Теория корабля и строительная механика

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-5>
УДК 532.5; 629.585; 534.1

В.Л. Земляк, В.М. Козин

ЗЕМЛЯК ВИТАЛИЙ ЛЕОНИДОВИЧ – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник кафедры технических дисциплин, AuthorID: 640226, SPIN: 9172-5202, ORCID: 0000-0002-3218-5738, ResearcherID: Y-2761-2018, Scopus ID: 36085759800, e-mail: vellkom@list.ru

Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема

Широкая, 70а, Биробиджан, Еврейская автономная область, Россия, 679015

КОЗИН ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории проблем создания и обработки материалов и изделий, AuthorID: 151655, SPIN: 1265-7970, ScopusID: 8548383800, e-mail: vellkom@list.ru

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН

Металлургов, ул., 1, Комсомольск-на-Амуре, 681005

Влияние формы поперечного сечения погруженного тела на волнообразование и ледоразрушение

Аннотация: При решении задачи движения подводного судна вблизи нижней поверхности ледяного покрова корпус судна, имеющий сложную геометрию, обычно заменяют на тело вращения упрощенной формы – при сохранении основных характеристик (относительного удлинения и водоизмещения). В свою очередь форма поперечного сечения корпуса может оказывать существенное влияние на параметры генерируемых в ледяном покрове прогрессивных изгибно-гравитационных волн. Авторы представляют экспериментальное исследование влияния формы поперечного сечения на прогиб и длину изгибно-гравитационных волн. Эксперименты, для которых были изготовлены три модели, имеющие одинаковые характеристики, но разную форму поперечного сечения, проводились в опытовом ледовом бассейне. В процессе буксировки моделей определялась скорость движения и записывались профили взволнованной поверхности льда. Масштаб моделирования составил 1:120. В ходе экспериментов были установлены зависимости параметров изгибно-гравитационных волн от рассматриваемых характеристик. Впервые с помощью модельного эксперимента определено влияние формы поперечного сечения погруженного тела на ледоразрушающую способность изгибно-гравитационных волн.

Ключевые слова: погруженное тело, ледяной покров, изгибно-гравитационные волны.

Введение

На сегодняшний день в Арктике обнаружено более 60 крупных месторождений углеводородов. По оценкам специалистов Геологической службы США (United States Geological Survey), в регионе сосредоточенно до 30% мировых неразведанных запасов газа и 13% – нефти. При реализации проектов, связанных с освоением природных ископаемых Арктического шельфа, необходимо решение целого комплекса серьезных проблем экономического и транспортно-технологического плана, особенно в отношении добычи и транспортировки углеводородного сырья. С учетом постоянного присутствия льда возникает необходимость со-

здания специальных транспортных средств для перевозки полезных ископаемых и обеспечения снабжения добывающих станций. Решение данного вопроса требует новых подходов к способам добычи и транспортировки сырья, которые можно реализовать с помощью подводных судов. Многие годы проектные организации прорабатывают возможность создания подводных транспортных средств, которые стали бы частью комплексной транспортной системы в Арктике.

Идея использования в качестве транспортных средств подводных лодок возникла, как только они стали использоваться в военно-морском флоте. Во время Второй мировой войны подводный транспортный флот существовал, например, в Италии и Германии. В военно-морском флоте Японии 58% общего числа подводных лодок использовалось в качестве транспортных [8]. Многие страны мира разрабатывали проекты подводных транспортных судов, однако ни один проект так и не был реализован. К идее использования подводных транспортов вернулись с началом активного освоения Арктического шельфа. Еще в конце 1990-х годов Санкт-Петербургское Центральное конструкторское бюро (ЦКБ) «Рубин» предложило использовать для этой цели устаревшие и выведенные из состава Военно-морского флота России тяжёлые ракетные подводные крейсеры стратегического назначения проекта 941 «Акула» [1].

В 2017 г. в Санкт-Петербурге на выставке «Нева-2017» ЦКБ «Рубин» представил подводный роботизированный комплекс «Айсберг», созданный по заказу Фонда перспективных исследований. Проект способен полностью обеспечивать подводное (подледное) освоение месторождений углеводородов на Арктическом шельфе, в зоне круглогодичного ледяного покрова. Проектом предусмотрено создание обитаемых атомных подводных судов гражданского назначения для доставки, обслуживания, монтажа и демонтажа оборудования [7].

Более чем 60% подледного пространства Арктики не позволяет осуществлять всплытие подводных судов традиционным методом путем статического нагружения льда снизу. В работе В.Г. Реданского [6] описаны неоднократные случаи получения различных повреждений субмаринами при осуществлении их всплытия в Арктике в сплошном ледяном покрове, майнах и полыньях. Первый теоретический анализ движения тела под ледяным покровом выполнен Д.Е. Хейсиным [9]. В работе показано, что при динамическом режиме движения нагрузки изгибной волне в пластине будет сопутствовать гравитационная волна в воде, а такую комбинацию волн называют изгибно-гравитационной (ИГВ). При определенной интенсивности ИГВ можно добиться частичного либо полного разрушения льда. Впервые возможность разрушения льда ИГВ, генерируемыми от движения погруженного тела, показана В.М. Козыным [3].

Исследование гидроупругого поведения плавающей пластины, покрытой слоем снега, от движения тонкого твердого тела, смоделированного путем его замены системой источник–сток, выполнено в [13]. Работоспособность предложенного метода подтверждена сопоставлением полученных данных с результатами модельных экспериментов.

И.В. Стуровой и Л.А. Ткачевой [14, 16] исследованы волновые движения от колебаний погруженного в жидкость под упругой пленкой горизонтального цилиндра. В работе [15] решена линейная задача об обтекании сферы под тонкой упругой напряженной пластиной постоянной толщины. А.А. Коробкиным и др. выполнено исследование поведения ледяного покрова в замерзшем канале от движения внешней нагрузки с постоянной скоростью. Нагрузка моделируется локальным плавным распределением давления, движущимся вдоль центральной линии канала [11].

Анализ литературы показывает, что в теоретических исследованиях погруженное тело моделируется телом вращения, однако современные субмарины имеют геометрически сложную форму корпуса и поперечного сечения, поэтому использование в расчетах тел вращения с поперечным сечением в виде окружности не совсем корректно.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния формы поперечного сечения погруженного тела на параметры генерируемых им изгибно-гравитационных волн при движении вблизи нижней поверхности ледяного покрова.

Описание экспериментальной установки и методики моделирования

Модельные эксперименты проводились в ледовом опытовом бассейне лаборатории ледотехники (Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема) [2] в период с декабря 2018 г. по февраль 2019 г. Размеры чаши бассейна, в котором намораживалось модельное поле льда, составили $L \times B \times H = 14000 \times 3000 \times 1000$ мм. Схема бассейна, выполненная в Autodesk 3ds Max, показана на рис. 1.

Рис. 1. Схема опытового бассейна. Здесь и далее иллюстрации В.Л. Земляка.

При проведении экспериментов использовались три модели (№ 1–3) погруженных тел, изготовленных в масштабе $\lambda_1 = 1:120$. Модели имели равные значения относительного удлинения L_m/B_m (где L_m – длина, B_m – ширина), длины цилиндрической вставки, площади поперечного сечения по мидель-шпангоуту S_m и водоизмещения D_m . Изменялась форма поперечного сечения и, соответственно, отношение H_m/B_m (где H_m – высота модели). Для модели № 1 $H_{m1}/B_{m1} = 1$, № 2 $H_{m2}/B_{m2} = 0,915$, № 3 $H_{m3}/B_{m3} = 0,813$. Схемы моделей, выполненные в AutoCAD 2019, показаны на рис. 2. Все размеры моделей на схеме указаны в миллиметрах. Модели изготовлены с помощью послойной печати на принтере Raise3D физического объекта по цифровой трехмерной модели.

Из-за отсутствия рефрижераторной установки в бассейне поле модельного льда намораживалось за счет естественного охлаждения. Эксперименты проводились в ночное время в зимний период года. Управляемая система терморегуляции внутри помещения позволяла сохранять постоянный температурный режим, что обеспечивало образование модельного поля льда заданной толщины $h_m = 2$ мм в течение 20–60 мин в зависимости от температуры внутри помещения от -10 до -20 °С. При ширине чаши бассейна 3000 мм разностенность модельного поля льда не превышала 0,3 мм.

Перемещение моделей выполнялось с помощью буксировочной системы. Конструктивно система была выполнена в виде двух рам, устанавливаемых по разные стороны бассейна и оснащенных подвижными балками с блоками проводки бесконечного буксировочного троса. Для буксировки моделей использовалась буксировочная тележка, перемещающаяся с помощью сервопривода Servoline 130SPSM14 компании Zetek (Russia) по рельсовым направляющим (рис. 1). После каждого эксперимента поле битого льда удалялось в специальный технологический отсек, где переплавлялось.

Рис. 2. Схемы моделей погруженных тел.

Для визуализации процесса распространения изгибно-гравитационных волн от движения нагрузки в боковой стенке чаши бассейна установлено три водонепроницаемых окна. Запись взволнованной поверхности ледяного покрова осуществлялась через измерительный модуль Q.bloxx A107 с помощью бесконтактных лазерных датчиков LAS-Z Q.Gate A107 компании Way Con (Германия). Профили ИГВ записывались с помощью программы Test.viewer 2.34. Также в процессе буксировки моделей измерялась скорость их движения с помощью датчика скорости.

Для моделирования ледяного покрова использовался пресноводный естественный лед без добавок. Возможность такого подхода показана в работах Л.М. Ногида [5] и Ю.А. Шиманского [10]. По сравнению с требованиями теории моделирования естественный лед имеет повышенную прочность, поэтому широкое распространение получила версия о невозможности его использования в качестве модельного. Однако при использовании естественного льда компенсировать повышенную прочность можно, уменьшив его толщину.

Моделирование осуществлялось с частичным выполнением условий подобия [3]. Модель нагрузки должна быть геометрически подобна натурному судну, а водоизмещения пропорциональны модулю геометрического масштаба в кубе:

$$L_n / L_m = \lambda_l, \quad (1)$$

$$D_n / D_m = \lambda_l^3, \quad (2)$$

где L_n – длина натурного судна; D_n – водоизмещение натурного судна; λ_l – геометрический масштаб.

Скорость движения нагрузки u_m определялась условием подобия

$$u_n / u_m = \lambda_l^{1/2}, \quad (3)$$

где u_n – скорость движения натурны.

Волновое сопротивление при моделировании связано соотношением

$$R_{wn} / R_{wm} = \lambda_l^3, \quad (4)$$

где R_{wn} – волновое сопротивление натурного судна; R_{wm} – волновое сопротивление модельного судна.

Параметры генерируемых ИГВ пересчитывались на натуру согласно формуле

$$\lambda_n / \lambda_m = w_n / w_m = \lambda_l, \quad (5)$$

где λ_n – длина натуральных ИГВ; λ_m – длина модельных ИГВ; w_n – прогиб натурального льда; w_m – прогиб модельного льда.

Толщина моделируемого ледяного покрова определялась по зависимости

$$h_n = h_m \lambda_l^{4/3} ([\sigma_u]_n / [\sigma_u]_m)^{-1/3}, \quad (6)$$

где $[\sigma_u]_n$ – предел прочности натурального льда на изгиб; $[\sigma_u]_m$ – предел прочности модельного льда на изгиб.

Изгибная прочность модельного льда определялась экспериментально, испытанием консолей на плаву согласно рекомендациям работы [4].

Модуль Юнга пресноводного льда выше модуля Юнга морского льда. Соотношение E / σ_u (где E – модуль Юнга) для морского и пресноводного льдов практически не отличается: соблюдение данного условия при моделировании чрезвычайно важно [12].

В качестве критерия ледоразрушения использовался коэффициент α , показывающий зависимость разрушения льда от угла наклона ледяной пластины.

В [3] установлено, что при движении нагрузки по льду и при движении погруженного тела подо льдом, если максимальное значение угла наклона поверхности льда превышает значение 0,04, происходит раскрытие трещин и наблюдается разрушения льда. Так как модельные и натурные эксперименты проводились с использованием пресноводного льда, то его применение для оценки разрушения морского льда не совсем корректно. Однако прочность и трещиностойкость морского льда ниже, чем пресноводного, соответственно значение α для морского льда должно быть меньшим. Значение α определялось по зависимости

$$\alpha = 2\pi w_m / \lambda_m. \quad (7)$$

В связи со сложностью проведения экспериментов, длительностью подготовки модельного поля льда и ограниченностью холодного периода года (декабрь–февраль) была выполнена предварительная серия тестовых прогонов модели с целью определения оптимальных параметров эксперимента: скорости перемещения моделей; заглубления; толщины ледяного покрова. Было установлено, что наиболее значимые результаты следовало ожидать при скоростях перемещения нагрузки $u_m = 1,4$ – $2,2$ м/с, заглублении $h_{svm} = 160$ – 250 мм, толщине льда $h_m = 2$ мм, что после пересчета на натуру составило $u_n = 15,33$ – $24,1$ м/с, заглублении $h_{svn} = 19200$ – 30000 мм, толщине льда $h_n = 1550$ мм.

Результаты модельных экспериментов

Ранее нами в работе [17] исследовалось влияние относительного удлинения L_m/B_m , и водоизмещения D_m моделей в виде погруженных тел вращения с формой поперечного сечения в виде круга, на параметры генерируемых от их движения в ледяном покрове изгибно-гравитационных волн. Характеристики модели № 1 полностью соответствуют параметрам модели использовавшейся в ранее выполненной работе.

Основные результаты экспериментов показаны на графиках (рис. 3–8).

Графики показывают, что наибольшие прогибы наблюдались при перемещении модели № 1, поперечное сечение которой имело круглую форму и значение $H_m/B_m = 1$ (рис. 3).

Несмотря на то, что у модели № 2 величина отношения $H_m/B_m = 0,915$ была больше, чем у модели № 3 $H_m/B_m = 0,813$, значения прогибов льда от движения модели № 2 оказались меньше, чем w_m от движения модели № 3, на 11–33% для разных скоростей движения (рис. 5, рис. 7). Это связано с тем, что форма корпуса модели № 3 имела худшее обтекание, чем у модели № 2.

Рис. 3. Зависимость прогибов w_m модельного льда ($h_m = 2$ мм) от скорости движения модели № 1: 1 – $h_{svm} = 160$ мм; 2 – $h_{svm} = 210$ мм; 3 – $h_{svm} = 250$ мм (рис. источник рис. 38: [14]).

Рис. 4. Зависимость коэффициента α от скорости движения модели № 1: 1 – $h_{svm} = 160$ мм; 2 – $h_{svm} = 210$ мм; 3 – $h_{svm} = 250$ мм.

Рис. 5. Зависимость прогибов w_m модельного льда ($h_m = 2$ мм) от скорости движения модели № 2: 1 – $h_{svm} = 160$ мм; 2 – $h_{svm} = 210$ мм; 3 – $h_{svm} = 250$ мм.

Рис. 6. Зависимость коэффициента α от скорости движения модели № 2: 1 – $h_{svm} = 160$ мм; 2 – $h_{svm} = 210$ мм; 3 – $h_{svm} = 250$ мм.

Рис. 7. Зависимость прогибов w_m модельного льда ($h_m = 2$ мм) от скорости движения модели № 3: 1 – $h_{svm} = 160$ мм; 2 – $h_{svm} = 210$ мм; 3 – $h_{svm} = 250$ мм.

Рис. 8. Зависимость коэффициента α от скорости движения модели № 3: 1 – $h_{svm} = 160$ мм; 2 – $h_{svm} = 210$ мм; 3 – $h_{svm} = 250$ мм.

В целом w_m модельного льда от движения модели № 2 по сравнению с w_m льда от движения модели № 1 уменьшались на 13–48% при различных скоростях движения. Для модели № 3 по сравнению с моделью № 1 – на 4–32%.

Ледоразрушающая способность ИГВ, генерируемых от движения моделей № 2 и № 3 по сравнению с моделью № 1 также снижалась (рис. 4). Для модели № 2 по сравнению с моделью № 1 значение α уменьшалось на 12–47% при различных скоростях движения (рис. 6). Для модели № 3 по сравнению с моделью № 1 на 3–30% (рис. 8).

Характер разрушения модельного льда от движения модели № 2 показан на рис. 9. С приближением скорости движения модели к критическому значению площадь разрушения модельного льда возрастала. При сверхкритической скорости движения эффективность разрушения льда снижалась, площадь льдин возрастала, что связано с большей кривизной ИГВ.

Наиболее эффективное разрушение ледяного покрова наблюдалось при движении модели № 1 (рис. 10), однако наибольшее измельчение льдин происходило при перемещении модели № 3 (рис. 11), что было явно связано с ее плохо обтекаемой формой.

Рис. 9. Характер разрушения модельного льда ($h_m=0.002$ м) ИГВ от движения модели № 2 со скоростью $u_m=1,85$ м/с при $h_{svm}=0.16$ м.

Рис. 10. Характер разрушения модельного льда ($h_m=0.002$ м) ИГВ от движения модели № 1 со скоростью $u_m=1,6$ м/с при $h_{svm}=0.16$ м.

Рис. 11. Характер разрушения модельного льда ($h_m = 0.002$ м) ИГВ от движения модели № 3 со скоростью $u_m = 1,65$ м/с при $h_{svm} = 0.16$ м.

С ростом заглубления моделей нагрузки величина прогибов начинала уменьшаться. Эффективность разрушения льда значительно снижалась. Раскрытие трещин в ледяном покрове происходило только при скоростях, близких к критическому значению.

Заключение

Проведенное исследование показало:

- для моделей, имеющих одинаковые характеристики (относительное удлинение, водоизмещение и площадь поперечного сечения), но отличающихся отношением высоты корпуса к его ширине, наибольший ледоразрушающий эффект наблюдался от движения модели, имеющей форму поперечного сечения в форме круга;

- уменьшение отношения высоты корпуса к его ширине приводит к снижению ледоразрушающей способности ИГВ;
- плохо обтекаемая форма тела, близкая к прямоугольной, увеличивает сопротивление формы корпуса, что влияет на распределение давления воды на поверхности корпуса судна и росту прогибов льда;
- наиболее эффективное измельчение льдин наблюдалось при движении модели с плохо обтекаемой формой;
- значительное снижение ледоразрушающей способности ИГВ происходило с ростом величины заглубления нагрузки.

Дальнейшим направлением исследования является разработка численной модели движения погруженного тела произвольной формы вблизи нижней поверхности ледяного покрова для определения его напряженно-деформированного состояния, а также оценка ее работоспособности путем сопоставления полученных результатов с данными описанных модельных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов И.Л., Карлинский С.Л., Суханов С.О. «Тайфун» меняет профессию // Судостроение. 2001. № 2. С. 113–115. URL: <http://www.sstc.spb.ru/publications/sudostroy/detail.php?ID=7926> (дата обращения: 09.11.2019).
2. Земляк В.Л., Баурин Н.О., Курбацкий Д.А. Лаборатория ледотехники // Вестник Приамурского гос. ун-та им. Шолом-Алейхема. 2013. № 1(12). С. 68–77. eLIBRARY ID: 21023639
3. Козин В.М., Онищук А.В., Марьин Б.Н. Ледоразрушающая способность изгибно-гравитационных волн от движения объектов. Владивосток: Дальнаука, 2005. 191 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002819370> (дата обращения: 14.11.2019).
4. Лавров В.В. Деформация и прочность льда. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 203 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007147095> (дата обращения: 20.11.2019).
5. Ногид Л.М. Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и в битых льдах // Труды ЛКИ. 1959. Вып. XXVIII. С. 179–185.
6. Реданский В.Г. Во льдах и подо льдами. (Тайные операции подводных флотов). М.: Вече, 2004. 480 с. URL: http://militera.lib.ru/research/redansky_vg01/index.html (дата обращения: 28.01.2020).
7. Сайт АО ЦКБ «Рубин». URL: http://ckb-rbin.ru/press_centra/novosti/novost/news/detail/News/podvodnyi_robotizirovanniy_kompleks_aisberg_preds (дата обращения: 13.11.2019).
8. Токмаков А.А. Подводные транспортные суда. Л.: Судостроение, 1965. 268 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006486344> (дата обращения: 14.11.2019).
9. Хейсин Д.Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 216 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006383459> (дата обращения: 10.11.2019).
10. Шиманский Ю.А. Теория моделирования движения судна в сплошном ледяном поле. Современные вопросы ледоколостроения. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 89 с.
11. Khabakhpasheva T.I., Shishmarev K.A., Korobkin A.A. Large-Time Response of Ice Cover to a Load Moving Along a Frozen Channel. *Applied Ocean Research*. 2019;86:154–165. DOI: 10.1016/j.apor.2019.01.020
12. Lewis J.W. Recent development in physical ice modeling. *Offshore Technol. Conf.*, Houston, 1982:493–498.
13. Pogorelova A.V., Zemlyak V.L., Kozin V.M. Body Motion in Liquid under Ice Plate With Snow Cover. *Applied Ocean Research*. 2019;84:32–37. DOI: 10.1016/j.apor.2019.03.020.
14. Sturova I.V. Radiation of Waves by a Cylinder Submerged in Water With Ice Floe or Polynya. *Journal of Fluid Mechanics*. 2015;784:373–395. DOI: 10.1017/jfm.2015.582.
15. Sturova I.V. The Motion of a Submerged Sphere in a Liquid Under an Ice Sheet. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2012;76(3):293–301. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2012.07.005.
16. Tkacheva L.A. Oscillations of a Cylindrical Body Submerged in a Fluid With Ice Cover. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2015;56(6):1084–1095. DOI: 10.1134/S002189441506019X
17. Zemlyak V.L., Kozin V.M., Baurin N.O., Nazarova V.P. Influence of Ice Cover on The Motion of a Submerged Body. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1214(1):012003. DOI: 10.1088/1742-6596/1214/1/012003.

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-5>

Zemlyak V., Kozin V.

VITALIY ZEMLYAK, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Leading Researcher,
Department of Technical Disciplines, ORCID: 0000-0002-3218-5738, ResearcherID: Y-2761-2018,
ScopusID 36085759800, e-mail: vellkom@list.ru

Sholom-Aleichem Priamursky State University
70a Shirokaya St., Birobidzhan, Russia, 679015

VICTOR KOZIN, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Researcher of the Laboratory
for Problems of Creation and Processing of Materials and Products,
ScopusID 8548383800, e-mail: vellkom@list.ru

Institute of Machine Science and Metallurgy FEB RAS
1 Metallurgov St., Komsomolsk-on-Amur, Russia, 681005

The influence of cross-sectional shape of a submerged body on wave formation and ice-breaking

Abstract: When solving the problem of motion of a submarine vessel near the ice surface, the hull of a submarine, which is of a complex geometry, is usually replaced by a rotation body of a simplified shape while preserving its main characteristics (elongation and displacement). In turn, the shape of cross section of the hull can have a significant influence on the parameters of flexural gravity waves generated by submarine vessel's motion. The authors present an experimental research of influence of cross section's shape on the deflection and the length of flexural gravity waves. Experiments for which three models were made with the same characteristics, but different shape of cross sections, were carried out in the ice tank. In the process of towing the models velocity was determined and the profiles of deflections in the ice cover were registered. Scale modeling was 1:120. The experiments allowed us to find dependencies of parameters of flexural gravity waves on the characteristics of the models. For the first time using model experiment, influence of cross-sectional shape of a submerged body on the ice-breaking capacity of flexural-gravitational waves is determined.

Keywords: submerged body, ice cover, flexural-gravity waves.

REFERENCES

1. Baranov I.L., Karlinsky S.L., Sukhanov S.O. *Typhoon is changing the profession*. Sudostroenie. 2001(2):113–115. URL: <http://www.sstc.spb.ru/publications/sudostroy/detail.php?ID=7926> – 09.11.2019.
2. Zemlyak V.L., Baurin N.O., Kurbachiy D.A., Laboratory *Ice technology*. Vestnik, Quart. J. of Amur State University after Sholom-Aleichem. 2013(12):68–77. eLIBRARY ID: 21023639
3. Kozin V.M., Onishchuk A.V., Mar'in B.N. The Ice-Breaking Capacity of Flexural-Gravity Waves Produced by Motion of Objects. Vladivostok, Dal'nauka, 2005, 191 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002819370> – 14.11.2019.
4. Lavrov V.V. Deformation and strength of ice. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1969. 203 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01007147095> – 20.11.2019.
5. Nogid L.M. Modeling the motion of a ship in a continuous ice field and in broken ice. Transactions of LKI. 1959;XXVIII:179–185.
6. Redansky V.G. In the ice and under the ice (Covert operations of submarines). Moscow, Veche, 2004, 480 p. URL: http://militera.lib.ru/research/redansky_vg01/index.html – 28.01.2020.

7. Web-site of CDB Rubin URL: http://ckb-rubin.ru/press_centra/novo-sti/novost/news/detail/-News/podvodnyi_robotizirovannyi_kompleks_aisberg_preds – 13.11.2019.
8. Tokmakov A.A. Submarine transport vessels. Leningrad, Shipbuilding, 1965, 268 p. 1. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006486344> – 14.11.2019.
9. Kheisin D.E. Dynamics of Ice Cover. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1967, 216 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01006383459> – 10.11.2019.
10. Shimansky Yu.A. The theory of modeling the motion of a ship in a continuous ice field. Modern issues of ice-breaking. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1960. 89 p.
11. Khabakhpasheva T.I., Shishmarev K.A., Korobkin A.A. Large-Time Response of Ice Cover to a Load Moving Along a Frozen Channel. *Applied Ocean Research*. 2019;86:154–165. DOI: 10.1016/j.apor.2019.01.020
12. Lewis J.W. Recent development in physical ice modeling. *Offshore Technol. Conf.*, Houston, 1982:493–498.
13. Pogorelova A.V., Zemlyak V.L., Kozin V.M. Body Motion in Liquid under Ice Plate With Snow Cover. *Applied Ocean Research*. 2019;84:32–37. DOI: 10.1016/j.apor.2019.03.020.
14. Sturova I.V. Radiation of Waves by a Cylinder Submerged in Water With Ice Floe or Polynya. *Journal of Fluid Mechanics*. 2015;784:373–395. DOI: 10.1017/jfm.2015.582.
15. Sturova I.V. The Motion of a Submerged Sphere in a Liquid Under an Ice Sheet. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2012;76(3):293–301. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2012.07.005
16. Tkacheva L.A. Oscillations of a Cylindrical Body Submerged in a Fluid With Ice Cover. *J. of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2015;56(6):1084–1095. DOI: 10.1134/S002189441506019X
17. Zemlyak V.L., Kozin V.M., Baurin N.O., Nazarova V.P. Influence of Ice Cover on The Motion of a Submerged Body. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1214(1),012003. DOI: 10.1088/1742-6596/1214/1/012003.