

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-41-49
УДК 624.042.3.001.24

О.Я. Тимофеев, К.Е. Сазонов, А.А. Добродеев, Е.А. Бокатова, И.А. Саперштейн
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МОРСКОГО ЛЬДА В ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются прочностные свойства на одноосное сжатие лабораторного льда в зависимости от его температуры и солёности.

Материалы и методы исследования. Материалом для проведения исследований является лабораторный лед, приготовленный из раствора поваренной соли различной солёности и выдерживавшийся при различных значениях температуры окружающего воздуха. Прочность льда определялась экспериментальным путем с помощью комплекса измерительной аппаратуры, ранее применявшейся при исследованиях грунтов и адаптированной для изучения льда.

Основные результаты. Разработано и изготовлено оборудование, а также технология для проведения лабораторных испытаний среднemasштабных образцов льда с целью определения физико-механических свойств и параметров разрушения. Проведена серия испытаний для создания численной анизотропной модели разрушения льда.

Заключение. Полученные данные могут быть использованы для разработки универсальных формализованных критериев разрушения морского льда с учетом его анизотропии, температуры и солёности.

Ключевые слова: прочность льда на сжатие, лабораторный лед, ледовая нагрузка.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-41-49
UDC 624.042.3.001.24

O. Timofeev, K. Sazonov, A. Dobrodeev, Ye. Bokatova, I. Sapershtein
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

STRENGTH STUDIES OF SEA ICE IN SUPPORT OF SOFTWARE DEVELOPMENT FOR ICE LOAD CALCULATION

Object and purpose of research. This paper studies uniaxial compression strength properties of laboratory ice at different temperatures and salinities.

Materials and methods. The study was performed on the laboratory ice obtained from common salt solutions of different concentrations and kept at different ambient air temperatures. Ice strength was determined experimentally, by means of a set of instrumentation previously used in soil explorations and adapted for ice studies.

Main results. Development and manufacturing of equipment and development of technology for laboratory tests on medium-sized ice samples to determine their physical & mechanical properties and failure parameters. A series of tests has been performed to develop numerical anisotropic model of ice failure.

Conclusion. These data could be used to develop universal formalized criteria of sea ice failure, taking into account its anisotropy, temperature and salinity.

Keywords: ice compression strength, laboratory ice, ice load.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Для цитирования: Тимофеев О.Я., Сазонов К.Е., Добродеев А.А., Бокатова Е.А., Саперштейн И.А. Исследование прочностных свойств морского льда в обеспечение создания программных комплексов для расчета ледовой нагрузки. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 386(4): 41–49.

For citations: Timofeev O., Sazonov K., Dobrodeev A., Bokatova Ye., Sapershtein I. Strength studies of sea ice in support of software development for ice load calculation. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 386(4): 41–49 (in Russian).

Введение

Introduction

Оптимизация формы судна, эксплуатирующегося на чистой воде – традиционная проектная задача в судостроении. Для ее решения широко применяются как численные методы гидродинамики, так и модельные испытания в опытовых бассейнах, причем явной тенденцией последнего десятилетия является замена испытаний более вариабельным численным моделированием, что сокращает сроки и повышает качество проектирования.

Важным направлением отечественного гражданского судостроения является создание судов ледового плавания и ледоколов, в ходе проектирования которых проводится большое количество дорогостоящих модельных ледовых испытаний на ходкость, маневренность, преодоление тороса. Высокая стоимость испытаний делает невозможным проведение модельных исследований для большого числа конкурирующих вариантов проектируемого судна. Аналогично складывается ситуация с созданием шельфовых инженерных сооружений, предназначенных для эксплуатации в ледовых условиях: модельные испытания проводятся для одного-двух вариантов формы по причине большой длительности и высокой стоимости испытаний. Выбор оптимального варианта корпуса судна, ледокола, ледостойкой платформы может быть произведен, если в дополнение к традиционным испытаниям в ледовом бассейне создать методику и программное обеспечение численного моделирования взаимодействия их корпусов со льдом. С точки зрения механики твердого деформируемого тела взаимодействие конструкции со льдом есть взаимодействие двух твердых тел, одно из которых (лед) разрушается. Следовательно, задача относится к классу задач механики разрушения. Механика разрушения (ее ветвь в численном моделировании) хорошо развита и реализована во многих зарубежных пакетах для основных конструкционных материалов. Исходными данными для описания таких материалов в пакетах прикладных программ являются два информационных блока:

- описание физико-механических свойств материала;
- формальные критерии разрушения материала.

Для морского льда до сих пор нет универсальной модели его физико-механических свойств и формальных критериев разрушения, готовых к использованию при создании современных программных комплексов.

В настоящее время уже разрабатываются отечественные универсальные платформы численного моделирования, содержащие в себе базы данных основных конструкционных материалов и верификационных задач. При условии создания численного описания физико-механических свойств и критериев разрушения морского льда такие платформы могут стать передовым программным продуктом по механике льда.

В рамках подпрограммы «Развитие судостроительной науки» государственной программы Российской Федерации «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений на 2013–2030 годы» специалистами лаборатории ледотехники ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (КГНЦ) были начаты работы по созданию нового экспериментального стенда для изучения прочностных свойств льда. Уникальность разрабатываемого стенда заключается в возможности намораживания лабораторного морского льда при различных температурных режимах и исследований его физико-механических свойств при различных видах нагружения, в том числе при сложном объемном нагружении. Полученную информационную базу предполагается использовать для построения формализованных критериев разрушения морского льда с учетом анизотропии, а также температуры и солености.

В настоящей статье приведены первые результаты проведенных экспериментов по одноосному сжатию образцов лабораторного льда.

Технология проведения испытаний среднемасштабных образцов лабораторного морского льда

Testing procedure for medium-sized laboratory sea ice samples

Первые опыты по созданию ледяных полей натурального состава в лабораторных условиях были проведены в шугоносном лотке Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева (ВНИИГ). Эти опыты показали, что при постоянстве температурного режима намораживания и солености воды можно неоднократно приготовить ледяные поля заданных физико-механических характеристик. Однако изготовлявшийся во ВНИИГ лабораторный лед вследствие несовершенства системы охлаждения и недостаточной изоляции стенок лотка отличался

значительной неравномерностью толщины и прочностью по площади лотка [1].

Физико-механические свойства лабораторного льда зависят от степени однородности структуры льда на различных его участках, которая обусловлена влиянием следующих факторов:

- распределение ядер кристаллизации в воде;
- температурные режимы в холодильной камере и чаше бассейна в процессе намораживания льда.

Методика исследования физико-механических характеристик льда основывается, в первую очередь, на рекомендациях Международной ассоциации гидравлических исследований (МАГИ/IAHR) [2, 3], предписаниях отечественных нормативных документов [4] и руководств.

Испытания среднemasштабных образцов льда выполнены с использованием установки, основными компонентами которой являются:

- холодильная камера ледового бассейна КГНЦ;
- специально спроектированные и изготовленные термоизолированные резервуары для намораживания образцов;
- устройство для нагружения образцов с компьютером для обработки получаемой при проведении каждого отдельного эксперимента информации;
- набор приборов для определения структуры и текстуры льда;
- кольцевой бур.

Холодильная система ледового бассейна КГНЦ позволяет поддерживать требуемые температурные режимы воздуха при намораживании льда и в процессе испытаний в диапазоне от плюс 20 °С до минус 30 °С при скорости движения воздуха в рабочем объеме камеры на уровне естественной конвекции.

Резервуар для намораживания образцов льда представляет собой емкость объемом 0,9 м³, которая разделена не доходящей до дна перегородкой на две секции. Таким образом, секции объединены по принципу сообщающихся сосудов. Площадь свободной поверхности малой секции составляет 15 % от общей площади свободной поверхности всего резервуара. Резервуар предназначен для заполнения водой с заданным содержанием соли и намораживания льда в условиях отрицательных температур окружающего воздуха. По периметру и со дна каждый резервуар обложен слоем теплоизоляционного материала с зазором в несколько сантиметров для создания воздушной прослойки между стенками резервуара и теплоизоляционным материалом. В образованной воздушной полости располагается саморегулирую-

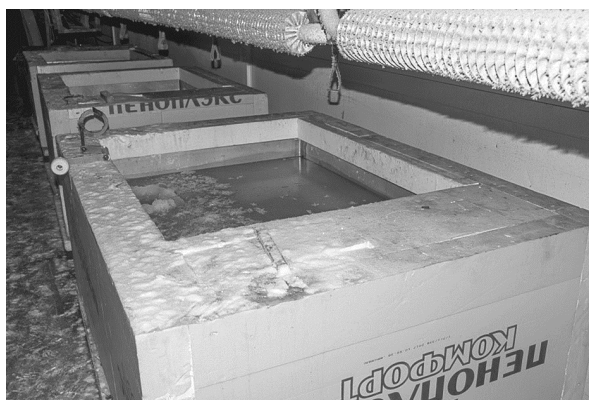


Рис. 1. Резервуары для намораживания образцов льда в процессе подготовки к эксперименту

Fig. 1. Reservoirs for generation of ice samples during preparation for experiment

- 1 – устройство нагрузочное ГТ 2.0.18;
- 2 – приспособление одноосного сжатия с установленным образцом;
- 3 – датчик силы

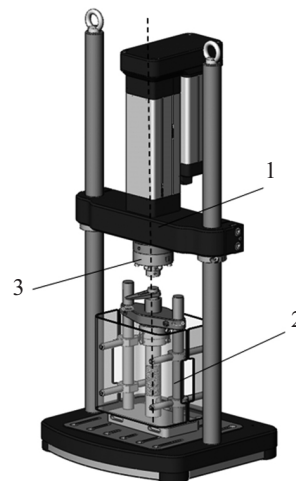


Рис. 2. Устройство для нагружения образцов льда

Fig. 2. Loading device for ice samples

щийся греющий кабель, обеспечивающий поддержание необходимой температуры внутри емкости. Использование такого принципа теплоизоляции контейнера позволяет предотвратить рост кристаллов льда от борта резервуара и со дна при его использовании в условиях низкой температуры. Мощность системы обогрева рассчитывается с учетом климатических условий, объема самого резервуара, толщины теплоизоляции (рис. 1). Также слой теплоизоляционного материала закрывает со всех сторон малую секцию резервуара, предотвращая образование льда на поверхности воды в ней. Наличие свободной поверхности воды в малой секции обеспечивает компенсацию давления при замораживании воды в основной секции и предотвращает возникновение внутренних напряжений в намораживаемом ледяном покрове, способных влиять на изменение его струк-

туры и текстуры, а также фильтрацию рассола через замороженный лед.

Для испытаний используется устройство, предназначенное для нагружения цилиндрических образцов льда диаметром до 100 мм в условиях отрицательных температур до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 2). Устройство разработано ООО «НПП «Геотек» и предназначено для исследования механических свойств грунтов. Это устройство было адаптировано изготовителем для исследования образцов льда. С его помощью можно исследовать прочность образцов льда на одноосное сжатие, объемное сжатие и одноплоскостной срез. В связи с тем, что на момент подготовки статьи экспериментальный стенд находится в стадии дооснащения оборудованием для создания условий объемного нагружения, далее рассматриваются лишь



Рис. 3. Выбуривание керна кольцевым буром диаметром 80 мм с укороченной штангой в одном из трех резервуаров

Fig. 3. Drill-out of ice core by means of annular bore (diameter 80 mm) with short boom in one of the three reservoirs

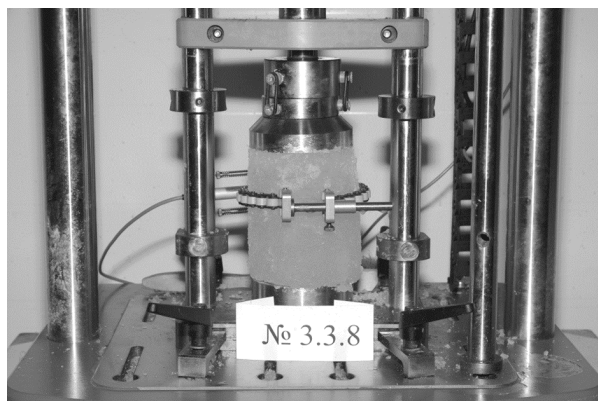


Рис. 4. Нагружение образца льда на испытательном стенде

Fig. 4. Loading of ice specimen at the test rig

проведенные эксперименты по одноосному сжатию образцов лабораторного льда.

Структура (кристаллическое строение) и текстура (включения во льду) льда изучается с помощью специального устройства в поляризованном свете. Прибор имеет две части – нижнюю и верхнюю, при этом одна может свободно проворачиваться относительно другой. С помощью такого вращения выбирается угол поляризации и тем самым достигается нужный эффект. Для выявления кристаллической структуры из керна изготавливаются тонкие срезы льда (шлифы), плоскость которых ориентирована перпендикулярно (вертикально) и параллельно (горизонтально) поверхности ледяного покрова. Толщина шлифа составляет от 0,5 до 1 мм.

Выбуривание образцов льда диаметром 80 и 100 см осуществляется с помощью самостоятельно изготовленного «кольцевого бура Н.В. Черепанова» (рис. 3).

При подготовке к намораживанию льда вода в каждом из трех одновременно используемых в холодильной камере резервуарах, доведенная до необходимой солености, охлаждалась до температуры кристаллизации. При намораживании льда использовалось специальное распыляющее воду устройство для внесения ядер кристаллизации на поверхность воды в резервуаре. При температуре воздуха минус $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ после очищения резервуара от остатков битого льда и сала над зеркалом воды производилось распыление. В процессе оседания часть мельчайших капелек успевала замерзнуть и превратиться в кристаллы льда, а часть – значительно переохладиться. Кристаллы льда и частицы переохлажденной воды, попадая на водную поверхность, производили «засев лабораторного льда», являясь ядрами кристаллизации, и давали начало кристаллообразованию.

Намораживание льда производилось в течение 72 ч. Перед началом испытаний вода из зоны компенсации давлений откачивалась для предотвращения выливания на поверхность льда при бурении первого керна. Испытания проводились при трех различных температурах воздуха в диапазоне от минус $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до минус $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ с шагом $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Образцы льда после выбуривания и обмеров сразу попадали в устройство для нагружения. Это было сделано для того, чтобы предотвратить вытекание рассола.

Испытания среднemasштабных образцов льда

Tests of medium-sized ice samples

Испытательная машина имеет возможность автоматической записи кривой «нагрузка – деформа-

ция» и обеспечивает измерение нагрузки с погрешностью не более $\pm 5\%$. Для каждого испытания определялась зависимость от времени деформации образца и действующей на него силы, что позволило определить напряжения в образце и модуль деформации льда для всего процесса нагружения. На рис. 4 представлена фотография одного из экспериментов по разрушению льда.

Прочность льда на сжатие, под которой понимается предел прочности при одноосном нагружении, определялась при разрушении прессом цилиндрических образцов льда диаметром 100 мм и высотой 150 мм. Вычисления произведены по формуле $\sigma_c = P/F$, в которой F – это площадь поперечного сечения образца, а P – разрушающее усилие. На величину предела прочности на сжатие оказывают влияние следующие факторы: направление приложения нагрузки по отношению к направлению роста кристаллов, кристаллическая структура образца, а также скорость изменения нагрузки. Среднее значение прочности льда на сжатие составляет $5,2 \pm 1,2$ МПа, при этом общий разброс данных очень большой – от 0,4 до 12,0 МПа [5].

Все испытания образцов при сжатии были выполнены при разных скоростях деформации в диапазоне от 10 до 150 кПа/с. Выбор такого диапазона скоростей деформации позволяет увидеть различные стадии упругопластического разрушения льда [6]. В работе [7] представлены результаты испытаний образцов модельного льда на сжатие, которые свидетельствуют о нелинейной зависимости прочности от скорости нагружения. Также сделан вывод о том, что характер разрушения льда сильно зависит от солёности: чем более пресный лёд, тем более характерно для него хрупкое разрушение, а для более солёного льда сильнее выражена стадия ползучести. Подобная картина наблюдалась и в ходе проведенных в КГНЦ экспериментов. При этом стоит отметить, что образцы льда не выдерживались дополнительно в холодильной камере до проведения испытаний, а после выбуривания и требуемых измерений отправлялись в испытательную машину. Перед испытанием образец должен был иметь температуру, которая наблюдалась в ледяном покрове, где он был отобран (допустимое отклонение – не более $0,5^\circ\text{C}$).

Для отсеивания грубых ошибок был применен критерий Шовене [8]. Если они обнаруживались, то соответствующее значение отбрасывалось, и проводилась новая проверка соответствия совокупности данных критерию. Допускалось исключение

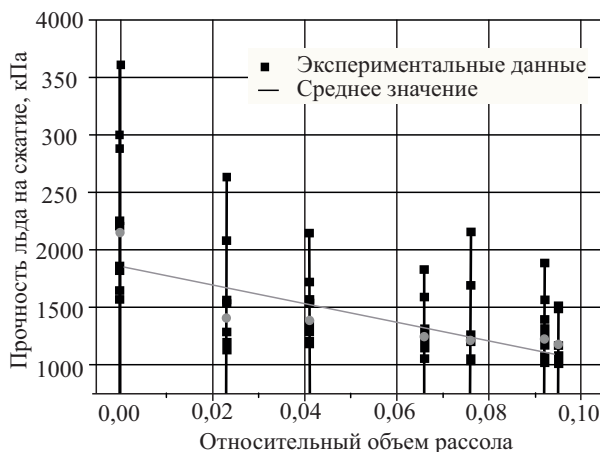


Рис. 5. Зависимость прочности льда на сжатие от относительного объема рассола в образцах

Fig. 5. Ice compression strength versus volume content of brine in specimens

только одной грубой ошибки в серии экспериментов. Если ошибок было обнаружено больше одной, то вся серия считалась недействительной.

При выполнении анализа экспериментальных данных использовались средние по высоте образца значения относительного объема рассола, полученные с использованием известной формулы Г.В. Франкенштейна и Р. Гарнера [9]:

$$v_b = S_l \cdot 10^{-3} \left(0,532 + \frac{49,185}{T_l} \right), \quad (1)$$

где S_l – солёность льда; T_l – температура льда.

На рис. 5 продемонстрирована зависимость полученных экспериментальных значений прочности льда на сжатие от относительного объема рассола, которая показывает, что при увеличении содержания рассола прочность льда на сжатие падает. Точки, приведенные на данном графике, получены для всех рассматриваемых скоростей нагружения. Зависимость от скорости нагружения проанализирована отдельно и представлена на следующем графике (рис. 6). Здесь показаны средние значения прочности льда на сжатие, полученные в результате серии экспериментов. Полученные для пресного льда значения имеют ярко выраженную линейную зависимость от скорости нагружения. В то время как образцы с определенным количеством рассола описываются полиномом 3 степени. Между значениями прочности на сжатие для среднего и высокого содержания рассола во льду прослеживается корреляционная связь. При этом для образцов с малым со-

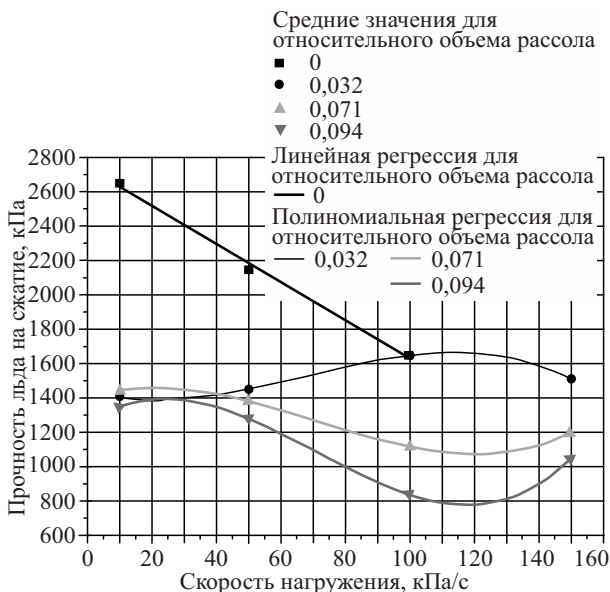


Рис. 6. Зависимость прочности льда на сжатие от скорости нагружения для образцов с различным содержанием рассола

Fig. 6. Compression strength vs loading rate of ice specimens with different brine contents

держанием рассола наблюдается увеличение прочности на скорости 100 кПа/с. Скорее всего, это обусловлено процессами, происходящими во льду в процессе замораживания, которые оказывают влияние на структуру льда и изменение прочности. Для более глубокого анализа необходимо проведение дополнительной серии экспериментов.

Определение структуры и текстуры льда

Determination of ice structure and texture

Кристаллическая структура льда определялась по тонким срезам (шлифам) в поляризованном свете. Из кернов, извлеченных из льда, выросшего в лабораторных бассейнах с водой разной солености, готовились шлифы толщиной около 1 мм. Шлифы были ориентированы в горизонтальной плоскости (параллельно поверхности выросшего льда) и в вертикальной (перпендикулярно поверхности льда). Вертикальные шлифы охватывали всю толщину льда (около 10 см). Горизонтальные шлифы брались с горизонта, расположенного на уровне половины толщины льда.

Готовые шлифы помещались между двумя поляризационными фильтрами (поляризатором и ана-

лизатором). При повороте анализатора однородные кристаллические элементы (кристаллаты¹ или поликристаллы) проявлялись визуально, принимая различную окраску, что позволило определить их размеры и пространственную ориентировку.

На рис. 7 представлена структура конжеляционного льда с вертикально ориентированной кристаллической структурой. Такой лед был получен при солености порядка 9 ‰. Вертикальные размеры кристаллических элементов (кристаллатов) сопоставимы с толщиной выросшего в бассейне льда. В горизонтальном сечении размеры кристаллатов составляли порядка 10^{-2} м. В соленых льдах такой структуры обычно наблюдается горизонтальная ориентировка главной оптической оси кристаллов, т.е. кристаллы растут базисными плоскостями в толщу воды. Структура аналогична типу В3 природного морского льда структурно-генетической классификации льдов природных водоемов Н.В. Черепанова [10]. Такой тип льда можно получить преимущественно в лабораторных условиях при разработанной схеме его намораживания.

Анализ результатов

Analysis of results

Проведение подобных испытаний при различных условиях является важным шагом в обосновании достоверности получаемых данных о прочности ледяного покрова вне полевых условий и возможности их использования для описания деформирования и разрушения льда. В работе [11] говорится о возможности применения принципа изоморфизма предельной поверхности материала. Основной догмой этого принципа является то, что лед остается самоподобным при варьировании внешних параметров его роста. Таким образом, для описания деформирования и дальнейшей верификации могут подходить результаты испытаний, проведенных в лабораторных условиях.

Данная работа проводится с целью формирования базы данных физико-механических свойств льда, которая необходима для создания численной анизотропной модели его разрушения. В дальнейшем база данных будет дополняться информацией о поведении льда и параметрах его прочности

¹ Термин «кристаллат» использовал Пуриков для определения агрегатов одинаково ориентированных элементарных кристаллических элементов (кристаллитов). В ледоисследовательской практике кристаллаты обычно называют просто кристаллами.

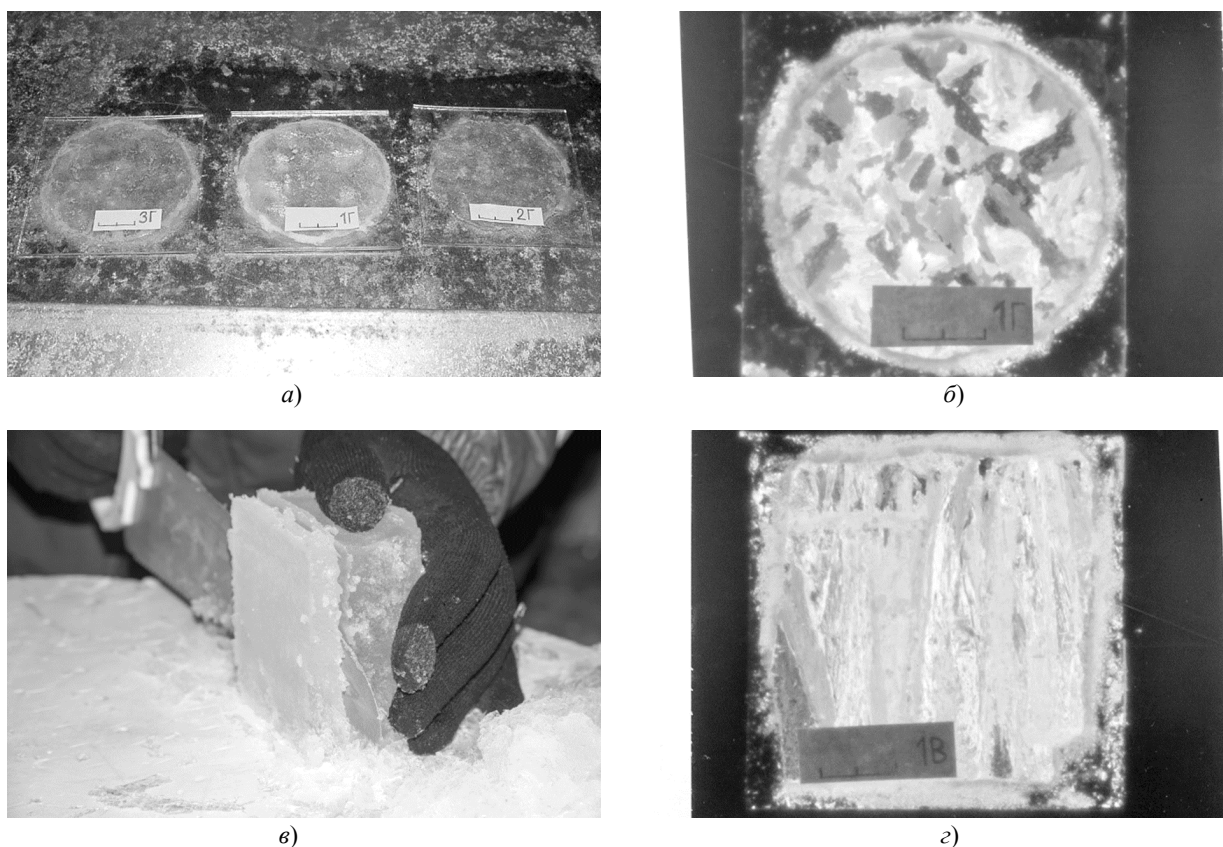


Рис. 7. Пример структуры и текстуры образцов лабораторного льда соленостью 8,9 ‰

Fig. 7. Example of structure and texture of lab ice specimens with 8.9 ‰ salinity

в условиях осесимметричного трехосного сжатия и одноплоскостного среза. На основе этих данных выполняются работы по реализации моделей материалов и разрушения для моделирования динамического воздействия на морской лед. В будущем они будут использованы для создания полномасштабной суперкомпьютерной технологии моделирования взаимодействия морских объектов с ледяным покровом, позволяющей выполнять оптимизацию форм корпусов ледоколов, судов ледового плавания и опорных оснований добычных платформ.

Современные тенденции в развитии промышленного освоения полярных регионов России указывают на доминирующую роль морского транспорта как наиболее эффективного средства, способного обеспечить возможность перевозки разнообразных грузов [12]. Многочисленные экономические расчеты показывают, что современная морская транспортная система, предназначенная для работы в ледовых условиях, достигает наибольшего эффекта при использовании в своем составе крупнотоннаж-

ных тоннажных судов дедейтотом более 60 000 т [13]. Это означает, что в Арктике в ближайшем будущем начнут эксплуатироваться суда абсолютно нового типа, а также появятся современные средства освоения месторождений. В связи с вышесказанным, внедрение современных суперкомпьютерных технологий позволит повысить качество выполнения работ на стадии проектирования, а также существенно сократить сроки их проведения.

Заключение

Conclusion

Разработано и изготовлено оборудование, а также технология для проведения лабораторных испытаний среднемасштабных образцов льда с целью определения физико-механических свойств, параметров разрушения. Эти данные могут быть использованы для разработки универсальных формализованных критериев разрушения морского льда с учетом его анизотропии, температуры и солено-

сти. Проведена серия испытаний, которая ляжет в основу создания базы данных физико-механических свойств льда, необходимой для создания численной анизотропной модели его разрушения. Работы выполняются ФГУП «Крыловский государственный научный центр» в рамках подпрограммы «Развитие судостроительной науки» государственной программы Российской Федерации «Развитие судостроения и техники для освоения шельфовых месторождений на 2013–2030 годы» и направлены на создание суперкомпьютерной технологии моделирования взаимодействия морских объектов с ледяным покровом.

Благодарности

Acknowledgements

Работа выполнена в рамках государственного контракта с Минпроторгом России № 17411.1810190019.09.012 от 31.10.2017 г., шифр «Форма-СК». Авторы выражают свою благодарность Н.В. Кубышкину за полезные консультации по определению структуры и текстуры льда.

Библиографический список

1. Позняк И.И. Ледовый бассейн и техника проведения в нем модельных испытаний // Современные вопросы ледоколостроения. Труды ААНИИ. 1960. Т. 237. С. 46–80.
2. Frederking R. et al. IAHR – Recommendations on testing methods in ice. 3th Report of the working group on testing methods on ice // Proceeding of IAHR International Symposium on Ice. 1981. P. 938–952.
3. Hausler, F.U. et al. IAHR – Recommendations on testing methods in ice. 6th Report of the working group on testing methods in ice // IAHR Ice Symposium. 1988, Sapporo.
4. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*.
5. Сазонов К.Е. Материаловедение. Свойства материалов. Методы испытаний. Лед и снег. СПб.: РГТУ, 2007.
6. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеоздат, 1980.
7. Беккер А.Т., Анохин П.В., Сабодаш О.А., Коваленко Р.Г., Уварова Т.Э., Помников Е.Е. Экспериментальное исследование физико-механических свойств модельного льда и их влияния на абразию материала конструкции ледостойких платформ //

Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № S4–9. С. 14–29.

8. Огibalов П.М., Мирзаджанзаде А.Х. Механика физических процессов. М.: Изд-во МГУ, 1976.
9. Frankenstein G.W., Garner R. Equations for determining the brine volume of sea ice from $-0,5$ to $-22,9$ °C // J. Glaciol. 1967. № 6 (48). P. 943–944.
10. Черепанов Н.В. Классификация льдов природных водоемов // Труды ААНИИ. 1976. Т. 331. С. 77–99.
11. Александров А.В., Матанцев П.А. Применение методов компьютерного моделирования в решении задач масштабирования ледовых нагрузок // Труды Крыловского государственного центра. 2017. № 1(379). С. 70–77.
12. Сазонов К.Е., Добродеев А.А. Ледовая ходкость крупнотоннажных судов. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2017.
13. Дехтярук Ю.Д., Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Некоторые вопросы создания морских транспортных систем для вывоза углеводородов из Арктики // Арктика: экология и экономика. 2013. № 2(10). С. 84–91.

References

1. Poznyak I. Ice basin and ice model test procedure // Current challenges in icebreaker construction. Transactions of AARI. 1960. Vol. 237. P. 46–80 (in Russian).
2. Frederking R. et al. IAHR – Recommendations on testing methods in ice. 3th Report of the working group on testing methods on ice // Proceeding of IAHR International Symposium on Ice. 1981. P. 938–952.
3. Hausler, F.U. et al. IAHR – Recommendations on testing methods in ice. 6th Report of the working group on testing methods in ice // IAHR Ice Symposium. 1988, Sapporo.
4. Construction Rules SP 38.13330.2012. Loads and effects (wave, ice and ship-induced) on hydraulic structures. Updated version of Construction Rules SNiP 2.06.04-82* (in Russian).
5. Sazonov K. Materials science. Properties of materials. Test methods. Ice and snow. SPb.: Russian State Hydrometeorological University, 2007 (in Russian).
6. Bogorodsky V., Gavrilov V. Ice. Physical properties. Modern methods of glaciology. L.: Gidrometeoizdat, 1980 (in Russian).
7. Bekker A., Anokhin P., Sabodash O., Kovalenko R., Uvarova T., Pomnikov Ye. Experimental research of physical and mechanical properties of modelling ice for abrasion process of structure's material of ice resistant platforms // Mining information & analytical bulletin. 2014. No. S4-9. P. 14–29 (in Russian).

8. *Ogibalov P., Mirzajanzade A.* Mechanics of physical processes. M.: Moscow State University publishing house, 1976 (in Russian).
9. *Frankenstein G.W., Garner R.* Equations for determining the brine volume of sea ice from -0.5 to -22.9 °C // *Journal of Glaciology*, 1967. № 6 (48). P. 943–944.
10. *Cherepanov N.* Classification of ice in natural water reservoirs // Transactions of AARI. 1976. Vol. 331. P. 77–99 (in Russian).
11. *Aleksandrov A., Matantsev R.* Application of computer-based simulation methods in ice load scaling // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2017. Vol. 1(379). P. 70–77 (in Russian).
12. *Sazonov K., Dobrodeev A.* Ice propulsion performance of large ships. SPb.: KSRC, 2017 (in Russian).
13. *Dekhtyaruk Yu., Dobrodeev A., Sazonov K.* Some questions on the establishment of marine transport systems for the removal of hydrocarbons from the Arctic // *Arctic: Ecology and Economy*. 2013. No. 2(10). P. 84–91 (in Russian).

Сведения об авторах

Тимофеев Олег Яковлевич, д.т.н., заместитель генерального директора по судостроению и морской технике – начальник 5 отделения ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-65-09, 8 (812) 727-96-21. E-mail: O_Timofeev@ksrc.ru.

Сазонов Кирилл Евгеньевич, д.т.н., начальник лаборатории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-45-23. E-mail: kirsaz@rambler.ru.

Добродеев Алексей Алексеевич, к.т.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный

центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 386-69-78. E-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru.

Бокатова Елизавета Антоновна, инженер 2 категории ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 386-69-78. E-mail: E_Bokatova@mail.ru.

Саперштейн Игорь Алексеевич, инженер, ФГУП «Крыловский государственный научный центр» Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 386-45-23. E-mail: 54lab@ksrc.ru.

About the authors

Oleg Ya. Timofeev, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Director General on Shipbuilding and Marine Technology – Head of Division, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-65-09, 8 (812) 727-96-21. E-mail: O_Timofeev@ksrc.ru.

Kirill Ye. Sazonov, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-45-23. E-mail: kirsaz@rambler.ru.

Aleksey A. Dobrodeev, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 386-69-78. E-mail: A_Dobrodeev@ksrc.ru.

Yelizaveta A. Bokatova, 2nd Category Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 386-69-78. E-mail: E_Bokatova@mail.ru.

Igor A. Sapershtein, Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 386-45-23. E-mail: 54lab@ksrc.ru.

Поступила / Received: 29.06.18
Принята в печать / Accepted: 12.11.18
© Коллектив авторов, 2018