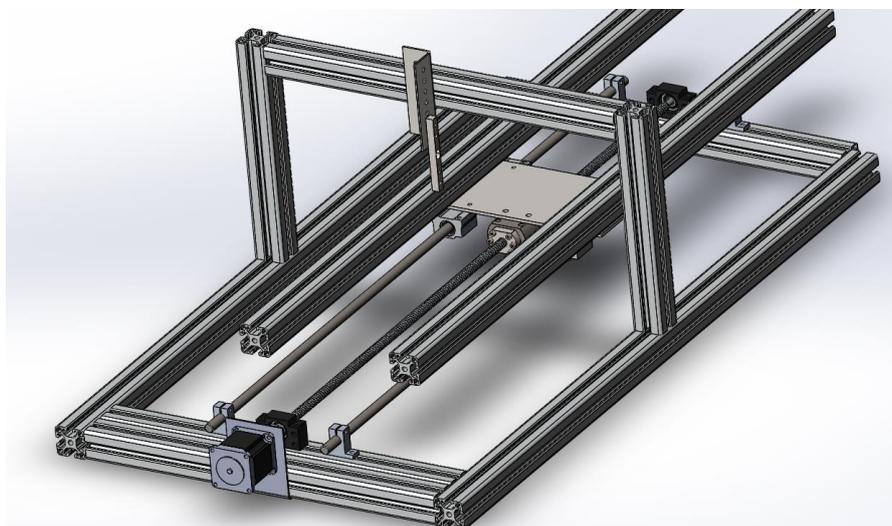


Рис. 1. Установка для определения коэффициента трения образцов о лед

В качестве примера, на рис. 2 показаны формы окна управления установкой и вывода результатов испытаний.

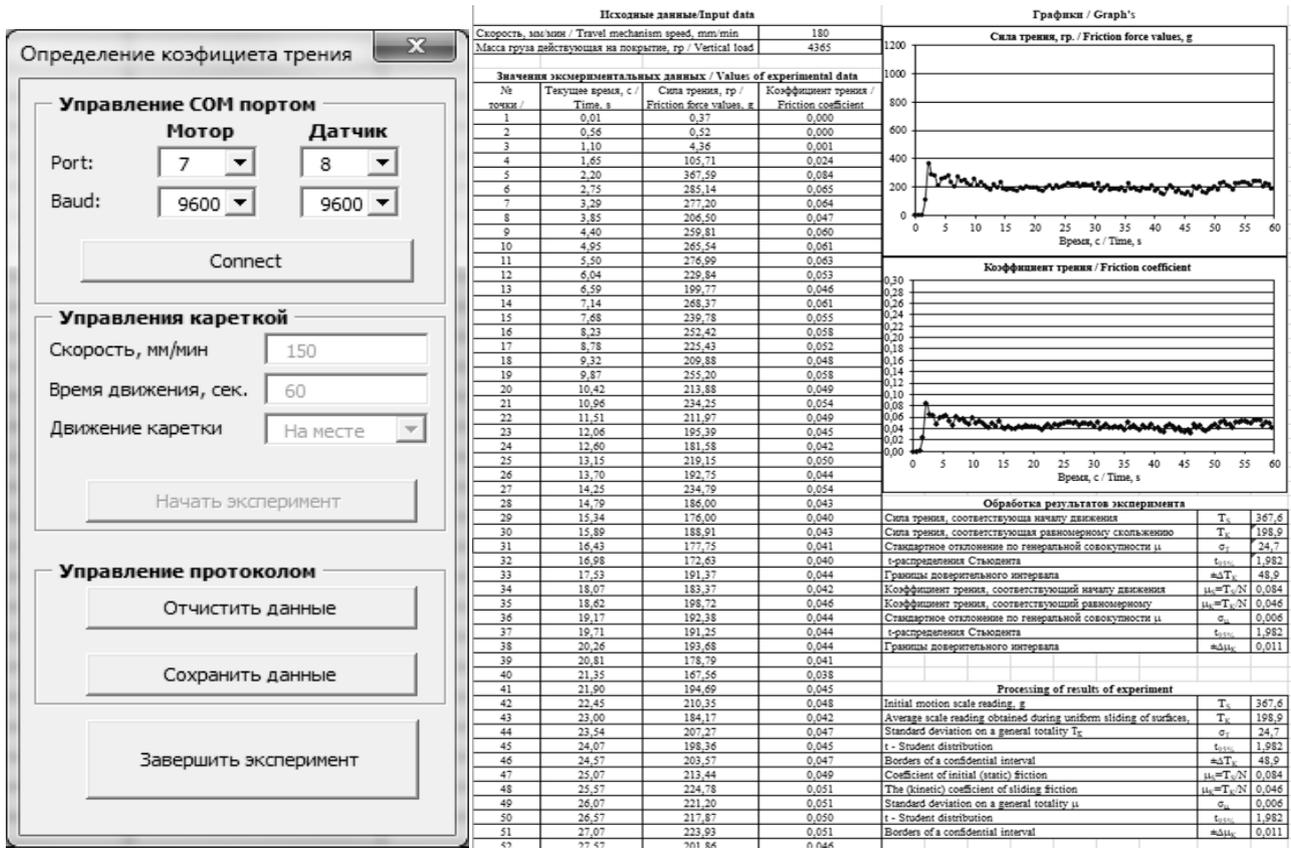


Рис. 2. Интерфейс программного обеспечения

Лабораторная установка настраивается, подключается к ПК и устанавливается, в климатической камере (-20°C). Регулировку и настройку испытательного оборудования производят в соответствии с технологической инструкцией лабораторной установки. Фиксируются температура, влажность и давление.

Предварительно образцы с нанесенным ЛЛКП выдерживают в климатической камере при температуре -20°C , после чего их закрепляют в лабораторной установке. Испытываемый образец с покрытием помещают на лед, полученный из дистиллированной воды. К образцу прикладывают вертикальное - прижимное усилие. Включают механизм продольного перемещения образца с предварительно установленной скоростью.

Вследствие сил трения между контактирующими поверхностями образца и льда они могут оставаться неподвижными относительно друг друга до тех пор, пока сила, сдвигающая образец, не станет равной силе статического трения между поверхностями или не превысит ее. Это максимальное первоначальное значение силы отмечается как сила, являющаяся компонентом начального (статического) коэффициента трения.

Регистрация и фиксация вертикального - прижимного усилия образца с нанесенным ЛЛКП ко льду и силы трения при его продольном смещении производится с использованием специализированного программного обеспечения.

Коэффициент начального (статического) трения рассчитывают следующим образом:

$$\mu_s = T_s / N,$$

где T_s – показание по шкале прибора, соответствующее началу движения, грамм; N – вертикальное (прижимное) усилие, действующее на образец, грамм.

Коэффициент трения скольжения (кинетический) рассчитывают следующим образом:

$$\mu_K = T_K / N,$$

где T_K – среднее значение показания по шкале, соответствующее равномерному скольжению, грамм.

Методика определения погрешности результатов опыта при использовании прибора принимается в соответствии с ИСО 5725. «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений».

Класс точности приборов – 0,5 %

После испытания производят визуальный осмотр испытанного образца.

Результаты испытания оформляют в виде протокола испытаний, подготовленного по установленной форме, согласованной с РМРС.

В результаты испытаний отображаются в виде графиков см. рис. 3.

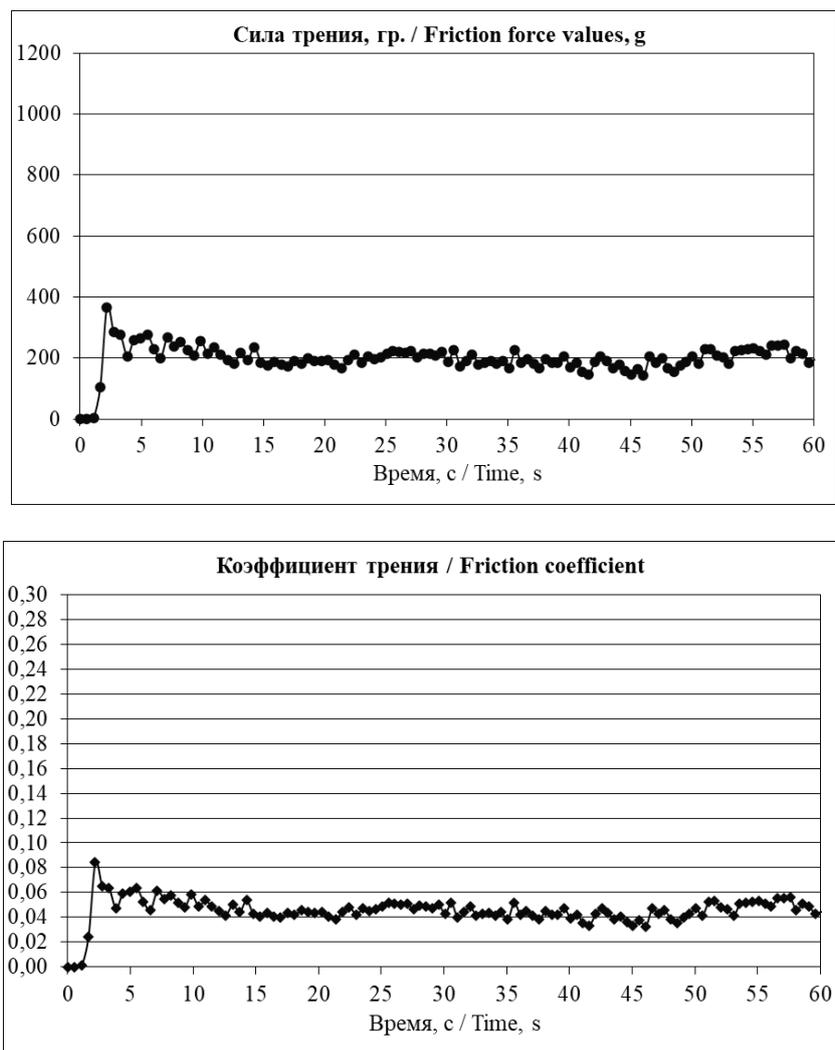


Рис. 3. Результаты испытаний ЛЛКП

Анализ опыта эксплуатации судов ледового плавания показывает, что в судостроении наибольшее распространение получили лакокрасочные защитные покрытия, которые представляют собой многокомпонентные системы, способные при нанесении на защищаемую поверхность корпуса судна высыхать с образованием пленок, удерживаемых силами сцепления. Защитные покрытия являются перспективным направлением повышения надежности, безопасности и функциональной эффективности судов и морской техники.

Коэффициент трения о лед является одним из важных показателей, характеризующих свойства и эффективность ледостойких покрытий.

По результатам настоящего исследования разработаны лабораторное оборудование, программное обеспечение и методика проведения испытаний по определению значений коэффициента трения скольжения о лед (согласованная с РМРС). Выполнены испытания ЛЛКП отечественных и зарубежных производителей.

Библиографический список

1. Правила классификации и постройки морских судов, часть XIII «Материалы», Российский морской регистр судоходства, Санкт-Петербург. 2023.
2. Veselov, V.A. Tests of paint and varnish ice-resistant protective coatings of ice class vessels / V.A. Veselov, M.V. Kitaev, P.O. Pastukhov, O.E. Surov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 986. – P. 012027.

УДК 629.563.2:624.042.43:001.573

DOI: 10.46960/polmech_2023_87

А. С. Большев, С. А. Фролов, А.Е. Харсеев, И.О. Розов

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ОСНОВАНИЯ АРКТИЧЕСКОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВНЕШНИХ НАГРУЗОКСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург

Промышленное развитие Арктических регионов России связано с энергетическим обеспечением реализуемых там объектов. В этих регионах, как правило, отсутствует централизованное энергоснабжение, а промышленная инфраструктура развита крайне слабо. В этих условиях быстро возводимые морские ветроэнергетические установки представляются удачным решением, так могут быть полностью изготовлены на специализированных предприятиях, транспортированы морским путем и быстро установлены в относительно благоприятный летний период. Для обеспечения длительной и безопасной работы морских ветроэнергетических установок в тяжелых арктических условиях необходим достоверный анализ прочности конструкции при действии экстремальных внешних нагрузок.

В статье предлагается методология анализа предельной прочности морской арктической ветроэнергетической установки на основе использования амплитудно-частотных характеристик «нагрузка-напряжение». Это позволяет значительно улучшить вычислительную эффективность расчетов по сравнению с прямым моделированием во временной области.

Представлена перспективная конструкция ВЭУ с ледостойким воротником и оптимизированными толщинами стали в разных элементах установки. На примере данного ветрогенератора произведено моделирование экстремальных внешних нагрузок и напряжений элементов основания за весь срок эксплуатации сооружения и показана допустимость полученных напряжений.

Ключевые слова: ВЭУ, трипод, основание, динамика, прочность.

Введение

Условия эксплуатации морских сооружений, располагаемых в арктических и дальневосточных морях, отличаются весьма суровыми условиями. Здесь в летний период наблюдаются шторма с высотой волн, превышающей 10–15 м, а зимой на сооружение воздействуют торосистые льды, характеризующиеся высокой прочностью и большой толщиной. Проектирование надежных и безопасных морских сооружений, способных длительное время работать в таких экстремальных условиях, является весьма сложной научно-инженерной задачей.

В данной статье предлагается методология анализа предельной прочности конструкции морской арктической ветроэнергетической установки. Методика основывается на выборе экстремального нерегулярного шторма 50-летней повторяемости для безледового периода и ледовой обстановки такой же повторяемости.

На следующем этапе методологии вычисляются нагрузки, вызванные данными воздействиями, которые прикладываются по высоте ветрогенератора в соответствии с эпюрами этих нагрузок, после чего происходит моделирование динамики сооружения и его реакции на внешние воздействия, вычисляются напряжения в наиболее нагруженных элементах конструкции. Моделирование производится в нескольких программных комплексах с передачей данных между ними. После завершения математического моделирования динамики производится вычисление результирующих экстремальных напряжений элементов конструкции.

Основное преимущество предложенного метода – использование амплитудно-частотных характеристик «нагрузка-напряжение» вместо прямого моделирования динамики сложной конструкции во временной области, которое ведет к неприемлемым вычислительным затратам при задании длительных нерегулярных нагрузок. Полученные амплитудно-

частотные характеристики позволяют провести необходимый объем статистических расчетов за определенный набор длительных штормов при незначительных вычислительных затратах.

В статье также приводится пример расчета напряжения элементов основания арктического ветрогенератора. После задания набора экстремальных штормов, действующих с разных направлений в летний период, и ледовых ситуаций – в зимний период, необходимо рассчитать нагрузку на сооружение от этих воздействий и приложить ее к тем элементам (или группам элементов) сооружения, на которые она непосредственно действует.

Так, ветровая нагрузка прикладывается в районе гондолы ветрогенератора и на самую башню, ледовая – на ее ватерлинии со стороны подхода льда, волновая нагрузка – по всей подводной части сооружения. При этом необходимо исследовать эти нагружения совместно по группам: ветер, течение и волнение в летний период, и ветер, течение, лед - в зимний. На третьем этапе нужно получить динамический частотный отклик (или АЧХ) наиболее напряженных элементов сооружения на эти воздействия, который будет разным для разных типов воздействий из-за изменения зон приложения нагрузки. С помощью отклика можно проводить эффективное решение линейной задачи (без захода в зоны текучести и разрушения элементов конструкции). На последнем этапе производится статистическая обработка напряжений в ключевых элементах конструкции для вычисления расчетных (экстремальных) значений напряжений.

Анализ существующих методов

В настоящее время расчеты прочности ВЭУ обычно основаны на руководящих принципах и полуэмпирических формулах, разработанных морской нефтегазовой промышленностью [1, 2, 3].

Для этих стандартов волновая нагрузка имеет первостепенное значение для прогнозирования экстремальных явлений. Однако при проектировании морских ветротурбинных сооружений необходимо одновременно учитывать спектры волновой и ветровой нагрузки [4].

В работе [5] показано незначительное влияние разнонаправленности ветра и волнения, что позволяет задавать внешние нагрузки в виде штормов с сонаправленным действием ветра и волнения. В работе [6] указывается на необходимость учета нелинейности волн на малых глубинах, на которых устанавливаются ВЭУ, для тонких сооружений.

При этом в работе [7] указывается на недостаточное представление в литературе учета одновременного воздействия различных внешних нагружений. Указано также на необходимость учета взаимодействия грунт-сваи-сооружение, что приводит к значительным временным затратам при расчете задачи во временной области и необходимости распараллеливания вычислений [8], а также делении задачи на несколько стадий, в некоторых из них может быть использована упрощенная модель сооружения с помощью применения суперэлементов. Однако упрощенное взаимодействие грунта и основания применимо для сокращения временных затрат при расчетах, допустимо также линеаризованное представление реакции грунта, о чем говорится в нормах [1], при условии, что линеаризация учитывает процессы гистерезиса и другие нелинейные процессы в грунте.

В последнее время широкое распространение также получили оптимизационные модели расчета ВЭУ, позволяющие улучшить (облегчить) конструкцию установки в процессе моделирования: [9–11]. Однако при их использовании необходимы упрощенные модели расчета в силу больших вычислительных затрат. Различные аспекты моделирования ветрогенераторов рассмотрены также в статьях [12–15].

Рассмотрим основные трудности, возникающие при решении задачи моделирования динамики ВЭУ обычными способами, то есть с помощью МКЭ-пакетов. Первая сложность – задание длительной нерегулярной нагрузки от ветра и волнения. Задание именно нерегулярной нагрузки обусловлено высокой динамичностью таких установок и необходимостью учета порывов ветра и вибраций от ледовых воздействий, при которых такая динамичность и проявляется. Интерфейс расчетных пакетов не очень хорошо приспособлен для задания объ-

емных временных зависимостей нагрузки, да еще распределенных по разным зонам сооружения. Вторая сложность – получение этих распределенных нагрузок от воздействий разной природы. Так, расчет нерегулярной нагрузки от волнения с учетом дифракции, спектра волнения или нелинейной волны и распределения этой нагрузки по элементам сооружения является достаточно трудной задачей, а еще необходимо одновременно приложить ветровую нагрузку с учетом определенного спектра ветра.

Расчет ветровой нагрузки на ветроколесо также является весьма специфичной задачей, так как нагрузка зависит от режима работы лопастей и скорости их вращения.

Следующая проблема – трудность учета ветрового демпфирования, которое является реакцией на колебания башни ветрогенератора, и, как будет показано далее, помогает весьма существенно гасить эти колебания. Далее, длительность типового шторма составляет три или шесть часов, при этом время решения динамической задачи во временной области на персональном компьютере получается неприемлемым. Не помогает даже использование суперкомпьютеров, которые эффективны за счет распараллеливания расчетов при числе элементов (узлов) конструкции порядка нескольких десятков тысяч, что ненужно в данной задаче, так как достаточно и нескольких тысяч.

Последняя сложность – статистическая обработка временной зависимости напряжений элементов при разных штормах и ледовых условиях, выбор наиболее нагруженных элементов и так далее.

Для преодоления этих трудностей было решено совместно использовать несколько расчетных пакетов, в частности, ANSYS, Plaxis и Anchored Structures (далее AS), с передачей данных между ними. Программный комплекс AS является универсальным пакетом, который позволяет рассчитывать нагрузки от ветра, течения, волнения и льда в статической и динамической постановке на плавучие и стационарные сооружения произвольной формы, определять их соответствующие перемещения, а также усилия в системах удержания [16]. Моделирование производится как в частотной, так и во временной области с учетом нелинейных особенностей воздействия внешней среды, сооружений и связей. Описание методики динамического взаимодействия с ледовыми образованиями дано в статье [17]. Для передачи данных в AS из ANSYS были разработаны и запрограммированы специальные процедуры и интерфейсы.

В перечисленных программах решаются следующие задачи.

В Plaxis определяется нелинейная реакция грунта на свайное основание, которая затем подвергается линеаризации и прикладывается в ANSYS в виде эквивалентных пружин.

Задачи, решаемые в ANSYS, заключаются в следующем:

1. Определение по эпюре напряжений набора наиболее напряженных элементов конструкции по результатам статических испытаний, в которых прикладывается пробная горизонтальная нагрузка в районе гондолы в продольном и поперечном направлениях в плане.

2. Для данного набора элементов рассчитываются набор АЧХ «сила-напряжение» при действии единичной горизонтальной нагрузки на разных вертикальных уровнях.

Остальные задачи, а именно, расчет внешних нагрузок, моделирование штормов и ледовых ситуаций, временная реализация основных и эквивалентных напряжений во временной области согласно полученных АЧХ, а также статистическая обработка результатов производятся в пакете AS.

В качестве тестовой ветроэнергетической установки была предложена перспективная модель с основанием в виде трипода.

Методика расчета напряжений в элементе конструкции ВЭУ с использованием программных пакетов ANSYS, PLAXIS И AS

1. По результатам испытаний горизонтальной статической нагрузкой на разных уровнях выбирается набор элементов основания конструкции с наибольшим напряжением под действием этой нагрузки (рис. 1). При этом возможен расчет как жестко закрепленного основания, так и с учетом взаимодействия грунт-свай-сооружение. Во втором случае производится линеаризация нелинейной реакции грунта (рис. 2).

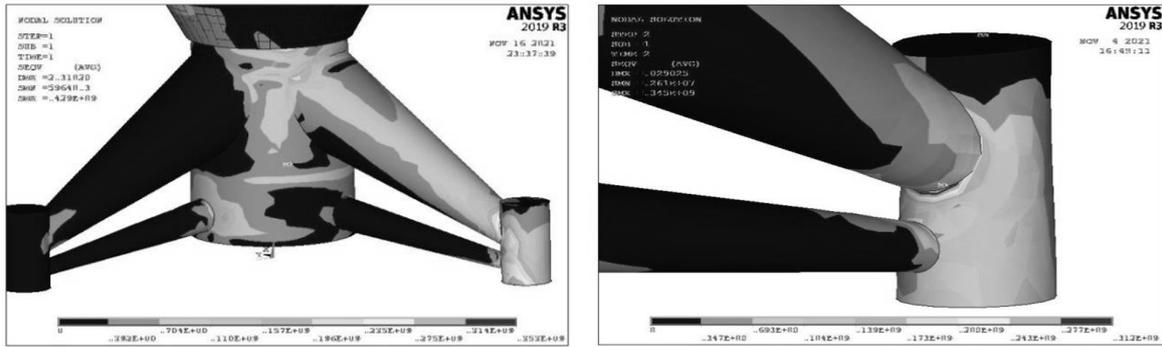


Рис. 1. Эпюра напряжений в основании жестко закрепленной ВЭУ

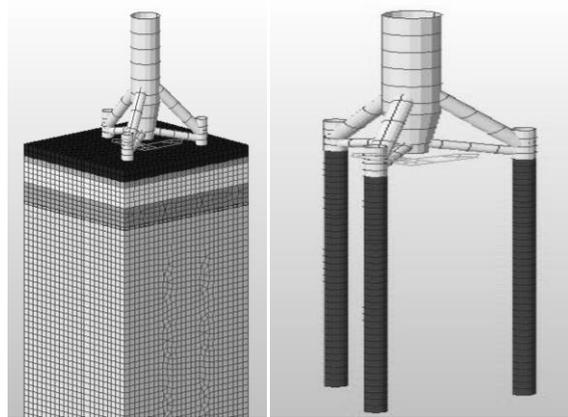


Рис. 2. Расчетная модель ВЭУ с учетом взаимодействия грунт-сваи-сооружение

2. ВЭУ разбивается по высоте на N секций, начиная снизу, с номерами i ($i = 1 - N$) так, чтобы целое число секций N_1 оказалось под водой и целое число секций N_2 – над водой, тогда $N = N_1 + N_2$.
3. Задается диапазон частот $0 - \omega_{\max}$ так, чтобы охватить большую часть диапазона внешних воздействий на ВЭУ и частоты необходимых мод конструкции. Этот диапазон разбивается на M гармоник, причем M должно быть не менее тысячи, чтобы получить для максимальной частоты ω_{\max} не менее 10 колебаний 1%-ной обеспеченности для надежной статистики. Тогда частота первой гармоники и шаг по частоте равны $\Delta\omega = \frac{\omega_{\max}}{M}$, а частоты всех гармоник составят $\omega_j = j\Delta\omega$, где $j = 1 - M$.
4. Далее задаются спектры волновых и ветровых воздействий для штормов 50-летней повторяемости для каждого из 8 (или 16) направлений действия возможного шторма. Затем спектры волнения преобразуются в дискретные гармоники, согласно выбранному в пункте 3 базису частот, а затем в гармоники волновой нагрузки, рассчитанной по уровням $F_j^w(z_i)$ с помощью задачи волновых потенциалов, решаемой в AS стандартным методом граничных элементов. Аналогично производится расчет гармоник ветровых порывов $F_j^a(z_i)$.
5. Расчет нагрузок на уровне ветроколеса производится по специальной методике, с учетом оптимального управления скоростью его вращения и поворота лопастей так, чтобы получить максимальную электрическую мощность генератора при минимально возможном усилии на ветроколесо. При этом в течение одного шторма средняя (с часовым усреднением) скорость ветра считается постоянной, как и скорость вращения ветроколеса, и поворот лопастей. Это позволяет зафиксировать на время шторма коэффициент тяги и упростить расчет ветровой нагрузки. Также производится учет демпфирования колебаний ветроколеса воздушным потоком, позволяющего значи-

тельно снизить колебания сооружения (рис. 3). В данной статье методика расчета нагрузок на ветроколесо для краткости не приводится.

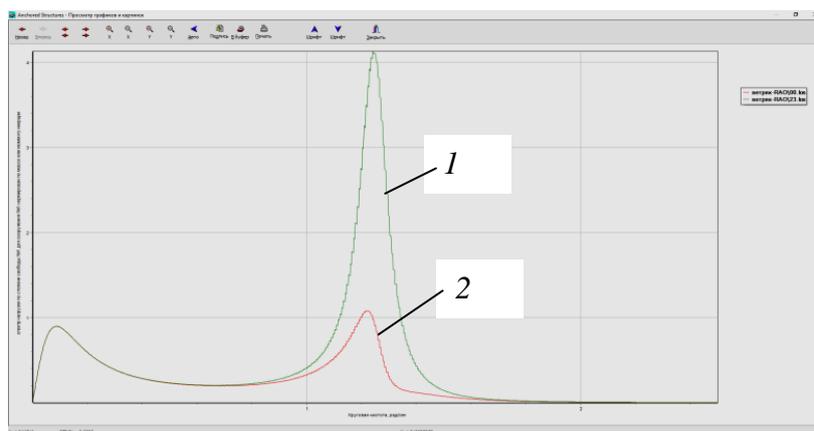


Рис. 3. Общий вид спектров суммарного напряжения в элементе основания ВЭУ при средней скорости ветра 10.5 м/с:
1 – без учета демпфирования; 2 – с учетом

6. Также задаются полученные в AS временные зависимости набора экстремальных ледовых нагрузок за время эксплуатации сооружения $F^l(t)$, которые прикладываются на уровне ватерлинии
7. Далее производится получение комплекта из шести компонентов напряжения (три нормальных и три касательных) для элемента k из набора элементов, заданном в первом пункте методики (для остальных элементов набора – аналогично). Будем прикладывать к элементам (узлам) конструкции, находящимся в центре каждой секции на высоте z_i , пробную горизонтальную гармоническую силу величиной F_{pj} (суммарно на данную группу элементов) с частотой $\omega_j = j\Delta\omega$, где $j = 1 - M$ (рис. 4). При этом амплитуда каждого компонента m ($m = 1 - 6$) напряжения в узле k в результате гармонического анализа в ANSYS составит σ_{kmj} . Аналогично можно прикладывать силы и моменты в других направлениях, получая соответствующие АЧХ.



Рис. 4. Приложение пробной внешней нагрузки на ВЭУ по уровням в ANSYS

8. Соответствующая АЧХ «сила–напряжение» на частотах ω_j и высоте действия нагрузки z_i в комплексной форме при этом составит для нагрузки в направлении оси X :

$$K_{xmj}(z_i) = \frac{\sigma_{kmj}(z_i)}{F_{pxj}(z_i)}, \quad (1)$$

и для нагрузки в направлении оси Y :

$$K_{ymj}(z_i) = \frac{\sigma_{kmj}(z_i)}{F_{pyj}(z_i)}. \quad (2)$$

Всего потребуется $2 \cdot 6 \cdot N$ АЧХ для каждого элемента основания k из набора (рис. 5).

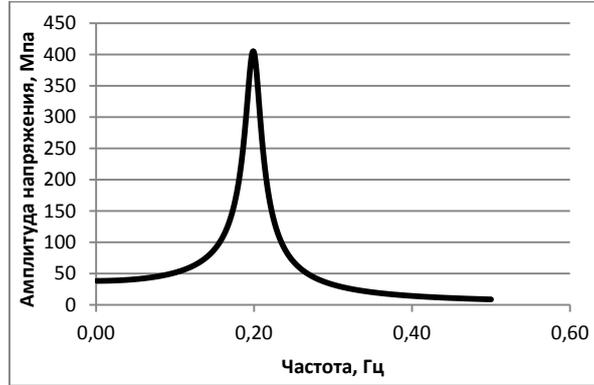


Рис. 5. Пример АЧХ «усилие-напряжение» для элемента основания

9. Суммарный m -й компонент напряжения по всем нагрузкам в узле k , записанный в комплексной форме, при действии комплексной волновой нагрузки $F_j^w(z_i)$ на секцию с номером i и с частотой ω_j составит:

$$\sigma_{kmj}^w = \sum_{i=1}^{N_1} F_j^w(z_i) (\cos(\alpha_w) K_{xmj}(z_i) + \sin(\alpha_w) K_{ymj}(z_i)), \quad (3)$$

где α_w – направление распространения волнения. Для использования этой формулы необходим расчет волновой нагрузки в AS по заданным секциям. Далее гармоника волновой нагрузки $F_j^w(z_i)$ рассчитывается согласно принятому спектру волнения и общей нагрузке на секцию при амплитуде волны 1 м, причем нулевая гармоника соответствует волновой силе дрейфа на секцию $F_0^w(z_i) = F_{di}$.

10. Суммарное напряжение в узле k при действии внешней нагрузки от ветра составит (принимая, что ветровая нагрузка на разных вертикальных уровнях действует синфазно):

$$\sigma_{kmj}^a = \sum_{i=N_1+1}^N F_j^a(z_i) (\cos(\alpha_a) K_{xmj}(z_i) + \sin(\alpha_a) K_{ymj}(z_i)), \quad (4)$$

где α_a – направление распространения ветра. При этом ветровая сила на секцию равна:

$$F_j^a(z_i) = \rho_a C S_i V_a(z_i) V_j(z_i), \quad (5)$$

где параметры в формуле, соответственно, равны: плотность воздуха, коэффициент сопротивления, площадь сечения i -й секции нормально потоку воздуха, средняя скорость ветра на высоте z_i , величина j -й гармоники скорости ветра, согласно принятому спектру ветра. При этом нулевая гармоника равна

$$F_0^a(z_i) = \frac{1}{2} \rho_a C S_i V_a^2(z_i). \quad (6)$$

11. Так как ветер и волнение – независимые случайные процессы, то их следует складывать среднеквадратически, то есть суммарная амплитуда j -й гармоники напряжения составит:

$$\sigma_{kj} = \sqrt{(1 - W)(\sigma_{kj}^w)^2 + (\sigma_{kj}^a)^2}, \quad (7)$$

где W – индикатор зимнего периода.

12. Постоянная составляющая напряжения k -го элемента от ветра, течения, волнения и момента от вращения ветрового колеса равна сумме амплитуд соответствующих нулевых гармоник (с учетом наличия волнения только в летний период):

$$\sigma_{km0} = \sum_{i=1}^{N_1} F_0^c(z_i) (\cos(\alpha_c) K_{xm0}(z_i) + \sin(\alpha_c) K_{ym0}(z_i)) +$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{i=N_1+1}^N F_0^a(z_i) \left(\cos(\alpha_a) K_{xm0}(z_i) + \sin(\alpha_a) K_{ym0}(z_i) \right) + \\
& + (1 - W) \sum_{i=1}^{N_1} F_0^w(z_i) \left(\cos(\alpha_w) K_{xm0}(z_i) + \sin(\alpha_w) K_{ym0}(z_i) \right) + \\
& + M_0^r \left(\cos(\alpha_a) K_{vx}(z_N) + \sin(\alpha_a) K_{vy}(z_N) \right). \tag{8}
\end{aligned}$$

Здесь $F_0^c(z_i) = \frac{1}{2} \rho_h C S_i V_c^2(z_i)$ – сила течения на i -ю подводную секцию; ρ_h – плотность воды; $V_c(z_i)$ – скорость течения на уровне z_i ; α_c – направление течения; M_0^r – момент вращения на валу ветроколеса; $K_{vx}(z_N)$ и $K_{vy}(z_N)$ – напряжения в элементе основания при действии единичного момента вращения по осям X и Y .

13. Набор гармоник полной ледовой нагрузки $F_j^I, j = 0 - N$ получается с помощью преобразования Фурье временной зависимости ледовой нагрузки, рассчитанной в ледовом модуле AS. В этом случае фазы гармоник уже не случайные, а также полученные из этого преобразования Фурье:

$$F_j^I = \frac{2}{T} \int_0^T F^I(t) e^{i\Delta\omega j t} dt, \tag{9}$$

здесь T – время действия ледовой нагрузки.

Амплитуда гармоник напряжения k -го элемента основания объекта при ледовой нагрузке составит:

$$\sigma_{kmj}^I = F_j^I (\cos(\alpha_I) K_{xmj}(z_I) + \sin(\alpha_I) K_{ymj}(z_I)), \tag{10}$$

где z_I – уровень ватерлинии; α_I – направление распространения льда.

14. Затем производится переход к временной реализации 6 компонентов напряжения в k -ом «горячем» элементе конструкции через набор гармоник со случайной фазой φ_j для ветровой и волновой нагрузки и фиксированной фазой φ_j^I для ледовой нагрузки. Данный спектр может быть промоделирован во временной области согласно выражению:

$$\sigma_{km}(t) = \sum_{j=0}^M (W \sigma_{kmj}^I \cos(j\Delta\omega t + \varphi_j^I) + \sigma_{kmj} \cos(j\Delta\omega t + \varphi_j)). \tag{11}$$

15. В каждый момент времени t из полученного набора шести компонентов напряжения вычисляются по стандартной методике сопромата три главных напряжения. Далее производится переход к одноосному напряженному состоянию с применением гипотезы энергии формоизменения, например, (Треска-Сен-Венана):

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2 \cdot \sigma_T^2, \tag{12}$$

где σ_T – предел текучести при растяжении.

16. Полученная временная реализация эквивалентного одноосного напряжения в k -м элементе далее подвергается статистической обработке для получения кривой плотности распределения с целью определения экстремальных напряжений элементов.

Пример использования разработанной методики

Выбранная модель ВЭУ с основанием в виде трипода имеет ориентировочную мощность 12 МВт, глубину установки на акватории 20 м и отличается наличием конусного ледостойкого пояса, который снижает ледовую нагрузку по сравнению с прямостенной конструкцией. Высота сооружения составляет 150 м, масса 1734 т, толщина стенок колеблется от 20 мм наверху колонны до 50 мм в самых напряженных элементах основания сооружения. Общий вид модели изображен на рис. 6, а ледостойкий пояс на рис. 7. Далее на рис. 8 приводятся скриншоты спектра волнения, ветра, а на рис. 9 – процесс моделирования волновой и ветровой нагрузки во временной области в AS.

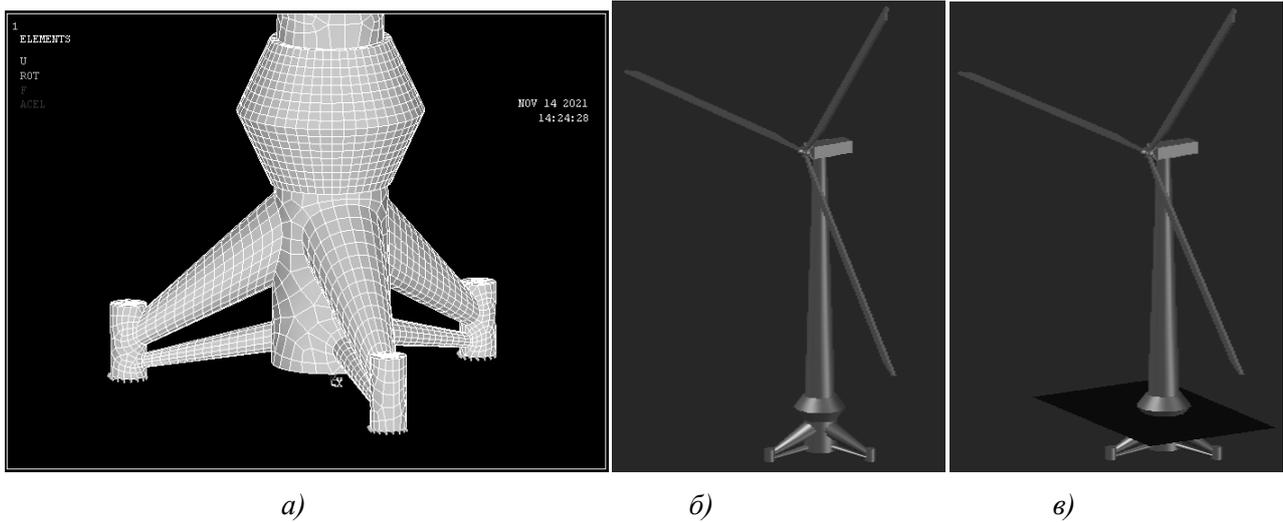


Рис. 6. Общий вид модели:
 а – разбивка на элементы поверхности ВЭУ в программе ANSYS;
 б – модель ветрогенератора без отображения поверхности воды;
 в – с отображением при глубине 20 м

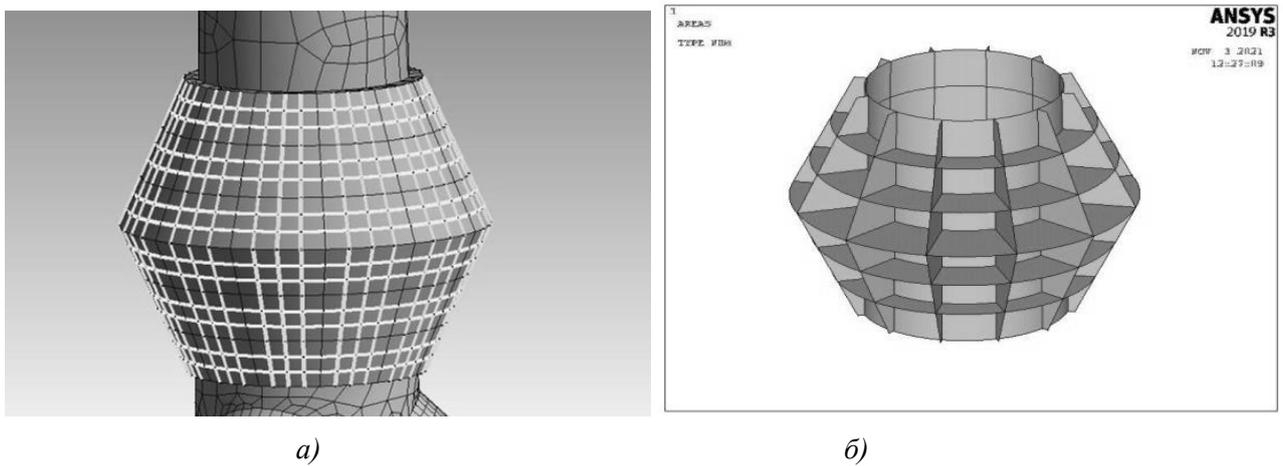


Рис. 7. Ледостойкий пояс:
 а – конструкция ледостойкого пояса; б – общий вид

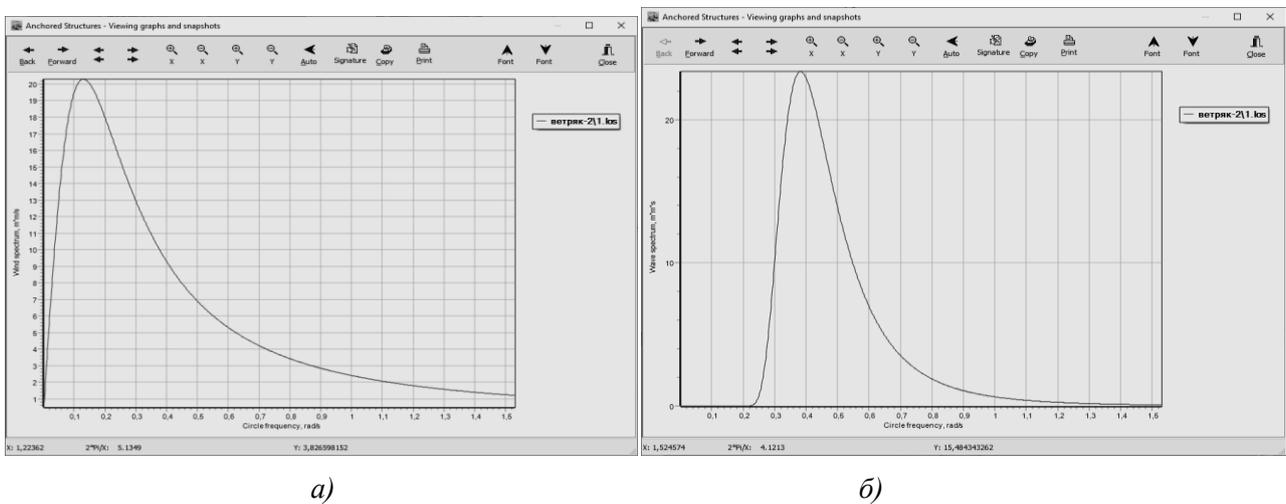


Рис. 8. Скриншоты спектра волнения и ветра:
 а – спектр ветра DAVENPORT; б – спектр волнения JONSWAP

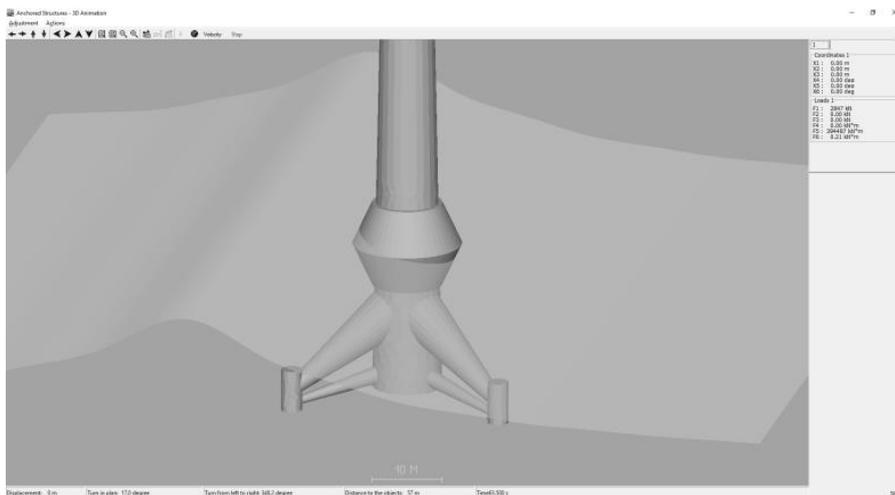
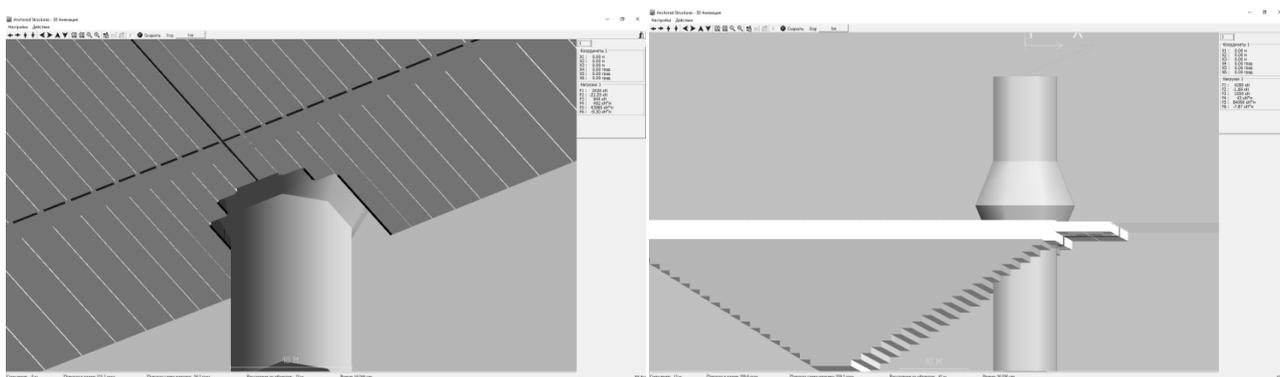


Рис. 9. Моделирование волновой и ветровой нагрузки на ВЭУ в AS

Далее на рис. 10 и рис. 11 приводятся изображения объекта и ледового поля при моделировании ледовой нагрузки в AS для разных ледовых ситуаций.

На рис. 12 показаны временные зависимости горизонтальной ледовой силы для ровного и торосистого льда.



a)

б)

Рис. 10. Моделирование воздействия льда на ледозащитный пояс:

a – разрушение ровного льда сколом;

б – торосистый лед

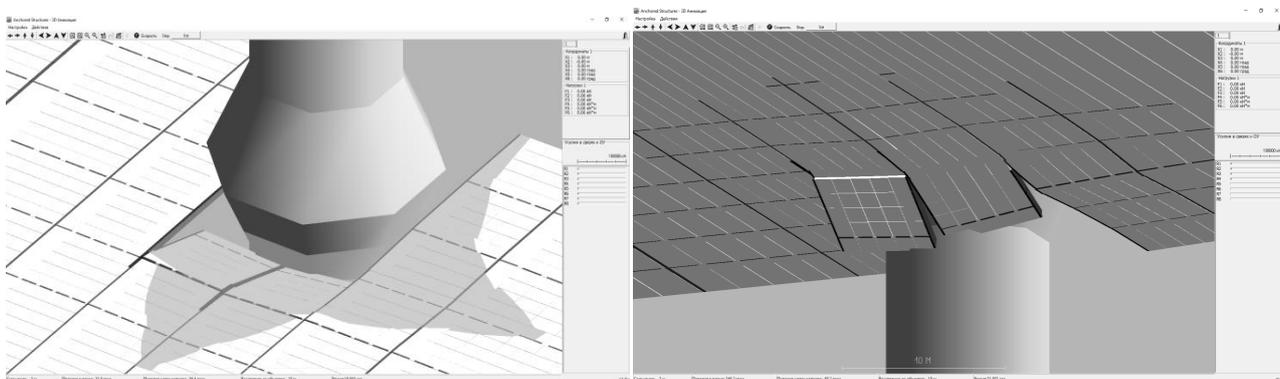
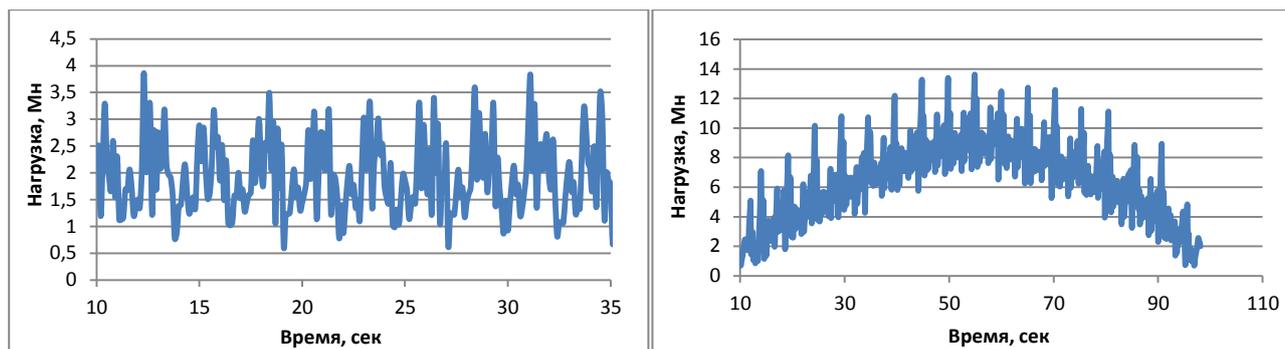


Рис. 11. Моделирование ледовой нагрузки на ледозащитный пояс.

Разрушение льда изломом



а)

б)

Рис. 12. Нагрузка от ровного (а) и торосистого (б) льда толщиной 1,4 м и прочностью 1.3 МПа при скорости движения льда 0.8 м/с

Далее на рис. 13 приводятся примеры полученных в результате моделирования во временной области распределений напряжений в элементе основания при действии нагрузок с различных направлений.

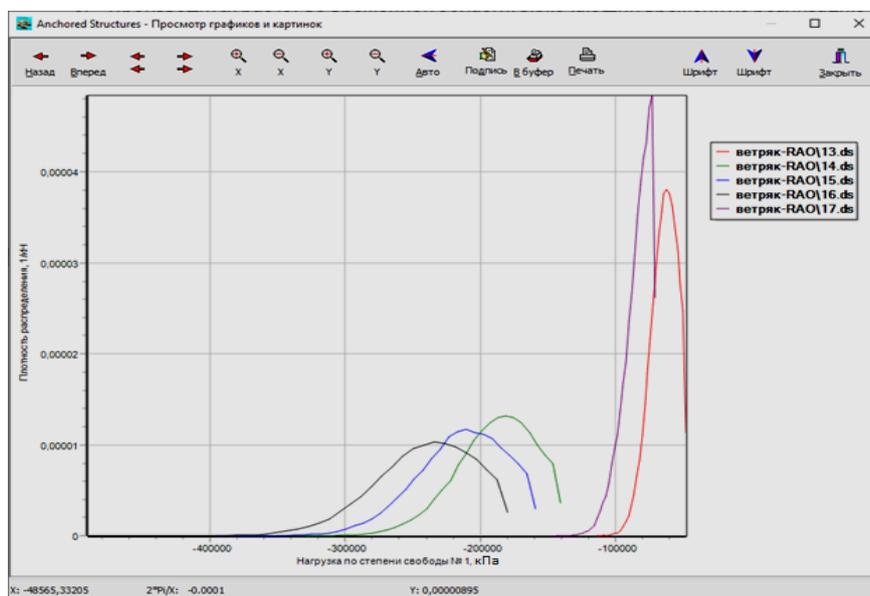


Рис. 13. Примеры кривых распределения напряжений в элементе основания

Статистическая обработка результатов моделирования напряжений, полученных по данной методике, показала, что максимальное (один раз за 25 лет эксплуатации сооружения) напряжение элементов основания не превышает 350 МПа, то есть является допустимым для стали F460W^{Arс40} с пределом текучести 460 МПа и коэффициентом запаса 1,3, а наибольший вклад в это значение вносит ветровая нагрузка на ветроколесо (не менее 70-75%).

Заключение

- Разработано новое конструктивное решение для создания опорного основания морской стационарной арктической ВЭУ. Определены характеристики стали, основные конструктивные размеры сооружения и геометрические параметры элементов.
- Разработана новая концепция прочностного анализа конструкции морской арктической стационарной ВЭУ на основании численного анализа поведения цифрового прототипа ВЭУ под действием регулярных и нерегулярных нагрузок от ветра, волнения, течения и льда на протяжении всего жизненного цикла эксплуатации сооружения.

- Разработана новая концепция реализации прочностного анализа конструкции морской арктической стационарной ВЭУ с помощью взаимодействия нескольких программных комплексов, между которыми организованы необходимые интерфейсные связи.
- Показана возможность эксплуатации данного морского сооружения в условиях Арктики.

Библиографический список

1. American Petroleum Institute. API RP 2A-WSD-2007 Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Load and Resistance Factor Design. American Petroleum Institute: Washington, DC, USA.
2. International Electrotechnical Commission. IEC 61400-3: Wind Turbines—Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines, 1st ed. (2013). International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland.
3. Det Norske Veritas. DNV-RP-C205, Environmental Conditions and Environmental Loads (2014). Det Norske Veritas: Oslo, Norway.
4. Tarp-Johansen, NJ (2005). Partial safety factors and characteristic values for combined extreme wind and wave load effects. *Journal of Solar Energy Engineering* 127(2): 242–252.
5. Thomassen, PE, Bruheim, PI, Suja, L (2012). A novel tool for fem analysis of offshore wind turbines with innovative visualization techniques. In Proceedings of the 22 International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece.
6. Yin, LL, Lo, KH, Wang, SS (2017). Effects of blade pitch, rotor yaw, and wind-wave misalignment on a large offshore wind turbine dynamics in western Gulf of Mexico Shallow water in 100-year return hurricane. *J. Offshore Mech Arct Eng*, 139, 011901.
7. Henderson, AR, Zaaier, MB (2014). Hydrodynamic loading on offshore wind turbine support structures. *Eng Integr*, 25, 24–31.
8. Plodpradit, P, Dinh, VN, Kim, KD (2019). Tripod-Supported Offshore Wind Turbines: Modal and Coupled Analysis and a Parametric Study Using X-SEA and FAST. *J Mar Sci Eng*, 7, 181.
9. Ju, SH, Huang, YC, Hsu, HH (2019). Parallel Analysis of Offshore Wind Turbine Structures under Ultimate Loads. *Appl. Sci*, 9, 4708.
10. Negm, HM, Maalawi, KY (2000). Structural design optimization of wind turbine towers. *Computers and Structures*, 74, 649–666.
11. Choi, E, Han, CG, Kim, HJ, Park, SG (2014). Optimal design of floating substructures for spar-type wind turbine systems. *Wind Struct*, 18, 253–26.
12. Yang, HZ, Zhu, Y (2015). Robust design optimization of supporting structure of offshore wind turbine. *JMarSciTechnol*, 20, 689–702.
13. Anders, D, Uhlar, S, Krüger, M, Groß, M, Weinberg, K (2012). Investigating a flexible wind turbine using consistent time-stepping schemes. *Eng Comput*, 29, 661–688.
14. Christiansen, S, Bak, T, Knudsen, T (2013). Damping wind and wave loads on a floating wind turbine. *Energies*, 6, 4097–4116.
15. Jonkman, BJ, Buhl, M (2004). Turbsim User’s Guide v2.00.00; Technical Report No. NREL-LEL-500-36970. National Renewable Energy Laboratory (NREL): Golden, CO, USA.
16. Kim, KD, Plodpradit, P, Kim, BJ, Sinsabvarodom, C, Kim, SJ (2014). Interface behavior of grouted connection on monopile wind turbine offshore structure. *Int J Steel Struct*, 14, 439–446.
17. Большев, А.С. Математическое моделирование морских плавучих объектов в программном комплексе «AnchoredStructures» / А.С. Большев, М.А. Кутейников, С. А. Фролов // Научно-технический сборник РМРС. – 2013. – Вып. 36. – С. 68-90.
18. Bolshev, AS, and Frolov, SA (2020). “The method of numerical modeling of the level ice impact on the sloping profile”, The Thirtieth (2020) International Ocean and Polar Engineering Conference, 35-37.

Т.Л. Чемакина, Л.С. Ефремова

ВЛИЯНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ РАЙОНА ЭКСПЛУАТАЦИИ НА АВАРИЙНОСТЬ СТАЦИОНАРНЫХ МОРСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь

Выполнен обзор влияния геодинамических факторов различных районов эксплуатации Арктического шельфа на аварийность стационарных морских сооружений. Рассмотрена сейсмическая активность Арктического шельфа.

Дан анализ аварийных случаев на мировых морских промыслах оффшорных месторождениях различных стран, происходившие вследствие различных факторов, в том числе и геодинамических. Перечислены факторы, которые необходимо учесть при разработке проекта буровой установки.

Ключевые слова: геодинамические факторы, аварийность буровых платформ, сейсмическая активность, геологические, экологические требования.

Особенности Арктической зоны, определяющие специальные подходы к ее социально-экономическому развитию в Арктике, состоят в следующем:

- а) экстремальные природно-климатические условия, крайне низкая плотность населения и уровень развития транспортной и социальной инфраструктуры;
- б) высокая чувствительность экологических систем к внешним воздействиям;
- в) устойчивая географическая, историческая и экономическая связь с Северным морским путем;
- г) неравномерность промышленно-хозяйственного освоения отдельных территорий Арктической зоны, ориентированность экономики на добычу природных ресурсов, их вывоз в промышленно развитые субъекты Российской Федерации и экспорт;
- д) высокая ресурсоемкость хозяйственной деятельности и жизнеобеспечения населения, их зависимость от поставок топлива, продовольствия и иных жизненно необходимых товаров из различных субъектов Российской Федерации [1].

Экономическая целесообразность освоения нефтегазовых ресурсов Арктического шельфа объясняется сближением себестоимости углеводородов, добываемых на суше и в море. Последнее объясняется тем, что в силу ограниченности запасов технологически доступных месторождений себестоимость нефти, добываемой на суше, растет быстрее, чем получаемой из морских месторождений [2].

В основной своей части Арктика была признана неактивной в отношении сейсмического показателя (см. рис. 1). Однако применительно к области шельфовых месторождений даже небольшой амплитуды подземные толчки могут дать начало аварии на нефтедобывающей платформе, вызывая повреждения и неустойчивость как её, так и нарушение работы трубопровода.

Суммарная площадь морского Арктического шельфа России составляет 2,9 млн км² и содержит в себе огромные запасы углеводородов. Крупнейшими месторождениями в несколько сотен миллионов тонн являются: Барандейское и Северо-Гуляевское – Печорское море (удельная плотность до 500 тыс. т/м²); Ледовое, Лудловское, Штокмановское – Баренцево море (удельная плотность более 300 тыс. т/км²) (см. рис. 2) [2].

При разработке новых морских месторождений углеводородного сырья важно учитывать не только климатические и гидрометеорологические особенности района добычи (волновые, ветровые, «ледниковый период» северных районов), но и геологические, сейсмические, а также жесткие экологические требования.

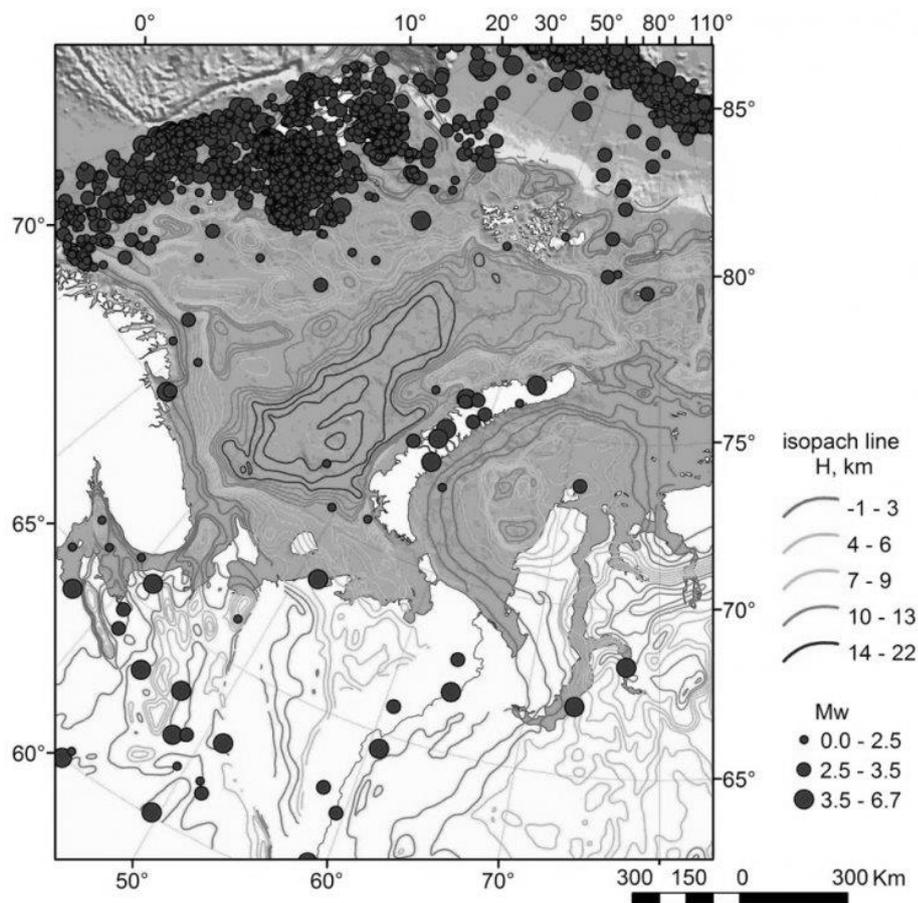


Рис. 1. Сейсмичность Арктики за 1980-2020 гг. Линиями показаны изопахиты мощности осадочного чехла, согласно данным (Ruscheikova et al. 2018, лаборатория сейсмологии ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН) Информация взята с портала «Научная Россия» (<https://scientificrussia.ru/>)

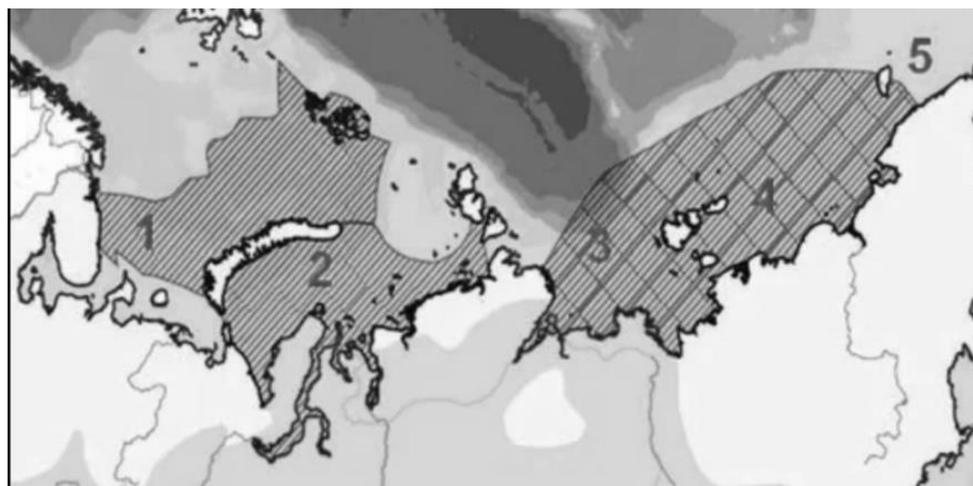


Рис. 2. Крупнейшие нефтегазоносные области в арктической части:
 1 – Баренцевоморская НГО; 2 – Карская и Обско-Тазовская НГО; 3 – НГО моря Лаптевых;
 4 – Восточно-Сибирская НГО; 5 – Чукотская НГО [3]

В 2020 г. утверждены постановлением Правительства Российской Федерации Правила организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации [4]. При разработке новых месторождений уг-

леводородов следует учесть наличие в районе разработки скопления ценных и особо ценных пород красной рыбы, таких как: белуга, калуга, осетр амурский, осетр персидский, осетр русский, осетр сибирский, севрюга и др. [5].

Как правило, геодинамические источники риска слабо учитываются при освоении северных районов добычи углеводородов, что в свою очередь может приводить к большим экономическим потерям. В мире по статистике из 3 000 аварийных случаев на оффшорных месторождениях 36% происходили вследствие сейсмической активности [6].

Аварии на нефтегазодобывающих платформах происходят практически каждый год, а в нескольких случаях и несколько раз в год. Это объясняется относительно высокой аварийностью при бурении скважин. При этом наиболее высокая доля разрушений происходит при воздействии природных явлений, ошибок персонала и внешних воздействиях техногенного характера (рис. 3) [7].

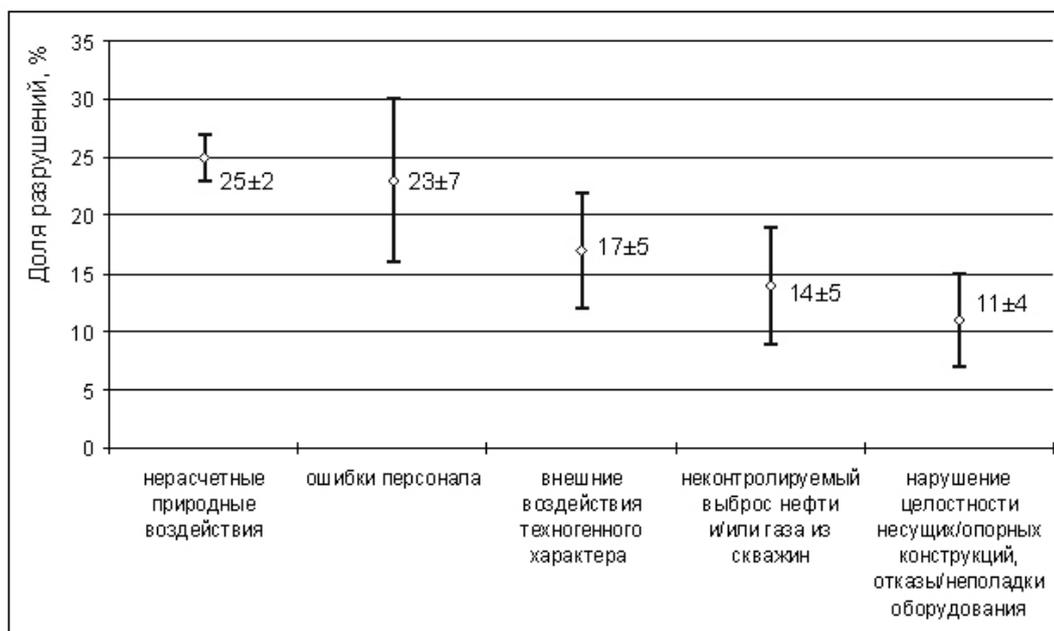


Рис. 3. Причины аварийности на нефтегазодобывающих платформах

Таблица 1

Характеристики месторождений углеводородов

Месторождения	Тип флюида	Тип пористость коллектора	Ожидаемые природно-техногенные процессы
Штокмановское	Газоконденсат	Слабосцементированные песчаники (15-27 %)	Вызванные землетрясения, оседание донной поверхности при эксплуатации месторождений углеводородов, активизация криогенеза, оползней и сплывов
Лудловское	Газ	Слабосцементированные песчаники и алевролиты (14-27%)	
Ленинградское и Русановское	Газ	Слабосцементированные алевролиты и песчаники (14-35 %)	
Мурманское	Газ	Пески, слабосцементированные песчаники	То же самое, но без активизации криогенеза
Поморское	Газоконденсат	Известняки (4-15 %)	Активизация криогенеза
Приразломное	Нефть	Известняки (4-24 %)	
Варандей-море	Нефть	Известняки (11-15 %)	
Медынское-море	Нефть	Известняки (11-15 %)	

В таблице дан анализ аварийных случаев на мировых морских промыслах оффшорных месторождениях различных стран, происходившие вследствие различных факторов, в том числе и геодинамических. При этом происходили потеря устойчивости и повреждения не только платформ, но и трубопроводов. Расходы на ликвидацию последствий техногенно-индуцированных землетрясений на одном только месторождении Экофиск (газонефтяное месторождение в норвежском секторе Северного моря) в Северном море составили более 400 млн долл. [8].

Обзор сейсмической активности на действующих месторождениях Арктического шельфа России даёт возможность сделать оценку последствий возможного сейсмического воздействия. Далее представлены характеристики некоторых месторождений и ожидаемые геодинамические воздействия на морские сооружения добычи углеводородов (см. табл. 1) [10].

В частности, в настоящее время уделяется особое внимание слабо изученным и до сих пор не получившим адекватной оценки факторам риска, связанным с современным «грязевым» вулканизмом и дегазацией донных осадочных формаций на Арктическом шельфе, резко усилившимися в период потепления климат.

Данный обзор в дальнейшем поможет усовершенствовать методические основы [11] и разработать практические рекомендации при разработке проекта буровой установки с учетом геодинамических факторов.

Библиографический список

1. Стратегия развития арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. Указ Президента Российской Федерации о стратегии развития арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. №645 от 26 октября 2020 г. – М., 2020.
2. Ахмеджанов, Т.К. Освоение шельфовых месторождений: учеб. пособие / Т.К. Ахмеджанов, А.С. Ыскак. – Алматы: КазНТУ, 2008 – 259 с.
3. Журнал Neftegaz.RU offshore. [1] 2017. ISSN 2410-3837
4. Постановление Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. N 2451 «Об утверждении Правил организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации, за исключением внутренних морских вод Российской Федерации и территориального моря Российской Федерации, а также о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации». – М., 2020.
5. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 23 октября 2019 г. N 596 "Об утверждении Перечня особо ценных и ценных видов водных биологических ресурсов" (с изменениями и дополнениями). – М., 2019.
6. Маловичко, А. А. Развитие систем геофизического мониторинга в Арктике / А. А. Маловичко, А. Н. Виноградов, Ю. А. Виноградов // Арктика: экология и экономика. – 2014. – № 2. – С. 16–23.
7. Марченко, И.А. Особенности инженерных изысканий для постановки буровых платформ в Арктических морях // Вести газовой науки. – 2019. – № 2 (39). – С. 149–156
8. Мори, В. Оседание буровых платформ на нефтяных промыслах Экофиск: проблема механики горных пород (причины и следствия оседаний, связанных с разработкой нефтяных залежей в Северном море) // Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти. – М.: Мир, 1994. – С. 257-264.
9. Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2010 г. – М.: ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011. – 352 с.
10. Козлов, С.А. Оценка устойчивости геологической среды на морских месторождениях углеводородов в Арктике // Нефтегазовое дело, 2005.
11. ГОСТ Р 57123 – 2016 Нефтяная и газовая промышленность. Сооружения нефтегазопромысловые морские. Проектирование с учетом сейсмических условий. – М., 2016.

УДК 629.1

DOI: 10.46960/polmech_2023_102

А.Д. Романов, Е.А. Романова, В.С. Макаров

РАЗРАБОТКА ВОЗДУХОНЕЗАВИСИМОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород

Показана комбинированная воздухонезависимая энергетическая установка на основе высокометаллизированного безгазового топлива с механизмом изменения плавучести для необитаемого подводного аппарата большой автономности.

Ключевые слова: воздухонезависимая энергетическая установка, необитаемый подводный аппарат, механизм изменения плавучести, глайдер.

В последние годы в мире предпринимаются значительные меры по созданию арктических программ, включающих разработку стратегий и создание научных центров, реализуются шельфовые проекты, создаются объекты арктической морской техники.

Активные исследования Арктики начались более века назад, однако, на сегодняшний день она остается одним из малоизученных участков нашей планеты. Для науки, как и для практики, необходимы многолетние круглогодичные наблюдения в одних и тех же районах Арктического бассейна и морей. Сегодняшние реалии таковы, что требуется такое количество информации об океане, которое никак не могут дать ни отдельные корабли, даже если бы их было на порядки больше, чем сейчас, ни отдельные дрейфующие станции, так как для создания эффективной системы океанологических наблюдений стоимость такой системы оказывается неподъемно высокой.

Несмотря на относительно малые размеры Северного Ледовитого океана, он оказывает сильное влияние на состояние климата Земли, являясь индикатором глобальных климатических изменений. Хотя величина наблюдаемых трендов изменялась в пределах определенного региона и для некоторых регионов наблюдалось похолодание, общий тренд для Арктики за последние несколько десятилетий демонстрирует потепление, превышающее средний глобальный рост температуры на планете.

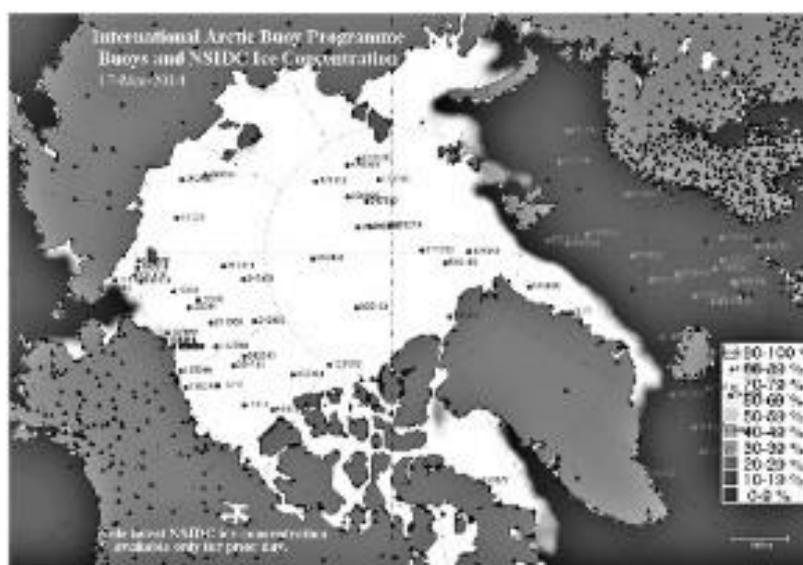


Рис. 1. Положение дрейфующих буев ИАВР по состоянию на 17 марта 2014 г.
Белым цветом показана область, занятая морским льдом

Прогнозирование океанографических характеристик в Арктическом бассейне Северного Ледовитого океана представляет собой сложную задачу, требующую учета значительно большего числа физических процессов в условиях крайнего недостатка оперативной информации. Так, информацию о состоянии Северного Ледовитого океана дают различные спутниковые системы, в основном ориентированные на измерение площади льда. Кроме того, важным фактором является проникновение относительно «теплых» и соленых вод из Атлантики. Для мониторинга существует постоянно пополняемая сеть буев, объединенная в рамках Международной Арктической программы буев IABP – International Arctic Buoy Program (рис 1). Возможность применения полных моделей циркуляции океана стала реальностью благодаря развитию региональных моделей Северного Ледовитого океана [1–3]. Однако буи типа Argo могут использоваться только в районах, свободных ото льда, поэтому в основном используются буи, закрепленные на льду. Однако, если такой буй выносится в область таяния льда – он теряется. В ключевых проливах устанавливаются заякоренные буи, ориентированные на измерения профилей температуры и солености, и, в меньшей степени – скорости течений. Количества STD измерительных систем, работающих в оперативном режиме, недостаточно.

В настоящее время актуальной задачей становится разработка новой методологии исследований, а вместе с ней современных высокотехнологичных технических средств исследований в Арктическом бассейне, которые были бы способны не только осуществлять плавание и проводить работы в прикромочной зоне и среди разреженных льдов, но также и проникать в массивы сплоченных льдов или в припайные льды, при этом обеспечивать возможность ведения наблюдений в нужных районах с большой продолжительностью во времени и разрешаемостью в пространстве.

Впервые концепция подводного глайдера была практически продемонстрирована компанией General Dynamics в конце 60-х гг. прошлого столетия. В настоящее время работы по созданию подводных глайдеров активно проводятся во многих странах [4, 5].

При этом одной из важнейших систем подводных глайдеров является механизм изменения плавучести (МИП), назначение которого состоит в изменении веса или объема аппарата, обеспечивая его погружение и всплытие. В настоящее время используется несколько различных типов, отличающихся принципом действия: электрические, термические, химические.

Целью настоящей работы является создание комплекса мониторинга подледной обстановки на основе подводных аппаратов с большей продолжительностью подводного хода, обеспечивающего возможность получения результатов исследования для решения практических задач.

Задачами работы являются разработка концепции применения и выбора оборудования для подводного аппарата, обладающего значительной подводной автономностью, оснащенной малогабаритной воздухонезависимой энергетической установкой с различными вариантами преобразователей, и выявление возможных границ применимости системы и накладываемые на нее ограничения.

В ходе предварительных работ [5, 6] были решены следующие задачи:

- разработана проектная документация и создан многофункциональный экспериментальный стенд комплексного исследования горения массива топлива с получением тепловой энергии;
- теоретически обоснована и экспериментально подтверждена безопасность применения данной энергетической установки с указанием оценок риска развития аварийных ситуаций, включая запроектные аварии;
- разработаны технические решения, позволяющие минимизировать последствия аварии;
- проведена оценка стоимости реализации различных технологических решений и оценка технико-экономической эффективности внедрения данной технологии.

На рис. 2 приведена принципиальная схема преобразования тепловой энергии горения высокометаллизированного топлива.

При этом большая часть тепловой энергии без преобразования поступает в механизм изменения плавучести, на основе изменения агрегатного состояния рабочего тела, что позволяет значительно увеличить дальность и/или скорость движения подводного аппарата.

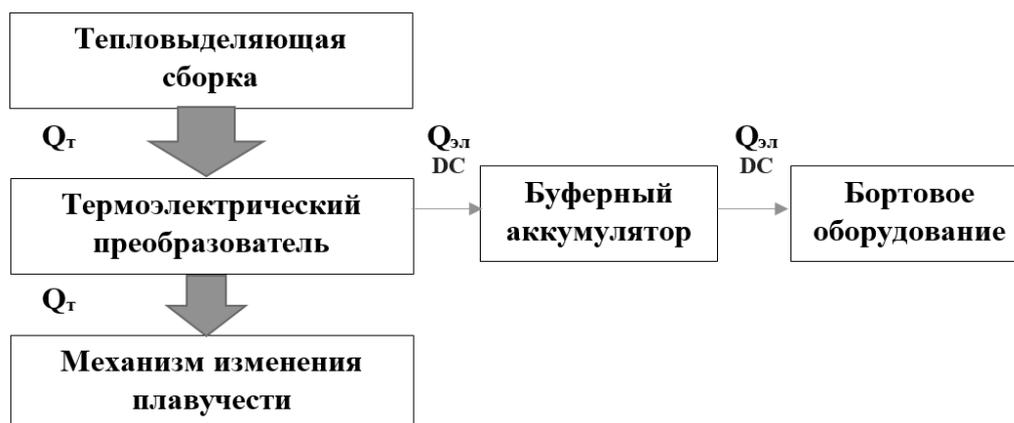


Рис. 2. Схема преобразования тепловой энергии

Глайдер, оборудованный подобной установкой, по сути, ничем, кроме дальности/скорости, не отличается от классического глайдера, оборудованного МИП на основе аккумуляторной батареи.

Библиографический список

1. Некипелов, А. Д. Перспективы фундаментальных научных исследований в Арктике / А. Д. Некипелов, А. А. Макоско // Арктика: экология и экономика. – 2011. – № 4(4). – С. 014-021. – EDN PXCZNL.
2. Яковлев, Н. Г. Современное состояние и проблемы моделирования циркуляции в Арктических морях // Труды Государственного океанографического института. – 2015. – № 216. – С. 6-23. – EDN YPDEHV.
3. Моделирование обратных связей климатообразующих процессов в Северном Ледовитом океане / А. С. Саркисян, С. Н. Мошонкин, Н. А. Дианский [и др.] // Арктика: экология и экономика. – 2013. – № 1(9). – С. 012-023. – EDN PYCHOR.
4. Борис Гайкович Подводные глайдеры-роботы для исследования и мониторинга арктических акваторий // Корабел. – 2015. – №4 (30). – С.126-130.
5. Подводные глайдеры: эффект "рыбьего пузыря" / И. В. Кожемякин [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2012. – № 4(18). – С. 3-9. – EDN PNGOBF.
6. Чернышов, Е. А. Разработка тепловыделяющего элемента на основе высокометаллизированного безгазового топлива / Е. А. Чернышов, А. Д. Романов, Е. А. Романова // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2015. – № 6(105). – С. 74-81. – EDN VKEBSF.
7. Чернышов, Е. А. Развитие воздухонезависимых энергетических установок подводных лодок / Е. А. Чернышов, Е. А. Романова, А. Д. Романов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2015. – № 5(33). – С. 140-152. – DOI 10.21821/2309-5180-2015-7-5-140-152. – EDN ULWVGJ.

УДК 624.012.4

DOI: 10.46960/polmech_2023_105

В.В. Малюк^{1,2}**ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БЕТОНА В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ КЛАССА XF4.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ**¹Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» ДальНИИС, г. Владивосток,²Сахалинский государственный университет, г. Южно-Сахалинск

Рассмотрены проблемы, возникающие при назначении показателей долговечности бетона для агрессивных сред класса XF4 на этапе проектирования. На основании современных теоретических положений структурной теории цементных бетонов и опыта строительства морских сооружений показано, что реализация нормируемой морозостойкости на этапе строительства возможна при условии обеспечения критической зрелости структуры бетона к началу морозного воздействия.

В процессе прогнозирования долговечности бетона целесообразно коррозию бетона рассматривать как двухстадийный процесс с периодами инициации и деградации. Рекомендуемые меры защиты бетона от морозной коррозии в агрессивной среде класса XF4 позволяют обеспечить срок службы бетонных конструкций 100 лет.

Ключевые слова: морские сооружения, морозостойкость бетона, долговечность, агрессивная среда.

Продолжительность жизненного цикла бетонных конструкций в агрессивных условиях класса XF4, как правило, оценивается долговечностью на этапе эксплуатации. Однако качественные показатели для долговечности устанавливаются на этапе проектирования и формируются на этапе строительства. Долговечность как срок службы конструкции является показателем качества жизненного цикла (далее – ЖЦ). Поэтому важно определить критические показатели каждого этапа, которые, в конечном итоге, определяют показатель качества ЖЦ конструкции – долговечность.

Класс агрессивности среды XF4 характеризует условия эксплуатации, в которых бетон конструкций подвержен воздействию циклов замораживания и оттаивания в условиях сильного насыщения минерализованной водой. В этих условиях эксплуатируются в основном конструкции морских портовых сооружений, конструкции зданий и сооружений, подверженные воздействию противогололедных материалов.

Традиционно для проектирования долговечности бетонных конструкций применяется предписывающий подход [1, 2]. Основой для этого является накопленный опыт эксплуатации существующих сооружений и большой объем экспериментальных исследований бетона в условиях, приближенных к реальным. Это явилось основой для разработки нормативных документов, которые предписывают алгоритм назначения требований к составу и свойствам бетона в зависимости от агрессивности среды эксплуатации конструкций [2, 3, 13, 14, 15]. Основная задача проектирования долговечности – обеспечить срок службы конструкций с помощью процедуры проектирования, а на этапе строительства – реализовать проектные требования по защите бетона от коррозии при морозном воздействии.

На рис. 1 представлена блок-схема системного подхода к технологии получения долговечного бетона для агрессивных сред класса XF4. В этой системе выделены основные подсистемы, на выходе из которых должны быть получены показатели, определяющие долговечность бетона в конструкциях. Из представленной схемы видно, что качество ЖЦ закладывается на этапе проектной разработки. Как было отмечено ранее, проектирование долговечности бетона для агрессивных сред класса XF4 основано на минимально необходимых требованиях к составу и свойствам бетона, позволяющих обеспечивать срок службы кон-

струкций не менее 50 лет. Требования к составу и прочности бетона не зависят от климатического района строительства. Дифференцированный подход принят для назначения марки по морозостойкости, которая должна назначаться на этапе проектирования в зависимости от климатического района строительства. Процесс подбора состава бетона по морозостойкости фактически является определенным этапом проектирования долговечности и представляет продолжительный, сложный и трудоемкий процесс, выполняемый специалистами-технологами высокого уровня, поскольку до сих пор отсутствуют расчетные методы определения состава бетона для требуемой морозостойкости.

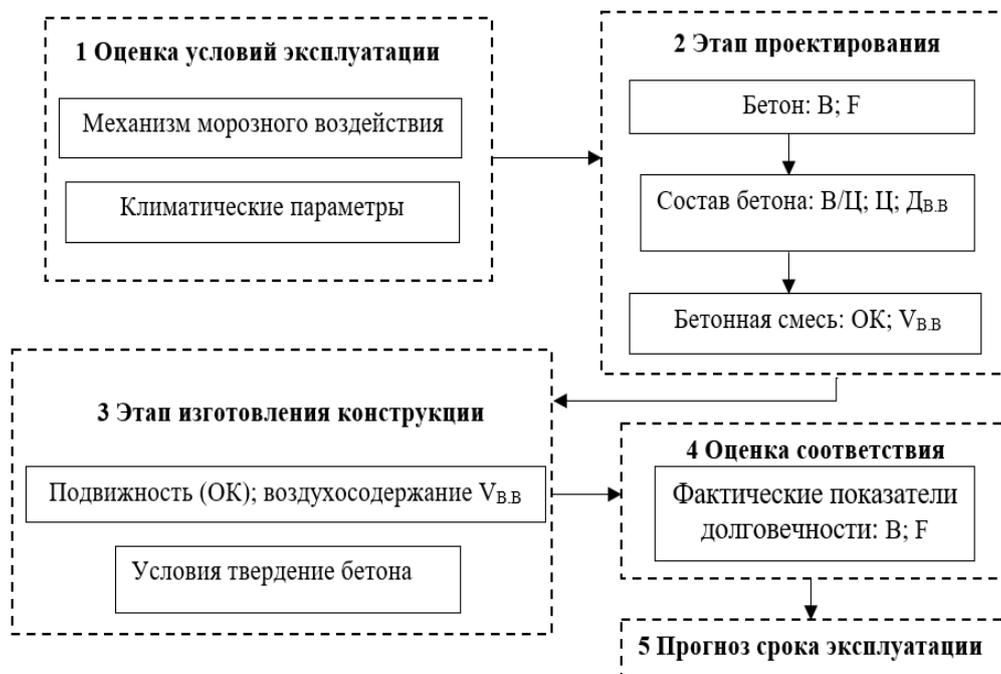


Рис. 1. Принципиальная схема этапов формирования показателей долговечности бетона для агрессивной среды класса XF4

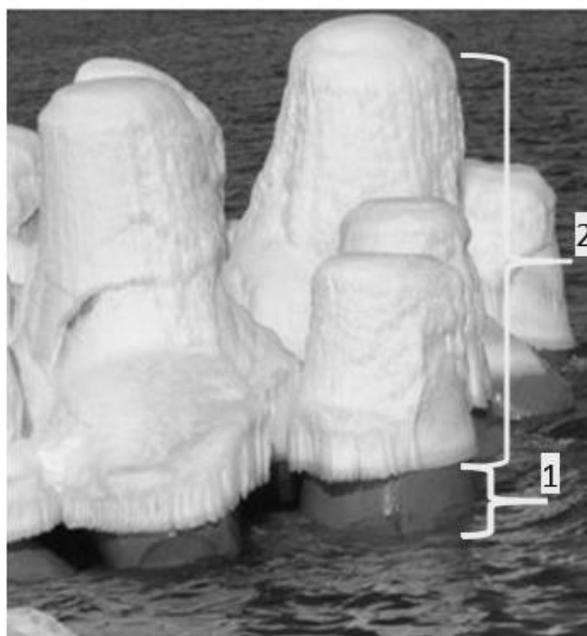


Рис. 2. Характерные условия эксплуатации бетона в конструкциях оградительных и причальных сооружений:
1 – участок прилива; 2 – участок всплеска волны

Предписывающий подход к проектированию долговечности бетонных конструкций для эксплуатации в агрессивных средах класса XF4 основан на том, что приемка конструкции должна выполняться по оценке соответствия показателям долговечности, т.е. по оценке морозостойкости бетона. Полагая, что при обеспечении проектной морозостойкости бетона в конструкции срок ее службы будет составлять не менее 50 лет [2, 3]. Опыт строительства морских сооружений показывает, что на этапе проектирования важно установить реальные параметры морозного воздействия на бетон в конструкциях и механизм замораживания бетона в конструкции [4, 5, 6, 7].

Исследование системы «материал – конструкция – среда» показывает, что в реальных условиях «среда» может принципиально изменять механизм замораживания и разрушения бетона [4, 8]. Возможность изменение влажностного состояния бетона в конструкции при длительном обледенении по причине термомассопереноса является принципиальным отличием от условий, в которых механизм замораживания обусловлен циклами замораживания и оттаивания. В зоне переменного уровня морских сооружений на Дальнем Востоке выделены два характерных участка конструкций, в которых принципиально отличаются механизмы замораживания бетона. На рис. 2 показаны условия эксплуатации бетона на этих участках.

Исходя из преобладающих факторов внешних воздействий наблюдается следующие механизмы замораживания бетона P_F :

а) на участке прилива механизм замораживания P_{F1} определяют температура замораживания бетона в конструкции (t_F) и число циклов замораживания и оттаивания бетона (N_{FT}), т.е.

$$P_{F1} = f(t_F, N_{FT}); \quad (1)$$

б) на участке всплеска волн механизм замораживания P_{F2} определяют температура замораживания бетона в конструкции (t_F) и продолжительность замораживания бетона (T_F), т.е.

$$P_{F2} = f(t_F, T_F); \quad (2)$$

Анализ требований к показателям бетона для получения долговечных бетонов в агрессивных средах класса XF4 [2, 3] показывает, что в принципе они соответствуют требованиям, предъявляемым к бетону для обеспечения морозостойкости:

а) для обычного бетона:

$$F_2 = D_{BT} = f(V/C; C; T_{y.T}); \quad (3)$$

б) для бетона с воздухововлекающими добавками:

$$F_2 = D_{BT} = f(V/C; C; T_{y.T}; V_{B.B}), \quad (4)$$

где F_2 – марка бетона по морозостойкости; D_{BT} – срок службы бетона; V/C – водоцементное отношение; C – содержание цемента; $V_{B.B}$ – воздуходержание; $T_{y.T}$ – условия твердения.

Проектирование долговечности бетона с учетом реальных условий эксплуатации бетона в конструкциях, т.е. с учетом механизма замораживания, вызывает необходимость учитывать фактор водосодержания бетонной смеси. Традиционные подходы к исследованию стойкости бетона от циклов ЗО не позволяют объективно оценить роль водосодержания бетонной смеси при механизме замораживания вида P_{F2} . Экспериментально установлено, что существует «критический» расход воды в бетоне, после которого происходит резкое снижение морозостойкости. По мнению исследователей, этот показатель является более важным для морозостойкости, чем V/C отношение [8]. Опыт строительства показывает, что одной из причин часто наблюдаемого преждевременного разрушения бетона в агрессивных средах класса XF4 связано с применением бетонных смесей с повышенным водосодержанием [10, 17]. Поэтому при проектировании долговечности бетона для конструкций, в которых преобладает механизм замораживания вида P_{F2} , в предписывающих ограничениях, представленных на схеме рис. 1, целесообразно дополнительно в бетонной смеси ограничивать расход воды критическим значением $V_{кр}$. В этом случае выражение (4) будет иметь следующий вид:

$$D_{BT} = f(V/C; V_{кр}; T_{y.T}; V_{B.B}). \quad (5)$$

Критическое значение расхода воды ($B_{кр}$) необходимо устанавливать с учетом условий твердения бетона ($T_{y.T}$). Принимая во внимание минимальные требования к составу бетона по показателям В/Ц отношения и расхода цемента, которые предписаны ГОСТ 31384 [3], для обеспечения долговечности бетона в агрессивных условиях класса XF4 расход воды в бетонной смеси должен быть на уровне 155 л/м³. Однако необходимо иметь в виду, что это рекомендовано для бетона с воздухововлекающими добавками, которые позволяют при низких расходах цемента повысить подвижность бетонной смеси по ОК в пределах 6–10 см. Эту подвижность бетонной смеси можно рассматривать в качестве косвенного показателя для ограничения расхода воды.

Рассматривая формирования долговечности бетона как процесс (см. рис. 1), следует отметить, что наиболее проблемным остается вопрос оценки соответствия бетона в конструкции требованиям долговечности, т.е. требованиям морозостойкости. Поскольку эффективность работы всех показателей, определяющих долговечность (см. выражение (5)), зависит от условий твердения ($T_{y.T}$) бетона к началу морозного воздействия. Это обусловлено тем, что условия твердения ($T_{y.T}$) определяют степень гидратации цементного камня, которая определяет наиболее важный показатель структуры пор с точки зрения морозостойкости – вид системы капиллярных пор.

Анализ факторов, влияющих на стойкость бетона в условиях морозного воздействия, показывает, что при всем их многообразии с практической точки зрения одним из главных критических показателей долговечности является условия для образования дискретной структуры капиллярных пор. Этот фактор является определяющим независимо от механизма замораживания бетона. Период перехода системы капиллярных пор от сквозной к дискретной предложено оценивать показателем критической зрелости структуры бетона с точки зрения морозостойкости [4, 11]. Однако в условиях длительного обледенения конструкций, т.е. когда преобладает механизм замораживания вида P_{F2} , не менее важно ограничивать содержание воды в бетонной смеси.

Традиционно принято считать, что суровость морозного воздействия в реальных условиях определяет количество циклов ЗО, поэтому долговечность бетонных конструкций пытаются связать с циклами ЗО. При стандартных испытаниях на морозостойкость рассматривается система «материал – среда», в которой «среда» имеет нормированные параметры. Это позволяет за счет варьирования показателей материала оценивать стойкость бетона различных составов при стандартных условиях испытания.

В системе «материал – конструкция – среда», т.е. в реальных условиях «среда» может **принципиально изменить механизмы замораживания и разрушения бетона** [3, 9]. Возможность изменение влажностного состояния бетона в конструкции при длительном обледенении по причине термомассопереноса является принципиальным отличием механизма разрушения при механизме замораживания вида P_{F2} . В этом случае необходимо повышать уровень критической зрелости структуры бетона для снижения объема свободной воды, способной к влагопереносу при температурном градиенте, или ограничивать содержание воды в бетонной смеси.

Опыт строительства морских портовых сооружений показывает, что для агрессивных сред класса XF4 можно получить долговечные бетоны, позволяющие обеспечить безремонтный срок службы конструкциям не менее 100 лет [5, 12]. Для этого необходимо:

- к существующим ограничениям, принятым для проектирования долговечности бетона, принять ограничение по максимальному содержанию воды в бетонной смеси;
- на этапе строительства в обязательном порядке делать оценку соответствия проектных требований по долговечности с использованием показателя, характеризующего структурную зрелость бетона к началу морозного воздействия.

В условиях морозного воздействия можно выделить характерные сценарии кинетики развития процессов в структуре бетона, которые характеризуют долговечность конструкций (см. рис. 3).

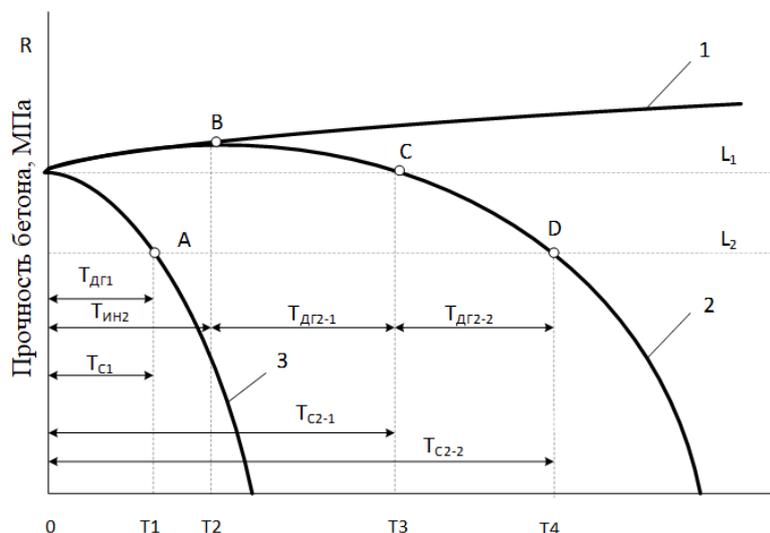


Рис. 3. Сценарии жизненного цикла бетона:

1 – наличие только периода инициации ($T_{ин}$); 2 – наличие периода инициации ($T_{ин}$) и деградации ($T_{дг}$); 3 – наличие только периода деградации ($T_{дг}$)

В концепции долговечности, предложенной автором [16], процесс морозной коррозии представлен как двухстадийный, в котором имеется стадия инициации ($T_{ин}$) и деградации ($T_{дг}$). Несмотря на то, что данная схема является лишь визуализацией периодов жизненного цикла бетона при эксплуатации конструкций, она позволяет определить направление для разработки модели прогноза долговечности. Обоснование продолжительности ЖЦ на этапе эксплуатации, который оценивается сроком службы конструкции, выполняется на этапе проектирования и может назначаться исходя из технических, финансовых, экологических и социальных аспектов.

Жизненный цикл (ЖЦ) бетона без ограничения срока эксплуатации визуально представлен в виде графика 1 на схеме рис. 3. В этом случае ЖЦ бетона не имеет ограничения, поскольку свойства бетона соответствуют условиям эксплуатации, т.е. бетон не имеет стадии деградации ($T_{дг}$). Это является характеристикой долговечного бетона. В литературе есть много высказываний об ограниченном сроке ЖЦ бетона в агрессивных средах класса XF4, т.е. ЖЦ бетона должен состоять из этапов ($T_{ин}$) + ($T_{дг}$), однако результаты проведенных исследований показывают, что это сценарий ЖЦ для не долговечного бетона. В реальных условиях кинетика прочности долговечного бетона должна иметь только возрастающий характер, т.е. не только сохранять прочностные показатели, но и увеличивать их [5]. Наличие у бетона в ЖЦ только стадии ($T_{ин}$) на протяжении 100 лет подтверждают результаты натурных исследований.

Выводы

Исследования морозостойкости бетона в реальных условиях эксплуатации и лабораторные исследования при различных режимах испытаний дают основания считать, что проблемы в разработке инженерных методов проектирования долговечности и ее прогнозирования при морозной коррозии бетона обусловлены отсутствием дифференциации двух периодов принципиально разных по механизму разрушения: инициации ($T_{ин}$) и деградации ($T_{дг}$).

Предлагаемая методика, основанная на концепции двухстадийности коррозии бетона при морозном воздействии, позволяет дифференцированно оценивать каждый период в ЖЦ бетона. Назначение показателей долговечности с учетом реального механизма замораживания бетона на этапе проектирования и реализация их на этапе строительства к началу морозного воздействия позволяет в агрессивных условиях класса XF4 обеспечить безремонтный срок службы конструкций 100 лет.

Библиографический список

- 1 Степанова, В.Ф. Современные проблемы обеспечения долговечности железобетонных конструкций / В.Ф. Степанова, В.Р. Фаликман // Бетон и железобетон – взгляд в будущее: в 7 т. Т. 3. – М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2014. – С. 430–444.
- 2 СП 28.1330.2017 Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85. – М., 1985.
- 3 ГОСТ 31384-2017 Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. – М., 2017.
- 4 Malyuk, V.V. Freezing mechanisms of the concrete in an area of variable water level of port facilities / V.V. Malyuk, V.D. Malyuk // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Science and Technology Conference "Earth Science", ISTC EarthScience 2022 - Chapter 4." 2022. С. 052020.
- 5 Малюк, В.В. Анализ результатов обследования железобетонных конструкций портовых сооружений (о. Сахалин, 1927-2018 гг.) / В.В. Малюк, В.Д. Малюк, С.Н. Леонович // Бетон и железобетон. – 2022. – № 1 (609). – С. 3-9.
- 6 Malyuk, V.V. Operating conditions and damage to the concrete of port facilities on the southern coast of Sakhalin / V.V. Malyuk, V.D. Malyuk, A.V. Lobodyuk // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Science and Technology Conference "Earth Science", ISTC EarthScience 2022 - Chapter 4." 2022. – С. 052035.
- 7 Malyuk, V. Climatic Conditions and Experience of Operation of Port Facilities on Sakhalin Island. Civil Eng Res J. 2020; 10(5): 555797.DOI: 10.19080/CERJ.2020.10.555797.
- 8 Чернышов, Е.М. Морозная деструкция бетонов. Часть 1. Механизм, критериальные условия управления // Строительные материалы. – 2017. – № 9. – С. 40-46.
- 9 Шестоперов, С.В. Долговечность бетона транспортных сооружений / С.В. Шестоперов. – М.: Изд-во Транспорт, 1966.
- 10 Malyuk, V. Degradation and sudden failure of concrete structures of marine hydraulic structures in severe hydrometeorological conditions. Far East Con-2018. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern technologies IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 463 (2018) 022071. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/2/022071>
- 11 Малюк, В.В. Прогнозирование долговечности конструкций морских гидротехнических сооружений из бетона по опыту строительства и эксплуатации в суровых климатических условиях // Проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения: материалы VIII Национальной конференции с международным участием. – Саратов: Изд. центр «Наука», 2018. – С. 223-231.
- 12 Малюк, В.В. Совершенствование методов проектирования и технологии бетонных работ (на примере о. Сахалин) / В.В. Малюк, В.Д. Малюк, С.Н. Леонович // Бетон и железобетон. – 2022. – № 2 (610). – С. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-610-2-30-34>
- 13 СНиП 3.07.02-87 Гидротехнические морские и речные транспортные сооружения: - Введен с 01.07.1987.
- 14 Пособие к СНиП 3.07.02-87 Правила производства и приемки работ на строительстве новых, реконструкции и расширении действующих гидротехнических морских и речных транспортных сооружений: ВСН 34-91. Минтрансстрой. – М., 1991.
- 15 Указания по повышению морозостойкости бетона транспортных сооружений. ВСН 150-93. АО корпорация «Трансстрой». – М., 1993.
- 16 Малюк, В.В. Концепция долговечности бетона для прогноза срока службы конструкций в условиях морозного воздействия. ДВФУ ВИШ. – 2020. – №45.
- 17 Вавренюк, С.В. Результаты исследования причин разрушения бетонного покрытия морского пирса на побережье Японского моря / С.В. Вавренюк [и др.] // Журнал Строительные материалы. – 2019. – №11.

УДК 517.95

DOI: 10.46960/polmech_2023_111

Р.А. Вирц¹, В.Н. Ларионова¹, М.А. Токарева¹

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ЖИДКОСТИ В ПОРОУПРУГОМ ЛЬДУ

¹Алтайский государственный университет, г. Барнаул

Рассматривается математическая модель фильтрации жидкости в пороупругой среде. Данная модель исследована численно в двух случаях: без учёта фазовых переходов и температурного воздействия и с учётом теплового обмена масс между фазами.

Ключевые слова: двухфазная фильтрация, автомодельные переменные, пористость, ледовый покров, фазовый переход, численные методы, закон Дарси.

Модель фильтрации жидкости в тающем пороупругом льду с учётом фазовых переходов описывается следующей системой уравнений [1–3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(1-\phi)\rho_i}{\partial t} + \operatorname{div}((1-\phi)\rho_i\vec{v}_i) &= -I_{iw}, \\ \frac{\partial(\rho_w\phi)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_w\phi\vec{v}_w) &= I_{iw}, \\ \phi(\vec{v}_w - \vec{v}_i) &= -\frac{k(\phi)}{\mu(\theta)}(\nabla p_w - \rho_w\vec{g}), \\ \operatorname{div}\vec{v}_i &= -a_1(\phi)p_e - a_2(\phi)\frac{dp_e}{dt}, \\ \nabla \cdot p_{tot} &= \rho_{tot}\vec{g} + (1-\phi)\eta\left(\frac{\partial\vec{v}_i}{\partial\vec{x}} + \left(\frac{\partial\vec{v}_i}{\partial\vec{x}}\right)^*\right), \\ (\rho_w c_w \phi + \rho_i c_i (1-\phi))\frac{\partial\theta}{\partial\vec{x}} + (\rho_w c_w \phi\vec{v}_w + \rho_i c_i (1-\phi)\vec{v}_i)\nabla \cdot \theta &= \operatorname{div}(\lambda_c \nabla \cdot \theta) + \\ &+ \nu \frac{\partial(1-\phi)\rho_i}{\partial t}, \\ p_{tot} &= \phi p_f + (1-\phi)p_s, p_e = (1-\phi)(p_s - p_f), \\ p_e &= (1-\phi)(p_i - p_w), \rho_{tot} = \phi\rho_w + (1-\phi)\rho_i. \end{aligned}$$

Здесь ϕ – пористость; $\rho_w, \rho_i, \vec{v}_w, \vec{v}_i$ – соответственно истинные плотности и скорости жидкой и ледовой фаз; p_e – эффективное давление, p_{tot} – общее давление, ρ_{tot} – общая плотность; \vec{g} – вектор силы тяжести; $a_1(\phi), a_2(\phi)$ – коэффициенты, характеризующие свойства среды; η – динамическая вязкость твердой фазы; $k(\phi)$ – проницаемость; $\mu(\theta)$ – динамическая вязкость жидкости; θ – температура среды; c_w, c_i – коэффициенты теплоёмкости фаз; λ_w, λ_i – коэффициенты теплопроводности фаз; λ_c – коэффициент теплопроводности среды в целом, ν – удельная теплота плавления льда, I_{wi} – интенсивность перехода массы из воды в лед в единице объема в единицу времени. Система является замкнутой, если $\rho_w = \text{const}$ и $\rho_i = \text{const}$, задача записана в переменных Эйлера.

Пусть $a_1(\phi) = \frac{\phi^m}{\eta}, a_2(\phi) = 0, k(\phi) = k\phi^n, \mu(\theta) = \mu = \text{const}$. Тогда изотермическая задача в автомодельных переменных $\xi = x - ct (\xi > 0)$ сводится к одному уравнению для нахождения функции пористости.

Результат численного исследования для пористости [4] приведён на рис. 1.

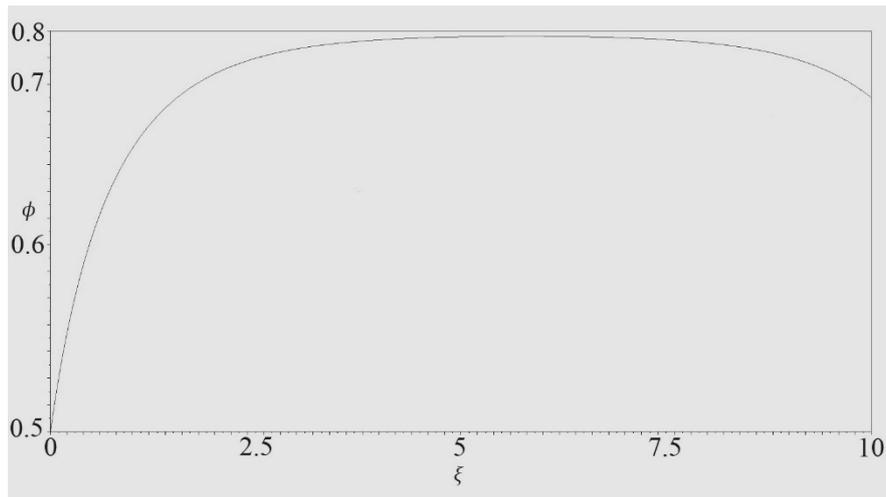


Рис. 1. Пористость среды

Далее рассмотрим неизотермическую фильтрацию с учётом фазовых переходов. Пусть $a_1(\phi) = \alpha\phi$, $a_2(\phi) = g = \beta = \eta = 0$, $\mu(\theta) = \text{const}$, $k(\phi) = k \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2}$, ($[k] = \text{м}^2$). Результаты численного исследования [4–8] приведены на рис. 2 – рис. 7.

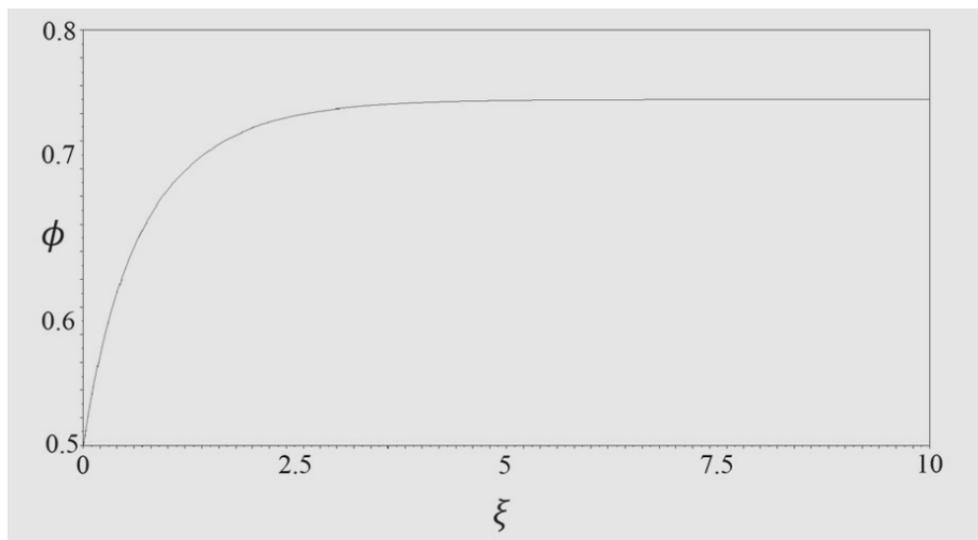


Рис. 2. Пористость среды

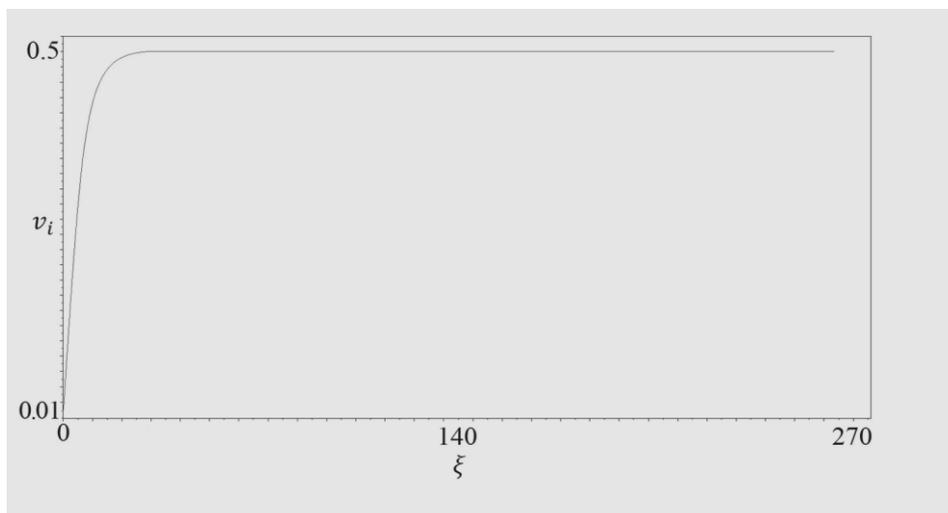


Рис. 3. Скорость льда

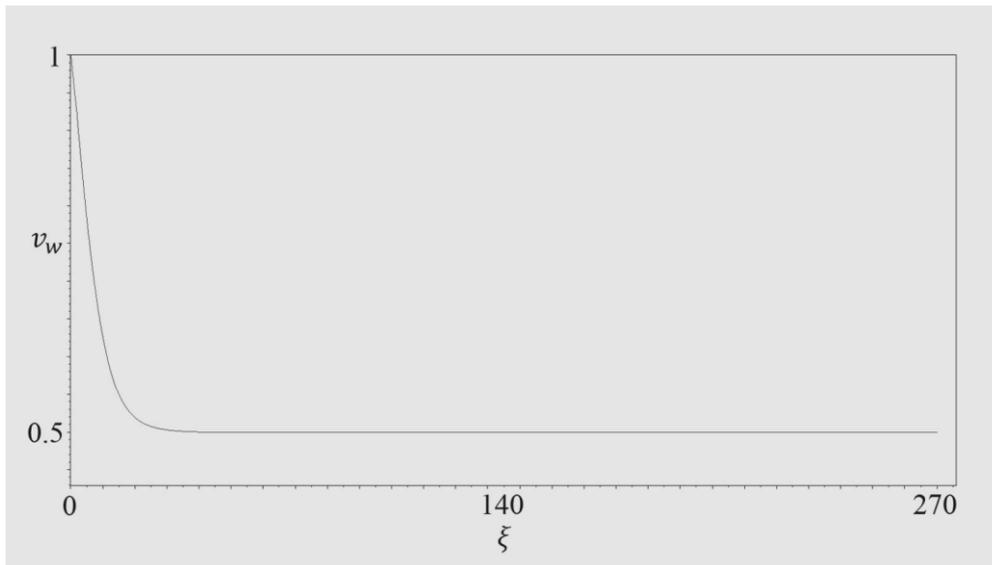


Рис. 4. Скорость воды

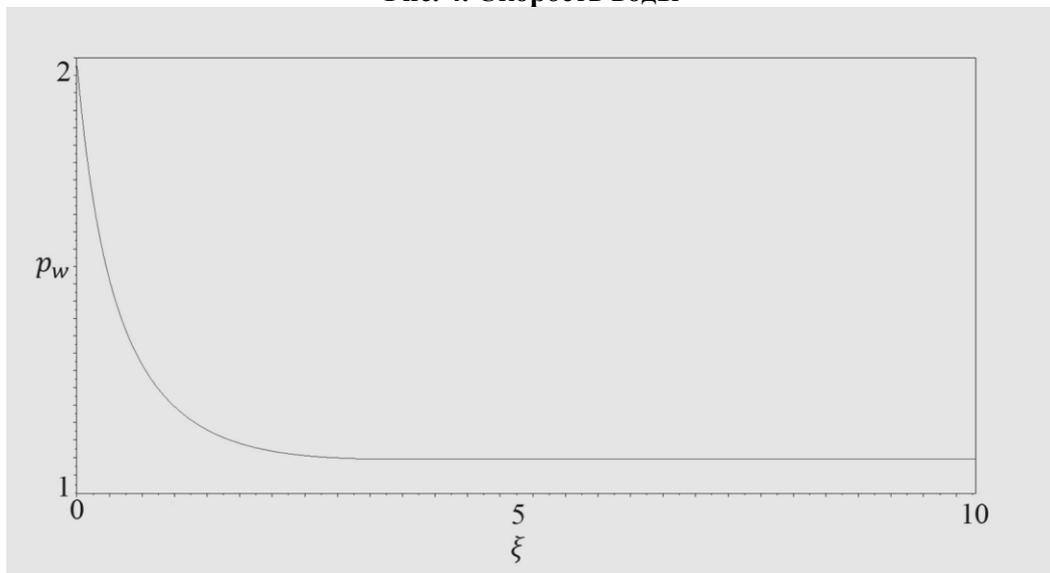


Рис. 5. Давление воды

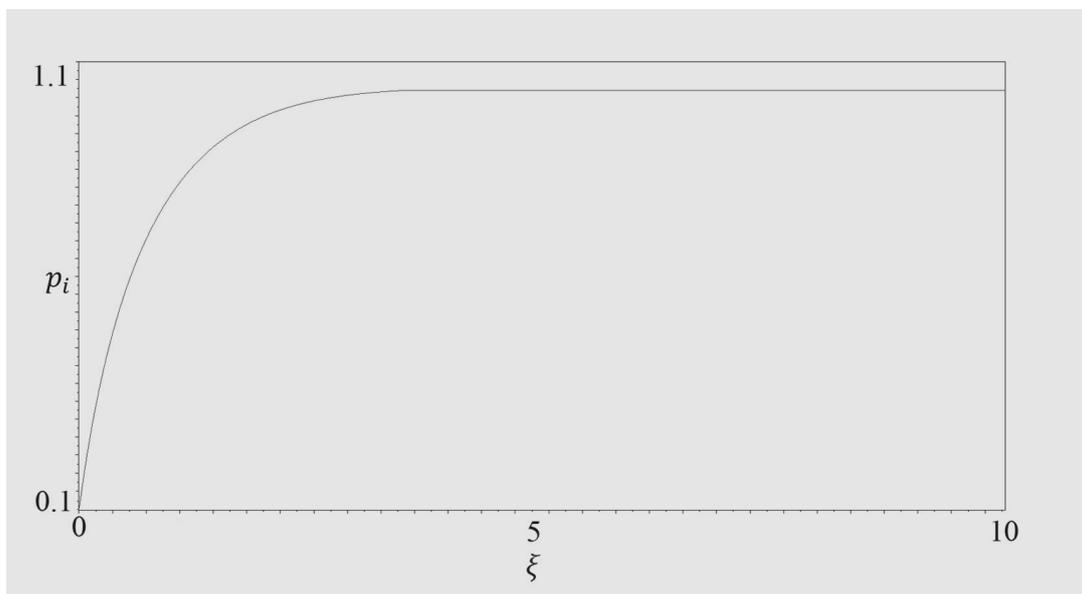


Рис. 6. Давление льда

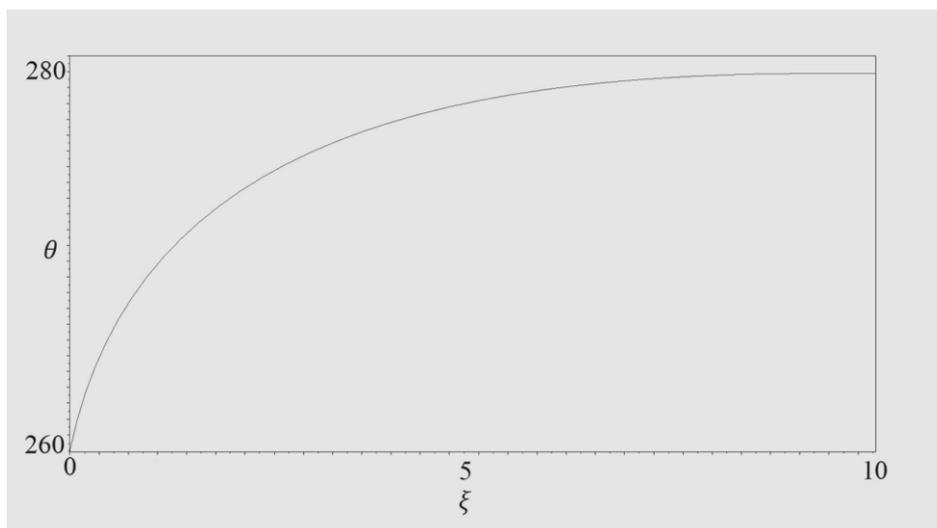


Рис. 7. Температура среды

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по теме «Современные методы гидродинамики для задач природопользования, промышленных систем и полярной механики» (номер темы: FZMW-2020-0008).

Библиографический список

1. Токарева, М.А. Краевые задачи для уравнений фильтрации в пороупругих средах: монография / М.А.Токарева, А.А. Папин. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2020. – 141 с.
2. Sibir, A. N. Heat and Mass Transfer in MeltingSnow / A. N. Sibir, A. A. Papin // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2021. – V. 62. – N 1. – P. 96–104.
3. Tokareva, M.A. Mathematical Model of Fluids Motion in Poroelastic Snow–ice Cover / M.A. Tokareva, A.A. Papin // Journal of Siberian Federal University. Mathematics&Physics. – 2021. – V. 14. – N 1. – P. 47–56.
4. Калиткин, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1978. – 512 с.
5. Morency, C. A numerical model for coupled fluid flow and matrix deformation with applications to disequilibrium compaction and delta stability / C. Morency [et al.] // Journal of Geophysical Research. – 2007.
6. Fowler, A. Mathematical Geoscience. – Springer–Verlag London Limited, 2011.
7. Bagderina, Yu.Yu., Equivalence of third–order ordinary differential equations to Chazy equations I–XIII. Stud. Appl. Math. – 2008. – V. 120. – №3. – P. 293–332.
8. Папин, А.А. Математические модели тающего снежно-ледового покрова и протаивающих грунтов: учеб. пособие / А.А. Папин, А.Н. Сибин, К.А. Шишмарев. – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2016. – 91 с.

УДК 551.461

DOI: 10.46960/polmech_2023_115

М.В. Кокоулина, О.Е. Куркина, А.А. Куркин

**ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ОХОТСКОМ МОРЕ,
ВЛИЯЮЩИХ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНУТРЕННИХ ВОЛН**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород

Среднеклиматические сезонные особенности плотностной стратификации вод Охотского моря проанализированы на основании карт интегрального индекса стратификации для летнего и зимнего сезонов. Зоны с более ярко выраженными вертикальными перепадами плотности морской воды представляют собой благоприятную среду для более интенсивных бароклинных процессов с высокой плотностью потоков бароклинной энергии. Также построены сезонные карты приливной массовой силы плавучести для суточных и полусуточных баротропных приливов.

Большие значения этой величины являются «маркерами» потенциальных очагов генерации внутренних приливных волн соответствующих периодов. Поэтому представленные в работе карты могут служить для предварительных качественных оценок характеристик и полей внутренних волн, в том числе при планировании полномасштабных численных экспериментов. В работе на базе построенных карт обсуждаются особенности географического и сезонного распределения указанных величин.

Ключевые слова: стратификация плотности морской воды, индекс стратификации, приливная массовая сила плавучести, баротропный прилив, Охотское море.

Введение

Охотское море расположено в умеренных широтах, но, несмотря на это, многие его гидрометеорологические характеристики близки к характеристикам полярного океана: суровая зима с низкой температурой воздуха и длительные периоды ледяного покрова.

Известно, что в связи с таянием льдов трансформируется стратификация вод и происходит усиление волновой динамики [Гордеева и др., 2014], что в свою очередь оказывает влияние на хозяйственную деятельность человека. В Охотском море активно ведется добыча природных ископаемых, с чем связано шельфовое строительство, развиты транспортные операции, рыболовство и т. д., все эти процессы зависят и от особенностей гидрологических условий.

В настоящей работе на основе данных гидрологических атласов и моделей показано географическое распределение и сезонное изменение индекса стратификации Охотского моря и массовой приливной силы плавучести, определяющих особенности процесса генерации и дальнейшей динамики поля внутренних гравитационных волн.

Используемые данные

В качестве исходных данных использованы международный гидрологический атлас WOA18, атлас батиметрии GEBCO и приливная модель TPXO8. Цифровой климатологический атлас с открытым исходным кодом World Ocean Atlas 2018 (WOA18) [Boyer et al., 2018] содержит обобщенную и стандартизированную информацию об основных особенностях гидрофизических параметров морской воды и их сезонных изменениях. В настоящей работе использовались данные солености и температуры за летний и зимний периоды из этого источника, на основе которых, с помощью уравнения состояния морской воды TEOS10 (<http://teos-10.org/>) восстановлена потенциальная плотность морской воды и вычислена частота Вьяйся-ля-Брента. GEBCO (<https://www.gebco.net>) – цифровой атлас батиметрии Мирового океана.

Мы использовали последнюю версию GEBCO-2022, которая содержит набор данных батиметрии с разрешением 15 угловых секунд. Данные максимального горизонтального потока воды для компонент баротропного прилива взяты из приливной модели TPXO 8 (A TOPEX/Poseidon Global Tidal Model), основанной на данных спутниковой альтиметрии [Egbert and Erofeeva, 2002].

Все описанные данные были интерполированы на самую грубую сетку, горизонтальное разрешение которой определяется пространственным разрешением входных данных атласа WOA18 (1/4 градуса). Затем они были использованы для построения карт интегральных величин, характеризующих возможные динамические процессы в толще жидкости: индекса стратификации плотности морской воды и приливной массовой силы плавучести для суточной и полусуточной баротропных приливных гармоник.

Индекс стратификации плотности воды в Охотском море

Индекс стратификации – величина, которая позволяет выделить области с более сильной, ярко выраженной стратификацией, либо области более перемешанных, однородных по вертикали вод [Seyfried et al., 2017; Estournel et al., 2016]:

$$I_{S,Z} = \int_Z^0 (\rho_0(Z) - \rho_0(z)) dz, \quad (1)$$

где ρ_0 – потенциальная плотность; Z – опорный уровень; $z = 0$ соответствует поверхности моря. $I_{S,Z}$ выражается в $\text{кг}/\text{м}^2$. $I_{S,Z} = 0$ означает, что водяной столб перемешан по меньшей мере до глубины Z . Вертикальный профиль плотности рассчитывается по обобщенным гидрологическим данным о температуре и солености для многолетних лета и зимы из международного атласа WOA18.

На рис. 1 приведены гистограммы распределения индекса стратификации, рассчитанного при $Z = H$ (H – полная глубина моря в точке) для летнего и зимнего сезонов по данным атласа WOA18. Максимальные значения $I_{S,H}$ для Охотского моря составляют около $1200 \text{ кг}/\text{м}^2$ в зимний период и около $1400 \text{ кг}/\text{м}^2$ в летний, средние значения довольно близки и равны соответственно $460 \text{ кг}/\text{м}^2$ и $510 \text{ кг}/\text{м}^2$. По картам нормированного индекса стратификации (см. рис. 2) визуально лучше видна разница между сезонами, летом нормированный индекс стратификации всюду больше, чем в зимний период (на глубине 100м значения достигают $50 \text{ кг}/\text{м}^2$, зимой около $3 \text{ кг}/\text{м}^2$).

Максимальные значения величина летом принимает в области больших глубин (Курильская котловина) и на шельфе. Зимой же в мелководных районах значения нормированного индекса стратификации очень низкие, что связано с охлаждением верхнего слоя моря и перемешиванием вод.

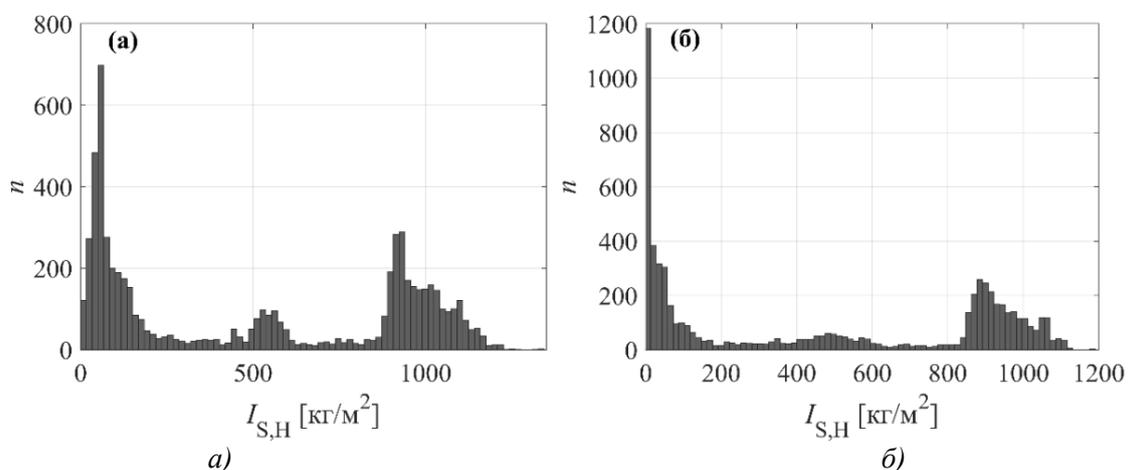


Рис. 1. Гистограмма распределения частот индекса стратификации $I_{S,H}$ (а) летом и (б) зимой

В районах с ярко выраженной плотностной стратификацией происходит увеличение всех кинематических и динамических характеристик волнового поля, поэтому полученные карты можно использовать для предварительных оценок возможных эффектов, включая планирование численных экспериментов.

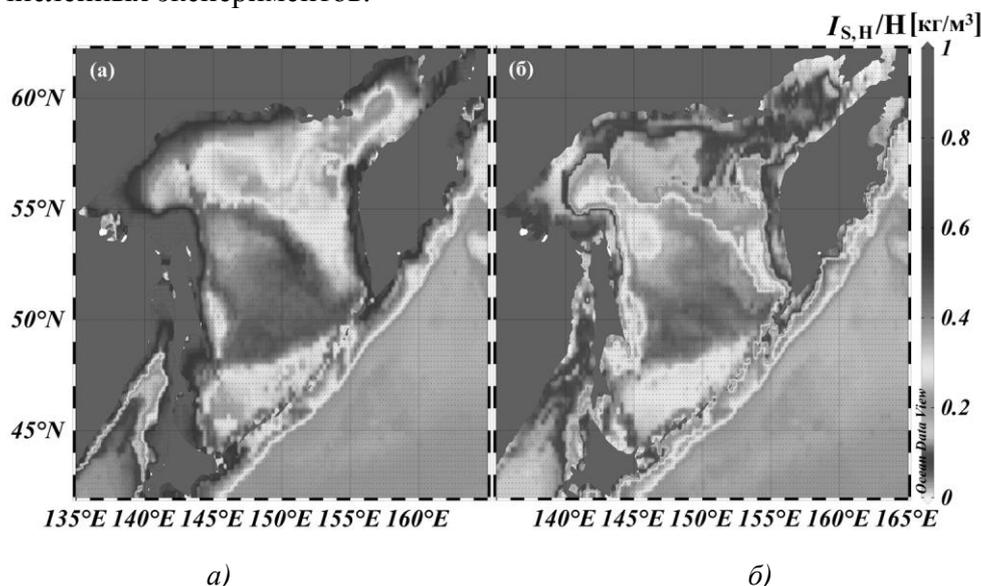


Рис. 2. Нормированный на глубину индекс стратификации $I_{S,H}/H$ (а) летом и (б) зимой. Эти и другие карты в данной работе отображены с использованием программного обеспечения Ocean Data View. (Schlitzer, Reiner, Ocean Data View, <https://odv.awi.de>, 2022)

Массовая сила плавучести баротропного приливного потока

Знание вертикального профиля плотности совместно с информацией о батиметрии и приливных потоках позволяет судить и о наиболее вероятных зонах генерации внутренних волн. Здесь также имеется интегральная (по вертикали) величина, которая может служить критерием для выявления областей интенсивной генерации бароклинных приливных волн баротропными приливными течениями. Формула для расчета баротропной приливной массовой силы плавучести была предложена в работах [Baines, 1973, 1982]:

$$F = -\frac{\bar{Q}\nabla H}{\omega H^2} \int_{-H}^0 zN^2(z)dz, \quad (2)$$

где z указывает положение по вертикали, ось z направлена вверх; \bar{Q} – максимальный горизонтальный поток воды для соответствующей компоненты баротропного прилива; H – локальная глубина моря; ∇H – градиент дна; ω – соответствующая приливная частота; $N(z)$ – частота Вайсяля-Брента. Её профили были рассчитаны с использованием стандартного подхода, основанного на классическом определении:

$$N^2(z) = -\frac{g}{\rho_0(z)} \frac{d\rho_0(z)}{dz}, \quad (3)$$

где g ускорение свободного падения и $\rho_0(z)$ – вертикальный профиль плотности, рассчитываемый по обобщенным гидрологическим данным о температуре и солености для многолетних лета и зимы из международного атласа WOA18.

Подобные расчеты величины приливной массовой силы плавучести, но основанные на других источниках гидрологических данных для компонент прилива K_1 и M_2 в Охотском море, приведены в работе [Свергун и др., 2022], для залива Петра Великого Японского моря – в статье [Новотрясов и др., 2018].

Рассчитанные пространственные распределения величины F (2) в Охотском море характеризуются средними значениями порядка $0.02 \text{ м}^2/\text{с}^2$ для приливной составляющей M_2 , $0.06 \text{ м}^2/\text{с}^2$ для O_1 и $0.07 \text{ м}^2/\text{с}^2$ для K_1 . Однако медиана F для всех рассматриваемых компонент

прилива намного ниже среднего значения, что указывает на сильную положительную асимметрию распределения.

Географическое распределение величины F (рис. 3 – рис. 5) показывает усиленное воздействие бароклинного прилива в районах с резкими изменениями рельефа дна, таких как шельф, подводные каньоны и хребты. На рис. 3, *а*, *б* показано пространственное распределение F (2) для Охотского моря для приливной компоненты K_1 . Максимальные значения распределены у Курильских островов, по периметру Курильской котловины, и севернее острова Сахалин, над котловиной Дерюгина. Для этих районов характерны резкие батиметрические градиенты. Следует отметить, что в районе шельфа (как восточного, так и западного) Камчатского полуострова также обнаружено много дискретных участков, где значения приливной объемной силы высоки. На рис. 3, *б* видно, что зимой в некоторых районах значения приливной объемной силы уменьшаются, например, это характерно для Сахалинского залива, района Пенжинской губы и пролива Лаперуза. С другой стороны, зимой области высоких значений в районе Курильской котловины незначительно расширяются.

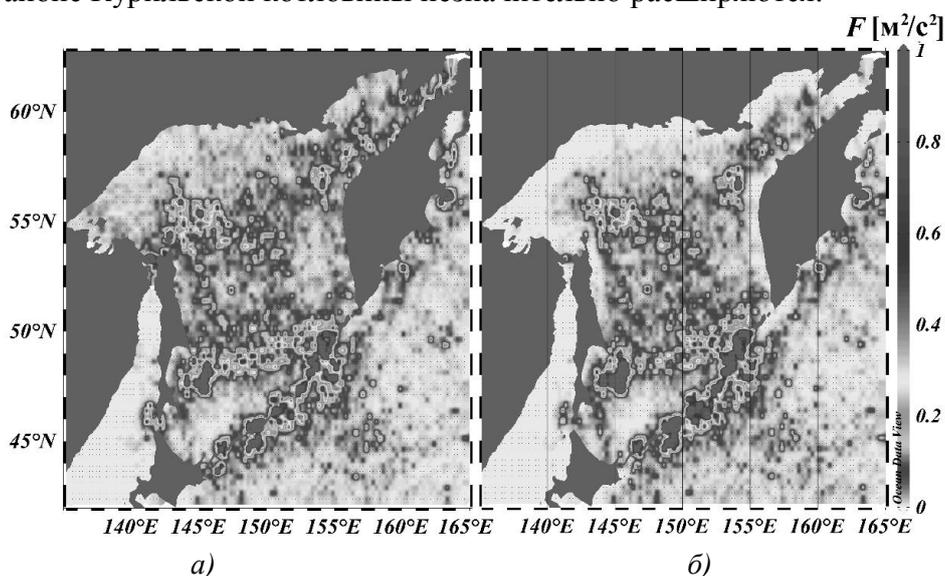


Рис. 3. Приливная массовая сила для суточной (K_1) компоненты прилива (*а*) летом и (*б*) зимой

Аналогичные расчеты для двух сезонов проводились для приливной компоненты O_1 (рис. 4, *а*, *б*). Количественная разница невелика, но все же заметна. Значения объемных сил для прилива O_1 в целом несколько ниже, чем для K_1 .

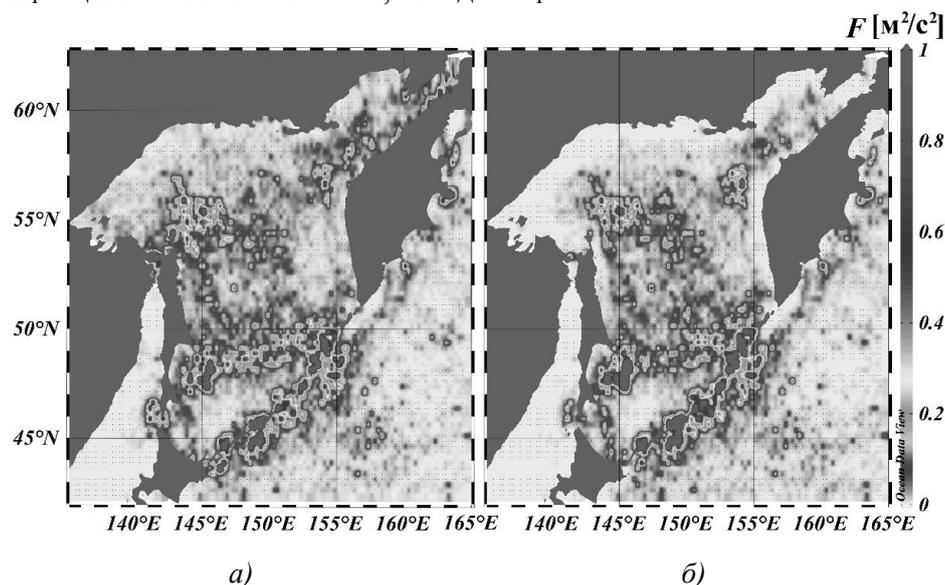


Рис. 4. Приливная массовая сила для суточной (O_1) компоненты прилива (*а*) летом и (*б*) зимой

Для компоненты M_2 пространственное распределение приливной объемной силы для лета и зимы показано на рис. 5, *a*, *б* соответственно. По сравнению с рассмотренными результатами для компонент K_1 и O_1 в районе исследований полусуточная приливная объемная сила значительно меньше, чем для суточных приливов. Максимальные значения F для M_2 также распределены у Курильских островов, по периметру Курильской котловины, а для летнего сезона (рис. 5, *a*) еще можно выделить области больших значений в Сахалинском заливе и Пенжинской губе.

Эти расчеты вполне согласуются с результатами, показанными в работе [Свергун и др., 2022], полученными на базе других источников входных данных.

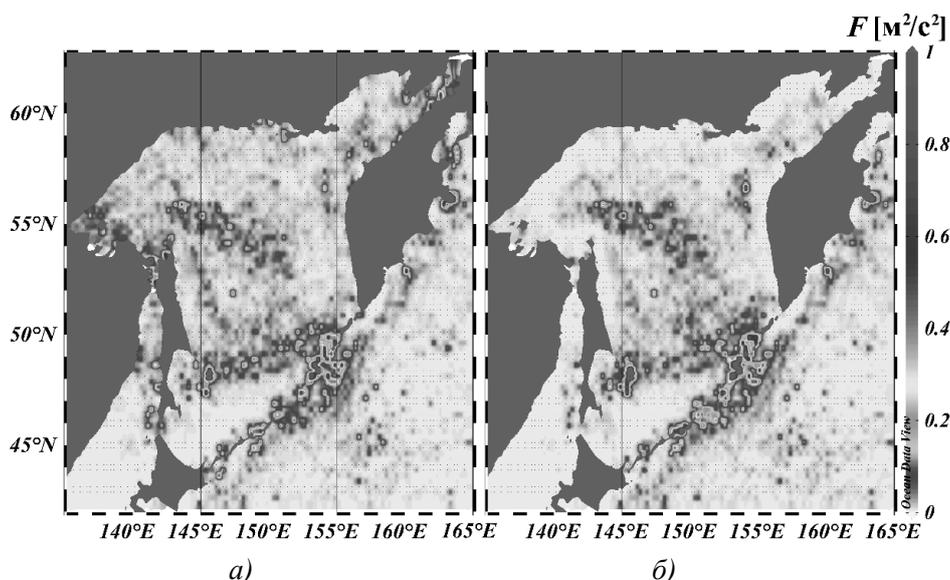


Рис. 5. Приливная массовая сила для полусуточной (M_2) компоненты прилива (*a*) летом и (*б*) зимой

Заключение

На основе данных гидрологического атласа WOA18 построены карты распределения индекса стратификации плотности морской воды для летнего и зимнего сезонов в Охотском море. Максимальные значения данной величины характерны для глубоководных районов, в летний сезон – ещё и для шельфовой зоны.

Также построены карты пространственного распределения приливной массовой силы плавучести для летнего и зимнего сезонов в Охотском море для основных приливных компонент K_1 , O_1 и M_2 .

Показано, что приливная массовая сила колебаний суточного периода значительно превышает силу полусуточных приливов практически повсеместно в области исследований. Характерные значения приливной массовой силы в Охотском море не превышают $2\text{--}8 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$.

Библиографический список

1. Гордеева, С. М. Влияние климатических изменений термохалинной структуры Баренцева моря на интенсивность внутренних приливных волн / С. М. Гордеева, А. С. Сафрай, И. В. Ткаченко // Навигация и гидрография. – 2014. – С. 81.
2. Baines, P. G. The generation of internal tides by flat-bump topography // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. – Elsevier, 1973. – Т. 20. – №. 2. – С. 179-205.
3. Baines, P. G. On internal tide generation models // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. – 1982. – Т. 29. – №. 3. – С. 307-338.
4. Boyer, T. P. World Ocean Atlas 2018. [temperature, salinity] / T. P. Boyer [et al.] // NOAA National Centers for Environmental Information. Dataset. <https://www.ncei.noaa.gov/archive/accession/NCEI-WOA18>. Accessed [08.12.2022].

5. Egbert, G. D. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides / G. D. Egbert, S. Y. Erofeeva // *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*. – 2002. – Т. 19. – №. 2. – С. 183-204.
6. Schlitzer, R. *Ocean data view*. – 2022.
7. Seyfried, L. Dynamics of the North Balearic Front during an autumn tramontane and mistral storm: air–sea coupling processes and stratification budget diagnostic / L. Seyfried, C. Estournel, P. Marsaleix, E. Richard // *Ocean Science*. – 2019. – Т. 15. – №. 1. – С. 179-198.
8. Estournel, C. High resolution modeling of dense water formation in the north- western Mediterranean during winter 2012–2013: Processes and budget / C. Estournel [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2016. – Т. 121. – №. 7. – С. 5367-5392.
9. Новотрясов, В. В. Некоторые особенности внутреннего прилива в заливе Петра Великого (Японское море) / В. В. Новотрясов, Д. В. Степанов, Т. И. Клещёва // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. – 2018. – №. 1 (197). – С. 40-48.
10. Свергун, Е.И. Внутригодовая изменчивость поверхностных проявлений внутренних волн в Баренцевом море и Курило-Камчатском регионе / Е.И. Свергун, А.В. Зимин, Е.В. Софьина // *Моря России: вызовы отечественной науки: тез. докл. Всероссийской научной конференции; Севастополь, 26–30 сентября 2022 г.* / Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2022. – С. 135-136.

Секция 3

ЛЕДОВАЯ МЕХАНИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 629.124.791.2.039

DOI: 10.46960/polmech_2023_121

¹В.М. Козин, ^{2,3} В.Ю. ВерещагинИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ЗАСНЕЖЕННОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА
ОТ ДЕЙСТВИЯ ДВИЖУЩЕЙСЯ НАГРУЗКИ

¹Хабаровский Федеральный исследовательский центр
Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Комсомольск-на-Амуре,
²Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск,
³Новосибирский государственный педагогический университет, г. Новосибирск

Представлена аналитическая модель напряженно-деформированного состояния ледяного покрова с наличием слоя снега, которое возникает под действием движущейся нагрузки. Приведены результаты расчётов, зависимости прогибов и напряжений в ледяном покрове с наличием слоя снега.

Ключевые слова: изгибно-гравитационные волны, ледяной и снежный покровы, движущаяся нагрузка, разрушение, резонансная скорость.

Введение

Разрушение ледяного покрова может осуществляться различными способами и техническими средствами. Одним из перспективных в этом направлении при решении определенных ледотехнических задач является резонансный метод разрушения ледяного покрова, заключающийся в возбуждении во льду резонансных изгибно-гравитационных волн (ИГВ), возбуждаемых движущимися нагрузками, в частности, амфибийными судами на воздушной подушке (СВП) [1].

При проведении ледокольных работ резонансным методом чистый от снега ледяной покров встречается редко, поэтому его реализация в условиях заснеженного ледяного покрова будет основным режимом движения СВП.

Теоретические зависимости

Приведены результаты решения задачи деформирования бесконечной флотирующей ледяной пластины толщиной h и плотностью ρ_1 при движении по ней системы поверхностных давлений q со скоростью u . Предполагается, что вода – идеальная несжимаемая жидкость плотностью ρ_2 , движение жидкости потенциальное.

Ледяной покров моделируется вязкоупругой, изначально ненапряженной изотропной пластиной, покрытой слоем снега толщиной h_c . Расчетная схема представлена на рис. 1.

Уравнение малых колебаний плавающей вязкоупругой ледяной пластины с учетом влияния слоя снега приведено в работе [2]:

$$\frac{G_m h^3}{3} \mathbf{Q} \nabla^4 w = \mathbf{P} \left(-q - \rho_2 g w - (\rho_1 h + \rho_c h_c) \frac{\rho_2 w}{\partial t^2} - \eta_c h_c \frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 w - \rho_2 w - \rho_2 \frac{\partial \varphi}{\partial t} \Big|_{z=0} \right), \quad (1),$$

где

$\mathbf{P} = \tau_m^{-1} + \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) \frac{\partial}{\partial t} + \tau_k \frac{\partial^2}{\partial t^2}; \quad \mathbf{Q} = \frac{\partial}{\partial t} + \tau_k \frac{\partial^2}{\partial t^2}, \rho_c$ – плотность снежного покрова;
 τ_m, τ_k – времена релаксации для моделей Максвелла и Кельвина-Фойгта; G_m и G_k – соответствующие модули упругости при сдвиге.

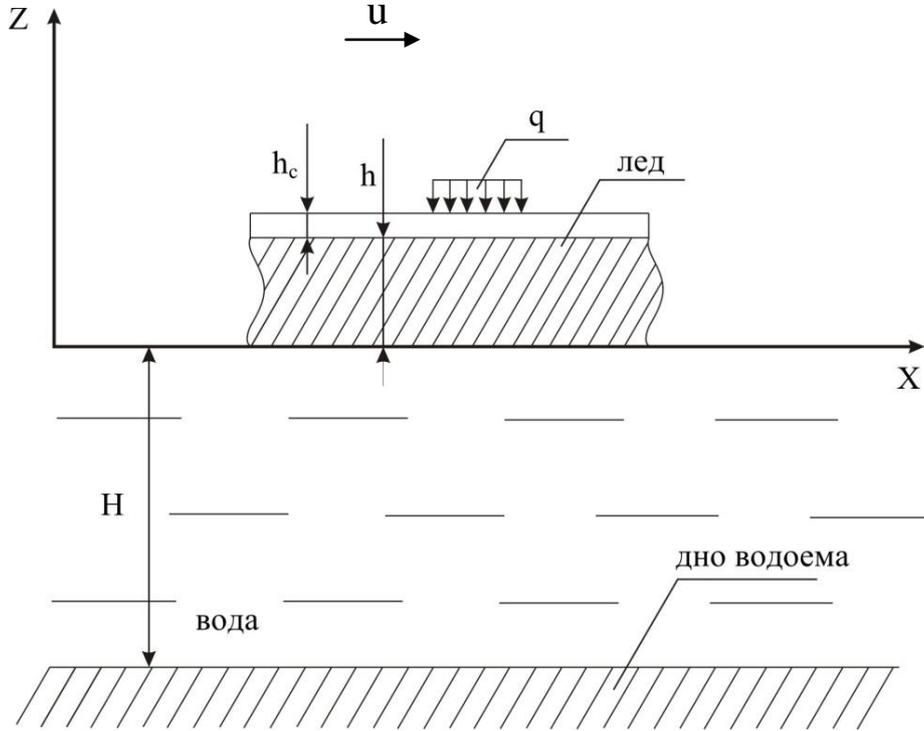


Рис. 1. Расчетная схема

Решение уравнения (1) получено в виде:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(w(x, y)) = & \frac{q_0}{4\rho_2 u^2 \alpha_1 \alpha_2} \int_0^\infty \lambda^2 \tanh(\lambda H) \int_0^\lambda \cos(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} y) \frac{\sin\left(\alpha \frac{L}{2}\right) \sin\left(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \frac{L}{2\omega}\right)}{\sinh\left(\pi \frac{\alpha}{2\alpha_1}\right) \sinh\left(\pi \frac{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}}{2\alpha_2}\right)} \times \\ & \times \frac{\left(\left(\tau_m^{-1} - \tau_k u^2 \alpha^2\right) \cos(\alpha x) + \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) u \alpha \sin(\alpha x)\right) \xi +}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} (\xi^2 + \eta^2)} \\ & + \frac{\left(\left(\tau_m^{-1} - \tau_k u^2 \alpha^2\right) \sin(\alpha x) - \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) u \alpha \cos(\alpha x)\right) \eta}{d\alpha d\lambda}, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \xi = & -\frac{G_m h^3 \alpha^2 \lambda^5 \tau_k \tanh(\lambda H)}{3\rho_2} + \tau_m^{-1} \left(\frac{g \lambda \tanh(\lambda H)}{u^2} - \frac{\alpha^2 \lambda (\rho_1 H + \rho_c h_c) \tanh(\lambda H)}{\rho_2} - \alpha^2 \right) + \\ & + \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m} \right) \frac{\eta_c h_c \alpha^2 \lambda^3 \tanh(\lambda H)}{\rho_2} + \tau_k \alpha^2 \left(-g \lambda \tanh(\lambda H) + \frac{u^2 \alpha^2 \lambda (\rho_1 h + \rho_c h_c) \tanh(\lambda H)}{\rho_2} + u^2 \alpha^2 \right), \end{aligned}$$

$$\eta = -\frac{G_m h^3 \alpha^3 \lambda^5 \tanh(\lambda H)}{3\rho_2 u} + \tau_m^{-1} \frac{\eta_c h_c \alpha \lambda^3 \tanh(\lambda H)}{u \rho_2} + \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) \left(-\frac{\alpha g \lambda \tanh(\lambda H)}{u} + \frac{u \alpha^3 \lambda (\rho_1 h + \rho_c h_c) \tanh(\lambda H)}{\rho_2} + u \alpha^3\right) - \tau_k \frac{u \alpha^3 \eta_c h_c \lambda^3 \tanh(\lambda H)}{\rho_2}.$$

Определение полей изгибных напряжений

Изгибные и касательные напряжения вычислялись по зависимостям:

$$\sigma_{x \max}^0 = \pm \frac{6M_x}{h^2}; \quad \sigma_{y \max}^0 = \pm \frac{6M_y}{h^2}; \quad \tau_{xy \max}^0 = \pm \frac{6M_{xy}}{h^2},$$

где

$$M_x = D \cdot \frac{q_0}{4\rho_2 u^2 \alpha_1 \alpha_2} \int_0^\infty \lambda^2 \tanh(\lambda h) \int_0^\lambda (\alpha^2 + \nu(\lambda^2 - \alpha^2)) \cdot \cos(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot y) \times \\ \times \frac{\sin\left(\alpha \cdot \frac{L}{2}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot \frac{L}{2\omega}\right)}{\sinh\left(\pi \cdot \frac{\alpha}{2a_1}\right) \cdot \sinh\left(\pi \cdot \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot \frac{1}{2\alpha_2}\right)} \times \\ \times \left[\frac{\left(\tau_m^{-1} - \tau_k u^2 \alpha^2\right) \cdot \cos(\alpha x) + \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) \cdot u \cdot \alpha \cdot \sin(\alpha x)}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot (\xi^2 + \eta^2)} \cdot \xi + \right. \\ \left. + \frac{\left(\tau_m^{-1} - \tau_k u^2 \alpha^2\right) \cdot \sin(\alpha x) - \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) \cdot u \cdot \alpha \cdot \cos(\alpha x)}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot (\xi^2 + \eta^2)} \cdot \eta \right] d\alpha d\lambda; \\ \\ M_y = D \cdot \frac{q_0}{4\rho_2 u^2 \alpha_1 \alpha_2} \int_0^\infty \lambda^2 \tanh(\lambda h) \int_0^\lambda (\lambda^2 - \alpha^2 + \nu \cdot \lambda^2) \cdot \cos(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot y) \times \\ \times \frac{\sin\left(\alpha \cdot \frac{L}{2}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot \frac{L}{2\omega}\right)}{\sinh\left(\pi \cdot \frac{\alpha}{2a_1}\right) \cdot \sinh\left(\pi \cdot \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot \frac{1}{2\alpha_2}\right)} \times \\ \times \left[\frac{\left(\tau_m^{-1} - \tau_k u^2 \alpha^2\right) \cdot \cos(\alpha x) + \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) \cdot u \cdot \alpha \cdot \sin(\alpha x)}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot (\xi^2 + \eta^2)} \cdot \xi + \right. \\ \left. + \frac{\left(\tau_m^{-1} - \tau_k u^2 \alpha^2\right) \cdot \sin(\alpha x) - \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) \cdot u \cdot \alpha \cdot \cos(\alpha x)}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot (\xi^2 + \eta^2)} \cdot \eta \right] d\alpha d\lambda;$$

$$M_{xy} = D \cdot (1-\nu) \cdot \frac{q_0}{4\rho_2 u^2 \alpha_1 \alpha_2} \int_0^\infty \lambda^2 \tanh(\lambda h) \int_0^\lambda \alpha \cdot \sin(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot y) \cdot \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \times$$

$$\times \frac{\sin\left(\alpha \cdot \frac{L}{2}\right) \cdot \sin\left(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot \frac{L}{2\omega}\right)}{\sinh\left(\pi \cdot \frac{\alpha}{2a_1}\right) \cdot \sinh\left(\pi \cdot \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot \frac{1}{2a_2}\right)} \times$$

$$\times \left[\frac{-\left(\tau_m^{-1} - \tau_k u^2 \alpha^2\right) \cdot \sin(\alpha x) + \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) \cdot u \cdot \alpha \cdot \cos(\alpha x)}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot (\xi^2 + \eta^2)} \right] \cdot \xi +$$

$$+ \left[\frac{\left(\tau_m^{-1} - \tau_k u^2 \alpha^2\right) \cdot \cos(\alpha x) + \left(1 + \frac{G_m}{G_k} + \frac{\tau_k}{\tau_m}\right) \cdot u \cdot \alpha \cdot \sin(\alpha x)}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} \cdot (\xi^2 + \eta^2)} \right] \cdot \eta \Bigg] d\alpha d\lambda.$$

Моменты, действующие в сечениях, нормальных к осям x и y , и приходящиеся на единицу длины сечения:

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(w + \tau_f \frac{\partial w}{\partial t} \right) + \nu \cdot \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(w + \tau_f \frac{\partial w}{\partial t} \right) \right),$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} \left(w + \tau_f \frac{\partial w}{\partial t} \right) + \nu \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(w + \tau_f \frac{\partial w}{\partial t} \right) \right),$$

$$M_{xy} = D(1-\nu) \cdot \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left(w + \tau_f \frac{\partial w}{\partial t} \right),$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость; $\tau_f = \eta/E$ – время релаксации деформаций.

Результаты расчетов напряжений по перечисленным зависимостям были проведены для СВП «Мурена» с наличием снежного покрова $h_c=0,5$ м и следующих исходных данных: $q = 3330$ Па; $2a = 30$ м; $2b = 13$ м; $u = 5,6$ м/с; $\rho_B=900$ кг/м³; $\rho_L=1000$ кг/м³; $\tau_f = 10$ с; $\mu = 1/3$; $E = 5$ ГПа; $h = 0,5$ м; $H = 5$ м представлены на рис. 2.

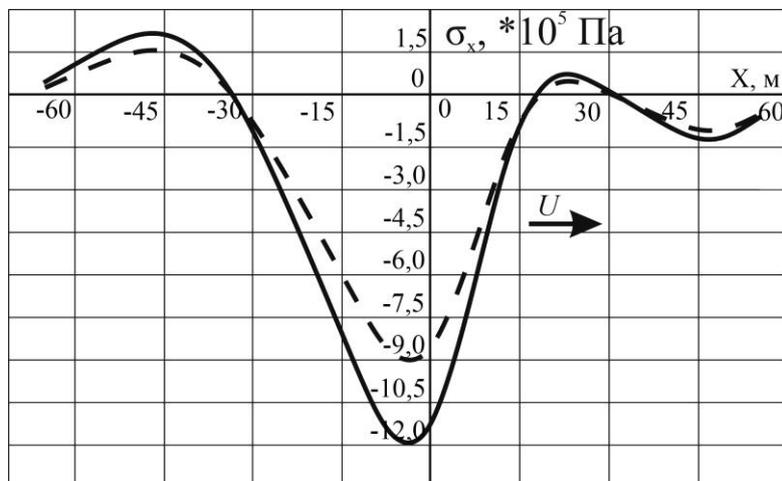


Рис. 2. График напряжений σ_x в ледяном при $H=5$ м и $u = 5,6$ м/с:
— без снежного покрова, --- $h_c=0,5$ м

Результаты расчетов НДС льда и экспериментов прогибов ледяного покрова с наличием снежного покрова приведены на рис. 3.

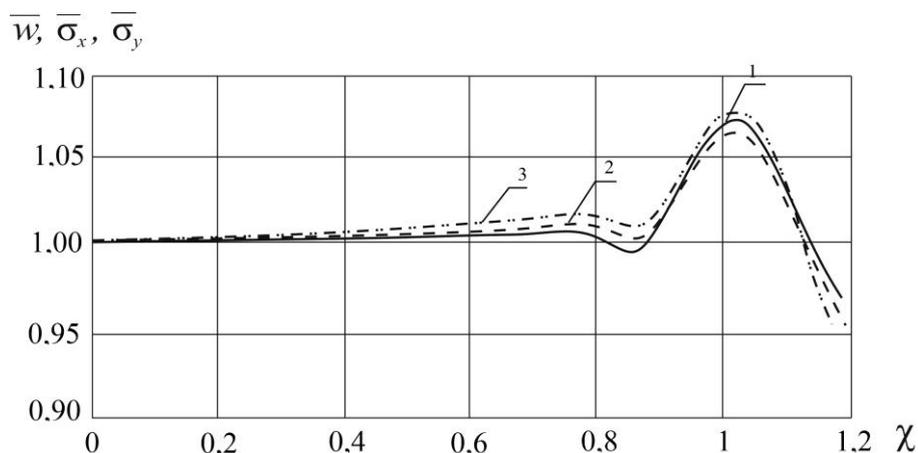


Рис. 3. Кривые относительных прогибов и напряжений в ледяном покрове в зависимости от скорости нагрузки $\chi = u/\sqrt{gH}$:

1 – w относительный прогиб (теоретические); 2 – $\overline{\sigma}_x$ относительные продольные напряжения; 3 – $\overline{\sigma}_y$ относительные поперечные напряжения, где $\overline{w} = w/w_{sp}$, $\overline{\sigma}_x = \sigma_x/\sigma_{xsp}$, $\overline{\sigma}_y = \sigma_y/\sigma_{ysp}$, w, σ_x, σ_y – прогиб и напряжения в статике; $w_{sp}, \sigma_{xsp}, \sigma_{ysp}$ – прогиб и напряжения с учетом снежного покрова

Из графиков видно, что наличие вязкого слоя (снежного покрова), как и следовало ожидать, приводит к уменьшению уровня напряжений (см. рис. 2).

В результате выполненных исследований можно сделать вывод, что наличие снежного покрова приводит к более быстрому затуханию и уменьшению амплитуд ИГВ, возбуждаемых движущимся судном, что снижает величину изгибных напряжений во льду.

Библиографический список

1. Козин, В.М. Резонансный метод разрушения ледяного покрова. Изобретения и эксперименты / В.М. Козин. – М.: Академия естествознания 2007 – 355 с.
2. Экспериментально-теоретические исследования зависимости параметров, распространяющихся в плавающей пластине изгибно-гравитационных волн от условий их возбуждения / В.М. Козин [и др.]. – Новосибирск, Сибирское отделение РАН, 2016. – 222 с.

М. Ю. Филимонов^{1,2}, Н. А. Ваганова^{1,2}

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ НА КУСТОВЫХ ПЛОЩАДКАХ СЕВЕРНЫХ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

¹Уральский Федеральный Университет,

²Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН, г. Екатеринбург

Для снижения капитальных затрат по обустройству нефтегазовых месторождений в районах распространения вечной мерзлоты разработаны математические модели и алгоритмы по моделированию тепловых нестационарных трехмерных полей в грунте от добывающих и нагнетательных скважин, учитывающие географические и климатические особенности конкретного нефтегазового месторождения.

Проведенные численные расчеты показали, что, используя предложенные алгоритмы и различные варианты эксплуатации скважин, можно существенно сократить расстояние между соседними скважинами.

Ключевые слова: вечная мерзлота, нефтегазовые месторождения, добывающие и нагнетательные скважины, моделирование.

Исследование долгосрочных изменений в вечной мерзлоте от различных климатических и техногенных факторов является актуальной задачей, связанной с освоением Арктики. Вечная мерзлота занимает около 25% Северного полушария, в России криолитозона занимает площадь 10 млн км², что соответствует более 60% всей территории с запасом подземных льдов около 19000 км³ [1, 2]. На этих территориях добывается более 90% российского природного газа и почти 75% нефти. В России большинство жилых и инженерных сооружений в зоне распространения многолетнемерзлых пород построено и эксплуатируется по принципу сохранения мерзлого состояния грунтов оснований. Мониторинг устойчивости за такими объектами основан на проведении температурных измерений в грунте оснований и анализе динамики их изменений [3, 4]. Долгосрочное прогнозирование таких изменений и влияние их на несущие свойства грунтов оснований под зданиями является актуальной задачей [5].

Климатические изменения и техногенные факторы могут приводить к оттаиванию мерзлого грунта [6], последствием которого будут просадки земной поверхности, приводящие к серьезным техногенным и экологическим авариям, последствиями которых могут быть разрушения различных опор, скважин, жилых зданий и инженерных сооружений. В настоящее время наблюдается также сокращение инвестиционных программ в освоение новых северных нефтегазовых месторождений. В связи с этим, актуальным является снижение затрат на проектирование и оптимальную эксплуатацию новых и функционирующих нефтегазовых месторождений. Например, сокращение площади кустовых площадок на осваиваемых северных нефтегазовых месторождениях позволяет существенно сократить затраты, причем уже на этапе проектирования.

Эксплуатация северных нефтегазовых месторождений предполагает определенные плановые технологические операции, связанные, например, с остановками скважин для профилактики [7], использованием вертикальных, или горизонтальных факельных систем [8, 9] для утилизации попутного газа, сезонно-действующих охлаждающих устройств [10] для термостабилизации грунта и т. п.

Актуальным является оптимизация регламента эксплуатации определенных технических систем, оказывающих влияние на нагрев грунта для минимизации таких последствий. Для факельных систем это может быть время включения факельных систем, продолжительность и периодичность их работы.

Цель данного исследования состоит в разработке как новых трехмерных нестационарных математических моделей теплопереноса от добывающих и нагнетательных скважин в мерзлом грунте со сложной литологией, ориентированных на конкретные нефтегазовые месторождения, так и в разработке высокоточных численных алгоритмов для проведения долгосрочных прогнозов по изменениям границ вечной мерзлоты при эксплуатации новых конструкций добывающих скважин и оценке устойчивости инженерной инфраструктуры за Полярным кругом.

Для безопасного и оптимального извлечения углеводородов в этих условиях требуется оценить последствия изменения в вечной мерзлоте, вызванного техногенным вмешательством. Поэтому комплексное моделирование влияния от всех технических систем и инженерных объектов на кустовой площадке нефтегазового месторождения на вечную мерзлоту является актуальной задачей.

В отличие от используемых ранее настроек привязки алгоритма к конкретному географическому месту в работе используется новый метод привязки. Если раньше для этого использовались только замеры температур в разведочных скважинах по глубине и ежегодное циклическое повторение рассчитываемой температуры в разведочной скважине, то в данной работе учитывается и температура на глубине 10 м. Целесообразность такого учета новых параметров часто связана с возможной погрешностью замера температуры в термической разведочной скважине (либо отсутствия таких замеров). Данная настройка моделей и алгоритмов к конкретному географическому месту в сочетании с ранее предложенным подходом [11, 12] позволяет опосредованно учесть и толщину снежного покрова, и имеющуюся на поверхности растительность, и число солнечных дней, и меняющееся альbedo поверхности, осадки и т.п.

Новизна поставленной задачи, связанной с моделированием изменений в вечной мерзлоте в Арктике от различных технических систем на кустовых площадках, заключена в том, что наряду со стандартным набором исходных данных, определяемых климатическими и техногенными факторами, задаются дополнительные условия, часто не используемые другими исследователями. Например, солнечное излучение, приводящее к нелинейным краевым условиям на дневной поверхности и заданный вариант эксплуатации добывающих и нагнетательных скважин с учетом их ежегодных двухнедельных профилактик в течение года. Разработанные методики и алгоритмы были использованы при обустройстве 15 северных нефтегазовых месторождений, а сравнение расчетных данных с экспериментальными показало их хорошее совпадение с точностью около 5%.

По мнению авторов такое совпадение во многом связано с адаптацией программы к конкретному географическому месту по разработанному оригинальному итерационному алгоритму и учете особенностей конструкций используемых скважин. Приведенные результаты численных расчетов иллюстрируют возможность сокращения расстояния между добывающими скважинами в некоторых случаях почти в два раза по сравнению с расчетами, которые учитывают упрощенные конструкции скважин и не учитывают возможные варианты их эксплуатации, связанные с остановкой для профилактических работ [13].

Библиографический список

1. Obu, J. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000-2016 at 1 km² scale / J. Obu, S. Westermann [et al.]. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.023 // Earth-Science Reviews. – 2019. Vol. 193. – P. 136–155.
2. Vaganova, N. Simulation of freezing and thawing of soil in Arctic regions / N. Vaganova, M. Filimonov. – DOI: 10.1088/1755-1315/72/1/012005 // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.– 2017. Vol. 72. – P. 012005.
3. Kamnev, Y. K. Automated Monitoring The Temperature Under Buildings With Pile Foundations In Salekhard: (Preliminary Results) / Y. K. Kamnev, M. Yu. Filimonov, A. N. Shein, N. A. Vaganova. – DOI: 10.24057/2071-9388-2021-021 // Geography, Environment, Sustainability. – 2021. Vol. 14, no.4. – P. 75 – 82.

4. Шейн, А. Н. Развитие автоматизированной системы температурного мониторинга мёрзлых грунтов в основании капитальных объектов в г. Салехард / А. Н. Шейн, М. Ю. Филимонов, Н. А. Ваганова, Я. К. Камнев. – DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-1-328-333 // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 2, no. 1. – С. 328–333.
5. Filimonov, M. Y. Modeling the Temperature Field in Frozen Soil under Buildings in the City of Salekhard Taking into Account Temperature Monitoring / M. Y. Filimonov, Y. K. Kamnev, A. N. Shein, N. A. Vaganova. – DOI: 10.3390/land11071102 // Land. – 2022. – Vol. 11, no. 7. – Art. no. 1102.
6. Filimonov, M. Yu. Simulation of Technogenic and Climatic Influences in Permafrost / M. Yu. Filimonov, N. A. Vaganova. – DOI: 10.1007/978-3-319-20239-6_18 // Lecture Notes in Computer Science. – 2015. Vol. 9045. – P. 185–192.
7. Vaganova, N. A. Computer simulation of nonstationary thermal fields in design and operation of northern oil and gas fields / N. A. Vaganova, M. Y. Filimonov. – DOI: 10.1063/1.4936694 // AIP Conference Proceedings: 41, Sozopol, 08–13 June 2015. – Sozopol, 2015. – Vol. 1690. – P. 020016.
8. Filimonov, M. Y. Flare Systems Exploitation and Impact on Permafrost / M. Y. Filimonov, N. A. Vaganova. – DOI 10.1088/1742-6596/899/9/092004 // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 899, no 9. – P. 092004.
9. Filimonov, M. Y. Simulation of Influence of Special Regimes of Horizontal Flare Systems on Permafrost / M. Y. Filimonov, N. A. Vaganova. – DOI: 10.1007/978-3-030-11539-5_25 // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – Vol. 11386. – P. 233–240.
10. Vaganova, N. A. Simulation of Cooling Devices and Effect for Thermal Stabilization of Soil in a Cryolithozone with Anthropogenic Impact / N. A. Vaganova, M. Y. Filimonov. – DOI: 10.1007/978-3-030-11539-5_68 // Lecture Notes in Computer Science. – 2019. – Vol. 11386. – P. 580–587.
11. Vaganova, N. Different shapes of constructions and their effects on permafrost / N. Vaganova, M. Y. Filimonov. – DOI: 10.1063/1.4968440 // AIP Conference Proceedings: 42, Sozopol, 08–13 June 2016. – Sozopol, 2016. – P. 020019.
12. Vaganova, N. A. On boundary conditions setting for numerical simulation of thermal fields propagation in permafrost soils / N. A. Vaganova, M. Y. Filimonov // CEUR Workshop Proceedings: IT and MathAZ 2018 - Proceedings of the International Research Workshop on Information Technologies and Mathematical Modeling for Efficient Development of Arctic Zone, Yekaterinburg, 19–21 April 2018. – 2018. – P. 18–24.
13. Filimonov, M. Yu. Thawing of Permafrost During the Operation of Wells of North-Mukerkamyl Oil and Gas Field / M. Yu. Filimonov, N. A. Vaganova. – DOI: 10.17516/1997-1397-2021-14-6-795-804 // Journal of Siberian Federal University. Mathematics and Physics. – 2021. – Vol. 14, no 6. – P. 795–2804.

УДК 532.59:539.3

DOI: 10.46960/polmech_2023_129

И.В. Стурова, Л.А. Ткачева

ПОВЕДЕНИЕ ПЛАВАЮЩЕГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРИ ДВИЖЕНИИ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ И НАЛИЧИИ СДВИГОВОГО ТЕЧЕНИЯ В ЖИДКОСТИ

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

Построено решение задачи о поведении ледяного покрова при равномерном движении области давления и наличии подледного течения с постоянным сдвигом скорости. Течение жидкости не потенциально. Ледяной покров моделируется бесконечной плавающей упругой пластиной постоянной толщины с учетом равномерного сжатия. Используется преобразование Фурье в рамках линейной теории волн.

Изучено влияние сдвига скорости на критические скорости движения нагрузки. Исследованы прогиб ледяного покрова, его деформации и волновые силы, действующие на движущуюся нагрузку, в зависимости от градиента скорости течения, направления движения и коэффициента сжатия ледяного покрова.

Ключевые слова: плавающий ледяной покров, равномерное сжатие, изгибно-гравитационные волны, движущаяся нагрузка, сдвиговое течение.

В настоящее время задача о поведении ледяного покрова при движении области внешнего давления достаточно хорошо изучена как для стационарного, так и нестационарного случая. Движущаяся нагрузка может быть обычным автомобилем, судном на воздушной подушке или самолетом при взлете или посадке. Прямолинейное движение подробно исследовано в [1-6]. Ледяной покров обычно моделировался изначально ненапряженной, однородной и изотропной тонкой упругой пластиной. Однако ледяной покров может испытывать сжатие или растяжение благодаря действию ветра, течений или температурных деформаций [2, 7]. Как правило, процессы генерации, развития и распространения изгибно-гравитационных волн рассматриваются для жидкости, которая изначально покоится или движется с постоянной скоростью. В реальных морских условиях возможно изменение скорости и направления основного потока жидкости по глубине.

В настоящее время влияние течения со сдвигом скорости на генерацию изгибно-гравитационных волн изучено недостаточно. Имеется несколько работ на эту тему [8,9], в которых рассмотрена двумерная задача для линейного профиля скорости течения. В этом случае возмущения в жидкости носят потенциальный характер. Достаточно хорошо изучено воздействие сдвигового течения на поверхностные волны [10, 11]. В трехмерном случае возмущения не потенциальны и носят вихревой характер.

Постановка задачи. Рассматривается бесконечный ледяной покров, плавающий на поверхности жидкости, который моделируется тонкой упругой пластиной постоянной толщины. Жидкость идеальная несжимаемая, конечной глубины H , с вертикальным сдвигом скорости. Введем декартову систему координат $Oxyz$, связанную с пластиной, с центром O на верхней границе жидкости, осью Ox , направленной противоположно основному течению и осью Oz , направленной вертикально вверх. Вектор скорости жидкости можно представить в виде $\mathbf{v}(x, y, z, t) = (U(z) + u, v, w)$, $U(z) = \gamma z$, где γ – константа. Основное течение жидкости $U(z)$ не потенциально, имеет постоянную завихренность, u, v, w – возмущенные компоненты скорости, малые по сравнению с основным течением. Предполагается, что заданное внешнее давление p_0 равномерно распределено по прямоугольной области шириной $2b$ и длиной $2a$. Область давления движется с постоянной скоростью V под углом ψ к оси Ox . Давление внешней нагрузки равно $p_0 = gM/(4ab)$, где M – масса движущегося тела; g – ускорение свободного падения. Данная нагрузка моделирует движение судна на воздушной подушке.

Скорость движения жидкости удовлетворяет уравнениям Эйлера и неразрывности:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla\right) \mathbf{v} = -\nabla P - g\mathbf{i}_z, \quad \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad P = -\rho gz + p. \quad (1)$$

Здесь P – гидродинамическое давление, которое складывается из гидростатической части и возмущенного гидродинамического давления p , ρ — плотность жидкости; \mathbf{i}_z – единичный орт оси Oz . Прогиб ледяного покрова $\eta(x, y, t)$ описывается уравнением изгиба тонких упругих пластин Кирхгофа-Лява:

$$(D\Delta^2 + Q\Delta + \rho_0 h d^2/dt^2 + \rho g)\eta = p(x, y, 0, t) - p_0(x, y, t), \quad (2)$$

$$D = Eh^3/(12(1 - \nu^2)), \quad \Delta \equiv \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2,$$

где D – цилиндрическая жесткость пластины; E – Модуль Юнга; ρ_0, h – плотность и толщина льда; ν – коэффициент Пуассона; Q – коэффициент сжатия ледяного покрова.

Ставятся граничные условия: условие непротекания на дне

$$w(x, y, -H, t) = 0, \quad (3)$$

а на верхней границе кинематическое условие

$$w(x, y, 0, t) = d\eta/dt \quad (4)$$

и динамическое условие (2). Условие излучения ставится в следующем виде: перед нагрузкой могут распространяться только те волны, групповая скорость которых больше скорости нагрузки.

Решение задачи. Введем безразмерные переменные, параметры и функции по формулам:

$$(x', y', z', H', b') = (x, y, z, H, b)/a, \quad t' = t\sqrt{g/a}, \quad (u', v', w') = (u, v, w)/\sqrt{ga},$$

$$\eta' = \eta/a, \quad p' = p/\rho ga, \quad p'_0 = p_0/\rho ga, \quad F = V/\sqrt{ga}, \quad S = \gamma\sqrt{a/g},$$

$$\beta = D/\rho ga^4, \quad q = Q/\rho ga^2, \quad \chi = \rho_0 \square/\rho a.$$

Штрихи далее опускаются. Поскольку мы ищем стационарное решение в системе координат, движущейся вместе с нагрузкой, то в исходной системе координат, связанной с ледяной пластиной, возмущенные скорости движения жидкости имеют вид

$$(u, v, w) = (u(\mathbf{r}_1, z), v(\mathbf{r}_1, z), w(\mathbf{r}_1, z)), \quad \mathbf{r}_1 = \mathbf{r} - \mathbf{F}t, \quad \mathbf{r} = (x, y), \quad \mathbf{F} = F(\cos \psi, \sin \psi).$$

В предположении малости возмущенных скоростей по сравнению с основным течением уравнения (1) линеаризуются. Применяем преобразование Фурье по переменным x, y . Неизвестные функции u, v, w, η, p ищем в виде

$$(u, v, w) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\hat{u}, \hat{v}, \hat{w})(\mathbf{k}, z) e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_1} dk_x dk_y, \quad \mathbf{k} = (k_x, k_y),$$

$$\eta(\mathbf{r}_1) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{\eta}(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_1} dk_x dk_y,$$

$$p(\mathbf{r}_1, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{p}(\mathbf{k}, z) e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_1} dk_x dk_y,$$

$$p_0(\mathbf{r}_1) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{p}_0(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_1} dk_x dk_y.$$

Из системы уравнений (1) получаем

$$i(k_x U - \mathbf{k} \cdot \mathbf{F})\hat{u} + S\hat{w} = -ik_x \hat{p},$$

$$i(k_x U - \mathbf{k} \cdot \mathbf{F})\hat{v} = -ik_y \hat{p},$$

$$i(k_x U - \mathbf{k} \cdot \mathbf{F})\hat{w} = -\hat{p}_z,$$

$$ik_x \hat{u} + ik_y \hat{v} + \hat{w}_z = 0.$$

После преобразований находим

$$\frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial z^2} - k^2 \hat{w} = 0, \quad k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}.$$

Решение этого уравнения с условием (3) на дне записывается в виде

$$\hat{w}(\mathbf{k}, z) = kA(\mathbf{k}) \operatorname{sh} k(z + H).$$

Из условия (4) следует

$$-i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{F})\hat{\eta} = kA(\mathbf{k}) \operatorname{sh} kH.$$

Тогда уравнение движения пластины (2) записывается в виде

$$[\beta k^4 - qk^2 + 1 - \chi(\mathbf{k} \cdot \mathbf{F})^2 - k_x S(\mathbf{k} \cdot \mathbf{F})/k^2 - (\mathbf{k} \cdot \mathbf{F})^2 \operatorname{cth} kH/k]\hat{\eta} = -\hat{p}_0.$$

С помощью обратного преобразования Фурье находим

$$\eta(\mathbf{r}_1) = -\frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hat{p}_0(\mathbf{k}) e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}_1} k \operatorname{th} kH dk_x dk_y}{f(\mathbf{k})}, \quad (5)$$

$$f(\mathbf{k}) = [(\beta k^4 - qk^2 + 1 - \chi(\mathbf{k} \cdot \mathbf{F})^2)k - S k_x(\mathbf{k} \cdot \mathbf{F})/k] \operatorname{th} kH - (\mathbf{k} \cdot \mathbf{F})^2.$$

Для того чтобы картина волн была стационарна, компонента скорости источника, нормальная к гребню волны, должна быть равна фазовой скорости гребня [1]. В размерных переменных получаем $(\mathbf{k} \cdot \mathbf{V})/k = \omega/k$. Поэтому функция в знаменателе формулы (5) представляет собой дисперсионное соотношение для изгибно-гравитационных волн, вызванных движением нагрузки, при наличии течения со сдвигом скорости, где ω заменено на $(\mathbf{k} \cdot \mathbf{F})$. Теперь удобно перейти в систему координат Ox_1y_1z , движущуюся вместе с нагрузкой, повернутую относительно исходной системы координат на угол ψ , с осью Ox_1 , направленной вдоль линии движения, осью Oy_1 – перпендикулярной к ней. В этой системе координат получаем

$$\hat{p}_0(\mathbf{k}) = 4p_0 \frac{\sin(k \cos \sigma) \sin(kb \sin \sigma)}{k^2 \cos \sigma \sin \sigma}, \quad \mathbf{k} = k(\cos \sigma, \sin \sigma),$$

$$\eta(x_1, y_1) = -\frac{p_0}{4\pi^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} \frac{f_1(k, \sigma)}{f_2(k, \sigma)} e^{ik(x_1 \cos \sigma + y_1 \sin \sigma)} dk d\sigma, \quad (6)$$

$$f_1(k, \sigma) = \frac{\sin(k \cos \sigma) \sin(kb \sin \sigma) t \square kH}{k \sin \sigma \cos \sigma},$$

$$f_2(k, \sigma) = [\beta k^4 - qk^2 + 1 - \chi k^2 F^2 \cos^2 \sigma - SF \cos \sigma \cos(\sigma + \psi)] t \square kH - kF^2 \cos^2 \sigma.$$

Известно, что в отсутствие сдвигового течения существует критическое значение скорости, равное минимальной фазовой скорости изгибно-гравитационных волн. При скорости движения нагрузки меньшей критической волны в ледяном покрове не образуются, деформации льда носят локальный характер вблизи области нагрузки. При наличии течения со сдвигом скорости также существует критическая скорость и находится аналогично работе [7]. Преобразуем уравнение $f(k, \sigma) = 0$ к виду:

$$\begin{aligned} &2(\beta k^4 - qk^2 + 1) t \square kH - F^2 k(1 + \chi k t \square kH)(1 + \cos 2\sigma) - SF t \square kH \cos \psi (1 + \cos \sigma) + \\ &+ SF t \square kH \sin \psi \sin 2\sigma = G(k, \psi) - \cos 2\sigma [F^2(1 + \chi k t \square kH) + SF t \square kH \cos \psi + \\ &+ SF t \square kH \sin \psi \sin 2\sigma] = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

$$G(k, \psi) = 2(\beta k^4 - qk^2 + 1) t \square kH - F^2 k(1 + \chi k t \square kH) - SF t \square kH \cos \psi.$$

Обозначим

$$\phi = \arcsin(\Lambda(k, \psi)/B(k, \psi)), \quad \Lambda(k, \psi) = SF t \square kH \sin \psi,$$

$$B(k, \psi) = \sqrt{\Lambda^2 + (F^2 k(1 + \chi k t \square kH) + SF t \square kH \cos \psi)^2}.$$

Тогда (7) можно записать в виде

$$G(k, \psi) - B(k, \psi) \cos(2\sigma + \phi) = 0,$$

$$\cos(2\sigma + \phi) = \frac{G(k, \psi)}{B(k, \psi)}. \quad (8)$$

Для существования решения необходимо, чтобы модуль выражения в правой части (8) был меньше единицы. Возводим в квадрат, преобразуем и в результате получаем: критическое значение числа Фруда F_* определяется как минимум функции $\Phi(k)$:

$$\Phi(k) = 2d(k) \frac{\sqrt{S^2 t^2 kH + 4d(k)d_1(k)t^2 kH - S t^2 kH \cos \psi}}{S^2 t^2 kH \sin^2 \psi + 4d(k)d_1(k)},$$

$$d(k) = \beta k^4 - qk^2 + 1, \quad d_1(k) = k(1 + \chi k t^2 kH),$$

$$F_* = \Phi(k_*), \quad \Phi'(k_*) = 0,$$

где штрих обозначает производную по k .

При $F > F_*$ функция $f(k, \sigma)$ имеет нули $k_1 = k_1(\sigma)$ и $k_2 = k_2(\sigma)$, $k_1 < k_2$, в некоторых областях значений угла σ . Поэтому при этих значениях угла σ интеграл по k в выражении (6) является интегралом в смысле главного значения. Контур интегрирования деформируется таким образом, чтобы выполнить условие излучения. Известно, что групповая скорость изгибно-гравитационных волн больше их фазовой скорости для коротких волн и меньше для длинных волн. Короткие волны соответствуют упругой ветви дисперсионной кривой, а длинные волны – гравитационной ветви. Поэтому при $\cos \sigma > 0$ корень k_1 обходится сверху, а корень k_2 – снизу, при $\cos \sigma < 0$ – наоборот. Картины гребней изгибно-гравитационных волн в дальнем поле строятся с помощью асимптотических методов аналогично тому, как в случае отсутствия течения [1].

Волновые силы. Волновое сопротивление F_1 и боковая сила F_2 , действующие на движущееся тело, а также их безразмерные коэффициенты A_1, A_2 определяются формулами:

$$(F_1, F_2) = \iint_{-a-b}^{ab} p_0(x_1, y_1) \left(\frac{\partial \eta}{\partial x_1}, \frac{\partial \eta}{\partial y_1} \right) dx_1 dy_1, \quad (A_1, A_2) = \frac{g\rho}{2bp_0^2} (-F_1, F_2).$$

Деформации ледяного покрова. Согласно линейной теории упругости деформации, пластины изменяются по толщине по линейному закону. Компоненты тензора максимальных деформаций имеют вид:

$$e_{ij} = -h/2 \partial^2 \eta / \partial x_i \partial x_j.$$

Главные значения деформаций определяются как собственные значения матрицы, составленной из компонентов тензора. В линейной теории упругости напряжения и деформации связаны линейной зависимостью. Необходимо, чтобы деформации и напряжения не превышали предельных значений, при которых начинаются пластические деформации и разрушение. Экспериментально полученные в [12] критические значения максимальных деформаций для льда составляют $4,4 \cdot 10^{-5} \div 8,5 \cdot 10^{-5}$. В работе [13] использовалось критическое значение максимальных деформаций $e_* = 8 \cdot 10^{-5}$. В данной работе также используется это значение.

Численные результаты. Численные расчеты проводились для ледяного покрова и воды при следующих входных параметрах: $E=5 \cdot 10^9$ Н/м², $h=1$ м, $\nu=0.3$, $\rho=1025$ кг/м³, $\rho_0=922.5$ кг/м³, $H=100$ м, $a=20$ м, $b=10$ м, $p_0=1000$ Н/м². Сила сжатия в ледяном покрове задавалась в виде $Q = \Omega \sqrt{\rho g D}$, $\Omega=0$ и 1.5 . На рис. 1 показаны зависимости критической скорости движения нагрузки от угла ψ для $\Omega=0$ (a) и $\Omega=1.5$ (b) и различных параметров $S=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$. Видно, что минимальные критические скорости достигаются при $\psi = 0$, когда нагрузка движется противоположно течению жидкости. Максимальные критические скорости наблюдаются при $\psi = \pi$, когда нагрузка движется по течению. При $\psi = \pi/2$ критическая скорость при любых значениях параметра S близка к ее значению в отсутствие течения. При увеличении коэффициента сжатия льда критические скорости значительно уменьшаются.

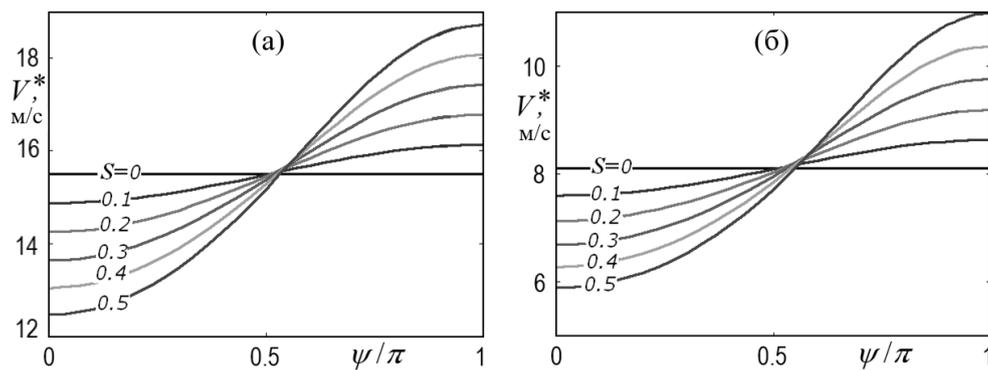


Рис. 1. Зависимости критических скоростей движения нагрузки от угла ψ при различных значениях параметра S и $\Omega=0$ (а), $\Omega=1.5$ (б)

На рис. 2 приведены трехмерные изображения прогиба ледяного покрова при $\Omega=0$, $V=15$ м/с, $\psi = 0$ (а) и $\psi = 2\pi/3$ (б). В случае $\psi = 0$ скорость $V=15$ м/с является сверхкритической, перед нагрузкой и за нагрузкой распространяются волны (рис. 2, а). При $\psi = 2\pi/3$ эта скорость является докритической, волн нет, прогиб ледяного покрова локализован вблизи области нагрузки (рис. 2, б).

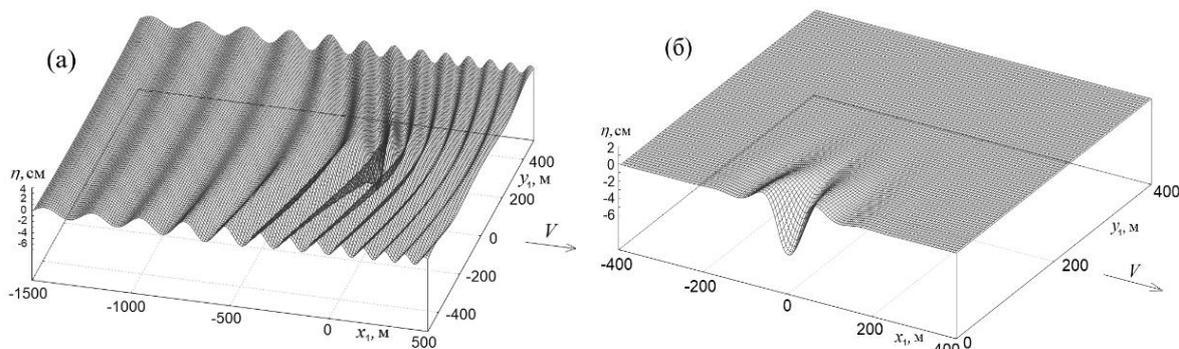


Рис. 2. Прогиб ледяного покрова при $\Omega=0$, $V=15$ м/с, $S=0.4$, $\psi = 0$ (а) и $\psi = 2\pi/3$ (б)

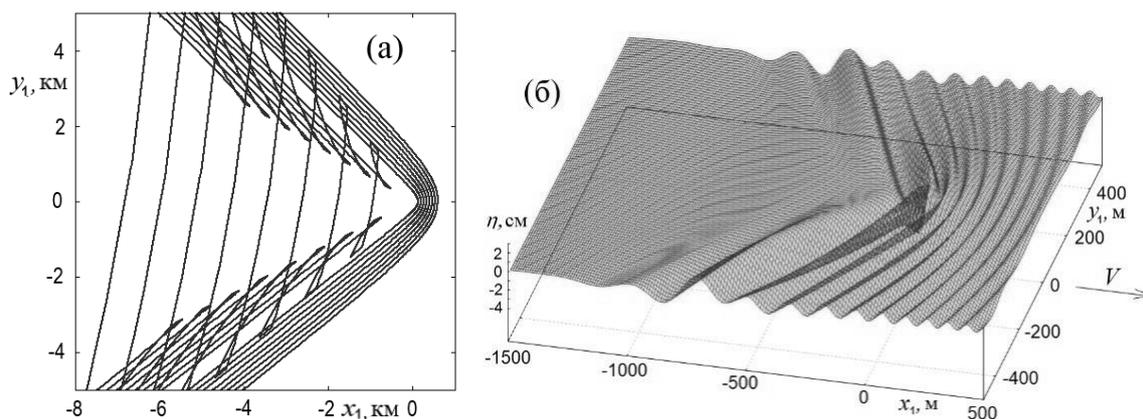


Рис. 3. Картина гребней изгибно-гравитационных волн в дальнем поле (а) и вертикальные смещения ледяного покрова в ближнем поле (б) при $\Omega=0$, $V=20$ м/с, $\psi = \pi/6$, $S=0.4$

На рис. 3 представлены картина гребней изгибно-гравитационных волн в дальнем поле (а) и прогиб ледяного покрова в ближнем поле (б) при $\Omega=0$, $V=20$ м/с, $\psi = \pi/6$, $S=0.4$.

Из рисунков видно, что сдвиг скорости, направление движения и коэффициент сжатия льда оказывают существенное влияние на критические скорости изгибно-гравитационных волн и прогиб ледяного покрова.

Библиографический список

1. Davys, J.W. Waves due to a steadily moving source on a floating ice plate / J.W. Davys, R.I. Hosking, A.D. Sneyd // *J. Fluid Mech.* – 1985. – V. 158. – P. 269-287.
2. Schulkes, R.M.S.M. Waves due to a steadily moving source on a floating ice plate. Pt 2 / R.M.S.M. Schulkes, R.J. Hosking, A.D. Sneyd // *J. Fluid Mech.* 1–987. – V. 180. – P. 297-318.
3. Milinazzo, F. A mathematical analysis of the steady response of floating ice to the uniform motion of a rectangle load / F. Milinazzo, M. Shinbrot, N.W. Evans // *J. Fluid Mech.* – 1995. – V. 287. – P. 173-197.
4. Squire, V.A. Moving Loads on Ice Plates / V.A. Squire [et al.] // Dordrecht: Kluwer, 1996.
5. Nugroho, W.S. Time-dependent response of a floating flexible plate to an impulsively started steadily moving load / W.S. Nugroho [et al.] // *J. Fluid Mech.* – 1999. – V. 381. – P. 337-355.
6. Погорелова, А.В. Исследование напряженно-деформируемого состояния ледяного покрова при взлете и посадке на него самолета / А.В. Погорелова, В.М. Козин, А.А. Матюшина // *ПМТФ.* – 2015. – Т. 56. – № 5. – С. 214-221.
7. Букатов, А.Е. Волны в море с плавающим ледяным покровом. ФГБУН МГИ / А.Е. Букатов. – Севастополь, 2017. – 360 с.
8. Букатов, А.Е. Влияние продольно сжатой упругой пластинки на развитие волнового возмущения потока однородной жидкости с вертикальным сдвигом скорости / А.Е. Букатов, В.И. Мордашев // *ПМТФ.* – 1981. – № 1. – С. 122-129.
9. Das, S. Flexural-gravity wave motion in the presence of shear current: Wave blocking and negative energy waves / S. Das [et al.] // *Phys. Fluids.* – 2018. – V. 30. 106606.
10. Ellingsen, S.Å. Ship waves in the presence of uniform vorticity // *J. Fluid Mech.* – 2014. – V. 742, R2.
11. Li Y., Ellingsen S. Å. Ship waves on uniform shear current at finite depth: wave resistance and critical velocity // *J. Fluid Mech.* – 2016. – V. 791. – P. 539-567.
12. Squire, V., Martin S. A field study of the physical properties, response to swell, and subsequent fracture of a single ice floe in the winter Bering sea: Technical report 18, University of Washington. 1980.
13. Shishmarev, K. The response of ice cover to a load moving along a frozen channel / K. Shishmarev, T. Khabakhpasheva, A. Korobkin // *Appl. Ocean Res.* 2016. V. 59. P. 313–326.

УДК 519.63

DOI: 10.46960/polmech_2023_135

Е.К. Гусева, В.И. Голубев, М.В. Муратов, И.Б. Петров

**СОЗДАНИЕ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ПРЯМЫХ ЗАДАЧ
СЕЙСМОРАЗВЕДКИ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ**Московский физико-технический институт (государственный университет),
г. Долгопрудный

В последние годы Арктический регион, где добываются значительные запасы нефти и газа, привлекает к себе всё большее внимание исследователей. Одним из наиболее распространённых способов получения информации о структуре грунта и возможных залежах полезных ископаемых является сейсморазведка. Однако использование данного метода в Северном регионе значительно усложняется наличием пластов многолетней мерзлоты, содержащих разнообразные ледовые включения. Данная работа направлена на создание моделей, отражающих данную специфику.

Были рассмотрены два подхода: с явным выделением контактных границ и построением криволинейных сеток, и с прямоугольной сеткой и хранением различных параметров в соответствующих ячейках. Сравнение методов производилось на двумерных постановках для прямой задачи сейсморазведки, включающих пласт вечной мерзлоты, ледовый слой, ледовые резервуары. Был рассмотрен случай шельфовой сейсморазведки после добавления в модели слоёв воды и морского дна.

Для описания используемых сред использовалась определяющая система уравнений линейной теории упругости, которая решалась сеточным-характеристическим методом на структурированных сетках.

В качестве источника сигнала выступал точечный импульс Рикера с частотой 30 Гц, помещённый на поверхность мёрзлого грунта, на водную поверхность и на морское дно. Был проведён анализ синтетических волновых картин и сейсмограмм.

Ключевые слова: Арктический регион, вечная мерзлота, прямая задача сейсморазведки, сеточно-характеристический метод.

Введение

Богатый полезными ископаемыми Арктический регион активно изучается и осваивается [1]. Однако исследования в данном регионе сопряжены с серьёзными трудностями, обусловленными специфичными для данного региона низкими температурами. Главной особенностью является наличие слоёв вечной мерзлоты – грунта, температура которого не поднималась выше 0°C на протяжении значительного промежутка времени (от 2-3 лет до тысячелетий) [2]. Данный слой представляет собой смесь льда и грунтовых пород с замершими грунтовыми водами, ледовыми и газовыми включениями. В связи с этим становится затруднительно проводить сейсмическое исследование, так как неоднородность и анизотропия механических свойств пород, а также наличие криволинейных границ негативно влияют на качество сейсмограмм. В шельфовой зоне дополнительные проблемы возникают из-за наличия кратных волн, курсирующих в тонких слоях воды и морского дна.

Настоящая работа направлена на разработку моделей, отражающих вышеописанные характеристики геологической среды Арктического региона.

Было произведено сравнение двух подходов к построению моделей на основе набора поверхностей слоёв. *Первый* заключался в создании нескольких криволинейных сеток с явным выделением контактных границ. *Второй* – в использовании одной прямоугольной сетки с хранением различных параметров среды в каждой ячейке, соответствующей определённому слою. В работе было произведено сравнение пространственных волновых полей и сейсмо-

грамм. Все расчёты выполнялись на персональном компьютере IntelCore i7 с использованием программного комплекса RECT. Его развитие ведётся на кафедре информатики и вычислительной математики Московского физико-технического института.

Описание моделей

В качестве определяющей системы уравнений для моделирования геологических сред в работе используется система уравнений линейной теории упругости [3]. Скорости продольных c_p и поперечных c_s волн совместно с плотностью среды ρ формируют набор параметров, характеризующих динамические свойства сред. Для расчёта в акустическом приближении скорость поперечной волны задавалась много меньше скорости продольной волны. Для численного решения данной системы уравнений гиперболического типа использовался сеточно-характеристический метод [4], который после расщепления по координатным направлениям в случае прямоугольных сеток и по произвольным направлениям в случае криволинейных сеток и перехода к инвариантам Римана, сводит задачу к системе одномерных линейных независимых уравнений переноса.

В настоящем исследовании для решения каждого уравнения переноса была использована схема 3 порядка аппроксимации Русанова [5], которая монотонизировалась с помощью сеточно-характеристического критерия монотонности [6].

Набор моделей, соответствующий первому изложенному подходу, изображён на рис. 1. Данный набор включал в себя модель, состоящую из слоя вечной мерзлоты над более плотным слоем грунта без включений, модель со слоем льда и модель с ледовыми включениями. Глубины залегания слоев соответствуют характерным значениям залегания для Западной Сибири и побережья Арктики. В рамках данного подхода области разбивались на отдельные криволинейные структурированные сетки с вертикальными прямолинейными границами и криволинейными горизонтальными границами согласно цветам на рис. 1.

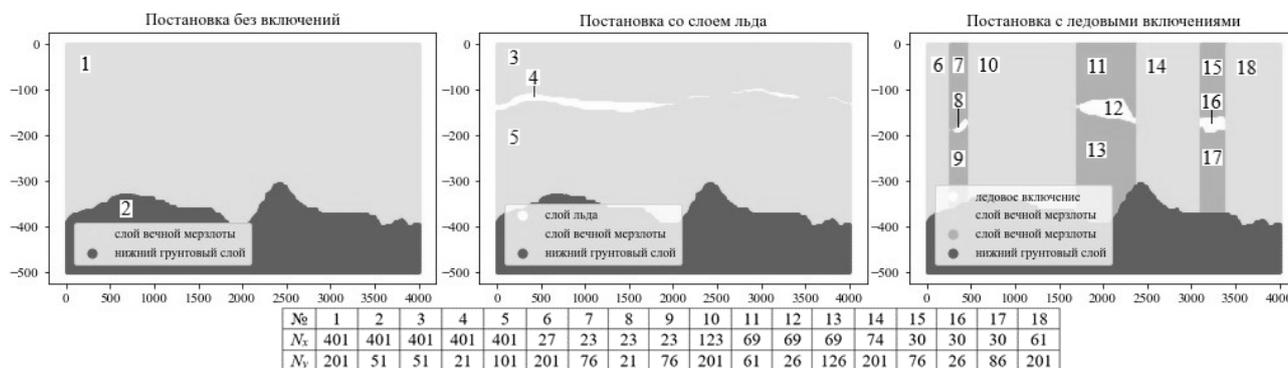


Рис. 1. Расчётные области и параметры расчётных сеток для первого подхода

Всего было создано 18 сеток, число ячеек в них вдоль осей указаны на рис. 1 (снизу). Пространственный шаг вдоль горизонтальной оси задавался постоянным для всех сеток и равнялся 10 м. Вдоль вертикальной оси до глубины 50 м шаг равнялся 2 м, затем менялся в зависимости от заданного числа ячеек. В слоях вечной мерзлоты задавались упругие параметры, характерные для мерзлого глинистого грунта: $c_p = 1961$ м/с, $c_s = 1048$ м/с, $\rho = 1750$ кг/м³. Нижнему более твердому грунтовому слою соответствовали параметры: $c_p = 2800$ м/с, $c_s = 1800$ м/с, $\rho = 2000$ кг/м³. Параметры льда: $c_p = 3578$ м/с, $c_s = 1929$ м/с, $\rho = 917$ кг/м³, где скорости вычислены по формуле Берденникова для температуры льда -4°C и с коэффициентом Пуассона $\nu = 0.295$. Для адаптации моделей на задачу морской сейсморазведки в акватории Арктики к областям на рис. 1 на поверхность слоя вечной мерзлоты были добавлены восьмиметровый слой воды ($c_p = 1500$ м/с, $c_s = 1$ м/с, $\rho = 1000$ кг/м³) и десятиметровый слой морского дна ($c_p = 1806$ м/с, $c_s = 316$ м/с, $\rho = 2000$ кг/м³). В данных слоях были созданы равномерные сетки с числами ячеек вдоль вертикальной оси, равными 21.

Между всеми слоями ставилось контактное условие полного слипания, на верхней границе использовалось условие свободной границы. На левой, правой и нижней границе области применялось условие поглощения.

Для второго подхода была создана равномерная более подробная сетка: $N_x = 801$, $N_y = 501$, для наземной сейсморазведки, $N_x = 801$, $N_y = 519$, для морской. В каждой ячейке упругие параметры задавались по известным поверхностям слоёв. В отличие от первого подхода, контактные условия слипания не применялись.

Во всех расчётах шаг по времени задавался постоянным $\tau = 0.0001$ с. Время расчета равнялось 1 с, кроме случая наземной сейсморазведки для первого метода, где оно было увеличено до 2 с. В качестве источника сигнала задавался точечный импульс Рикера с частотой 30 Гц. Он был погружен на одну ячейку в центре дневной поверхности в случае наземной сейсморазведки и в центре поверхностей воды и морского дна в случае морской сейсморазведки. Приёмники сигнала в количестве 200 штук, расположенные в 10 м друг от друга, помещались в центр области на поверхность вечной мерзлоты в случае наземной сейсморазведки и на поверхность воды, и на морское дно в другом случае.

Результаты расчётов

Волновые картины, полученные в результате расчётов, представлены на рис. 2 для наземной сейсморазведки и на рис. 3 – для шельфовой. Отмечается, что для постановки без особенностей на рис. 2, отражённой в обоих методах моделирования, присутствует симметричный изначальный волновой фронт, состоящий из двух поперечных, продольной и поверхностных волн (рис. 2 слева). Также присутствует отражённая волна от нижнего более плотного слоя (рис. 2 справа). Наличие слоя льда деформирует волновой фронт, добавляя переотражения.

В случае присутствия ледовых включений появляются кратные волны, дополнительно зашумляющие волновые картины, в том числе, отражение от нижнего грунта. В свою очередь, при переходе к случаю морской сейсморазведки, согласно рис. 3, в исходном волновом фронте появляются дополнительные осцилляции, вызванные отражениями в тонких поверхностных слоях при его формировании (рис. 3, слева). При этом на более поздних этапах можно наблюдать курсирование кратных и поверхностных волн в этих слоях (рис. 3 справа). Также можно заметить, что помещение источника в слой воды приводит к исчезновению части волн и увеличению амплитуды поверхностных волн. Однако основные свойства постановок в зависимости от присутствующих включений, которые можно увидеть на рис. 2, также отражаются на рис. 3.

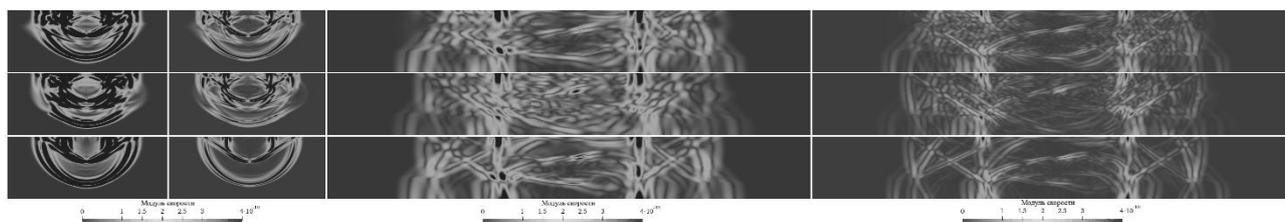


Рис. 2. Волновые картины в результате наземной сейсморазведки. Левые два столбца – момент времени 0.2 с, центральная часть области, 1200 м, правые – 0.6 с, вся область. Первый метод – 1 и 3 столбцы, второй – 2, 4. Верхний ряд – постановка со слоем льда, средний – с ледовыми включениями, нижний – без особенностей

В качестве основных отличий результатов, рассчитанных для разных методов, можно отметить более гладкий и расплывчатый волновой фронт в результатах расчётов по первому методу по сравнению со вторым, а также значительную разницу в амплитуде.

В расчётах использовалась одинаковая амплитуда изначального импульса. Несмотря на это, на рис. 2 волновые картины в расчётах по первому методу имеют большую амплитуду, а на рис. 3 меньшую, а в расчётах по второму методу амплитуда остаётся почти одинаковой. Можно предположить, что данные особенности связаны с непостоянством пространственного шага в криволинейных сетках и необходимостью использовать более подробную сетку.

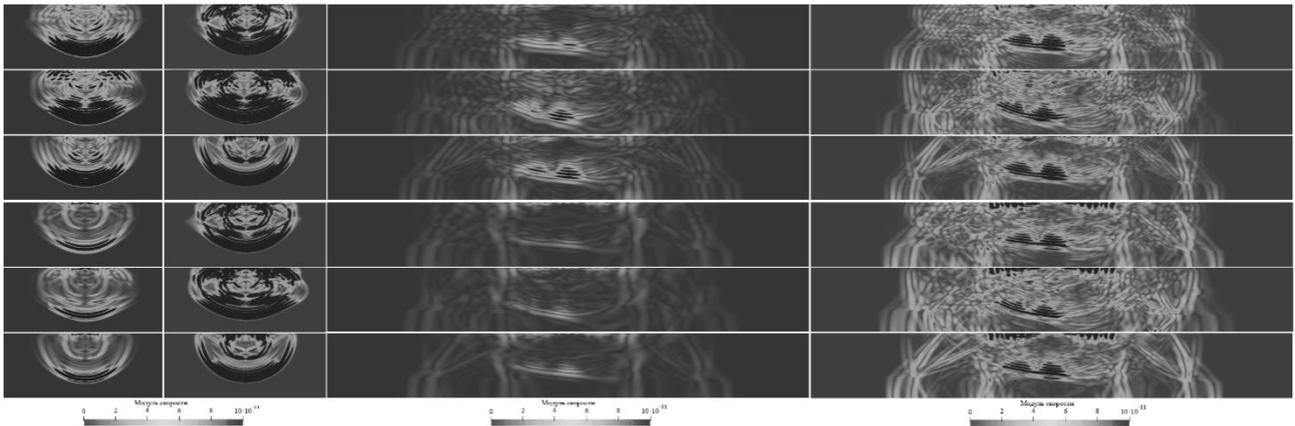


Рис. 3. Волновые картины в результате морской сейсморазведки. Левые два столбца – момент времени 0.2 с, центральная часть области, 1200 м, правые – 0.6 с, вся область.

Первый метод – 1 и 3 столбцы, второй – 2, 4. Верхние три ряда – источник на морском дне, нижние – на поверхности воды; 1, 4 ряд – постановка со слоем льда; 2, 5 – с ледовыми включениями; 3, 6 – без особенностей

На рис. 4 представлены сейсмограммы для первого метода, на рис. 5 – второго. Исследуя сходства, характерные для обоих методов, можно выделить особенности самих постановок. Для случая без включений можно отметить повторяющееся отражение от границы вечной мерзлоты с нижним грунтом. По сравнению с ним отражение от льда приходит раньше, потом сливаясь с ним и деформируя его. Разница постановок со слоем льда и ледовыми включениями заключается в подобных слегка различающихся деформациях фронтов.

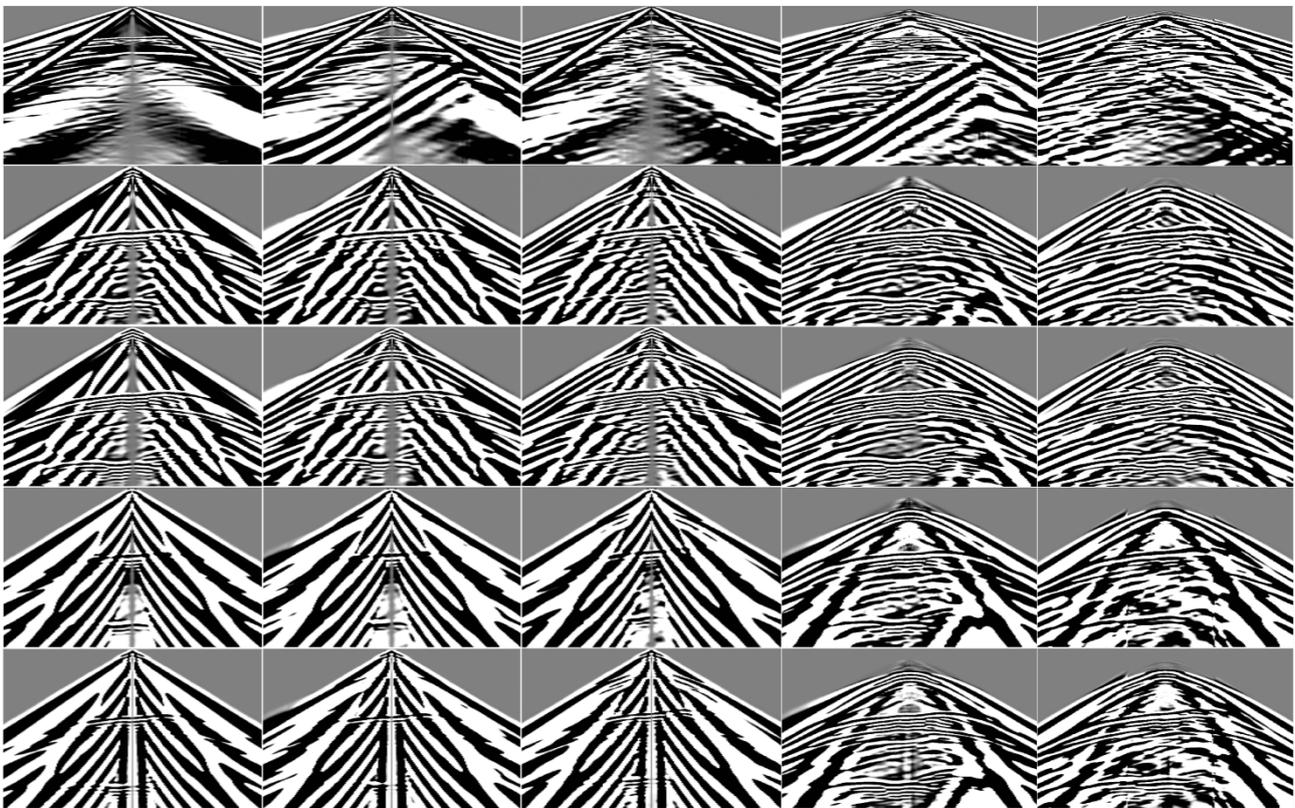


Рис. 4. Сейсмограммы для первого метода. Первые три столбца – сейсмограммы компоненты скорости v_x , остальные – разница между постановкой без включений и остальными; 1 столбец – постановка без включений; 2 и 4 – со слоем льда; 3 и 5 – с ледовыми включениями. Первый ряд – наземная сейсморазведка, остальные – морская; 2 и 3 ряды – источник в грунте, ниже – в воде; 2 и 4 ряды – приемники на морском дне; 3 и 5 – на поверхности воды

При переходе к шельфовой сейсморазведке значительную часть сейсмограмм начинают зашумлять поверхностные волн. Также возникают кратные волны, привносящие дополнительные пики в волновой фронт, причём при регистрации сейсмограмм на поверхности воды к ним добавляется больше переотражений. Поэтому для лучшего анализа подходят сейсмограммы с разностями между постановками с включениями и без них. Именно их анализ позволяет выявить одинаковость свойств геологических областей при различных положениях источников и приёмников сигнала.

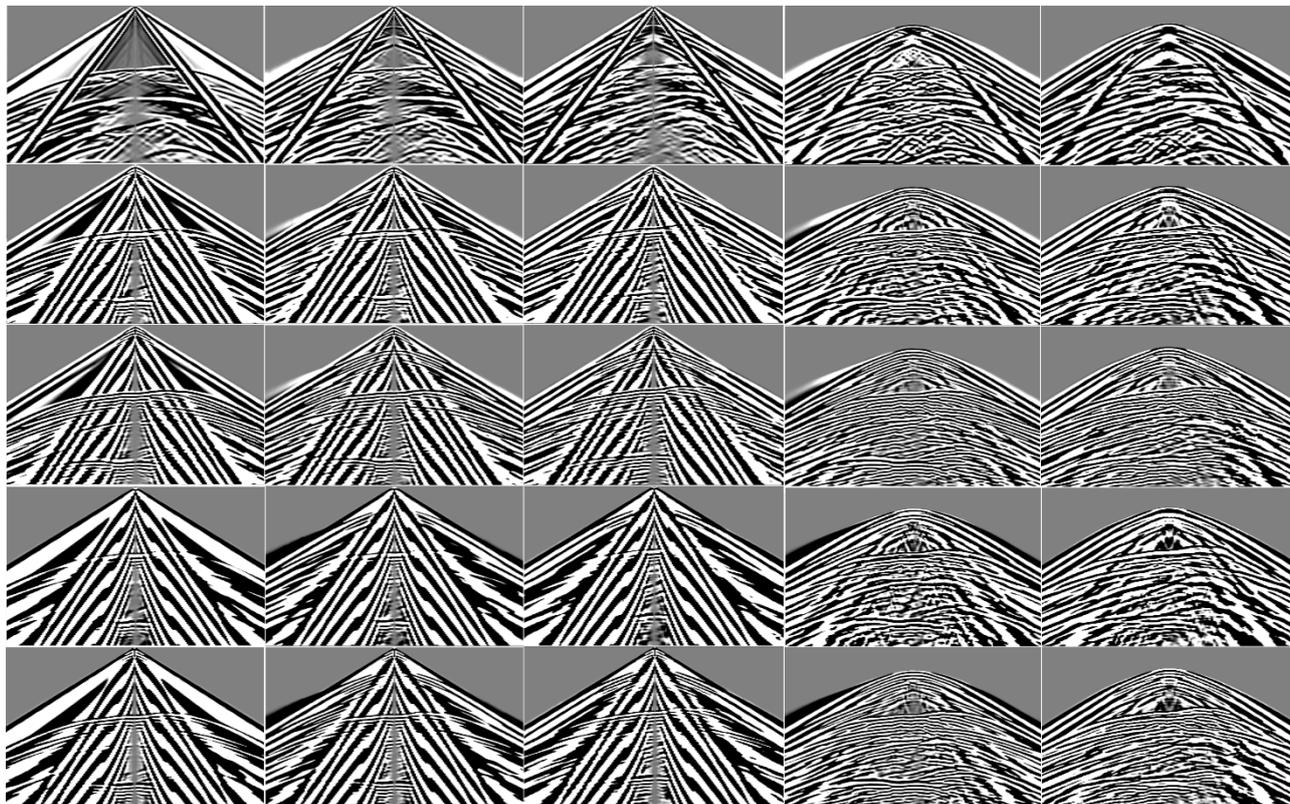


Рис. 5. Сейсмограммы для второго метода. Расположение аналогично рис. 4

С другой стороны, одним из самых явных различий является наличие длинной диагональной линии на сейсмограммах в случае со слоем льда в первом методе, которое не наблюдается во втором. В волновых картинах это проявляется в идущей справа налево почти вертикальной волне. Ещё одним наблюдением является большее различие между данными сейсмограммами в первом методе, тогда как во втором они более сходны.

В итоге, оба использованных способа отражают основные свойства рассмотренных постановок. Вопрос наиболее точного воспроизведения экспериментальных данных является целью будущих исследований.

Заключение

В результате данного исследования был разработан ряд моделей геологических сред с многолетней мерзлотой и ледовыми включениями, отражающих характерные черты грунта в береговой зоне и в акватории Арктического региона. Была решена прямая задача сейсморазведки, и проведён анализ полученных результатов.

На основе сравнения волновых картин и синтетических сейсмограмм можно сделать вывод, что обе методики успешно восстанавливают основные особенности моделей и могут быть пригодны для моделирования волновых процессов в Северном регионе. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10015, <https://rscf.ru/project/21-71-10015/>.

Библиографический список

1. Петров, И. Б. Проблемы моделирования природных и антропогенных процессов в Арктической зоне Российской Федерации/ И. Б. Петров. - Текст : электронный // Матем. моделирование. – 2018 – 30 № 7. – С. 103-136. – URL: <https://www.mathnet.ru/rus/mm3988> (дата обращения: 05.10.2022).
2. Streletskiy, D. A. The costs of Arctic infrastructure damages due to permafrost degradation. / D. A. Streletskiy, S. Clemens, Jean-Pierre Lanckman, N. I. Shiklomanov – Текст : электронный // Environmental Research Letters. – 2023. – 18 № 1. – 015006. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/acab18> (дата обращения: 12.01.2023).
3. Новацкий, В. Теория упругости : монография: [пер. с польск. Б. Е. Победри] / В. Новацкий. – М. : Мир, 1975. – 872 с.
4. Магомедов, К. М. Сеточно-характеристические численные методы : учеб. пособие для вузов / К. М. Магомедов, А. С. Холодов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2022. – 313 с. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-534-04220-7. - Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/491087> (дата обращения: 20.12.2022).
5. Rusanov, V. V. The calculation of the interaction of non-stationary shock waves with barriers. / V. V. Rusanov - Текст :электронный // J. Comput. Math.Phys. - USSR. – 1961. – 1 № 2. – P. 267-279. – URL: <https://www.mathnet.ru/eng/zvmmf7987> (дата обращения: 03.02.2022).
6. Холодов, А. С. О критериях монотонности разностных схем для уравнений гиперболического типа / А. С. Холодов, Я. А. Холодов. - Текст : электронный // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 46 № 9. – 2006. – С. 1638-1667. – URL: <https://www.mathnet.ru/rus/zvmmf415> (дата обращения: 03.02.2022).

УДК 519.63

DOI: 10.46960/polmech_2023_141

В.И. Голубев¹, В.П. Епифанов², Е.К. Гусева^{1,2}, И.Б. Петров¹, В. Халид¹**ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕОЛОГИИ ЛЬДА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**¹Московский физико-технический институт (государственный университет),

г. Долгопрудный,

²Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва

Активное вовлечение в хозяйственную деятельность Арктического региона в последние годы ставит всё более сложные научно-технические задачи. Особенностью данного региона является наличие ледяного покрова, который существенным образом влияет на технологические процессы: сейсмическая разведка, плавание судов, бурение. Современные методы высокоточного математического моделирования могут быть использованы для адаптации и совершенствования существующих технологий. При этом фундаментальной задачей является построение корректной механико-математической модели льда, описывающей его динамическое поведение в широком спектре параметров (температура, скорости нагружения, солёность).

Данная работа направлена на экспериментальное и численное исследование процесса низкоскоростного (менее 5 м/с) взаимодействия ударника с подложкой из льда. В лабораторных экспериментах проведено измерение деформационной кривой льда, её зависимости от начальной скорости ударника. В рамках численного моделирования получены деформационные кривые, соответствующие использованию линейно упругой модели и упруго-пластической модели для льда.

По результатам расчётов установлена необходимость рассмотрения более сложных механико-математических моделей, что должно позволить точнее воспроизвести результаты экспериментов.

Ключевые слова: Арктический регион, лёд, динамическая нагрузка, деформационная кривая.

Введение

При построении механико-математической модели льда необходимо учитывать ряд важных факторов.

Во-первых, внутренняя структура льда чрезвычайно сложна. Макроскопический образец состоит из кристаллов, пор и включений, которые значительно влияют на его динамическое поведение при приложении внешней нагрузки.

Во-вторых, значительное влияние на механические макропараметры оказывают внешние условия, такие как температура, давление, а также условия образования льда (солёность, предыстория его формирования).

При достаточно низких температурах, далеко от температуры фазового перехода, естественно предположить возможность использования линейно упругой (возможно анизотропной) модели для описания деформаций льда. При повышении температуры или энергии взаимодействия с ним естественно ожидать повышение влияния инерционных процессов, соответствующее упруго-пластической модели. Отдельно необходимо отметить вероятную необходимость учёта процесса разрушения льда, его хрупкое разрушение.

В настоящей работе была поставлена задача по исследованию вопросов применимости упругой и упруго-пластической моделей для описания деформационной кривой льда, соответствующей низкоэнергетическому (около 1 Дж) взаимодействию ударника с образцом из льда.

Механико-математическая модель и численный метод

В работе рассматривались две различные механико-математические модели применительно к задаче описания динамического деформирования образца из льда.

Первой из них была выбрана изотропная линейно упругая модель, определяющие уравнения которой приведены, например, в работе [1]. Она однозначно задаётся тремя механическими параметрами – скорость продольных волн, скорость поперечных волн и плотность. Система уравнений в частных производных первого порядка, описывающая линейно упругую среду, является гиперболической. Для получения её численного решения в работе использовался сеточно-характеристический метод [2], учитывающий математические особенности задачи – распространение разрывов вдоль характеристических кривых.

Данный метод был успешно использован ранее для решения динамических задач в неоднородных акустических средах [3]. Для учёта процесса деформирования льда использовалась подвижная Лагранжева регулярная перестраиваемая сетка.

Второй моделью являлась упруго-пластическая модель [4], учитывающая возникновение необратимых деформаций при превышении нагрузкой значения предела текучести для материала. Таким образом, дополнительным параметром модели является его значение. Численное решение упруго-пластической задачи получалось с использованием инженерного программного обеспечения Abaqus. Его основой является метод конечных элементов [5].

В обоих постановках задачи ударник считался жёстким.

Результаты расчётов

В настоящей работе использовались следующие параметры. В качестве ударника рассматривался стальной шар радиусом 38 мм с плотностью 7800 кг/м^3 . В эксперименте он свободно падал с заданной высоты, что обеспечивало набор им скорости непосредственно перед ударом до 48.4 м/с . При проведении компьютерного моделирования для сокращения времени расчёта положение шара с заданной начальной скоростью задавалось в непосредственной близости от пластины из льда. В качестве мишени рассматривалась параллелепипедная пластина из льда размерами $2 \text{ м} \times 2 \text{ м} \times 55 \text{ см}$. Упругие параметры её материала (льда) выбирались следующим образом: скорость продольных волн – 3600 м/с , скорость поперечных волн – 1942 м/с , плотность – 917 кг/м^3 . Предел текучести варьировался в диапазоне $0.1 - 0.6 \text{ Н/мм}^2$. При расчёте сеточно-характеристическим методом структурная сетка содержала более 150 000 узлов, при расчёте методом конечных элементов использовалось более 65 000 элементов (более 680 000 степеней свободы).

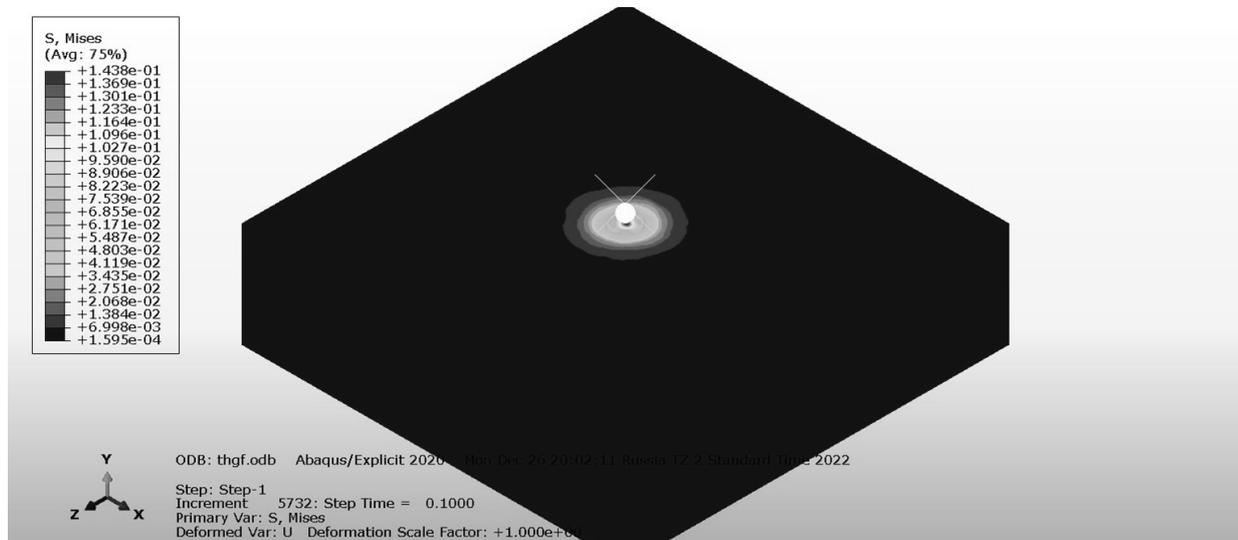


Рис. 1. Пространственное распределение напряжений по Мизесу на момент окончания упруго-пластического расчёта

Результаты лабораторных экспериментов свидетельствуют о том, что максимальная осадка полюса шара достигает величины 0,4 мм. При проведении расчётов в приближении линейно упругого тела максимальные деформации оказались на порядок ниже наблюдаемых в эксперименте. По-видимому, это свидетельствует о значимости пластических деформаций в рассматриваемой задаче.

Результаты расчёта в приближении упруго-пластического тела представлены на рис. 1. Видно, что область максимальных напряжений совпадает с точкой столкновения шара с платиной, присутствует довольно быстрое спадание их при удалении от центра.

На рис. 2 представлены деформационные кривые, полученные по результатам лабораторных экспериментов, а также по результатам численных расчётов. Отметим, что дополнительная модификация значений упругих параметров позволила получить лучшее совпадение с экспериментальными данными.

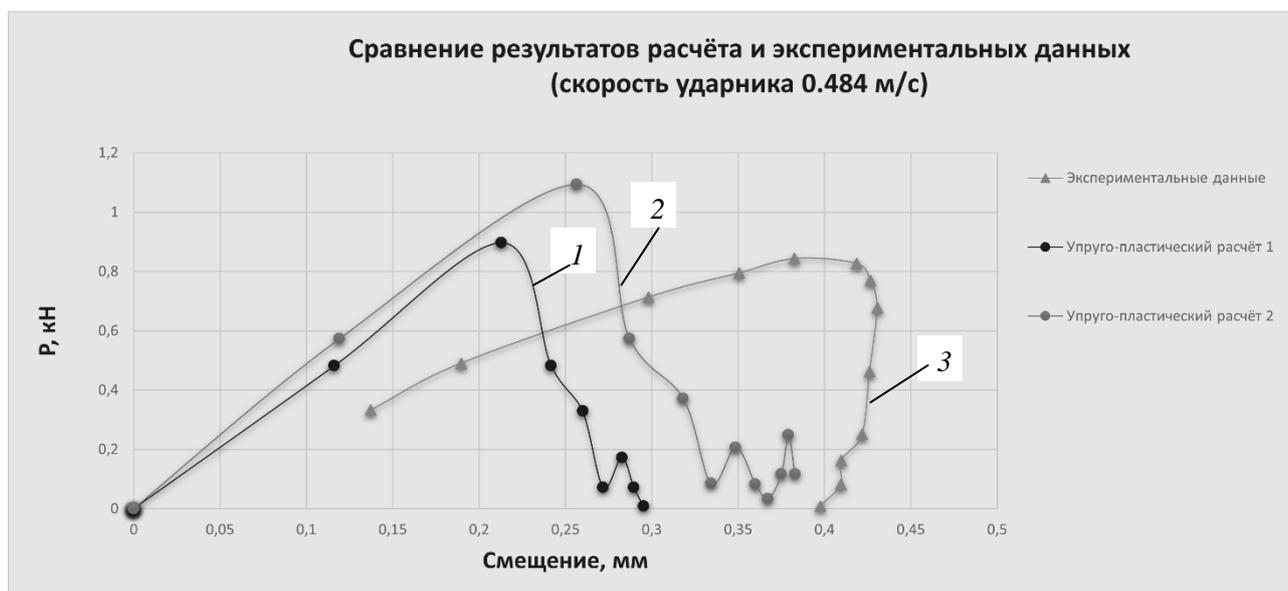


Рис. 2. Сравнение результатов численного расчёта в рамках упруго-пластической модели и экспериментальных данных: исходные упругие параметры (1); скорость продольных волн – 3940 м/с (2); скорость поперечных волн – 2493 м/с (3)

Заключение

В работе были проведены экспериментальные и численные исследования процесса низкоскоростного взаимодействия стального шара с пластиной изо льда. Результаты лабораторных экспериментов свидетельствуют о достаточно сложной реологии льда, такой, что деформационная кривая в полной мере не соответствует ни линейно упругому телу, ни упруго-пластическому телу. Вероятно, это может быть объяснено сложной внутренней структурой льда, которая формируется при его замерзании.

По результатам проведённых линейно упругих расчётов выявлено формирование значительно меньших деформаций фронтальной поверхности льда. Это позволяет сделать вывод, что данное приближение не способно адекватно воспроизвести динамическое поведение льда. Использование упруго-пластического приближения позволило соответствующим выбором констант материала добиться значительно большего сходства экспериментальной и расчётной деформационных кривых. Однако, при повышении скорости ударника наблюдается дальнейшее расхождение результатов, которое требует дальнейшего исследования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–21–00384, <https://rscf.ru/project/23-21-00384/>.

Библиографический список

1. Новацкий, В. Теория упругости : монография: [пер. с польск. Б. Е. Победри] / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
2. Petrov, I.B. Simulation of Seismic Waves in Anisotropic Media. / I. B. Petrov, V. I. Golubev, V. Y. Petrukhin [et al.] // Dokl. Math. – 2021. – 103. – P. 146-150. – URL: <https://doi.org/10.1134/S1064562421030145> (дата обращения: 31.01.2023).
3. Golubev, V. Compact Grid-Characteristic Scheme for the Acoustic System with the Piece-Wise Constant Coefficients. / V. Golubev, A. Shevchenko, N. Khokhlov, I. Petrov, M. Malovichko // International Journal of Applied Mechanics. – 2022. – 14(2). – 2250002. – URL: <https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/S1758825122500028> (дата обращения: 31.01.2023).
4. Lee, Y.-L. Metal Fatigue Analysis Handbook. Chapter 7 - Fundamentals of Cyclic Plasticity Theories / Y.-L. Lee, M. E. Barkey. – 2012. – P. 253-297.
5. Abaqus Unified FEA - Mechanical Simulation. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/> (дата обращения: 31.01.2023).

УДК 519.63

DOI: 10.46960/polmech_2023_145

Д.С. Конов, М.В. Муратов, Е.К. Гусева, И. Б. Петров

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТАЮЩЕГО ЛЕДОВОГО ОСТРОВА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), г. Москва

Для различных практических задач, возникающих вследствие освоения Арктического шельфа, современной заменой классических объектов инфраструктуры, например, нефтяных платформ, являются ледовые острова. Они создаются искусственно для размещения на их поверхности оборудования и являются более экономичными и экологичными по сравнению с другими методами. У любых ледовых структур несущая способность может падать со временем из-за таяния.

Исследованию ледового острова посвящена эта статья. В начале для ледового острова на основе данных о погодных условиях в Баренцевом море решается задача Стефана. Форма острова и поле температур внутри с течением времени меняется, как следствие, меняются и механические свойства, которые исследуются с помощью решения механической задачи сеточно-характеристическим методом. В статье представлены теоретическая модель и результаты вычислений периода в 9 месяцев.

Ключевые слова: ледовые структуры, численное моделирование, задача Стефана, сеточно-характеристический метод.

Развитие северных регионов России, включая Арктику, является одной из важнейших задач для нашей страны. Огромные месторождения нефти и газа на шельфе представляют большой интерес, но их освоение является нетривиальной задачей. Одной из перспективных технологий, призванной удешевить процесс и сделать его более экологичным, являются ледовые острова [1]. На них возможно размещение оборудования для разведки и добычи полезных ископаемых. Ледовые острова представляют собой искусственные сооружения, которые могут плавать или опираться на дно [2], опыт их постройки и эксплуатации описан в [3].

Обслуживание таких конструкций сопряжено с проблемами, которые не возникают при обслуживании, например, нефтяных платформ. Они включают в себя таяние льда, зависимость упругих характеристик от температуры, влияние погодных условий, морских течений, тепловых потоков от оборудования. Для исследования этих сооружений на устойчивость необходимо комбинировать механическую и термическую задачу.

В данной работе предлагается объединить эти задачи так: сначала для ледового острова решается задача Стефана [4], которая является обобщением задачи теплопроводности для веществ с фазовыми переходами, затем для отдельных моментов времени решается механическая задача, ее результаты указывают, выдержит ли ледовый остров механическую нагрузку от оборудования. В начале этой статьи будут указаны методы решения задачи Стефана, далее будет обсуждаться механическая задача и результаты численного моделирования.

Задача Стефана формулируется следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_i^V T}{\partial t} &= \vec{\nabla}_r (k_i \vec{\nabla}_r T), \vec{r} \notin \Gamma(t), \\ \lambda^V \frac{\partial \vec{r}_\Gamma}{\partial t} \cdot \vec{dS} &= (\vec{q}_L - \vec{q}_S) \cdot \vec{dS}, \vec{r}_\Gamma \in \Gamma(t), \\ \left(\alpha T + \beta \frac{\partial T}{\partial n} \right) |_{\partial \Omega} &= \gamma, \quad T(\vec{r}, t) |_{t=0} = T_0(\vec{r}). \end{aligned}$$

Здесь индексом $i \in \{L, S\}$ обозначаются фазы (жидкая и твердая соответственно); $\vec{r} \in \Omega$ – произвольная область в пространстве; Γ – граница раздела фаз, $\vec{q}_i, C_i^V, T, t, k_i$ – тепло-

вой поток, теплоемкость единицы объема, поле температур, время, коэффициент теплопроводности соответственно; α, β, γ – произвольные коэффициенты в граничном условии. Задача переформулируется с использованием энтальпии (теплосодержания единицы объема), обозначенной u , следующим образом:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \vec{\nabla}_r \left(k(u) \vec{\nabla}_r T(u) \right), \quad \left(\alpha T(u) + \beta \frac{\partial T(u)}{\partial n} \right) |_{\partial \Omega} = \gamma, \quad u(\vec{r}, t) |_{t=0} = u(T_0(\vec{r}))$$

Коэффициент теплопроводности здесь непостоянен, в промежуточной области теплоемкости его можно непрерывно доопределить линейной функцией. Численное решение можно получить в двумерном случае с помощью продольно-поперечной схемы, ее шаблон изображен на рис. 1, а:

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{u}_{ml} - u_{ml}^n}{\tau/2} &= \Lambda_{xx} u_{ml}^{n+1/2} + \Lambda_{yy} u_{ml}^n, \\ \frac{u_{ml}^{n+1} - \tilde{u}_{ml}}{\tau/2} &= \Lambda_{xx} u_{ml}^{n+1/2} + \Lambda_{yy} u_{ml}^{n+1}, \\ \Lambda_{xx} u &= k_{m+\frac{1}{2}l} \frac{t_{m+1l} - t_{ml}}{h_x^2} + k_{m-\frac{1}{2}l} \frac{t_{m-1l} - t_{ml}}{h_x^2}. \end{aligned}$$

Операторы дифференцирования по u аналогичны. Коэффициент теплопроводности в узлах побочной сетки определяется:

$$k_{m+\frac{1}{2}l} = k_{m+1-\frac{1}{2}l} = \frac{k_{m+1l} + k_{ml}}{2}.$$

Нелинейность коэффициента теплопроводности учитывается с помощью итерационного процесса. В начале каждого шага по времени коэффициенты теплопроводности вычисляются из данных на предыдущем слое, по ним восстанавливается тепловой поток и поле теплосодержания на следующем шаге. Шаг по времени выполняется повторно, но значения коэффициента теплопроводности используются новые. Весь итерационный процесс повторяется, пока норма разности полей теплосодержания между итерациями не станет меньше определенного числа, то есть не будет достигнута точность ε .

Преимущество неявной схемы для задачи теплопроводности в том, что она устойчива безусловно, то есть можно свободно выбирать шаг по времени. Благодаря алгоритму прогонки, скорость алгоритма остается приемлемой, сложность вычисления следующего шага по времени линейная.

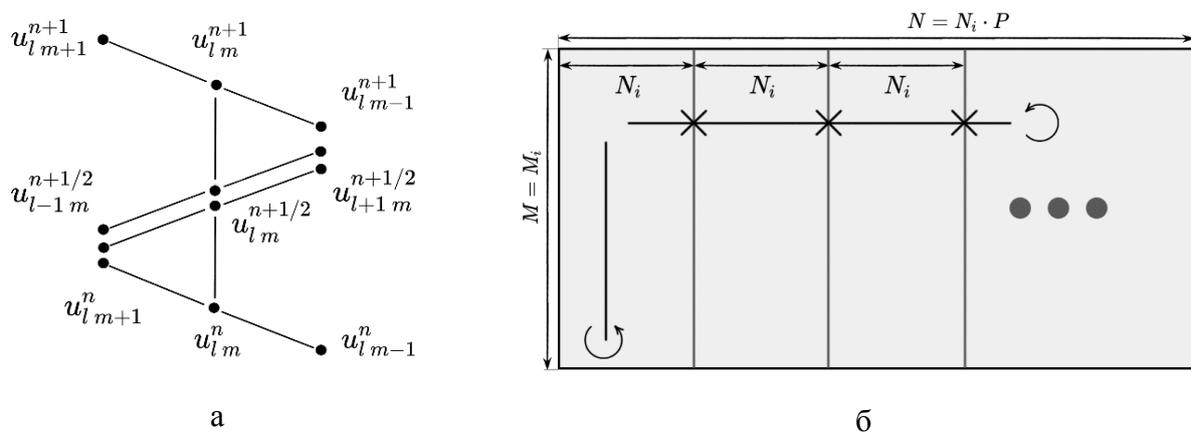


Рис. 1. Шаблон продольно-поперечной схемы (а), схема вычисления задачи Стефана для системы с распределённой памятью (б)

Оптимизация алгоритма на системы с общей памятью тривиальна, так как в каждом полушаге по времени прогонки вдоль одного направления могут быть выполнены одновре-

менно. Для систем с распределенной памятью по аналогии с работой [5] может быть предложен алгоритм конвейерной прогонки, где прогоночные коэффициенты α , β отправляются с одного вычислительного узла на другой. После отправки вычислительный узел может незамедлительно приступить к следующим прогонкам (рис. 1, б). Для реализации программного обеспечения использовались библиотеки OpenMP и MPI.

В результате расчетов задачи Стефана получается фазовая картина области интегрирования и поле температур, изменяющееся со временем. Эти результаты могут быть использованы для восстановления параметров в области интегрирования в задаче линейной упругости с помощью формулы Берденникова [6], то есть для льда:

$$E = (87.6 - 0.21T - 0.0017T^2) \cdot 10^8 \text{ Па},$$

$$\nu = 0.295,$$

Переходя к коэффициентам Ламе записываем:

$$\rho \dot{\vec{v}} = \nabla \cdot \sigma + \vec{f},$$

$$\dot{\sigma} = \lambda(\nabla \cdot \vec{v})I + \mu(\nabla \otimes \vec{v} + (\nabla \otimes \vec{v})^T) + F.$$

Задача линейной упругости решается сеточно-характеристическим методом [7]. Используются явная схема Русанова [8]:

$$[r_i]_m^{n+1} = [r_i]_m^n + \frac{c_i}{2}([r_i]_{m-1}^n - [r_i]_{m+1}^n) + \frac{c_i^2}{2}([r_i]_{m-1}^n - 2[r_i]_m^n + [r_i]_{m+1}^n),$$

$$- \frac{c_i(1 - c_i^2)}{6}([r_i]_{m-2}^n - 3[r_i]_{m-1}^n + 3[r_i]_m^n - [r_i]_{m+1}^n).$$

Для монотонизации используется корректор [9] со следующим критерием:

$$\min\{[r_i]_1^n, [r_i]_2^n\} \leq [r_i]_m^{n+1} \leq \max\{[r_i]_1^n, [r_i]_2^n\}.$$

При нарушении этого условия $[r_i]_m^{n+1}$ заменяется максимумом (минимумом) из двух ближайших у характеристики значений на предыдущем слое. Для учета вязкоупругих свойств льда, используется модель Максвелла [10]. Уравнения нелинейной теории упругости решаются сначала с нулевым тензором F , далее действует дополнительный корректор:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_0}\right).$$

Для исследования льда на разрушение используются критерий Мизеса и динамический критерий разрушения [11], который явно устанавливает трещину в области интегрирования при превышении главной компонентой тензора напряжений порогового значения. Реализация на многопоточных системах явных схем с описанными улучшениями достигается без существенных трудностей.

Численно исследовался ледовый остров (рис. 2). Физические характеристики веществ в расчетах представлены в табл. 1. Начальные условия в задаче Стефана соответствовали установившемуся состоянию острова при температуре воздуха в $T_a = -40^\circ\text{C}$ и температуре воды $T_w = 3^\circ\text{C}$. Далее, моделировался период в 9 месяцев, а погодные условия на шельфе менялись согласно табл. 2. Шаг по пространству $h_x = h_y = 0.05 \text{ м}$ и шаг по времени $\tau = 50 \text{ с}$. В итоге остров изменил свою форму (рис. 3), а температурные распределения (рис. 4) были использованы как входные данные для механической задачи.

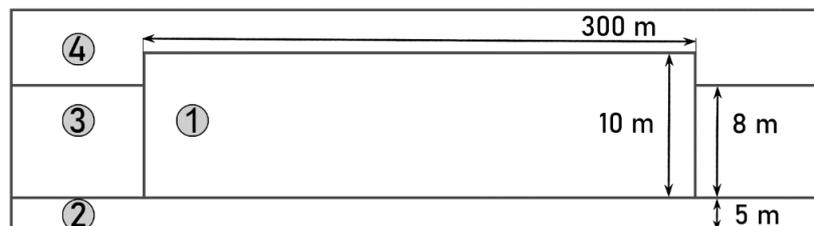


Рис. 2. Ледовый остров, исследованный в численном эксперименте

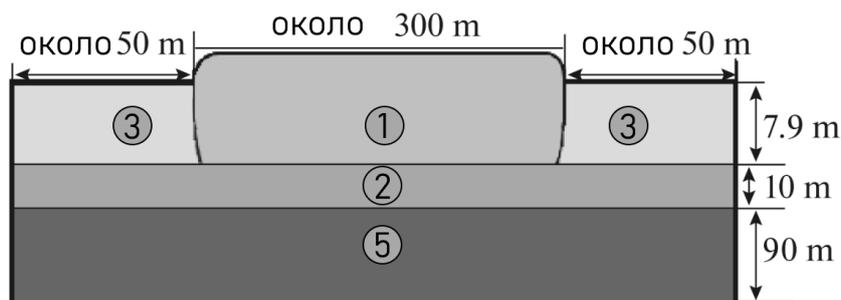


Рис. 3. Область интегрирования в механической задаче

Таблица 1

Физические характеристики веществ в расчетах

№	Вещество	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$k, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$C_p, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$S_p, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$S_s, \frac{\text{м}}{\text{с}}$
1	Лед	917	0.591	2100	3550-3600	1920-1940
2	Донный грунт	2500	0.8	750	1806	316
3	Вода	1000	2.22	4180	1500	—
4	Воздух	—	—	—	—	—
5	Осадочные породы	2500	—	—	2250	1000

Таблица 2

Температура воздуха и воды в зависимости от месяца

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
T_a	-28	-28	-27	-20	-9	-1	2	1	-2
T_w	3	3	3	3	3	5	6	9	7

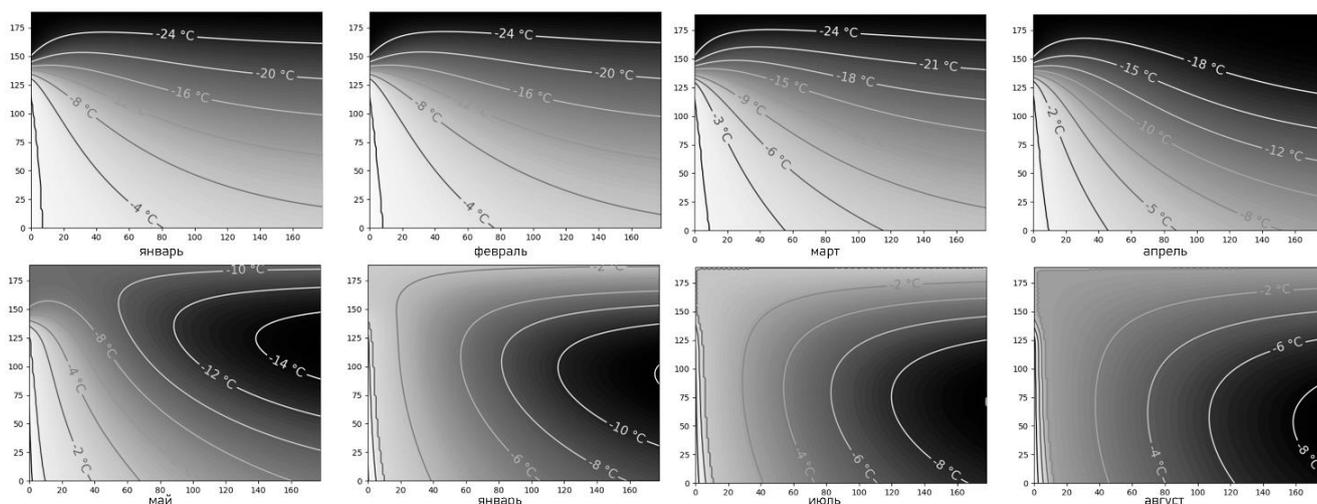


Рис. 3. Температурные распределения в ледовом острове в зависимости от месяца

Механическая задача решалась с временным шагом времени $\tau = 0.01$ мс в двух постановках. В первой каждый месяц на отрезок верхней грани длиной 10 м устанавливалась

постоянная нагрузка в 10^4 Н. Для всех 9 месяцев нагрузка не привели ни к появлению трещин по механизму динамического разрушения, ни к выполнению критерия Мизеса. Волновые картины в разные моменты времени для января и августа изображены на рис. 4, а и б.



Рис. 4. Модуль скорости через 0.05 с (а) и 0.5 с (б) в январе (сверху) и августе (снизу)

Из рис. 4 следует, что волновые картины в результате таяния на протяжении 9 месяцев меняются незначительно, а нагрузка в 10^4 Н не привела к разрушениям на протяжении всего моделируемого периода. Во второй постановке исследовалась предельная нагрузка, при которой остров начинал разрушаться (выполнялся критерий Мизеса). Оказалось, что остров не разрушается под действием силы в $(2.175 \pm 0.025) \cdot 10^6$ Н в январе, по ходу года предельная нагрузка незначительно падает и достигает $(2.125 \pm 0.025) \cdot 10^6$ Н в июле и августе. Разрушение происходит в точке контакта острова и донного грунта.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 21-71-10015.

Библиографический список

1. Горгуца, Р. Ю. Строительство искусственных ледовых островов в условиях Арктики / Р. Ю. Горгуца, Е. Ю. Курило // Гидротехника. XXI в. – 2017. – №4 (32). – С. 54–57.
2. Morgan, V. Ice island study Report No. R-05-014-241 v1.0 / US Dep. Of the Interior, 2015.
3. Riley, J. G. The construction of artificial islands in the Beaufort Sea / Proceedings of the Annual 7th Offshore Technology Conference, OTC-2167-MS, 1975.
4. Muratov, M. V. Numerical modeling of elastic and thermal dynamical processes in artificial ice island / M. V. Muratov, P. V. Stognii, D. S. Konov, I. B. Petrov // Proceedings of the 26th international Conference on port and ocean engineering under Arctic conditions, 2021.
5. Lipavskii, M. Parallel implementation of multioperators-based scheme of the 16-th order for three-dimensional calculation of the jet flows / M. Lipavskii, I. Konshin // In Proc. Of Int. Conf. Ruscdays, 2022, 1–15.
6. Berdennikov, V. P. Study of the modulus of elasticity of ice // Tr. GGI, 1948, 7 (61), 13–23.
7. Магомедов, К. М. Сеточно-характеристические численные методы / К. М. Магомедов, А. Холодов // Наука, 1988.
8. Rusanov, V. The calculation of the interaction of non-stationary shock waves with barriers / J. Comput. Math. Phys. USSR 1, 1961, 267–279
9. Kholodov, A. S. Monotonicity criteria for difference schemes designed for hyperbolic equations / A. S. Kholodov, Ya. A. Kholodov // Comput. Math. Math. Phys. 46, 2006, 1560–1588
10. Argatov, I. Mathematical modeling of linear viscoelastic impact: Application to drop impact testing of articular cartilage // Tribol. Int., 2012, 63, 213–225
11. Favorskaya, A. V. Study the elastic waves propagation in multistory buildings, taking into account dynamic destruction / A. V. Favorskaya, V. I. Golubev // Smart Innov. Syst. Technol., 2020, 193, 189–199.

А.А. Добродеев^{1,2}, Н.Ю. Родионов^{1,2}, К.Е. Сазонов^{1,2}

НОВЫЕ ВИДЫ МОДЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА, РАЗРАБОТАННЫЕ В ЛЕДОВОМ БАССЕЙНЕ КРЫЛОВСКОГО ЦЕНТРА

¹ Крыловский государственный научный центр, г. Санкт-Петербург,

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
г. Санкт-Петербург

Описаны новые экспериментальные методики проведения модельных исследований в ледовом бассейне, которые были разработаны в Крыловском научном центре. Как правило, разработка новой методики эксперимента происходит в связи с запросами практики. Для судов ледового плавания эти запросы связаны с увеличением количества крупнотоннажных судов, эксплуатируемых в Арктике.

Новые задачи в области исследования ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения связаны с необходимостью создания новых портов в арктическом регионе.

Ключевые слова: ледовый бассейн, модельный эксперимент, крупнотоннажное судно, ледовая нагрузка, гидротехническое сооружение.

Введение

В настоящее время происходит активное хозяйственное освоение арктических регионов России. Это развитие ставит новые задачи, в том числе и перед водным транспортом, который является основой любых арктических транспортных систем. Решение этих задач требует применения современных подходов и технологий, ранее не использовавшихся в арктическом судоходстве. Ледовые бассейны принимают активное участие в этих работах, проводя экспериментальную проверку подобных идей.

Новизна изучаемых вопросов приводит к необходимости разработки новых видов эксперимента и методик их проведения. В данной работе описываются несколько видов эксперимента, которые были разработаны в ледовом бассейне Крыловского научного центра в прошлом году.

Оценка возможности буксировки вплотную крупнотоннажных судов современными ледоколами

Буксировка вплотную ледоколом является часто используемым приемом при проводке судов, ширина которых меньше ширины проводящего их ледокола [1]. Для проводки крупнотоннажных судов такой способ обычно не используется. Однако в последнее время, появились проекты транспортных систем, в которых допускается возможность выполнения этой операции для судов с низким ледовым классом. Поэтому в ледовом бассейне КГНЦ были проведены модельные исследования, в которых изучалась возможность выполнения буксировки вплотную, а также оценивались трудности, возникающие при этом.

Исследования проводились на моделях (масштаб 1:34,44) нового атомного ледокола типа «Арктика» и условного балкера водоизмещением около 100 тыс. т и максимальной импульсивной мощностью 14 МВт. Ледовый класс транспортного судна – Arc4. Водоизмещение балкера примерно в три раза превышает водоизмещение ледокола, при этом его ширина незначительно больше ширины ледокола. В некоторых ледовых бассейнах мира проводились модельные испытания движения таких судов по каналу, проложенному ледоколом [2, 3]. Модельные же исследования буксировки вплотную ранее никем не проводились.

Для изучения особенностей буксировки вплотную модели были дооборудованы и оснащены специальным измерительным оборудованием. Дополнительно был изготовлен

имитатор кормового выреза ледокола с кранцем и установлен на его корпусе с помощью динамометра, способного измерять горизонтальную нагрузку. Кранцевое устройство в вырезе имитировалось прорезиненным материалом умеренной жесткости. Подбор имитатора осуществлялся, исходя из опыта экспериментаторов и доступной информации. В качестве имитатора буксировочного каната использовался металлический трос. Его крепление на моделях соответствовало типичному расположению буксировочных устройств на натуральных судах. Буксировочный трос был снабжен динамометром, измеряющим его натяжение.

В ходе проведения экспериментов рассматривались следующие характерные режимы движения сцепки: буксировка на прямом курсе, буксировка на циркуляции и моделирование остановки ледокола при буксировке. Буксировки на прямом курсе были проведены в четырех различных толщинах льда от 0,5 до 2,1 м при грузовой и балластной осадках балкера. Н

На рис. 1 приведены некоторые результаты экспериментов. Из приведенных графиков следуют очевидные ограничения возможность осуществления операции по толщине льда и скорости движения сцепки.

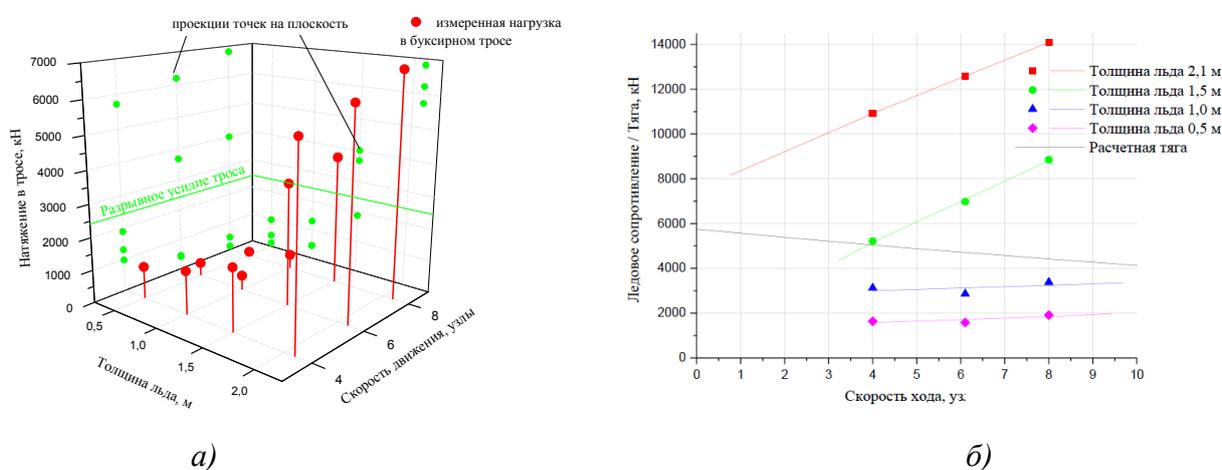


Рис. 1. Результаты измерений натяжения в буксирном тросе при прямолинейном движении (а) и ледового сопротивления ледокола, осуществляющего буксировку балкера (б)

Исследования циркуляции сцепки показали, что возникающие в буксирном устройстве усилия очень чувствительны к кривизне описываемой траектории. Напряжения в буксирном тросе практически всегда превышали разрывное усилие, что свидетельствует о высокой вероятности заклинивания крупнотоннажного судна в криволинейном канале.

Моделирование внезапной остановки ледокола показало, что возникающие при этом нагрузки практически не зависят от толщины льда, в котором происходит остановка, но очень чувствительны к скорости движения сцепки и интенсивности ускорения торможения. Дополнительные результаты описанных выше исследований можно найти в работе [4].

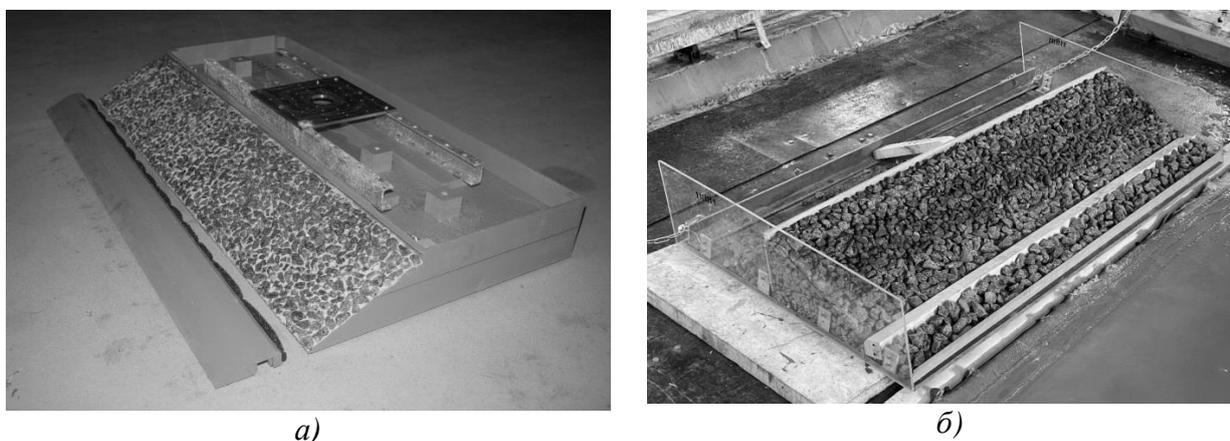
Влияние каменной наброски на процесс взаимодействия гидротехнического сооружения со льдом

Каменная наброска традиционно используется для укрепления откосов различных гидротехнических сооружений, а также берегов различных водоемов [5]. Ее основное назначение защита сооружения или береговой черты от волнового воздействия. Ледовые воздействия на каменную наброску практически не изучены, в литературе имеются лишь отдельные указания на этот счет. Например, в работе [6] указано, что такая наброска успешно противостоит воздействию ровных ледяных полей, хотя и может разрушаться при взаимодействии с ними. Указанные обстоятельства обусловили необходимость разработки и внедрения в ледовом бассейне КГНЦ новых технологий проведения испытаний моделей гидротехнических

сооружений с каменной наброской со льдом, которая базировалась на первых удачных опытах [7]. Далее приводятся основные положения этой технологии.

Разработанная технология использует разные подходы при изучении величины ледовой нагрузки на модели и при рассмотрении характера разрушения каменной наброски и ее влияния на геометрические размеры ледяных образований. В первом случае эксперимент проводится по схеме обращенного движения, при этом каменная наброска жестко прикреплена к модели. Во втором случае используется прямое движение, а камни наброски имеют возможность сдвигаться под действием ледовых сил.

Для имитации каменной наброски используется гравий, при этом размер и масса камней соответствуют натурным с учетом масштаба моделирования. При этом используется два подхода к имитации наброски. При обращенном движении для снижения веса модели применяется однослойное размещение щебня на наклонной поверхности (рис. 2, а). Для этого создается специальное покрытие, состоящее из приклеенного к поверхности щебня заданной фракции. Эксперименты в обращенном движении обычно проводятся при многослойной наброске щебня, когда весь профиль сооружения набирается из щебня. Для удобства наблюдения за процессом разрушения щебень окрашивают в разные цвета (рис. 2, б).



а)

б)

Рис. 2. Модели сооружений с каменной наброской:

а – модель с однослойным расположением камней; *б* – многослойное расположение камней

Приведем некоторые результаты экспериментальных исследований. Сравнение данных экспериментов с засыпкой и без нее показало, что ее наличие не приводит к увеличению уровня воспринимаемых сооружениями ледовых нагрузок. В некоторых экспериментах уровень ледовой нагрузки оказался несколько меньше, чем на сооружениях с гладкой гранью. По-видимому, наблюдаемый эффект можно объяснить наблюдаемым в эксперименте особенностями формирования ледяного нагромождения перед моделью.

Анализ видеозаписей процесса показал, что на начальном этапе формирования нагромождения оно создается раньше, у самого уреза воды. Можно ожидать, что такое смещение ледяных образований в сторону моря вызвано возросшей шероховатостью сооружения, которая мешает продвижению льдин. Это приводит к тому, что хотя и происходит формирование внушительного по размерам образования, оно представляет меньшую опасность для сооружения.

Как отмечалось ранее, исследования возможности разрушения каменной наброски изучалось в экспериментах, в которых реализовывалось прямое надвигание льда. На рис. 3 представлены результаты исследований, демонстрирующие характер разрушения каменной наброски при взаимодействии со льдом средней и большой толщины.

Как следует из приведенных фотографий, при взаимодействии наброски со льдом средней толщины она практически не разрушается от воздействия льда. Наблюдаются лишь от-

дельные перемещения камней, которые изначально были расположены на уровне воды. В случае толстого льда разрушения более значительны. Однако они также в основном связаны с первоначальным взаимодействием льда и наброски. В этом случае происходит непосредственное вырывание камня из наброски льдом. Как правило, этот процесс возможен с камнями, которые возвышаются относительно поверхностного слоя наброски и относительно слабо с ним связаны. Основной причиной, по которой камень может быть унесен льдом является не совершенство случайной наброски камня.

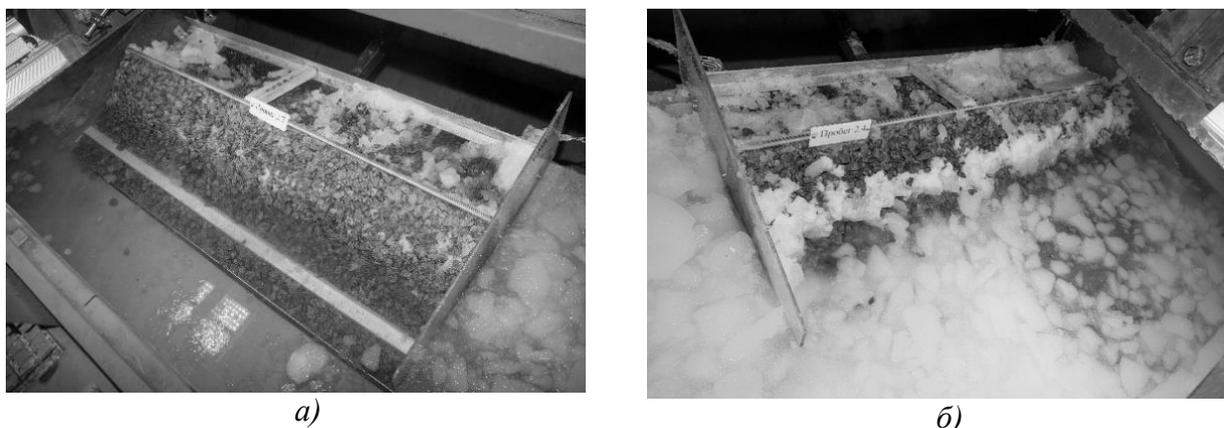


Рис. 3. Характер разрушения каменной наброски льдом средней толщины (а) и большой толщины (б)

Наблюдения за характером взаимодействия наброски со льдом позволило выявить еще один механизм ее разрушения. Он связан с не плотной упаковкой камней при случайной наброске. Из-за этого под действием ледовой нагрузки протекают процессы уплотнения наброски. Наиболее интенсивно эти процессы протекают в верхних горизонтах наброски, которая находится под меньшим давлением. Деформации наброски при ее уплотнении приводят к тому, что отдельные камни могут выдавливаться на поверхность. Такие эффекты наблюдались в экспериментах, когда камень, к которому еще не приблизилась кромка льда, начинал двигаться и выдавливаться из наброски.

В результате выполненных исследований уже сейчас можно сделать ряд важных для практического использования выводов.

1. По предварительным данным немногочисленных пока еще экспериментов каменная наброска не приводит к увеличению горизонтальной ледовой нагрузки на сооружение, однако этот вывод требует еще дополнительных подтверждений. В этих же экспериментах зарегистрировано заметное снижение вертикальной нагрузки, которая, по-видимому, связана с более ранним началом формирования ледяного нагромождения. Данные опытов показывают, что каменная наброска способствует смещению надводного ледяного нагромождения в сторону моря от сооружения.

2. Каменная наброска при определенных условиях может разрушаться под воздействием льда. На основании проведенных опытов можно сказать, что разрушение в основном происходит при взаимодействии наброски с кромкой надвигающегося ледяного поля. В экспериментах выявлено два сценария разрушения.

Первый – непосредственное выворачивание кромкой льда отдельных камней, которые недостаточно сжаты соседними камнями и возвышаются над средним уровнем наброски.

Второй сценарий заключается в выдавливании камней за счет внутренних усилий в наброске при ее взаимодействии со льдом.

3. В целом, можно констатировать, что каменная наброска может применяться для гидротехнических и портовых сооружений, возводимых на замерзающих акваториях России.

Заключение

В работе представлены два примера разработки новых методик проведения экспериментальных исследований в ледовом бассейне Крыловского Центра. Указанные методики были разработаны весьма оперативно, а их эффективность подтверждает успешным выполнением контрактных работ и принятием их результатов заказчиком. Можно даже утверждать, что быстрая разработка новых методик и быстрая реализация является отличительной чертой работы ледового бассейна.

В современных условиях, когда заказчику по целому ряду причин необходимо быстро получить ответы на интересующие его вопросы традиционный путь долгой разработки и утверждения экспериментальных методик не подходит. Более типичной является ситуация, когда исправления в методику вносятся в процессе выполнения эксперимента. Все это предъявляет к современному ледовому бассейну довольно жесткие требования: профессионализм, опыт и снова профессионализм.

Библиографический список

1. Куликов, Н.В. Буксировка судов во льдах / Н. В. Куликов, К. Е. Сазонов. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2003. – 158 с.
2. Luo, W. Numerical simulation of an ice-strengthened bulk carrier in brash ice channel / W. Luo, D. Jiang, T. Wu, C. Guo, C. Wang, R. Deng, S. Dai // *Ocean Engineering*. – 2020. – 196. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106830.
3. Close-coupled towing in model scale. – *Arctic Passion News*. – Aker Arctic Technology Inc's customer magazine, 2022. – Vol. 1/2022. – Is. 23. – 20 p.
4. Добродеев, А.А. Экспериментальные исследования возможности проводки ледоколом крупнотоннажных судов при буксировке вплотную / А.А. Добродеев, К.Е. Сазонов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2022; 14(5): 645–655. DOI:10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655.
5. Тлявлиная, Г.В. Применение природного камня в морском гидротехническом строительстве // Г.В. Тлявлиная, Е.А. Вялый // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. – 2022. – № 2. – С. 53–69. — DOI: 10.22449/2413-5577-2022-2-53-69
6. Рогачко, С.И. Научное сопровождение проектирования берегозащитных сооружений // С.И. Рогачко, Н.В. Шунько // *Вестник МГСУ*. – 2016. – № 12. – С. 103-113. – DOI: 10.22227/1997-0935.2016.12.103-113.
7. Добродеев, А. А. Физическое моделирование ледовой нагрузки на протяженные гидротехнические сооружения. Откосные сооружения с наклонной гранью / А.А. Добродеев, К.Е. Сазонов // *Арктика: экология и экономика*. – 2021. – Т. 11. – № 1. – С. 90-100. – DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-90-100.

УДК 626.01

DOI: 10.46960/polmech_2023_155

Е. С. Исаева, Т. Э. Уварова

ОБЗОР МЕТОДИК ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА

Дальневосточный федеральный университет, г Владивосток

Рассматриваются существующие методики по расчету толщины льда для последующего уточнения расчета ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения.

Ключевые слова: толщина льда, ледовая нагрузка, гидрометеорологические данные, гидротехнические сооружения.

При расчете ледовых нагрузок должны учитываться физические и механические свойства льда, соответствующие естественным условиям рассматриваемого района. Отсутствие надежных исходных данных сдерживает темпы проектирования и строительства объектов обустройства, что отодвигает сроки освоения месторождений.

В настоящее время нет единого подхода к выбору нормативных значений параметров ледяного покрова. Существенные расхождения в значениях расчетных ледовых нагрузок, определенным по нормативным методикам, обусловлены проявлением высокой пространственно-временной изменчивостью параметров ледового режима и свойств морского льда при взаимодействии с конструкциями, с одной стороны, и несовершенством расчетных методов, с другой.

Проблема оценки ледовых нагрузок на морские гидротехнические сооружения и нормирования таких нагрузок продолжает оставаться актуальным научным вопросом, имеющим важное народнохозяйственное значение. Проектирование и эксплуатация гидротехнических сооружений требует обоснованных морфометрических и прочностных характеристик ледяного покрова. Относительно редкая сеть прибрежного гидрометеорологического мониторинга в Арктическом и дальневосточном бассейнах приводит к отсутствию необходимых природных характеристик в локальных районах. Толщина льда является одним из основных параметров в расчете ледовой нагрузки.

В статье приведены методики определения толщины льда на основе гидрометеорологических данных.

Ледовые нагрузки определяются по полувероятностной модели, параметры льда находятся на основе статистических характеристик гидрометеорологических и ледовых условий в районе расположения сооружения. Согласно исследованию М. Е. Миронова и В. Н. Смирнова, толщина льда по нормам СП 31.13330.2018 определяется путем статистической обработки данных натурных наблюдений либо путем выполнения расчетов по гидрометеорологическим условиям района[1]. Исходя из п. 5.3 указаний по расчету нагрузок и воздействий от волн, судов и льда на морские гидротехнические сооружения, толщину льда h_d следует определять во формуле:

$$h_d = 0,034n\sqrt{R}, \quad (1)$$

где n – коэффициент местных условий, зависящий от начальной температуры, скорости ветра, наличия снега и т.д. (варьируется от 0,6 до 0,8); R – индекс замерзания от начала образования ледового покрова до рассматриваемого момента времени, °Ссут.

После проведенных полевых исследований свойств ледяного покрова и сопоставления расчетных и натурных данных для параметров льда авторами было установлено, что толщина льда в ледяном поле соответствует расчетной толщине ровного льда.

Таким образом, определение параметров ледяного покрова на замерзающих акваториях по рекомендуемому в нормах СП 31.13330.2018 методу является достоверным.

В работе И.М. Кузнецова и А. Л. Гарманова рассмотрены эмпирические формулы для расчета толщины ровного льда в зависимости от различных параметров, предлагаемые разными авторами [2]. Наиболее интересны формулы, учитывающие количество градусо-дней мороза, прошедших с момента начала наблюдений, и толщину снежного покрова [3, 4; 5; 6]. Физический смысл одного из эмпирических коэффициентов состоит в том, что он соответствует отношению теплопроводностей льда и снега. Теплопроводность снега сильно зависит от плотности и изменяется в широких пределах [7]. Расчетные значения, наиболее близкие к экспериментальным данным, дает формула Доронина (2) [3], модифицированная Кузнецовым и Гармановым, при условии, что эмпирический коэффициент в ней, соответствующий отношению теплопроводностей льда и снега, взят из формулы Шестерикова [5]:

$$H = -6,9h + \sqrt{(6,9h + H_0) + 12\Sigma(-T_a)}, \quad (2)$$

где H – толщина льда; h – толщина снега; H_0 – начальная толщина льда; $\Sigma(T_a)$ – количество градусо-дней мороза, прошедшее с начала наблюдений.

По формуле (2) был произведен расчет нарастания толщины льда и сравнение с экспериментальными данными. Исследования позволили получить данные о состоянии ледяного покрова центральной части Арктического бассейна, было установлено, что расчетные значения толщины льда, наиболее близкие к экспериментальным, дает формула Ю. П. Доронина с эмпирическими коэффициентами Н. П. Шестериковым.

В докладе Р. Ю. Горгуца предлагается инженерная методика расчета толщины льда с учетом данных Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России. Было предложено выполнять оценку толщины льда следующим способом:

1. Определить ГМС Росгидромета, расположенной вблизи места определения толщины льда, с самым длинным и надежным периодом наблюдений. Наиболее предпочтительными являются ГМС с автоматическими измерениями температуры наружного воздуха. Для снижения неопределенностей при статистическом анализе требуются записи с периодом измерения не менее 20 лет.

2. Собирать сведения об исторических среднесуточных температурах воздуха для выбранной ГМС. Эта информация может быть получена из метеорологических ежемесячников или со специализированных сайтов в сети Интернет.

3. Создать электронную таблицу для вычисления индекса намерзания льда R_d по формулам (1–4) [8] для каждой зимы, начиная со времени наступления устойчивых холодов. При среднесуточной температуре воздуха выше 0°C индекс R_d не накапливается до первого длительного периода низких температур.

4. Определить наибольшее значение индекса намерзания льда R_d для каждой зимы.

5. Выполнить статистический анализ полученных индексов намерзания для определения экстремальных значений с заданными периодами повторяемости. Как правило, для целей проектирования требуются сведения об индексах намерзания с периодом повторяемости один раз в 100 лет.

6. По формуле (3) вычислить толщины льда для периода времени, в течение которого выполнялись натурные наблюдения за толщиной льда:

$$h_d = \left(\frac{2\lambda_d}{\rho_d L} R \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где L – удельная теплота кристаллизации (плавления) льда, принимаемая равной $3,25 \times 10^5$ Дж/кг; λ_d – теплопроводность соленого льда, Вт/(м²×°К), принимаемая в зависимости от температуры воздуха t_a ; ρ_d – плотность соленого льда, кг/м³; $R(R_d)$, индекс намерзания, °С*сут.

7. Выполнить сравнение вычисленных толщин льда с замеренными в натуре (сведения о натуральных толщинах льда могут быть получены из гидрологических ежегодников

Росгидромета, по фондовым данным государственных организаций или частных компаний), а также уточнить коэффициенты формулы (3) в несколько итераций до достижения приемлемой сходимости (3–5 %).

8. Оценить расчетную толщину льда с заданным периодом повторяемости на основе экстремальных индексов намерзания льда Rd по формуле (3) с использованием уточненных коэффициентов.

Расчетную толщину льда необходимо сравнивать с натурными данными измерений толщин льда исследуемого участка с целью выявления степени соответствия принятых коэффициентов характеристикам физических процессов, оказывающих влияние на рост ледяного покрова.

Фундаментальной формулой расчёта нарастания льда является формула Стефана, полученная в 1891 г. [9]:

$$h = 3,4 \cdot \sqrt{Q \cdot t}, \quad (4)$$

где h – предрасчётная толщина льда; t – время, промерзания льда в сутках; Q – среднесуточная температура C° воздуха.

На сегодняшний день, в связи с изменением климата, практика показывает, что более реальным, для открытых акваторий будет вид:

$$h = 2,2 \cdot \sqrt{Q \cdot t}, \quad (5)$$

а для проливов с сильным течением вид:

$$h = 1,6 \cdot \sqrt{Q \cdot t}, \quad (6)$$

Полуэмпирическая формула Н. Н. Зубова позволяет, зная начальную толщину льда, сделать предрасчёт толщины льда на определённую дату по ориентировочной сумме градусо-дней мороза:

$$H = -25 + \sqrt{(25 + h_0)^2 + 8\Delta F}, \quad (7)$$

где h_0 – начальная толщина льда; H – конечная толщина льда; ΔF – сумма градусо-дней мороза, рассматриваемого периода [9].

Заключение

Отечественными и зарубежными авторами разработано несколько рабочих методик по определению толщины ледяного покрова, однако все рассмотренные решения рекомендовано сравнивать с данными фактических измерений толщин льда в исследуемых районах. Перспективным развитием рассмотренных методик будет разработка инструмента для определения толщины льда в выбранном участке без необходимости выполнения сравнения результатов расчета с натурными данными. В качестве такого инструмента может быть использована компьютерная программа, позволяющая на основе гидрометеорологических данных исследуемого района выполнять расчет параметров ледового покрова с использованием комбинированной методики определения толщины льда.

Библиографический список

1. Миронов, М. Е. О выборе параметров ледяного покрова для расчета ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения / М. Е. Миронов, В. Н. Смирнова // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 2014. – Т. 272. – С. 51-58.

2. Кузнецов, И.М. О практическом использовании формул для расчета толщины морского льда / И.М. Кузнецов, А.Л. Гарманов // Метеорология и гидрология. – 1987. – № 11. С. 116–120.
3. Доронин, Ю.П. К вопросу о нарастании морского льда // Проблемы Арктики и Антарктики. – 1959. – № 1. С. 73–79.
4. Доронин, Ю.П. Рост и таяние морского льда // Морской лед. Сбор и анализ данных наблюдений, физические свойства и прогнозирование ледовых условий: Справочное пособие. – СПб.: Гидрометеиздат, 1997. – С. 107–125.
5. Шестериков, Н.П. Некоторые особенности нарастания припайного льда в районе Мирного // Проблемы Арктики и Антарктики. – 1963. – № 13. С. 19–26.
6. Николаева, А.Я. Метод расчета ледовых условий (на примере моря Лаптевых) / А.Я. Николаева, Н.П. Шестериков // Труды ААНИИ. – 1970. – Т. 292. С. 143–217.
7. Кузьмин, П.П. Физические свойства снежного покрова / П.П.Кузьмин. – Л.: Гидрометеиздат, – 1957. – 179 с.
8. Горгуца, Р. Ю. Расчет толщины льда на основе статистических данных о метеорологических условиях местности / Р. Ю. Горгуца, М. Е. Миронов, А. В. Соколов // ГИДРОТЕХНИКА. XXI ВЕК. – 2015. – №1(21). – С. 52-55.
9. Кобленц, И. Я. Как безопасно работать на однолетнем ледовом припае в Арктике / И. Я. Кобленц. – Текст : электронный // GO ARCTIC : [сайт]. – URL: <https://goarctic.ru/work/kak-bezopasno-rabotat-na-odnoletnem-ledovom-pripae-v-arktike/> (дата обращения: 02.02.2023).

УДК 67.03

DOI: 10.46960/polmech_2023_159

М. А. Большедворова, Т. Э. Уварова

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЛЬДА

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

В рамках освоения Арктики одной из основных проблем является труднодоступность региона и обеспечение его качественными и доступными материалами и ресурсами. Использование льда и композитных материалов на его основе является перспективным направлением в развитии дальнейшего развития этого региона.

В статье рассмотрены способы повышения износостойкости льда путем армирования и добавления модифицирующих добавок. Степень повышения прочности зависит не только от вида добавки, но также от способа их комбинации.

Ключевые слова: армирование льда, ледяные композитные материалы.

Введение

Лед как конструкционный материал широко используется в настоящее время для строительства временных инженерных сооружений различного назначения: дороги, аэродромы, причалы, дамбы, искусственные острова и т. п. Основной проблемой эксплуатации таких сооружений является износ льда, как конструкционного материала под действием эксплуатационных нагрузок. Анализ научных исследований и практического опыта показал, что перспективным направлением решения проблемы деградации льда может быть его модификация различными способами для повышения эксплуатационных характеристик.

Повышение износостойкости льда и композитных материалов на его основе является важной проблемой при использовании их как строительного материала для дорог, переправ, взлетно-посадочных полос, разгрузочных площадок и других сооружений.

Методы повышения прочности и износостойкости льда

Использованию льда в качестве полноценного конструктивного материала препятствует высокая хрупкость и низкая прочность ледовой матрицы [1]. Увеличить несущую способность ледяного покрова можно следующими способами [2]:

- намораживанием дополнительных слоев льда;
- армированием льда и созданием композитных материалов с ледяной матрицей.

Если намораживание льда эффективно только при относительно тонких слоях (до 50 см) и толщина намороженного слоя не превышает 30% от естественной толщины льда [2], то различные структурные изменения льда, такие как его армирование и введение модифицирующих добавок, имеют большую перспективу в развитии Арктического материаловедения.

Методы армирования льда с созданием ледяных композитов разделяют на два типа [3]: микро- и макро-армирование. В первом случае армирующими материалами служат водорастворимые полимеры, дисперсные частицы и короткие волокна, а во втором протяженные материалы, такие как сетки, полотна, материалы с длинными волокнами. Тип наполнителя и его концентрация существенно влияют на зернистую структуру льда, а следовательно, и на его прочность.

Для льда основными показателями прочности являются прочность на изгиб и сжатие, а также сопротивление удару. Однако национальных стандартов по определению характеристик модифицированного льда не существует.

В работах [4-6] приведены испытания с армированием льда геосинтетическими материалами. При введении геосинтетического материала в плиту происходит уменьшение упругого прогиба и для разрушения необходимо затратить в несколько раз больше энергии, чем для разрушения неармированного образца. На рис. 1 представлена диаграмма, иллюстриру-

ющая характер разрушения неармированного и образцов при испытании на изгиб. Максимальное увеличение работы льда (до пяти раз) наблюдалось при армировании геосеткой на основе стекловолокна.

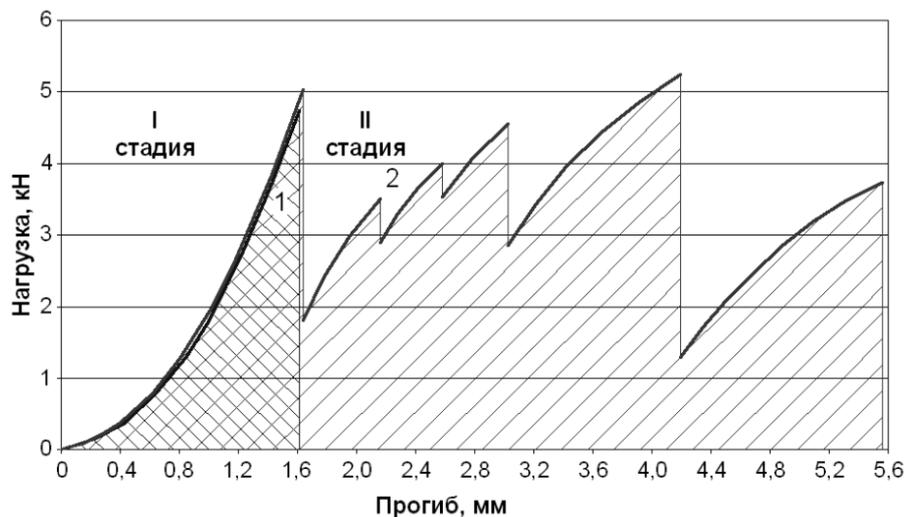


Рис. 1. Диаграмма, иллюстрирующая характер разрушения армированных и неармированных балок из льда:

1 – неармированный образец; 2 – армированный образец [4]

Кроме того отмечается, что внедрение армирующего материала, в данном случае сетки, не влияет на формирование кристаллов льда, их разрыва не происходит. Но есть риск образования воздушных пузырьков вокруг внедренного материала, что может сказаться на его прочности.

При исследовании армирования льда геосинтетическими материалами [4-6] установлено, что такое армирование позволяет повысить их сопротивление растягивающим напряжениям от силовых и температурных воздействий, уменьшить трещинообразование и увеличить износостойкость материала.

Увеличить износостойкость льда можно путем внедрения древесных частиц и коротких волокон. Так, в исследовании [7] представлена сравнительная характеристика пайкрита – материала на основе древесных опилок (приблизительно содержит 14% массы опилок и 86% массы воды) с «новым» пайкритом, в котором в качестве волокнистого материала выступала газетная бумага, а в качестве добавки улучшающей связи между волокнами использовался натрий-карбоксиметил-целлюлозно-желатиновый полиэлектролитный комплекс (SGPS). Установлено оптимальное соотношение составляющих «нового» пайкрита, при котором прочность его на сжатие увеличивается приблизительно в 1,75 раз и прочностью на изгиб приблизительно в 1,65 раз больше по сравнению с прочностью классического пайкрита.

В качестве волокнистого наполнителя также может выступать базальтовое волокно или волокна сена [8]. Введение таких наполнителей приводит к увеличению предела прочности льдокомпози́тов в два-три раза при испытаниях на изгиб. Неармированные образцы льда раскалывались хрупко вдоль действия нагружающего усилия, а армированные образцы демонстрировали разрушение по вязкому механизму из-за механического сцепления армирующих волокон с ледяной матрицей.

Управлять свойствами льда возможно при помощи введения модификаторов на основе высокомолекулярных соединений. Введение таких модификаторов успешно используется в различных спортивных сооружениях (катках, бобслейных трассах) [9]. На рис. 2 приведены зависимости концентрации модификаторов на прочностные свойства льда с армированием и без.

Таким образом, концентрация модификаторов 150-300 ppm способствует повышению прочности на изгиб, в обратном случае, прочность уменьшается.

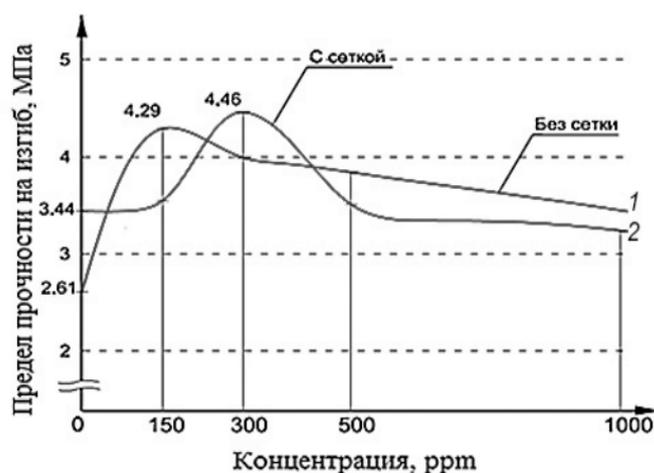


Рис. 2. Влияние концентрации модификаторов на прочностные свойства льда без сетки 1 и армированного геотекстильной сеткой 2 [9]

На рис. 3 приведена диаграмма зависимости прочностных свойств композиционных материалов с ледовой матрицей, армированных различными наполнителями - полимерными, минеральными, волокнистыми, а также биологическими. Наибольший эффект достигается при армировании льда нитями и сетками, а также может быть достигнут лучший эффект при комбинировании различных методов [9].

Необходимо заметить, что есть возможность послойного «запирания» модификаторов в массиве льда при отводе тепла к окружающему воздуху, что позволяет значительно увеличить несущую способность льда при оптимально подобранном распределении модификаторов [1].

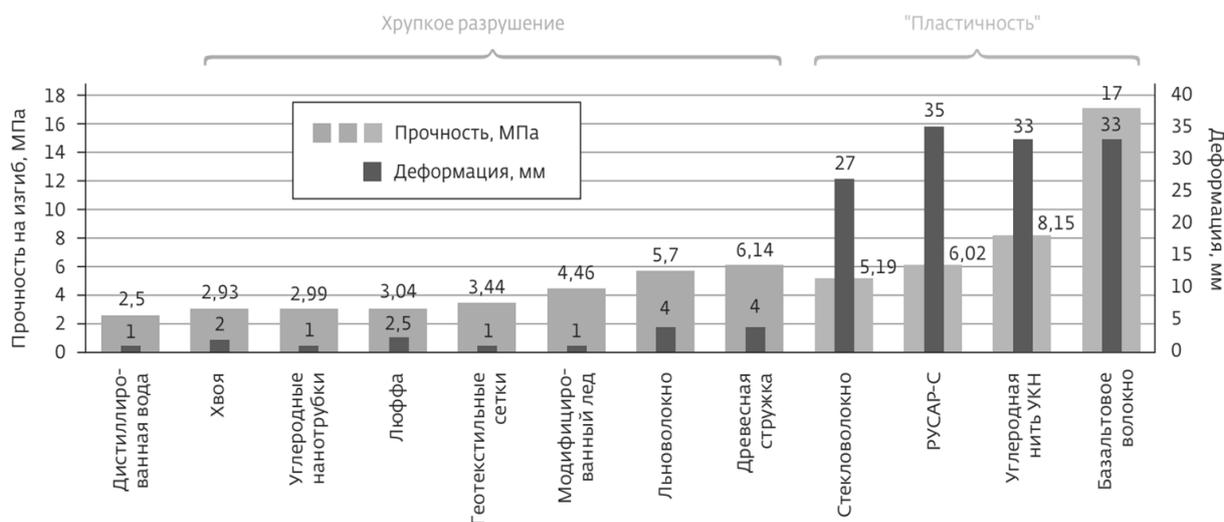


Рис. 3. Сравнительная характеристика композиционных материалов с ледовой матрицей с разными наполнителями [9, 10]

Заключение

Учитывая высокую стоимость материалов, завозимых в Арктику с материка, перспективно использование льда в качестве конструкционного материала для дорог, переправ, взлетно-посадочных полос, разгрузочных площадок и других сооружений.

На основе выполненного обзора можно сделать следующие выводы:

- исследование модифицирующих добавок и армирующих материалов является приоритетным направлением в рамках освоения Арктики;
- увеличение несущей способности льда возможно путем его армирования, а также введения модифицирующих добавок;

- использование армирующих добавок существенно изменяет поведение льда при испытаниях на изгиб
- наилучший эффект увеличения прочности льда показывает совместное использование армирования с модифицирующими добавками.

Применение композитных материалов с ледовой матрицей позволит повысить износостойкость при использовании их как строительного материала для дорог, переправ, взлетно-посадочных полос, разгрузочных площадок и других сооружений в рамках освоения Арктики, что несомненно положительно повлияет на дальнейшее развитие региона.

Библиографический список

1. Новый метод упрочнения ледовых массивов, формируемых в условиях естественного холода / Г. Ю. Гончарова, Р. О. Степанов, Т. С. Разомасова [и др.] // Российский химический журнал. – 2021. – Т. 65. – № 3. – С. 33-41.
2. Обоснование конструктивно-технологических решений ледовых переправ, армированных геосинтетическими материалами: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.23.11 / Якименко Ольга Владимировна; [Место защиты: Сиб. автомобил.-дорож. акад. (СибАДИ)]. - Омск, 2011. - 23 с.;
3. Васильев, Н.К. Методы упрочнения и армирования льда для конструкций гидротехнических сооружений из ледяных и льдогрунтовых композитов / Н.К. Васильев, А.А. Иванов, И.Н. Шаталина // Вестн. НГУ. Сер. матем., мех., информ. – 2013. – Т. 13. – Вып. 3. – С. 31–37
4. Якименко, О. В. Армирование ледовых переправ // Техника и технологии строительства. – 2015. – № 2(2). – С. 68-73.
5. Сиротюк, В.В. Расширение опытно-производственного внедрения усиления ледового покрова геосинтетическими материалами / В. В. Сиротюк [и др.] // Техника и технологии строительства. – 2015. – № 2(2). – С. 58-68.
6. Paul, D. Barrette, Bradley Butt, Beam testing of reinforced ice in the context of winter roads, 25th IAHR International Symposium on Ice Trondheim, 23 – 25 November, 2020.
7. JiaHui Li, Zhen Wei, Chao Wu, Preparation and properties of novel building materials at low temperature, Materials & Design, Volume 67, 2015, Pages 464-468, ISSN 0261-3069, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.040>.
8. Сыромятникова, А. С. Перспективы применения ледяных композиционных материалов для строительства ледовых переправ / А. С. Сыромятникова, Л. К. Федорова // Арктика: экология и экономика. – 2022. – Т. 12. – № 2(46). – С. 281-287.
9. Создание и исследование композиционных материалов на основе льда / Г. А. Нужный, В. М. Бузник, Р. Н. Черепанин [и др.] // Полярная механика. – 2018. – № 4. – С. 22-29.;
10. Бузник, В. М. Материалы для освоения арктических территорий - вызовы и решения / В. М. Бузник, Н. И. Василевич // Лаборатория и производство. – 2020. – № 1(11). – С. 98-107.

УДК 624.147

DOI: 10.46960/polmech_2023_163

Н.К. Васильев

ЛЕДЯНЫЕ КОМПОЗИТЫ. ИССЛЕДОВАНИЯ И ДОСТИЖЕНИЯ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ

АО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева», г. Санкт-Петербург

Приведен аналитический обзор исследований, посвященных армированию льда. Со времени предыдущего обзора 2015 г. по применению ледяных и льдогрунтовых в арктических регионах опубликованы результаты многочисленных исследовательских работ по методам упрочнения льда, создания и применения ледяных композитов.

Отмечено, что количество публикаций с 2016 по 2023 гг. и исследований, посвященных ледяным композитам, исчисляется несколькими десятками и тенденция роста их количества сохраняется. Это обусловлено интенсивным освоением регионов холодного климата, в которых рационально использовать лед, как самый доступный материал для данных регионов в технологическом, экономическом и логистическом отношении.

Ключевые слова: обзор исследований, ледяные и льдогрунтовые композиты, армирование льда, ледяные сооружения.

В арктических регионах лед самый доступный материал, и наряду с его экологической безопасностью и низкой стоимостью имеет низкую плотность и относительно высокую прочность. Таким образом, использование льда в качестве строительных материалов для замены строительной стали и бетона обеспечивает альтернативу инженерным инфраструктурам и временным постройкам в Арктике. Однако имеются и существенные ограничения его использования из-за ползучести при температурах, близких к 0°C, зависимости механических свойств от температуры и хрупкости при низких температурах. Чтобы сделать лед более пригодным для строительства путем создания ледяных композитов, можно значительно повлиять на его механические характеристики, снизить ползучесть, повысить прочность на сжатие, изгиб и растяжение, и ударную вязкость. Ледяные композиты успешно применяются при строительстве взлетно-посадочных полос, ледовых переправ, ледяные гостиниц, куполов, дворцов для увеселений, различных хранилищ и для работ со льда.

В транспортном и гидротехническом строительстве льдогрунтовые композиты могут быть использованы в водонепроницаемых элементах плотин и дамб для содержания отходов, в качестве оснований автомобильных и железных дорог, а также могут быть использованы для укрепления нестабильных грунтовых оснований объектов магистральных трубопроводов.

Со времени опубликования в 2015 г. предыдущего обзора исследований по применению ледяных и льдогрунтовых в арктических регионах [1] проведено множество исследовательских работ по методам упрочнения льда, создания и применения ледяных композитов. Количество публикаций с 2016 по 2023 гг. и исследований, посвященных ледяным композитам, исчисляется несколькими десятками и тенденция роста их количества сохраняется. Получили развитие все три группы рассмотренных в обзоре ледяных композитов:

- (I) ледяные композиты, армированные геосинтетическими материалами;
- (II) криогелевые льдогрунтовые композиты;
- (III) пайкерит – композит, состоящий из древесных опилок (или какого-либо другого вида древесной массы, например, бумажной пульпы) и льда.

Области применения ледяных и льдогрунтовых композитов постоянно расширяются и за последние годы появились новые области их применения: для укрепления грунтовых оснований объектов магистральных трубопроводов [2], для укрытий средств ПВО [3] и для образовательных целей при строительстве ледовых сооружений [4].

I. Ледяные композиты, армированные геосинтетическими материалами

В 2019 г. Национальным исследовательским советом Канады опубликован доклад [5], посвященный применению и исследованию ледяных композитов первой группы - ледяных композитов, армированных геосинтетическими материалами. Подробно рассмотрены различные типы георешеток. Показано, что полимерные георешетки обладают желаемыми характеристиками, в том числе хорошей прочностью на растяжение и восстанавливаемостью. Этот материал также широко используется в дорожных работах, где он поддерживает движение автотранспорта по мягкому грунтовому основанию. Предоставлена информация о распространенных полимерных георешетках, имеющих в продаже. Особенно подчеркивается роль геоматериалов для повышения безопасности эксплуатации ледяных трасс посредством значительного повышения сопротивления распространению трещин.

В том же 2019 г. в Приамурском государственном университете им. Шолом-Алейхема проведены экспериментальные и численные исследования влияния армирования на несущую способность ледовых переправ [6]. Эти исследования проводились для различных схем армирования. Экспериментальные результаты сопоставлены с результатами численного анализа напряженно-деформированного состояния с использованием программного комплекса ANSYS и выявлено их хорошее совпадение. Теми же авторами предложено [7] использование армирующих каркасов из полипропиленовых труб диаметром 32 мм, которое приводит к увеличению в три раза величины нагрузки выдерживаемой ледовым покровом.

Одним из примеров реализации идеи применения геосинтетики (геосетки ГЕОН 40/40) для усиления ледяного покрова является ледовая переправа длиной 6,3 км в Иркутской области между населенными пунктами п. Игжей (Усть-Удинский район) и п. Балаганск (Балаганский район) [8]. Практическая реализация усиления ледового покрова армированием геосеткой выявила положительные моменты: простая технология укладки, повышенная безопасность эксплуатации трасс, возможность многократного применения геосетки в последующие зимы. Использование геоматериала может осуществляться на следующий год, так как после схода ледяного покрова геосетка не теряет своих свойств, а скатывается в рулоны и убирается на хранение, что приносит экономическую выгоду от строительства переправы в течение нескольких лет. Геосетка принимает на себя растягивающие напряжения, возникающие от температурных и транспортных нагрузок.

Разработанный в [9] способ армирования ледового покрова в нижней зоне приведен на рис.1. В работе [10] даны рекомендации по использованию геосинтетических материалов ГК «МИАКОМ» для армирования ледовых переправ.

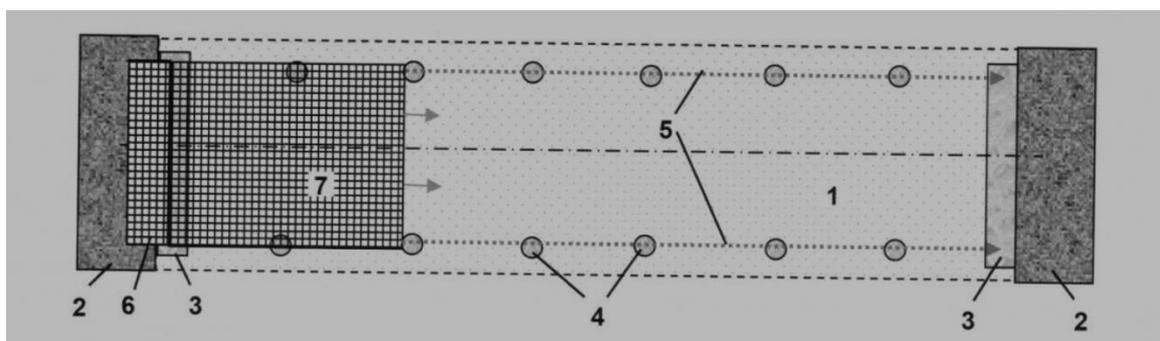


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая способ нижнего армирования ледового покрова:

1 – естественный ледяной покров; 2 – берега; 3 – майны во льду для подачи и приема армирующего полотна; 4 – лунки для протягивания тросов; 5 – подо льдом; 6 – рулон геосинтетического материала; 7 – полотно геосинтетики, протаскиваемое подо льдом

II. Криогелевые льдогрунтовые композиты

Разработки и исследования в области их применения в последние годы продолжены, и в основном они касаются криогелей на основе поливинилового спирта (ПВС). Это связано

не только с тем, что в состав композитов на основе ПВС входят экологически безопасные продукты, но и с тем, что варьируя характеристики ПВС (молекулярную массу, содержание остаточных ацетатных групп, концентрацию), состав растворителя, природу добавок, а также режим криогенной обработки (температуру и продолжительность замораживания и др.), можно в широких пределах регулировать физико-химические и реологические показатели криогелей, их макро- и микроструктуру. Криогелевый льдогрунтовый композит формируется после цикла замораживания – оттаивания в результате криотропного гелеобразования. С каждым циклом прочность криогеля увеличивается.

В настоящее время имеется опыт использования криогелевых композитов в нефтегазовом комплексе, однако опыт ограничен единичными случаями: в ПАО «Газпром» на Бованенково в 2016 г. удачно проведен эксперимент по укреплению грунтов откосов и насыпей применением криогелей, кроме этого, известна технология укрепления устьев скважин на территориях распространения многолетнемерзлых грунтов; разработан метод по использованию криогелей в околотрубном пространстве [11].

Метод (рис. 2) включает нагнетание криогелеобразующего раствора ПВС в грунт основания дна траншеи трубопровода через скважины с двух сторон так, что под основанием траншеи образуется прочная опорная система в виде пространственной решетки из криогелевого льдогрунтового композита. Этим методом устраняются различные отклонения (изгиб трубы, перенапряжение), возникающие при эксплуатации трубопровода. Слой грунта, скрепленный криогелеобразующей композицией, защищает слои грунта от смещений друг относительно друга, а также служит гидроизоляцией в ходе сезонных колебаний температур.

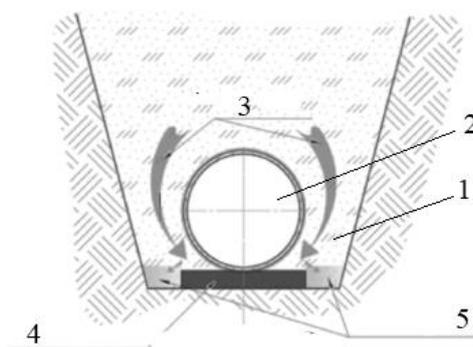


Рис. 2. Схема применения криогелевых грунтовых композитов для трубопроводов [2, 12]:

1 – траншея; 2 – трубопровод; 3 – движение подземных вод;
4 – криогелевый льдогрунтовый композит; 5 – линейные дренажи

Продолжены исследования по созданию криогелевых грунтовых композитов на основе водных растворов ПВС [13, 14, 15]. В работе [13] проведены многочисленные НН-испытаний на трехосное сжатие образцов криогелевых льдогрунтовых композитов с различным содержанием ПВС в водном растворе и установлено, что их прочностные характеристики, такие как угол внутреннего трения и удельного сцепления существенно растут с ростом количества циклов замораживания-оттаивания по сравнению с неармированным грунтом, испытанного при тех же условиях. Исследования проведены на песчанистых грунтах с варьированием содержания ПВС в водном растворе от 5 до 10%.

В работе [14] проведены исследования испытания по упрочнению соленого льда полимером ПВС, испытано 53 образца льдокомпозитов с различным содержанием ПВС. Зафиксировано повышение прочности на сжатие в 3 и более раз и снижение ползучести в 1,9 раза по сравнению с неармированным соленым льдом.

III. Пайкерит

Пайкерит обладает полезными для использования в качестве строительного материала свойствами, в частности, низкой скоростью таяния вследствие низкой теплопроводности, бо-

лее высокой прочностью и вязкостью разрушения по сравнению со льдом. Использование пайкерита было предложено во время Второй мировой войны Джеффри Пайком как материала для изготовления огромных, непотопляемых авианосцев (проект Аввакум, который не успели реализовать). Подробный исторический экскурс по созданию авианосца из пайкерита опубликован сотрудниками университета «Горный» (Санкт-Петербург) в 2016 г. [15].

К настоящему времени накоплен некоторый опыт строительства ледовых сооружений из пайкерита. Наиболее значительные проекты последних лет по созданию ледовых сооружений из пайкерита: модель храма «Святого Семейства», построенного в 2015 г. в Юуука, Финляндия, в масштабе 1:5 с башней высотой 21 м и Ледяная башня «Фламенко», возведенная в 2017–2018 гг. в Харбине в Китае (рис. 3) [16, 17]. Эти сооружения созданы путем распыления при отрицательной температуре древесно-волоконистой пульпы на надувную мембрану, удерживаемую веревочной сеткой. Высота Ледяной башни Фламенко составила 30,5 м при толщине слоя армированного льда – 7,0 см вверху и 40,0 см у основания. Такие параметры ледяного сооружения достигнуты за счет повышенной прочности льда, армированного целлюлозными волокнами [16,17].

Наряду с продолжением исследований свойств «традиционного» пайкерита (льда, армированного древесными опилками) проведены исследования по армированию льда другими производственными отходами переработки целлюлозы, например первичными целлюлозными волокнами. При добавлении в пульпу полиэлектролитного комплекса на основе натрий карбоксиметилцеллюлозы получен еще более прочный льдокомпозит, названный в публикации [18] «новым пайкеритом». Проведены исследования по армированию льда волокнами из других материалов, в частности базальтовыми волокнами [19,20]. Армирование льда базальтовыми волокнами и материалами на их основе (базальтовыми ровингами и др.) повышает прочностные характеристики испытанных образцов льдокомпозитов в 4-6 раз по сравнению с образцами пресноводного льда [19].



Рис. 3. Вид Ледяной башни «Фламенко» в Харбине, Китай

Заключение

В настоящем обзоре приведена только малая часть исследований последних 5-7 лет, посвященных армированию льда. Многочисленность исследований и наблюдаемый рост публикаций в последние годы обусловлены интенсивным освоением регионов холодного климата, в которых рационально использовать лед, как самый доступный материал для данных регионов в технологическом, экономическом и логистическом отношениях. Но невысо-

кие прочностные свойства и хрупкость сильно ограничивают его применение, эту проблему могут решить ледяные и льдогрунтовые композиционные материалы, создаваемые различными методами армирования ледовой матрицы.

Библиографический список

1. Vasiliev, N.K. Review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions / N.K. Vasiliev [et al.] // *Cold Regions Science and Technology*, 115 (2015). – P. 56–63. DOI:10.1016/j.coldregions. 2015.03.006.
2. Алтунина, Л. К. Применение криогелей для решения задач рационального природопользования и эксплуатации объектов магистральных трубопроводов в условиях Арктики / Л. К. Алтунина [и др.] // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. 2020.10(2). С. 173–185. DOI: 10.28999/2541-9595-2020-10-2-173-185.
3. Слободчиков, Н. А. К вопросу об использовании облегченных сооружений из пайкерита для арктических районов России / Н. А. Слободчиков, Н. К. Васильев, В. И. Моисеев // *Системный анализ и логистика*. – 2016. 2 (13). – С. 29-34.
4. Pronk, A. Success factors in the realization of large ice projects in education / A. Pronk [et al.] // *Int. Journal ofspacestructures*. – 2021. – Vol. 36, Issue 1. [https:// doi.org/10.1177/09560599219909](https://doi.org/10.1177/09560599219909)
5. Barrette, P.D. Reinforcement of ice covers for transportation: Material investigation and preliminary laboratory testing. OCRE-TR-2018-031.2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.33892.40322.
6. Zemlyak, V. L. Experimental and numeral inverstigation of the influence of reinforcement on the load-carrying capacity of ice crossings // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2019. – Vol. 56. – No. 1. DOI 10.1007/s11204-019-09566-x
7. Васильев, А.С. Экспериментальное исследование поведения ледовых образцов при усилении трубчатыми стержнями из полипропилена / А.С. Васильев, В.Л. Земляк, В.М. Козин // *Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики*. – 2021. – Томск. – С. 154-157.
8. Карпунин, А.А. Использование геосинтетических материалов при сооружении и эксплуатации ледовых переправ в Иркутской области / А.А. Карпунин, С.С. Шабуров // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. – 2016. – № 4 (19). – С. 114–121. DOI: 10.21285/2227-2917-2016-4-114-121.
9. Якименко, О.В. Усиление ледовых переправ геосинтетическими материалами / О.В. Якименко, В.В. Сиротюк // *СибАДИ*. – Омск, 2015. – 169 с.
10. Рекомендации по использованию геоситетических материалов ГК «МИАКОМ» для армирования ледовых переправ [Электронный ресурс]. – URL: http://www.miakoming.ru/Info-Tech/Ledovie_perepravu.
11. Дудникова, С.А. К вопросу о создании грунтовых оснований с улучшенными гидроизоляционными, теплоизоляционными и механическими свойствами применением полимерных криогелей / С.А. Дудникова, В.Ю. Дудников, Г.Г. Осадчая // *Успехи современного естествознания*. – 2021. – № 3. – С. 43-48.
12. Altunina, L.K. Organizational-technical measures for cryogels application to increase the soil bearing capacity in the construction and operation of the pipeline transport facilities / L.K. Altunina [et al.] // *Pipeline Science and Technology*. – 2019. – Vol. 3. – No.2. DOI: 10.28999/2541-9595-2019-9-2-164173
13. Krainiukov, A. Performance of silty sand reinforced with aqueous solution of polyvinyl alcohol subjected to freeze-thaw cycles / A. Krainiukov [et al.] // *Cold Regions Science and Technology*. 2020. P.174 -182. DOI :10.1016/j.coldregions.2020.103054.
14. Лозинский, В.И. Ледовые композиты на основе криогелей / В.И. Лозинский, Н.К. Васильев // *Арктическое материаловедение: состояние и развитие*. – М., 2021. – С. 312-316.

15. Ковалев, О.В. Пайкерит–льдокомпозит Второй мировой войны / О.В. Ковалев, М.Н. Андреев, В.В. Райс // *Лёд и Снег*. – 2016. 56(1). – С. 119-127. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-119-127>
16. Pronk, A. Design and construct of the 30.5 meter Flamenco Ice Tower. Conference: IASSSymposium. 2018. MIT, Boston, USA.
17. Li, Q. Structural performance under solar radiation of the 30.5-meter-high Flamenco Ice Tower / Q. Li [et al.] // *Int. J. of Space Structures*. – 2021. – Vol. 36 (1). <http://doi.org/10.1177/09560599211005095>
18. Buznik, V.M. Strengthening of ice with basalt materials / V.M. Buznik [et al.] // *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 196. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103490
19. Syromyatnikova, A. S. Reinforcement of Composites Based on Fresh Ice with Natural Filers / A. S. Syromyatnikova [et al.] // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. Vol. 11. No 4. P. 955—957. DOI: 10.1134/S2075113320040371.
20. Бузник, В.М. Армируемые композиционные материалы с ледовой матрицей / В.М. Бузник, Р.Н. Черепанин, Н.К. Васильев // *Арктическое материаловедение: состояние и развитие*. – М., 2021. – С. 304-312.

УДК 539.3

DOI: 10.46960/polmech_2023_169

В.П. Глазырин¹, М.Ю. Орлов¹, Ю.Н. Орлова²

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЛЬДА ПРИ УДАРНЫХ И ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗКАХ

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск,²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск

Приведены результаты экспериментального и численного исследования разрушения льда при ударных и взрывных нагрузках. Модель поведения льда рассматривается с позиций феноменологической макроскопической теории механики сплошных сред на основе фундаментальных законов сохранения. Лед описывается однофазной, сжимаемой, пористой, упруго-пластической средой с учетом прочностных свойств, ударно-волновых явлений и совместного образования отрывных и сдвиговых разрушений. Определяющие соотношения задаются уравнениями Прандтля – Рейса при условии текучести Мизеса.

Экспериментальные исследования проведены при помощи легкогазовой баллистической установки и при технической поддержке ООО «КузбасСпецВзрыв».

Численные расчеты проведены при помощи некоммерческого пакета прикладных программ «Удар. Ос. 1».

Проведены также тестовые расчеты для проверки алгоритмов и феноменологической модели разрушения льда. Результаты расчетов представлены в виде фото, конечных конфигураций, а также графиков и таблиц.

Ключевые слова: Лед, модель, метод, удар, взрыв, расчет, эксперимент, разрушение, кратер, майна.

Введение

В настоящее время исследование поведения льда при ударных и взрывных нагрузках является сложной и актуальной научно-технической проблемой. Основная сложность сформулирована еще в прошлом веке и заключается в его физико-механических свойствах, которые мало изучены в условиях динамических нагрузок.

Лед обладает уникальными пластическими свойствами, его прочность зависит от температуры. Основные концепции разрушения льда еще только разрабатываются. Для разработки адекватных феноменологических моделей, необходимы систематические теоретико-экспериментальные исследования направленные на изучение основных особенностей деформирования и разрушения льда под нагрузкой. Актуальность таких исследований обусловлена широким кругом приложений, в том числе добычей углеводородов в вечной мерзлоте, проектированием портов в северных регионах нашей страны, разработкой противоударных защит элементов летальных аппаратов (например, защита Уиппла), борьбой с ледовыми заторами на сибирских реках, необходимостью безопасного разрушения переправ в весенние периоды и т.п. [1-4].

В настоящей работе представлены результаты исследований процесса деформирования и разрушения льда при ударных и взрывных нагрузках.

Феноменологическая модель поведения льда под нагрузкой

Модель поведения льда рассматривается с позиций феноменологического макроскопического подхода на основе фундаментальных законов сохранения. Лед моделируется однофазной, сжимаемой, пористой и упруго-пластической средой с учетом ударно-волновых явлений и фрагментарного разрушения материалов. В процессе разрушения льда допускается

появление очагов разрушения, новых свободных и контактных поверхностей, эволюционирующих в процессе нагрузки. Определяющие соотношения задаются в форме Прандтля – Рейса при условии текучести Мизеса. Уравнения состояния льда взято в форме Уолша [4]. Действие продуктов детонации описано при помощи уравнений Ландау – Станюковича [5].

Численный метод расчета

В качестве основного метода исследований используется численный лагранжев метод Г.Р. Джонсона, модифицированный для решения задач пробития преград и проникания ударников. Оригинальность метода заключается в новом способе выделения поверхностей разрыва сплошности материалов, который не накладывает серьезные ограничения на решение современных динамических много-контактных задач механики деформируемого твердого тела.

Численное моделирование проведено в двумерной осесимметричной постановке при помощи некоммерческого программного комплекса «Удар. Ос.1». В зависимости от класса решаемых задач использовалось несколько решателей [6].

Экспериментальное исследование процесса разрушения льда при ударе и взрыве

Экспериментальные исследования проведены в лабораторных и полномасштабных натуральных условиях. Объектами исследования выступали лед, полученный в искусственных условиях (температура заморозки -18°C) и речной лед средней толщины (до 80 см) приблизительного возраста 120 дней. В лабораторном эксперименте использовались однослойные, двухслойные, трехслойные и пятислойные ледяные мишени размерами в (105×50) мм (рис. 1). Ударник имел закругленную головную часть и начальную скорость 315 м/с. Лабораторные эксперименты проведены при помощи баллистической легкогазовой установки. Полномасштабные натурные эксперименты осуществлялись при технической поддержке ООО «КузбасСпецВзрыв» и Управления МЧС по Томской области. Рассмотрен только один тип речного льда, характерный для СФО. После подрыва эмульсионной взрывчатки в ледяном покрове формируется майна до 200 см в диаметре. В дальнейшем, все вышеупомянутые эксперименты были смоделированы численно.

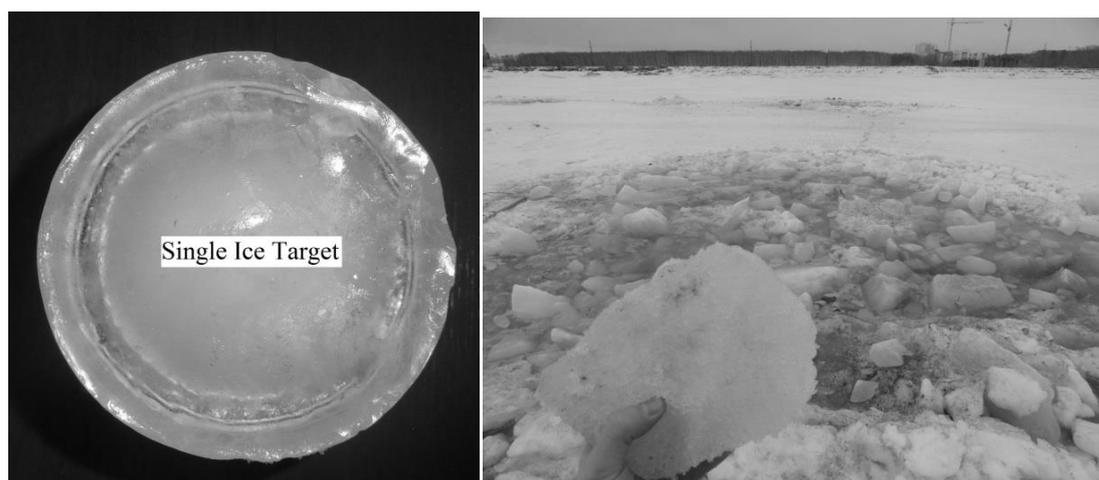


Рис. 1. Однослойная ледяная мишень (вид сверху), майна во льду после подрыва 4 кг эмульсионной взрывчатки

Численное моделирование внедрения стального ударника в ледяной блок

Далее представлены результаты численного моделирования глубокого внедрения металлических ударников в ледяной блок и подрыва ледяного покрова безоболочечным зарядом ВВ.

Вначале смоделирован удар ледяного цилиндра по жесткой стенке (тест Тейлора). Ледяной цилиндр имел размеры (17.5×42.2) мм и температуру 263К. Начальная скорость составила 213 м/с. В процессе эксперимента сравнивалась морфология разрушения ледяных преград, а именно: время зарождения первых очагов разрушения, их распространение внутри образца, формирование осколков и т.п. В целом, картина разрушения льда соответствовала экспериментальным результатам, полученными другими авторами.

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования процесса внедрения стального шарика диаметром 4.5 мм в ледяной куб размерами (30×30) мм. Начальная скорость равнялась 350 м/с. Слева изображена конечно-элементное разбиение преграды в момент времени окончания счета (120 мкс). Справа показаны два расчета для начальной скорости 154 м/с и 350 м/с соответственно. Варианты первого расчета сравнивались с экспериментальными данными (по глубине и диаметру кратера), расхождение не превысило 15%.

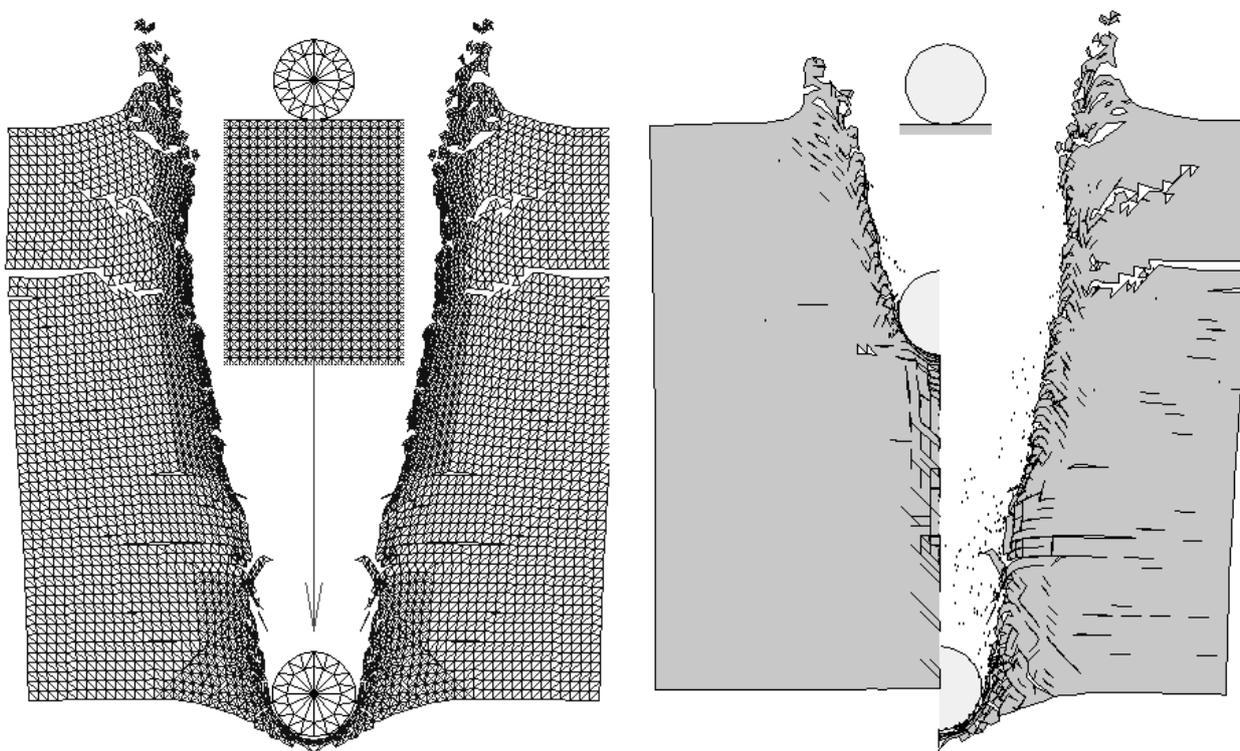


Рис. 2. Результаты расчетов процесса внедрения стального шарика в ледяной блок, время 120 мкс

Конечная конфигурация подтверждает сильное искажение расчетных элементов в зоне контакта ударника и ледяной преграды. Отмечен выплеск приповерхностных слоев льда в направлении, противоположном вектору скорости. Как и в лабораторном эксперименте, наблюдается V-образный кратер в ледяной мишени, а также многочисленные очаги разрушения во льду, подтверждающие ее хрупкое разрушение. Видно, что ледяной блок разрушается через магистральные трещины, как минимум на три осколка разных размеров. При начальной скорости 154 м/с во льду образуется только V-образный кратер. Пластических деформаций ударника не обнаружено.

Численное моделирование процесса взрывного нагружения ледяного покрова

В заключении представлены результаты численного моделирования процесса подрыва ледяного покрова безоболочечным зарядом тринитротолуола (ТНТ). В расчетах моделировался лед различной начальной пористости, а именно: 5% и 25%. Толщина ледяного по-

кровля составила 300 см, лед располагался на водной подложке глубиной 500 см. Масса заряда ТНТ – 270 кг. Воздушный зазор между зарядом ВВ и льдом отсутствовал вовсе. На контактной границе лед – ВВ задано условие скольжения без трения. Вычислительный эксперимент продолжался до 9 мс, так как в дальнейшем картина разрушения льда практически не менялась. Время расчета составило почти 15 ч на Intel (R) Core (TM) I5-2430 M.

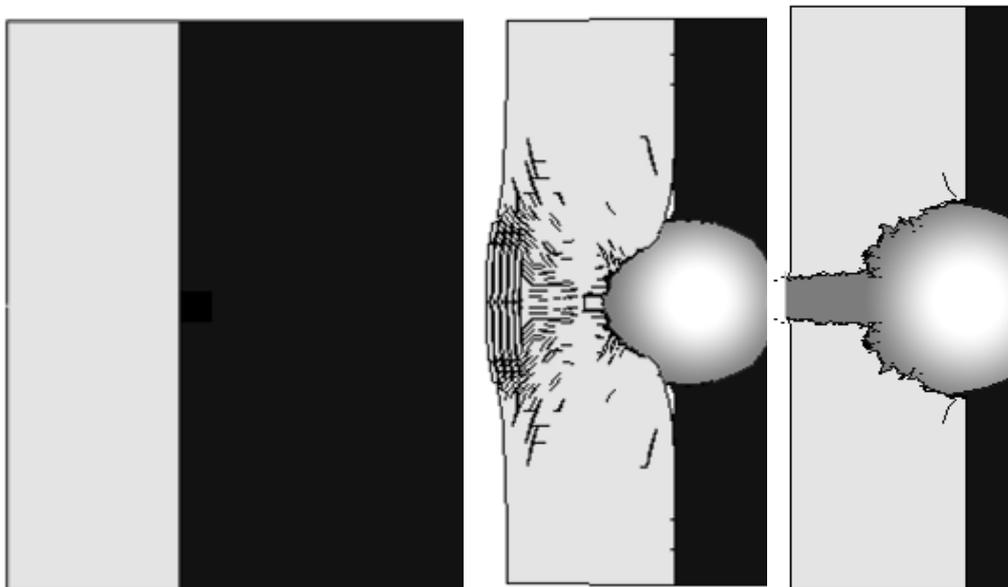


Рис. 3. Результаты расчетов процесса подрыва ледяного покрова:
конфигурация системы «Лед – ВВ – Вода» в начальный момент времени,
5% – пористый лед, 25% – пористый лед

На рис. 3 показаны конфигурации системы «Лед – ВВ – вода» в начальный и конечный момент времени (9 мс). Видно, что картины разрушения льда с разной пористостью отличаются. При разрушении менее пористого льда преобладало хрупкое разрушение, а при разрушении более пористого льда уже сформировалось сквозное отверстие.

Заключение

Таким образом, феноменологическая модель и численный метод вполне адекватно описывают основные закономерности разрушения льда при ударных и взрывных нагрузках.

Авторы благодарны ООО «КузбасСпецВзрыв» и Управлению МЧС по Томской области за помощь в проведении экспериментов. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00257, <https://rscf.ru/project/23-29-00257>.

Библиографический список

1. Герасимов, С. И. Исследование пробития ледовой преграды цилиндрическим ударником / С. И. Герасимов [и др.] // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. – 2020. – Т. 9. – № 2. – С. 95-99. – DOI 10.1134/S2304487X20020042.
2. Глазова, Е. Г. Численное моделирование удара ледяной сферы о преграду / Е. Г. Глазова, С. В. Крылов, Д. Т. Чекмарев // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. – 2020. – Т. 162. – № 2. – С. 137-147. – DOI 10.26907/2541-7746.2020.2.137-147.

3. Гриневич, Д. В. Обзор применения численных методов для моделирования деформации и разрушения льда / Д. В. Гриневич, В. М. Бузник, Г. А. Нужный // Труды ВИАМ. – 2020. – № 8(90). – С. 109-122. – DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-8-109-122.
4. Глазырин, В. П. Анализ процесса внедрения в лед удлинённых ударников / В. П. Глазырин [и др.] // Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики - 2021: матер. XI Всероссийской научной конференции с международным участием, Томск, 17–21 ноября 2021 года / под ред. М.Ю. Орлова. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2022. – С. 34-37.
5. Андреев, С. Г. Физика взрыва: в 2 т. Т. 1. / С. Г. Андреев [и др.]. – 3-е изд., перераб. – М.: ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2004. – 832 с.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016663830 Российская Федерация. Взрыв. Сглаживание контактной границы: № 2016661600: заявл. 31.10.2016 : опубл. 19.12.2016 / В. П. Глазырин, Ю. Н. Орлов, М. Ю. Орлов ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Балашов М.Г.	21	Куркин А.А.	115
Благовидова И.Л.	66	Куркина О.Е.	115
Большев А. С.	87	Ларина Е.М.	45
Большедворова М.А.	159	Ларионова В.Н.	111
Булатов В.В.	58	Макаров В.С.	39, 102
Ваганова Н.А.	126	Малюк В.В.	105
Васильев Н.К.	163	Морозов В.П.	27
Верещагин В.Ю.	121	Москвичева Ю.А.	42, 53
Веселов В.А.	82	Муратов М.В.	135, 145
Вирц Р.А.	111	Орлов М.Ю.	169
Владимиров И.Ю.	58	Орлова Ю.Н.	169
Гладышев Н.С.	27	Петров И.Б.	135, 141, 145
Глазырин В.П.	169	Родионов Н.Ю.	150
Голубев В.И.	135, 141	Родькина А.В.	50, 62
Гусева Е.К.	135, 141, 145	Розов И.О.	87
Добродеев А.А.	33, 150	Романов А.Д.	39, 102
Епифанов В.П.	141	Романова Е.А.	39, 102
Ефремова Л.С.	98	Роннов Е.П.	16
Зуева Е.В.	42, 53	Сазонов К.Е.	5, 150
Иванова О.А.	62, 66	Стурова И.В.	129
Ильичева М.А.	58	Суров О.Э.	82
Исаева Е.С.	155	Ткачева Л.А.	129
Калинина Н.В.	10	Токарева М.А.	111
Касьянов В.С.	50	Уварова Т.Э.	155, 159
Китаев М.В.	82	Фальмонов Е.В.	71
Козин В.М.	121	Филимонов М.Ю.	126
Кокоулина М.В.	115	Фролов С.А.	87
Конов Д.С.	145	Халид В.	141
Кочнев Ю.А.	16	Харсеев А.Е.	87
Крамарь В.А.	50, 52	Чемакина Т.Л.	98

ПОЛЯРНАЯ МЕХАНИКА

**Сборник докладов
VI Всероссийской научно-практической конференции
с международным участием**

23-24 марта 2023 г.

Подписано в печать 25.09.2023. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 22,0. Тираж 50 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.
Типография НГТУ.
Адрес университета и полиграфического предприятия:
603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

22 десятилетие
науки
и технологий 31

ПОЛЯРНАЯ МЕХАНИКА

Сборник докладов
VI Всероссийской научно-практической
конференции с международным участием

ISBN: 978-5-50201-740-4



9 785502 017404



Крыловский
государственный
научный центр



приоритет2030⁺
лидерами становятся

г. Нижний Новгород