На правах рукописи

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого», Инженерно-строительный институт, Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства

Казунин Иван Дмитриевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ОТ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК С ПОМОЩЬЮ ИРРЕГУЛЯРНО ВМОРАЖИВАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Научный доклад

Направление подготовки
08.06.01 «Техника и технологии строительства»
Направленность
05.23.07 «Гидротехническое строительство»

Научный руководитель:
д.т.н., профессор А.И.Альхименко

С-Петербург – 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы: Актуальность рассматриваемой диссертации определяется потребностями рынка стран, располагающихся в арктических регионах с целью минимизации ледовых нагрузок на ГТС как при движении ледовых полей, так и при сближении с ГТС, крупных судов ледовового класса, которые смогут осуществлять самостоятельное сближение с ГТС без помощи ледоколов.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие задачи:

- изучить современные методы понижения прочности льда при проходе судов ледового класса к ГТС;
- разработать эконочески эффективный метод защиты ГТС
- определить допустимую глубину математического моделирования и определить специальные требования к численной модели;
- произвести экспериментальную проверку предложенного метода защиты ГТС при сближении с ними судов ледового класса
- разработать численную модель процесса защиты ГТС с помощью предложенного метода защиты ГТС при сближении с ними судов ледового класса
- показать, что предложенная методика защиты ГТС может эффективно применяться для закрытых акваторий арктических портов;

Работа состоит из 5-ти глав:

В ***первой главе*** на основе анализа литературных данных приводится краткий обзор современных методов понижения прочности льда при подходе судов ледового класса к ГТС.

Вторая глава посвящена разработке методам защиты арктических ГТС с помощью иррегулярно вмораживаемых объектов (ИВО), которые размещаются на закрытой акватории.

Третья глава посвящена экспериментальной проверке проходимости судов через поле льда с ИВО при сближении с ГТС с целью определения параметров воздействий на ГТС и свойств льда.

Четвертая глава посвящена исследованию свойств исследуемых объектов, жидкостей и льда, используемых в работе. Применена теория о квазистационарном разрушении четырехслойной модели льда с равномерным распределением параметров внутри его каждого слоя. Зависимости параметров льда трансформированы автором, методом асимптотических эквивалентных замен к эквивалентными функциям, при которых она будет не прерывна и не будет иметь разрыва первой производной в всей области проводимого численного эксперимента.

Пятая глава посвящена численному моделированию процесса защиты ГТС с помощью ИВО при подходе судов ледового класса и показано, что предложенная методика защиты ГТС может эффективно применяться для закрытых акваторий арктических портов.

Область применения: результаты работы могут быть использованы для формирования защиты ГТС северных портов с закрытыми акваториями с целью: 1) оценки возможности снижения рабочих диапазонов нагрузок на причальные сооружения; 2) имитационного моделирования для проектов создания систем управления ледовой обстановкой 3) оптимизации конструктивных элементов систем защиты сооружений 4) создания учебных приложений

***Научная новизна (*Новизна и практическая значимость):** в результате необходимости освоения арктических районов, автором предложен, изучен и рассчитан новый метод по созданию безопасных морских маршрутов в северный регионах, путем уменьшения толщины и создания пористой структуры, а, следовательно, и уменьшения прочностных характеристик льда.

Новизна работы подтверждена свидетельствами и состоит в том, что:

- Разработан новый способ защиты поверхности акватории порта от ледообразования с помощью плавающих изолированных с поверхности объектов иррегулярной структурой

- Рассчитаны конструктивные решения реализации поставленной задачи и выполнен их кинематический анализ, решены вопросы формы защиты и адгезии использованных материалов
- Разработан тепловой расчет для изолирующего слоя, укладываемого на поверхность предложенных, конструкция предотвращающих ледообразование, для которого методом исследования литературных данных подобраны коэффициенты характерные для порта Сабетта.

На защиту выносится:

- новый метод защиты ГТС с помощью ИВО
- новая методика расчета нагрузок на ГТС защищаемых ИВО
- новые экспериментально полученные данные по нагрузкам на ГТС при статическом нагруженные и при движении льда судов ледового класса через поле сплошного льда и поля льда ослабленного ИВО

Исследования проводились в 2012 в ФГПУ «РОСМОРПОРТ» г. Новороссийске, 2013 в организации ООО «Морстройтехнология», в проектирования, с 2012 по 2014 на кафедре прикладной кибернетики при Математико-Механическом факультете, С-Петербургского Государственного Университета, с 2015 – 2020 проектном отделе при Федеральном Государственном Унитарном Предприятии (ФГУП) «Главного Военно-Строительного Управления №4» (ГВСУ №4) Министерства обороны Российской Федерации (МО).

Внедрение результатов работы: результаты работы автора внедрены в ряд ОКРов разработанных в рамках РГМТ 2011-2013 годы и работу предприятий группы «Кронштадат», о чем имеется акт о внедрении.

Апробация работы: материалы диссертационной работы докладывались на заседаниях кафедры. Отдельные положения диссертации докладывались автором на следующих конференция и семинарах.

- *На конференциях*: 1)Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference Kona, Big Island, Hawaii, USA, June 21-26, 2015 ; 2) International Conference On Engineering Sciences And Technologies, 27-29 May 2015, Tatranská

Štrba, High Tatras Mountains - Slovak Republic; 3) Научно-практической конференции с международным участием (неделя науки 2012 года). Инженерно-строительный факультет.

По теме диссертации опубликовано: 13 печатных работы, в числе которых 3 работы, опубликованных в изданиях**,** рекомендованных в Перечне ВАК, 6 свидетельств о регистрации программ, 2 публикации в материалах международных конференций и 2 - в других изданиях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОНИЖЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ЛЬДА ПРИ СБЛИЖЕНИИ СУДОВ ЛЕДОВОГО КЛАССА С ГТС.

Одна из ключевых особенностей строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений в северных регионах - воздействие льда. Определение основных несущий элементов конструктива сооружения напрямую зависит от воздействия льда и ледовых нагрузок. При проектировании ГТС, расчет ледовых нагрузок определяется на основании нормативных документов, одним из основных который является СП38.13330 [4]. Но помимо норм, из большого перечня книг, статьей, авторы предлагают к подробному рассмотрению [1], [2], [3]. Но все рекомендации, сводятся к усилению и удорожанию конструкций.

Воздействие льда, чаще всего проявляется в качестве нагрузки, под действием внешних факторов (например течение, ветер). Но также существуют ситуации, воздействия сил на сам ледовый покров. Один из таких случаев, наиболее распространённый в настоящее время, во время использования судов ледового класса, для разрушения и поддержания акватории свободной ото льда. При ломки льда таким способом и образовании судоходного канала [5], [6], усилие от судна передается на лед, создавая в нем напряжения. В процессе разрушения льда таким способом и при выполнении швартовых операций судов, возникает высокая вероятность повреждения причальных сооружений в зоне переменного

уровня воды [7]. Для предотвращения разрушения гидротехнических сооружений (ГТС) используются методы ломки льда, методы уменьшения его прочности или значительное усиление конструкций.

В качестве нового метода предлагается использовать иррегулярно расположенные полупогруженные шарообразные искусственно вмороженные объекты (ИВО) [8], [9] большого диаметра, которые будут при замерзании акватории нарушать целостность ледового поля. Использование ИВО поможет уменьшить прочностные характеристики ледяной толщи и позволит судну ледового класса (СЛК) создавать меньшие нагрузки на ГТС при сближении с ним, а также избежать использования дорогостоящих ледоколов или установки дорогостоящих систем по воздействию на ледовый покров.

Глава 2. ЗАЩИТА АРКТИЧЕСКИХ ГТС С ПОМОЩЬЮ ИВО. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОНСТРУКЦИИ.

В закрытых акваториях портов, расположенных в северных регионах, после образования ледового покрова, при выполнении швартовых операций судов, возникает высокая вероятность повреждения причальных сооружений в зоне переменного уровня воды [7], [3]. Существует огромное количество видов структур льда [10], [11], которые образуются под воздействием множества природных факторов. Рассмотрим, наиболее важный для защиты гидротехнических сооружений (ГТС), случай “сплошного ледяного покрова акватории арктического порта”.

При исследовании воспользуемся схемой воздействия корпуса судна на лед, предложенной в работе [5]. Схема приведена на рис.1. Воздействие судна на лед производят разрушение льда в носовой части (рис. 1 – в области условным диаметром B_k'), при этом их воздействие на лед передается на ГТС в трех характерных областях B_k', d, d' [5]. Наибольшую опасность для ГТС представляет области B_k', а область канала L, остающегося за СЛК, является наименее опасной.

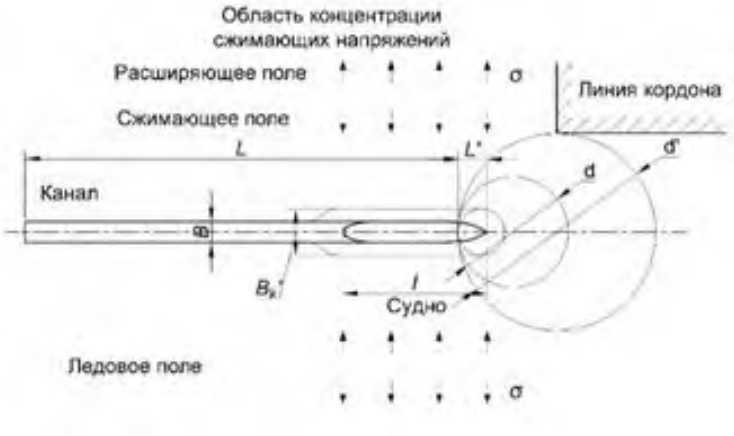


Рис. 1. Трех зонная схема [5] механических воздействий СЛК на ГТС для сплошного ледяного покрова на акватории арктического порта.

(ссылка на источник фото: http://www.world-art.ru/cinema/cinema_photos.php?id=92556&screenshot_number=901762)

B_k — ширина канала (считаем, что равна B –ширине судна); B_k' — ширина поверхности льда, подверженного основному воздействию СЛК; d', d — области концентрации сжимающих напряжений; l — длина судна; L — длина канала [5] (рис. 13 стр 25), L' - области переходного состояния канал

Разрушающее воздействие в области B_k' складывается из среза, сжатия, изгиба, где наиболее важной формой разрушения льда при использовании СЛК является изгибающее воздействие (рис. 2) [5].

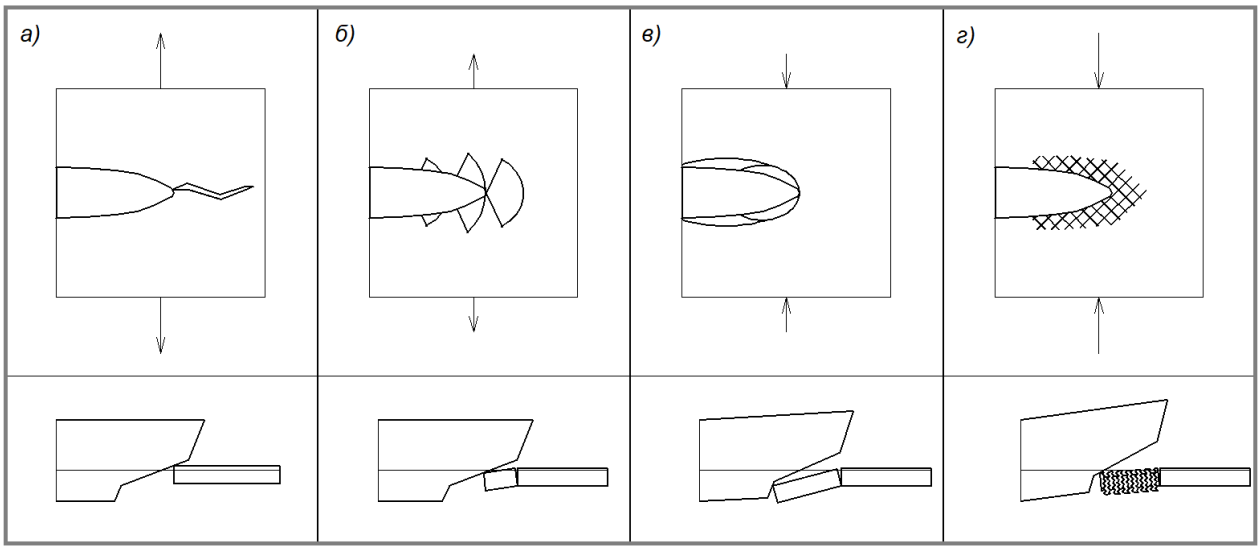


Рис. 2. Основные виды разрушения льда [5] в области B_k'

а — развитие разрывов при сильных внутренних растяжений поля льда; *б* — обламывание кромки льда при внутренних растяжениях поля льда (изгиб); *в* — обламывание кромки льда при внутреннем сжатии поля льда (изгиб); *г* — торошение при сильном внутреннем сжатии поля льда.

Для всех случаев разрушения льда, приведенных на рисунке 2, расчет сопротивления движению судна производится с использованием аналитических методов и с учетом экспериментальных зависимостей, полученных для конкретных типов корпусов, при этом полное сопротивление судна при движении во льдах представляется в виде формулы:

$$R = R_p + R_{\text{тр}} + R_{\text{обл}} + R_{\text{в}}$$

где R_p - сопротивление от разрушения сплошного ледяного покрова (см. *d*, рис. 1), $R_{тр}$ – трение корпуса о кромку неразрушенного льда канала (рис. 1); Rобл - сопротивление от взаимодействия корпуса с обломками льда (от притапливания, поворота, раздвигания обломков корпусом судна) и от трения обломков о корпус (на стыке канала по ширине B_k-рис. 1); $R_в$ - сопротивление воды.

Для оценки распределения нагрузки от судна, создаваемого винтами, в соответствии с пятиточечной моделью разрушения льда (рис 3) [12] опишем формулами нагрузку, передаваемую от судна на лед.

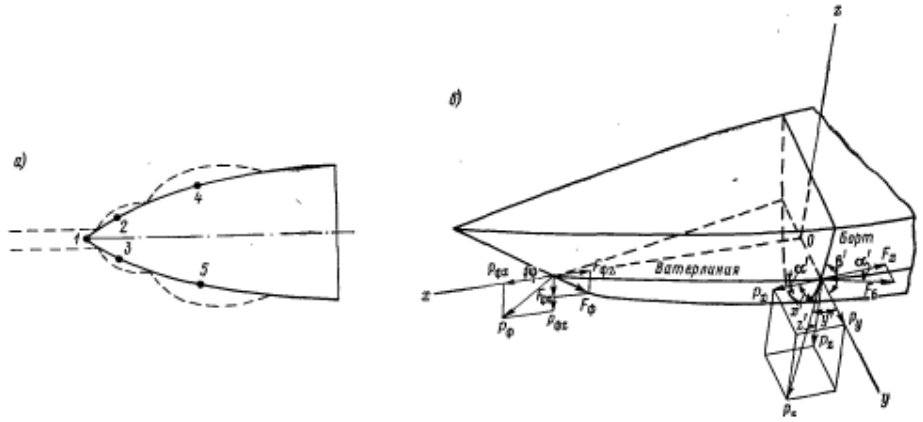


Рис. 3. Пятиточечная модель разрушения льда судном ’

Усилие, создаваемое винтами судна ледового класса T, равномерно и пропорционально k, распределяется между пятью точками контакта, оказывая контактное давление $P_б$ и $P_ф$, создавая силы трения $F_б$ и $F_ф$. В результате получим:

$$\begin{cases} P_б = k * cosx'; & F_б = \mu_k * P_б = \mu_k * k * cosx' \\ P_ф = k * cos(90° - \varphi) = k * sin\varphi; & F_ф = \mu_k * P_ф = \mu_k * k * sin\varphi \end{cases}$$

где k – коэффициент пропорциональности усилия, создаваемого винтами,

x' - угол между нормалью к борту и направлением движения вдоль тяги винтов,

y’ - угол между нормалью к борту и горизонтальной осью y,

z’ - угол между нормалью к борту и вертикальной осью z.

μ_k - коэффициент динамического трения корпуса судна об лед, изменяющийся в диапазоне (0,04…0,8) в зависимости от влажного до сухого трения корпуса об лед.

Тогда проекции $P_б$ и $F_б$ имеют вид:

$$\begin{cases} P_x = P_б * cosx' = k * cos^2x' \\ P_y = P_б * cosy' = k * cosx' * cosy' \\ P_z = P_б * cosz' = k * cosx' * cosz' \end{cases} \qquad \begin{cases} F_x = F_б * cos\alpha' = \mu_k * k * cosx' * cos\alpha' \\ F_y = F_б * sin\alpha' = \mu_k * k * cosx' * sin\alpha' \\ F_z = F_б * \emptyset = 0 \end{cases}$$

А проекции $P_ф$ и $F_ф$ имею вид:

$$\begin{cases} P_{фx} = P_ф * sin\varphi = k * sin^2\varphi \\ P_{фy} = F_ф * \emptyset = 0 \\ P_{фz} = P_ф * cos\varphi = k * sin\varphi * cos\varphi \end{cases} \qquad \begin{cases} F_{фx} = F_ф * cos\varphi = \mu_k * k * sin\varphi * cos\varphi \\ F_{фy} = F_ф * \emptyset = 0 \\ F_{фz} = F_ф * sin\varphi = \mu_k * k * sin^2\varphi \end{cases}$$

В соответствии с (2) получаем распределение тяги по пяти точкам контакта:

$$T = R = 2 * \left(P_{x_{1ш}} + P_{x_{4ш}}\right) + P_{фx} + 2 * \left(F_{x_{1ш}} + F_{x_{4ш}}\right) + F_{фx}$$

где $P_{x_{1ш}}, P_{x_{4ш}}$ и $F_{x_{1ш}}, F_{x_{4ш}}$ – проекции сил для первого и четвертого шпангоутов, $P_{фx}$, $F_{фx}$ – усилия для форштевня.

Распределение усилия *T* в пятиточечной модели контакта *(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5)*; и, используя законы аналитической геометрии, определим усилия, создаваемые судном ледового класса (СЛК) в равномерной структуре льда (без включения ИВО).

$$\begin{cases} P_{1xy} = P_{фx}; & P_{1z} = P_{фz} \\ P_{2xy} = P_{3xy} = P_{xy1ш} = \sqrt{P_{x1ш}^2 + P_{y1ш}^2}; & P_{2z} = P_{3z} = P_{фz1ш} \\ P_{4xy} = P_{5xy} = P_{xy4ш} = \sqrt{P_{x4ш}^2 + P_{y4ш}^2}; & P_{4z} = P_{5z} = P_{фz4ш} \end{cases}$$

В результате можно сформулировать вывод о том, что усилие на причальное сооружение оказывает:

- лед, находящийся под нагрузкой от форштевня (≈31%)
- лед, находящийся под нагрузкой от первого шпангоута (≈15%)
- лед, находящийся под нагрузкой от четвертого шпангоута (≈8%).

Для общей простой оценки решеним плоскую задачу (рис. 4) где определеним влияние прикладываемой изгибающей нагрузки P_z на теоретическую линию слома льда b_0 и горизонтальную нагрузку P_y.

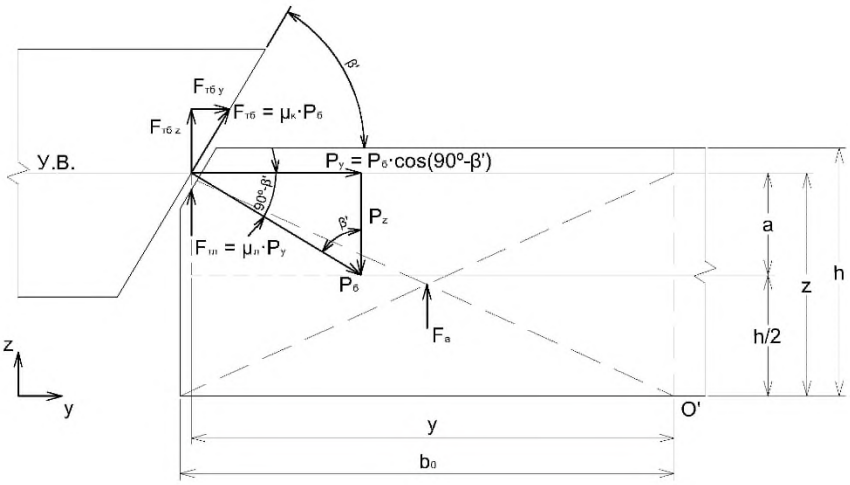


Рис. 4. Плоская схема разрушения льда судном ’

$$P_z = q_{\text{вт}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot W_x \cdot \sigma}{q_{\text{вт}}}}$$

$$b_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot W_x \cdot \sigma}{q_{\text{вт}}}}$$

где $q_{\text{вт}}$ – результирующая выталкивающая распределенная сила; W_x – момент сопротивления сечения льда по линии слома, σ – прочность льда на изгиб.

Таким образом, можно сделать вывод:

1. при увеличинии плаучести

- растет вертикальная изгибивающая сила, и как следствие горизонтальаня
- линия слома перемещается ближе к прикладываемой силе

2. при уменьшении момента сопротивления сечения льда

- уменьшается прикладываяемая сила
- линия слома также перемещается ближе к прикладываемой силе

В результате теоретических вычислений можно заключить, что для достижения нужных результатов, конструкция ИВО по плотсности должна быть близкая к плотности льда (результирующая выталкивающая сила остается практически такой же как при чистом поле льда), адгезия между ИВО и льдом должно стремится к нулю, для уменьшения момента сопротивления сечения льда.

Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК СПЛОШНОГО ЛЬДА И ЛЬДА С ИВО НА ГТС ПРИ ШВАРТОВКЕ СУДОВ ЛЕДОВОГО КЛАССА.

В области B_k', основным видом нагрузки от судна, передаваемой на ГТС закрытых акваторий, является нагрузка, предшествующая моменту разрушения льда по варианту *в)* рис. 2 , и которая для решения большинства задач по защите ГТС может быть представлена в виде “пятиточечной модели ломки льда” [12]. В этом случае, для дальнейших рассуждений по защите ГТС, пять сегментов льда в области B_k', (возникающие при разрушении льда СЛК (рис. 5)) могут быть представлены в виде эквивалентных балок подверженных изгибу. Поэтому балки, подверженные изгибу, были выбраны для экспериментальной проверки гипотезы авторов по использованию ИВО для снижения нагрузок при защите ГТС, а момент их излома выбран для определения времени завершения единичного силового воздействия судная на ГТС в области B_k', выделенной на рисунке окружностью.

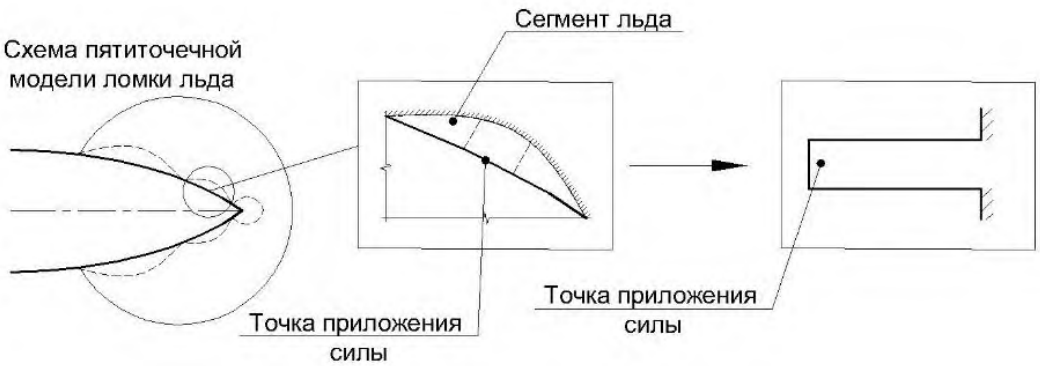


Рис. 5. Предположение о возможности трансформации сегментов пятиточечной модели ломки льда (при движении СЛК) с наклонно-направленным воздействием на лед к экспериментальным клавишам, исследованных в данной статье, с вертикальным результирующим воздействием (в виде проекции на ось ординат).

Как в лабораторных, так и в полевых условиях для испытания льда на изгиб применяются три основные техники измерений основных величин, входящих в зависимости:

$$\begin{cases} \sigma = \dfrac{M_x}{W_x} \\ M_x = \int F dS \\ W_x = \dfrac{I_x}{y_{\max}} = \dfrac{1}{y_{\max}} \cdot \int\limits_A y^2 dA \end{cases}$$

где M_x— изгибающий момент, W_x — момент сопротивления сечения, F — сила, S — расстояние, I_x — момент инерции сечения, y_{max} — проекция на ось ординат *(Y)* наиболее удаленной точки сечения в перпендикулярной оси абцис (*X)*, *A* — площадь сплошного сечения.

Два способа требуют извлечение образца из природной среды и помещение в искусственные (лабораторные) условия. Поэтому при испытании льда на изгиб, наиболее часто применяют 3й способ (без извлечения льда из водоема), который и был использован в данной работе. В соответствии с выбранным способом из сплошного льда выпиливается прямоугольная балка, один конец которой закреплен (как продолжение поля сплошного льда); а второй — нагружается во время проведения исследований. При этом, в соответствии с выбранной методикой (базирующейся на теории погруженных пластин) выпиливается балка такай длинны *S*, чтобы при проведении исследований излом льда происходил на достаточном для целей исследования расстоянии от ее заделки (закрепленного конца).

Расчет прочности на изгиб σ для равномерного прямоугольного сечения имеет вид:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} = \frac{6 \cdot F \cdot L_p}{B \cdot h^2}$$

где F — нагрузка, прикладываемая по площади, L_p — расстояние от линии действия нагрузки до линии слома L (см. рис. 7), B — ширина образца льда, h — толщина льда.

Для льда с ИВО расчет σ выполнялся для момента сопротивления сечения представленного на рис. 6.

$$W_x = \frac{B \cdot h^2}{6} - W_{\square} \cdot n$$

где W_x — момент сопротивления сечения льда с ИВО с учетом вычета площади сегмента W_s, n — количество ИВО в сечении приходящихся на ширину B.

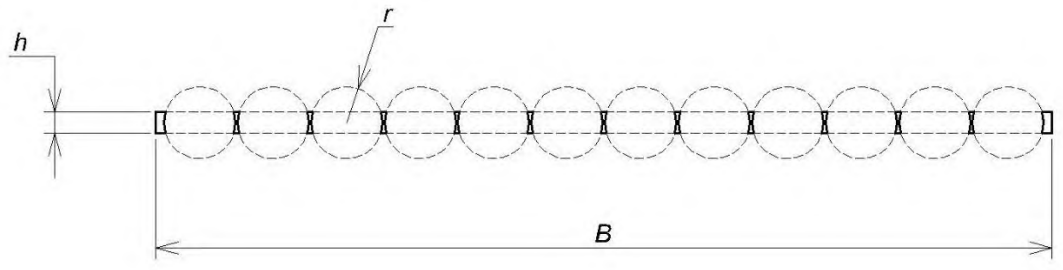


Рис. 6. Схема составного сечения

Эксперимент по определению прочности на изгиб Иррегулярно плавающих Вмерзших в лед Объектов (ИВО) проведен в г. Санкт-Петербурге на озере Лахта, 20 – 21 марта 2016г. и 8 – 9 февраля 2017г. Место проведения испытаний (60,0000 СШ, 30,1868 ВД). На ледовой поверхности озера выполнен разрез льда прямоугольной формы длиной 5,5м, шириной 110 – 120см и разрез длиной 10 м и шириной 150 – 175 см.

Толщина ледового покрова на озере колебалась в диапазоне 20÷45 см (в основном, 38 см). Выбранный участок освобождался от льда для последующей установки в нем ограничителей, делящих поверхность воды на прямоугольные фрагменты разной ширины В (изменяемой в диапазоне значений 10 – 60 см), часть из которых оставалась незаполненными, а часть заполнялись пластмассовыми, а часть полиуретановыми шариками (ИВО) создавая два типа исследуемых клавиш. Для возможности дальнейшего сравнения сплошные клавиши и клавиши с ИВО формировались одновременно, при одинаковых внешних условиях. Клавиши с ИВО разделялись на два вида: в первом случае применялись шарики диаметром 40 мм, полые внутри, к которым крепился специальный груз для их погружения в воду на половину (ИВО½), во втором случае шарики диаметром 40 мм были сплошные, которые находились на 2/3 погруженные в воду (ИВО⅔).

Длительность формирования ледового слоя зависела от погодных условий водоема и варьировалась в диапазоне 5-7 часов. В течение суток проводили серию из двух последовательных полномасштабных экспериментов с клавишами. Температура воздуха колебалась от –8ºС до –12ºС, с доминирующими значениями в районе –10ºС. В процессе замораживания пресноводного льда в водоеме, в естественных условиях, равномерная фактура образующегося льда обеспечивалась чистотой водной поверхности и ее защитой от ветрового воздействия, отсутствием поступления газа со дна водоема (за счет выбора места и способа вскрытия льда).

При достижении толщины льда на участках полигона в диапазоне 10 – 18 мм ограничители шириной не менее 3 см изымались, образуя разрезы в образовавшемся ледяном покрове, скрепленного двумя концами с полем льда водоема. Далее, с одной стороны удалялись трех сантиметровые граничные фрагменты образовавшегося льда (с переходной по радиусу-замораживания толщиной) и мы получали клавиши, соединенные одним концом с основным полем льда водоема и пригодные для проведения эксперимента.

Испытательный полигон прямоугольной формы был разделён на 3 области выделенных для проведения эксперимента: область поля льда водоема, область чистой воды (включая очищенное пространство 3 см для обеспечения свободного движения конца клавиши длиной S и толщиной льда h), область клавиш с равномерной толщиной льда.

Нагрузка на свободный конец клавиши осуществлялась сверху вниз на поверхность диаметром D = 120 мм медленным изменением веса.

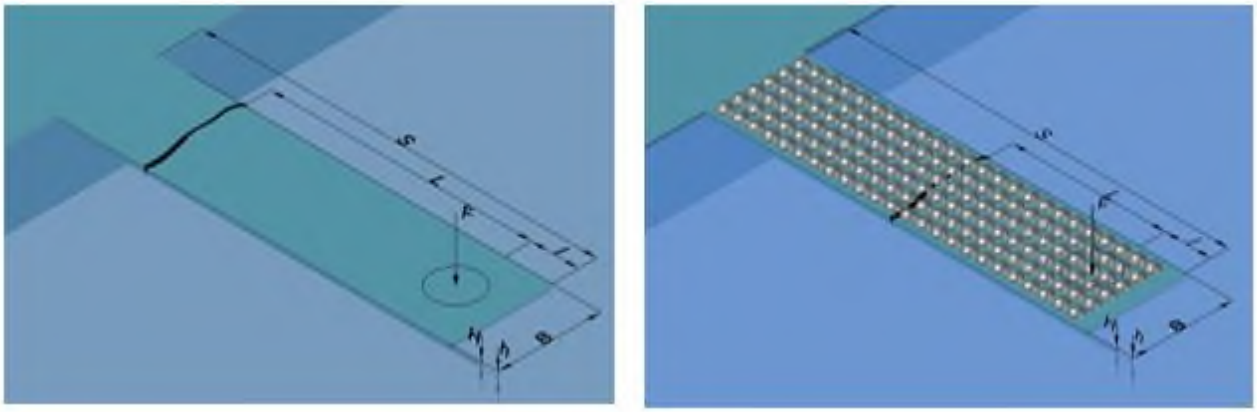


Рис.7. Схема проведения эксперимента с образцами льда

Для достижения наиболее точных результатов в материалах Международной Ассоциации Гидрологических Исследований (МАГИ) рекомендуется соблюдать следующие параметры клавиш: $B = (1 – 2)h$, $S = (7 – 10)h$. В нашем случае, из-за наличия шариков эти рекомендации не применимы, однако для проведения сравнительного анализа двух типов образцов сплошного льда и образцов льда с ИВО, длина, ширина и толщина образцов были выбраны приблизительно одинаковыми. Размеры экспериментальных образцов лежали в диапазоне: длина 80 – 115 см (для полигона 20 марта 2016 г.) и 100 – 170 см (для полигона 8 февраля 2017 г.); ширина 10 – 60 см; толщина 10 – 18 мм.

Для проведения оценочных расчетов экспериментальные данные были обработаны методом наименьших квадратов. Полученные результаты представлены на рисунке 8.

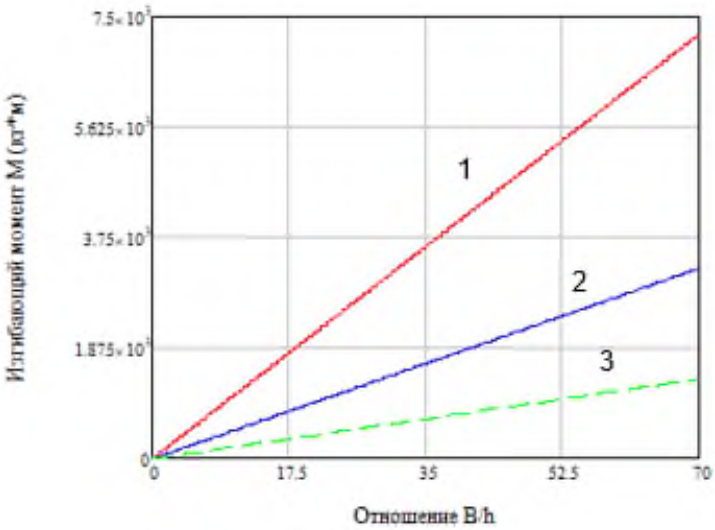


Рис. 8. Влияние ИВО на изгибающий момент в зависимости от их ширины *B* и толщины *h*

1 — функция $M_{x\text{-}сл}(A_x)$ для сплошного льда; *2* — функция $M_{x\text{-}ИВО½}(A_x)$ для льда с ИВО½; *3* — функция $M_{x\text{-}ИВО⅔}(A_x)$ для льда с ИВО⅔.

В ходе исследований удалось установить качественное влияние ИВО шарообразной формы на прочность льда на изгиб в зависимости от степени его погружения:

- использование ИВО½, «поддерживающими» лед, приводило к снижению прочности льда в ≈2,2 раза, в сравнении со сплошным

- использование ИВО⅔, «не поддерживающими» лед, приводило к снижению прочности льда в ≈5,2 раза, в сравнении со сплошным.

Качественная оценка распределения ИВО шарообразной формы по подходному каналу или акватории после проводки судна выполнена на основании фото и видео материалов, полученных с использованием модельных, масштабированных шариков в экспериментальной зоне ледового бассейна длиной 30 м, разделенной на четыре участка, по 5м каждый (рис. 9). При обработке данных экспериментальная зона графически делилась на ряды, шириной 40 мм, в каждом из которых определялось количество ИВО.

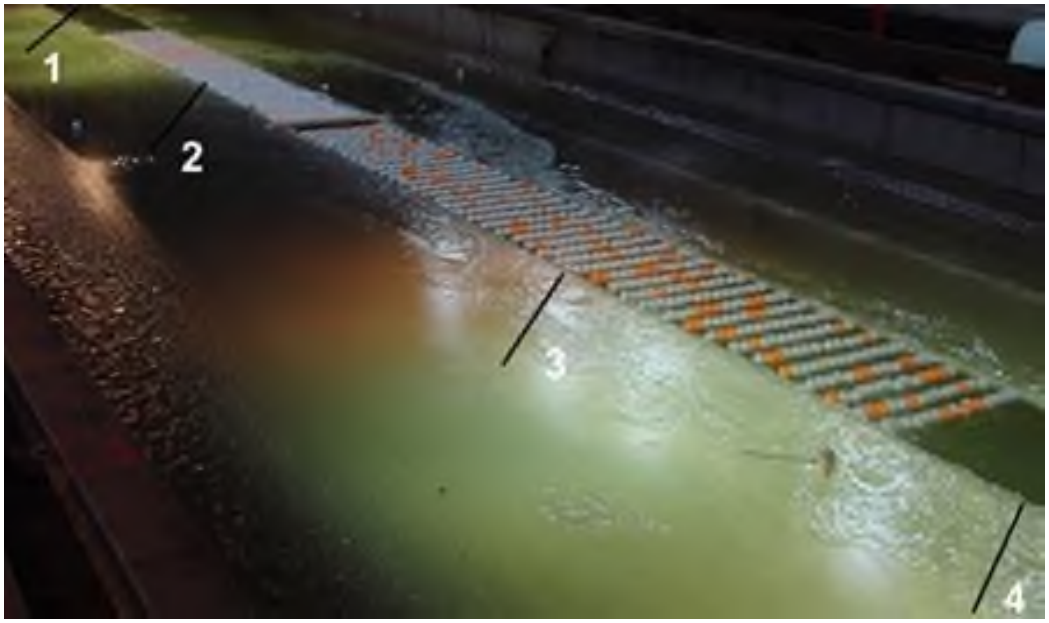
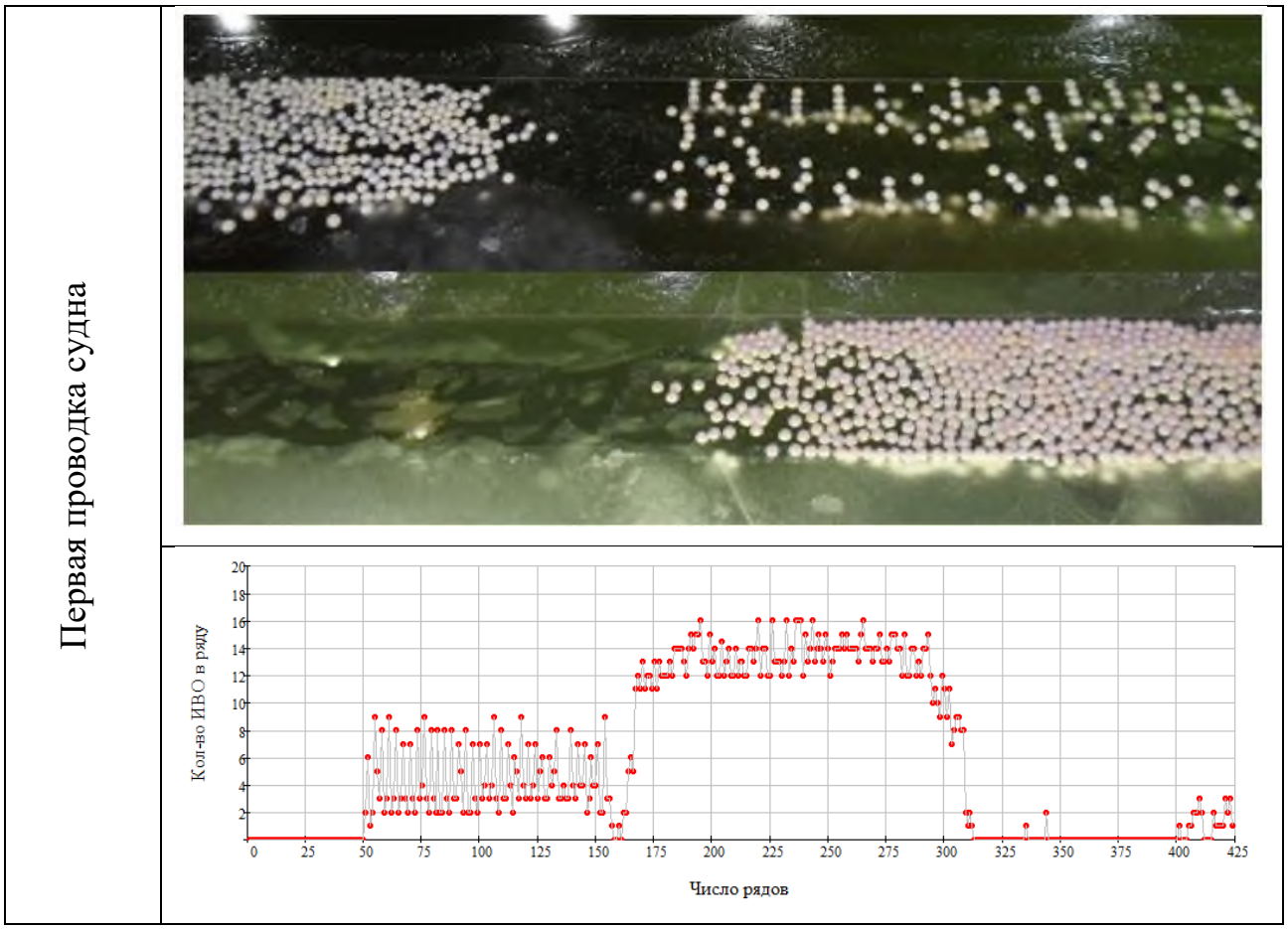
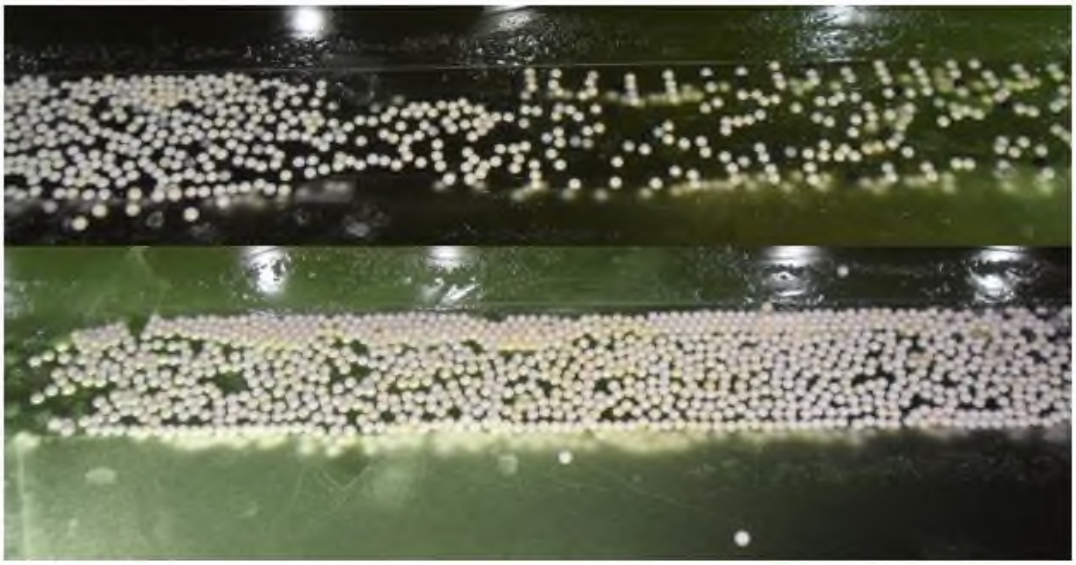
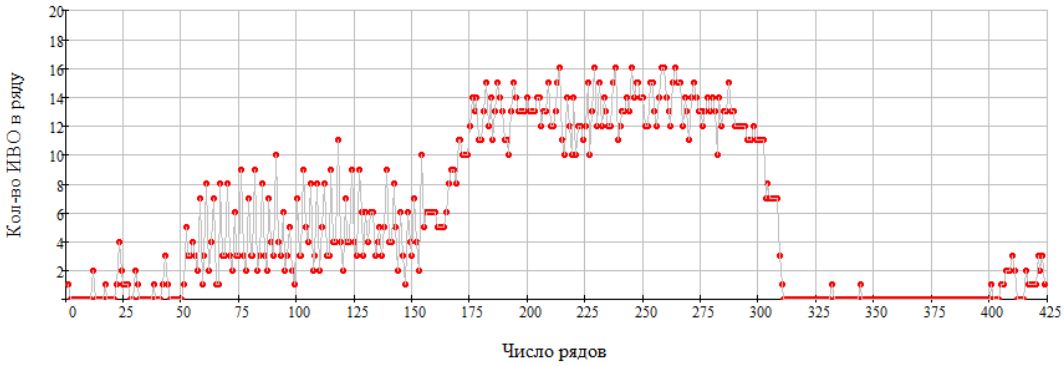


Рис. 9 – Рабочая зона и исходное распределение ИВО.

1 — участок моделированного льда, 2 — участок сплошного размещения ИВО, 3 — участок с редко расположенными ИВО, 4 — чистая вода

В результате статистического анализа удалось определить количество шариков, вынесенных за рассматриваемый диапазон N для двух участков (с разряженным и плотным расположением шариков). После первой проводки судна ΔS_0-2 составило 116 шт. из 2386 шт., а после второй проводки ΔS_0-3 – 168 шт. из 2386 шт., причем часть шариков, вынесенных после первой проводки судна, вернулась обратно после второй проводки судна.



Вторая проводка судна	
	

На основании t-критерия Стьюдента был оценен уровень значимости расхождения распределений ИВО между их начальным расположением и расположением после первой и второй проводки судна, который составил 0,3% (при вмороженных ИВО) и 0,5% (при свободно плавающих ИВО в битом льду).

Кроме того, на основании фото и видео материалов, можно сделать заключение, что на закрытых акваториях портов и подходных каналах использование ИВО показывает удовлетворительные результаты по сохранению их распределения при защите ГТС, а также, что существенного “выноса” ИВО из зоны защищаемых ими ГТС не происходит.

Глава 4. АНАЛИЗ СВОЙСТВ МОДЕЛИРУЕМОГО ЛЬДА.

Для моделирования поведения исследуемых объектов, необходимо знать их свойства и свойства сред, в которых они находятся, что позволит определить допустимые параметры в ходе: численного и экспериментального исследования и оценить допустимые диапазоны отклонения получаемых значений. При этом свойства должны быть описаны непрерывными функциями, не имеющими разрыва первой производной, на всем диапазоне исследуемых параметров. Они будут использоваться в численных моделях, реализованных в расчетных пакетах и моделях автора.

Для решения задачи диссертационного исследования, будем считать, что 1) суда, причальные гидротехнические сооружения, стационарные платформы, ИВО являются однородными, упругодеформируемыми, не разрушающимися объектами, 2) вода в нашей задаче будет считаться несжимаемой средой, с плотностью, зависящей только от солености и температуры; а 3) лед будет обладать набором специфических особенностей, описанных в данной главе.

По своей природе лед не может обладать однородной («идеальной») структурой, как и из-за климатических факторов (давление, резкие скачки температуры, соленость воды и т.п.) так и из-за антропогенного влияния человека (мусор, отходы), поэтому его свойства непостоянны. В целях необходимости упрощения модели в нашей задаче морской лед будем считать упругодеформированным, разрушающимся, многокомпонентным веществом, которое состоит из твердой и жидкой фазы, и которое в зависимости от его солености, температуры, давления может иметь разную фактуру и пористость.

Поскольку экспериментальный лед находится на границе между двумя средами с разной температурой – воздух -10°C и вода +1°C, то в образованном, на поверхности водоема, льду, будет послойно разная температура и структура, как представлено на рис 10.

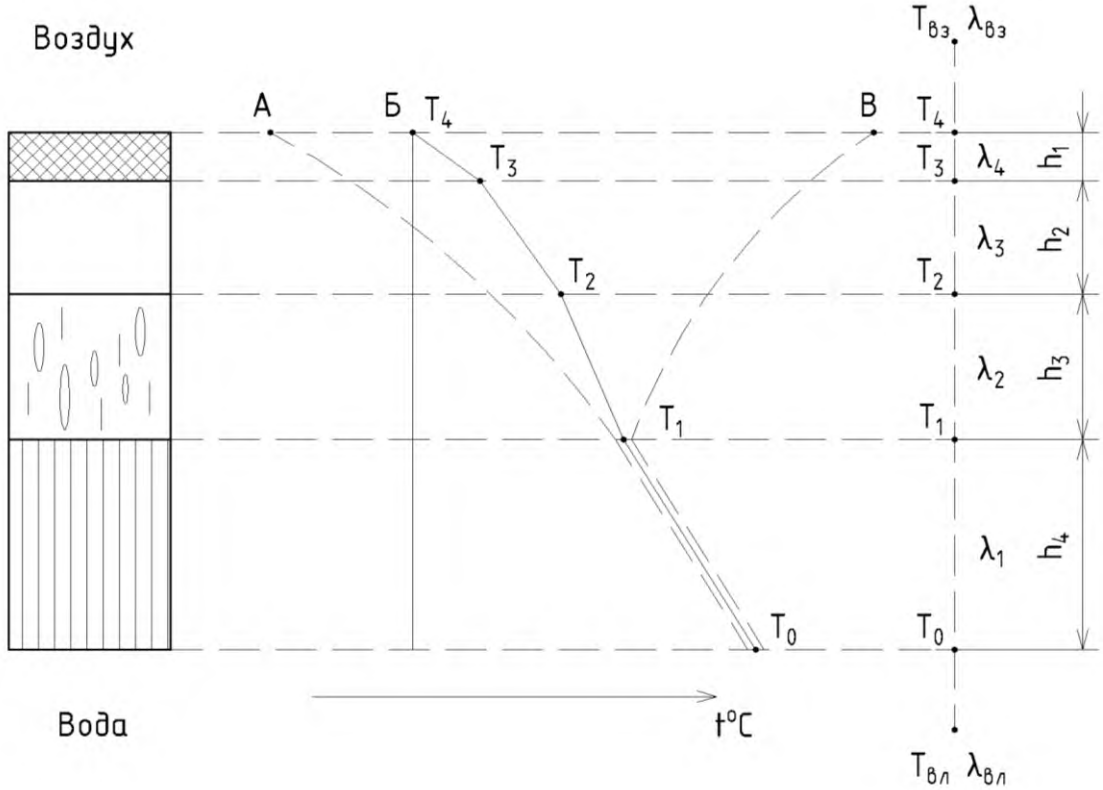


Рис. 10. Процесс образование ледового покрова на открытых водоемах

Лед будет представлен как материал, состоящий из четырех слоев, для каждого из которых будут определяться и рассчитываться свои параметры и характеристики при соответствующей температуре, как представлено в формуле:

$$\begin{cases} h_4 \to T_{ср4} \;\to\; E_4, \nu_4, \sigma_{из4} = f(T_{ср4}, n_4) \\ h_3 \to T_{ср3} \;\to\; E_3, \nu_3, \sigma_{из3} = f(T_{ср3}, n_3) \\ h_2 \to T_{ср2} \;\to\; E_2, \nu_2, \sigma_{из2} = f(T_{ср2}, n_2) \\ h_1 \to T_{ср1} \;\to\; E_1, \nu_1, \sigma_{из1} = f(T_{ср1}, n_1) \end{cases}$$

где h_i – толщина слоя льда, n_i – пористость слоя льда $T_{срi}$ – средняя температура слоя льда, E_i - модуль юнга слоя льда.

Для послойного определения плотности морского (пресного) льда ρ, кг/м^3 от температуры, давления, пористости и солености, будем использовать зависимость, дополненную автором:

$$\rho(P,T,n,s) = \frac{\rho_{пл}(P,T,n)}{M_р(T,s)\cdot\left(\frac{\rho_{пл}(P,T,n)}{1+0.0008\cdot S_р(T)}-1\right)+1}\cdot 10^3$$

где $M_р(T,s)$ – масса рассола в 1 кг морского льда как функция от температуры льда, кг/кг; $S_р(T)$ – соленость рассола как функция от температуры льда, ‰; $\rho_{пл}(P,T,n)$ – плотность чистого льда в зависимости от температуры льда, давления, пористости.

$$\rho_{пл}(P,T,n) = \frac{\rho_ч}{1+\gamma\cdot T}\cdot\left(1+0{,}94\cdot 10^{-7}\cdot(P-1)\right)\cdot(1-n)$$

где γ – коэффициент объемного расширения льда ($0{,}158 \cdot 10^{-3}$ °C $^{-1}$), $\rho_ч$ – плотность чистого пресноводного льда, без пор, при температуре 0°C и атмосферном давлении 1 атм и составляет 916.8 кг/м^3.

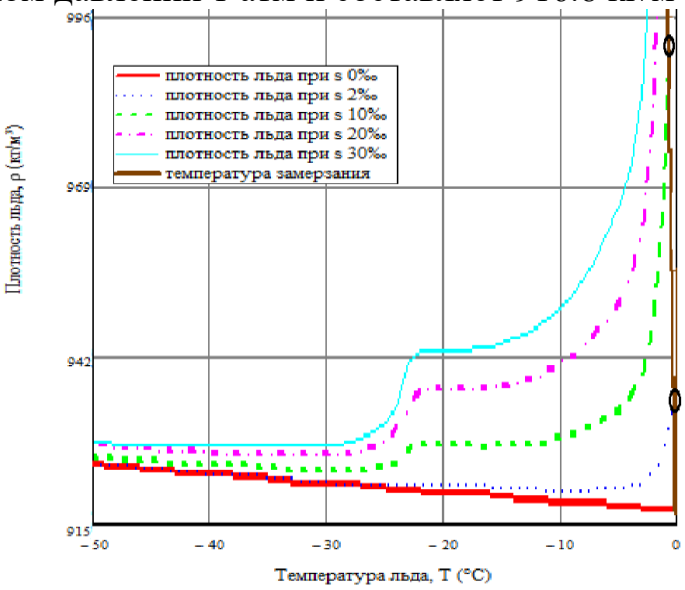


Рис. 11. График зависимости плотности льда ρ (кг/м^3) от температуры льда T (ºC).

Коэффициент Пуассона определяется по экспоненциальной зависимости от температуры льда T °C , предложенной В.Уикса и А.Асура:

$$v(T) = 0.333 + 0.06105 \cdot e^{\left(\frac{T}{5.48}\right)}$$

Модуль Юнга определяется на основе уравнения К.Хуттера в зависимости от температуры и солености, и дополненное включением пористости по следующей системе:

$$E(\mathrm{T,n,s}) = \begin{cases} E_{пр}(\mathrm{T,n}) \cdot \left(1 - 5 \cdot V_p(\mathrm{T,s})\right) & 0 \le V_p(\mathrm{T,s}) \le 0{,}15 \\ E_{пр}(\mathrm{T,n}) \cdot \left(47{,}168 \cdot \left(0{,}15 - V_p(\mathrm{T,s})\right)^3 - 45{,}97 \cdot \left(0{,}15 - V_p(\mathrm{T,s})\right)^2 + 0{,}5 \cdot \left(0{,}15 - V_p(\mathrm{T,s})\right) + 0{,}25\right) & 0{,}15 \le V_p(\mathrm{T,s}) \le 0{,}4 \\ 0{,}06 \cdot E_{пр}(\mathrm{T,n}) \cdot \left(1 - V_p(\mathrm{T,s})\right) & 0{,}4 \le V_p(\mathrm{T,s}) \le 1 \end{cases}$$

$$E_{пр}(T,n) = 11 \cdot (1-n)^2 \cdot (1 - 0{,}00146 \cdot T) \cdot 10^9$$

Полученные формулы и описание свойств льда, помогут в дальнейшем, более точном моделировании экспериментальных исследований в вычислительном пакете.

Глава 5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАЩИТЫ ГТС С ПОМОЩЬЮ ИВО ПРИ ПОДХОДЕ СУДОВ ЛЕДОВОГО КЛАССА

Моделирование клавиш из чистого льда и льда с ИВО и численный расчет выполнен на базе программного комплекса ABAQUS, для чего было разработатна

схема расчета в которой лед представлен в ввиде перфорированых пластин с свойствами льда, а поддерживающая сила ввиде поля пружин.

Для моделирования материала льда, были рассчитаны его свойства, на основе формул (1)-(5), для экспериментального льда, при температуре воздуха -10°С, воды +1°С. Результаты расчета приведены в таблице 1

Таблица 1. Расчётные свойства льда

Номер слоя	Плотность слоя льда, кг/м^3	Коэффициент Пуассона	Расчетный модуль Юнга, Па	Примечание
1	916	0,3	10,24E+9	граница лед-воздух
2	916	0,3	8,12E+9	
3	930	0,35	5,7E+9	
4.1	945	0,4	3,45E+9	граница фазового перехода, при толщине более 12 мм
4.2	960	0,4	1,45E+8	граница фазового перехода, при толщине менее 12 мм

При статическом расчете клавиш льда в вычислительном комплексе приняты следующие допущения:

- Для построения клавиш в расчетном пакете используются оболочечные элементы типа SHELL;

- Расчет клавиш выполнялся по упругой модели, где положение концентрации напряжений считается расчетным местом слома;

- Полученные в ходе расчета концентрации максимальных напряжений, приравниваются к потенциальному месту разрешения;

- Воздействие воды на клавишу льда и прикладываемый груз учитывается с помощью нелинейных пружин, равномерно присоединенных к узлам модели. Суммарная жесткость пружин имеет зависимость от перемещения клавиши вдоль вертикальной оси согласно закону Архимеда и представлен на рис. 12.

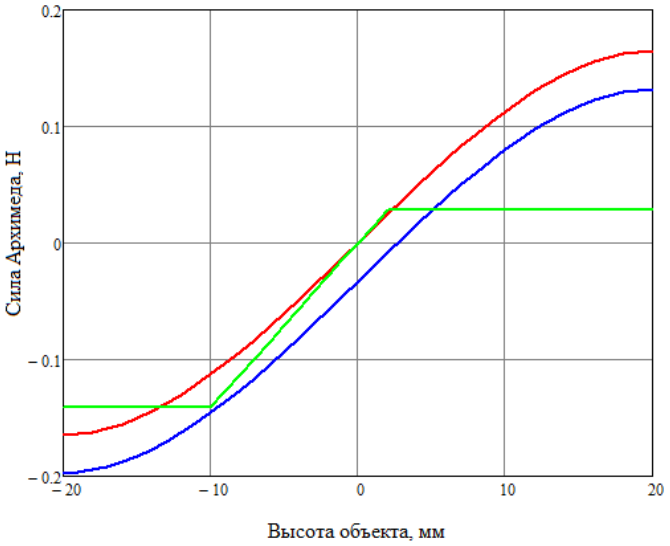


Рис. 12. График зависимости силы Архимеда (Н) от погруженного тела (мм).
красная линия – зависимость силы Архимеда для ИВО½
синия линия – зависимость силы Архимеда для ИВО⅔
зеленная линия - зависимость силы Архимеда для клавиши льда

Значения экспериментальных и расчетных положений линий слома сведены в таблицу 2

Таблица 2.

Номер, №№	Длина клавиш S, мм	Ширина клавиш B, мм	Толщина льда h, мм	Сила F, Н	Расч. линия слома, мм	Эксп. линия слома, мм	Отклонение, %
1	1670	500	14	22,246	1670	1670	0,0
2	1700	500	9,8	15,974	1105	940	9,7
3	1640	600	10,5	17,444	885	780	6,4
4	1600	600	11,5	18,62	865	620	15,3
5	1600	600	9,5	24,5	1600	1600	0,0
6	1800	100	12,5	2,45	482	350	7,3
7	1800	100	13,5	2,45	523	360	9,1
8	1440	100	13,5	2,45	527	500	1,9
9	1670	420	17	24,892	704	480	13,4
10	1670	400	17,5	16,954	664	540	7,4
11	1700	400	13	13,426	643	620	1,4
12	1590	300	12,5	14,7	613	480	8,4
13	1580	300	14	13,72	663	560	6,5

Полученные в ходе расчета максимальные значения напряжений для пластин при заданной экспериментальной ширине более 100 мм, составляют 0,48 МПа, а для пластин менее 100 мм - 0,36 МПа.

Значения экспериментальных и расчетных положений линий слома, а также понижение прикладываемой нагрузки сведены в таблицу 3

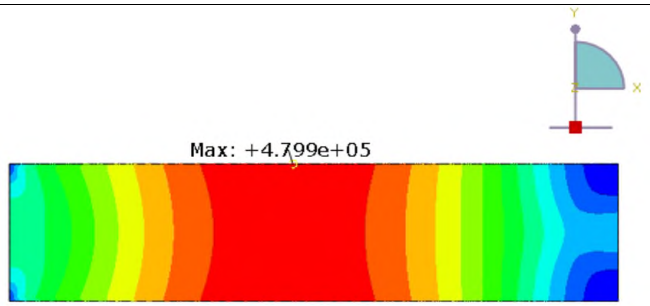
Таблица 3.

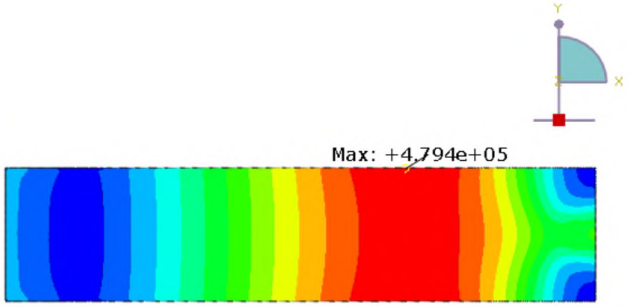
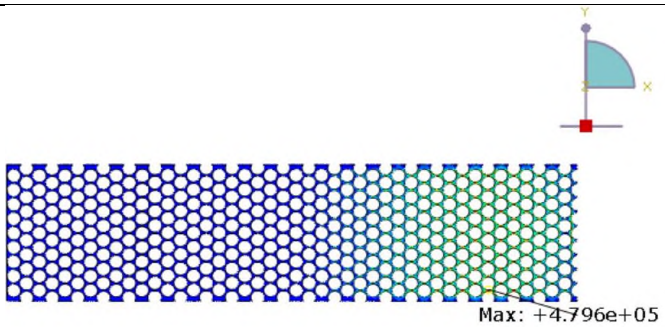
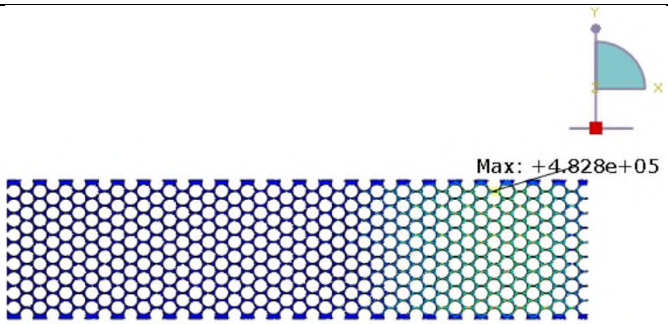
Номер, №№	**Длина клавиш S, мм**	**Ширина клавиш B, мм**	**Толщина льда h, мм**	**Сила F, Н**	**Расч. линия слома, мм**	**Эксп. линия слома, мм**	**Отклонение, %**
1	1640	500	12	22,246	400	344	3,4
2	1240	500	12	26,166	340	364	-1,9
3	870	500	12	25,186	270	307	-4,3
4	1530	420	13	12,936	240	236	0,3
5	1300	420	13	12,936	200	282	-6,3
6	1000	420	13	12,936	250	276	-2,6
7	800	420	13	12,936	500	347	19,1
8	1540	300	13	11,172	450	354	6,2
9	1150	300	13	11,76	360	312	4,2
10	1700	400	13	13,426	620	354	15,6
11	1640	100	19	3,626	440	219	13,5
12	1200	100	19	3,626	450	280	14,2
13	710	100	19	10,584	530	265	37,3

Полученные в ходе расчета максимальные значения напряжений для перфарированной пластины получены такие же, как и для чистых клавиш, но линия слома была приближена к прикладываемой нагрузке, за счет увеличенной плавучести клавиши, что не противоречит теоретическим выводам, сделаным ранее.

По данным, полученным в ходе повторения экспериментальных исследований в вычислетиельном пакете, для клавиши одной гемоетрии и одинаковыми физическими свойствами льда, выполнен последовательный расчет с использованием ИВО из разных материлов.

Таблица 4.

Результаты расчета сплошной клавиши льда Линия слома – 909 мм Прикладываемая разрушающая нагрузка F = 3.88 Н	

Результаты расчета клавиши с ИВО½ и адгезией: Линия слома – 547 мм Прикладываемая разрушающая нагрузка F = 10.32 Н	
Результаты расчета клавиши с ИВО½ и без адгезии: Линия слома – 346 мм Прикладываемая разрушающая нагрузка F = 2.31 Н	
Результаты расчета клавиши с ИВО⅔ и без адгезии: Линия слома – 350 мм Прикладываемая разрушающая нагрузка F = 1.97 Н	

Расчеты, выполненые в пакете ABAQUS, показали, что с ростом выталкивающей силы и плавучести клавиши, линия слома смещалась к прикладываемой нагрузке. В случаях, когда ИВО выполнены из материала с минимальнйо адгезией, необходимая для разрушения поля льда нагрузка уменьшалась. Полученные в расчетном пакете результаты не противоречат формулам и выводам, сделаные в теоретической части работы, а также позволяют более точно оценить влияние ИВО на прочностые характеристики льда и произвести исследование влияние различной осадки ИВО на процесс разрушения поля льда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работ были изучены современные и наиболее часто используемые методы по борьбе с ледообразованием акваторий северных портов и наиболее распространенные методы уменьшения прочности льда. В качестве нового способа по защите ГТС от воздействия льда автором был предложен метод по уменьшению ледовой нагрузки (возникающей как под действие природных факторов (вода, течение), так и при швартовке судов) с помощью искусственно вмороженных объектов (ИВО).

В процессе исследования был выполнен кинематический анализ использования иррегулярно расположенных полупогруженных шарообразных ИВО и произведен расчет конструктивных решений входе которых определны особенности ИВО, а так же форма объекта и адгезия использованных материалов. Выведеные теоретические формулы позволяют подобрать наиболее походящие размеры ИВО для определенных свойств ледового поля (толщины льда, солености воды и т.д.).

Для проверки теоретических выводов, была выполнена экспериментальная проверка, предложенного метода защиты ГТС. Для этого в зимний период на открытом водоеме, были сфрмированы клавиши чистого льда и льда с ИВО и проведено их испытание на изгиб. А также была выполнена проводка модельного судна в ледовом бассейне ААНИИ. Анализ получных экспериментальных данных, подтвердил теоретические предпосылки и позволил определить необходимый набор свойств льда для создания численой модели комплекса исследуемых объектов.

На основе экспериментальных данных, разработанна и отлаженна численая модель в расчтеном пакете ABAQUS. После воспроизведения экпериментального иследования в пакете, был выполнен сравнительный анализ полученных данных и определен допустимый процент отклоенния точного расчета от натурного исследования. Благодаря отлаженной численной модели были выполнены

уточняющие расчеты по особеностям конструкции ИВО, и сформулированы рекомендации по их конструктивным особенностям и свойствам применяемых веществ.

Как показывает исследование использование иррегулярно расположенных полупогруженных шарообразных искусственно вмороженных объектов (ИВО), при правильно выбраной форме и своств материала показывают значительное снижение прочности льда на изгиб и как следствие, снижение горизонтальной нагрузки, передаваемой от судна на ГТС при его швартовке.

Результаты работы могут быть использованы для формирования защиты ГТС северных портов с закрытыми акваториями с целью снижения ледовой нагрузки возникающей под действием внешних факторов и при швартовке судов к ГТС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Альхименко А.И., Беляев Н.Д., Фомин Ю.Н.* Безопасность морских гидротехнических сооружений. Лань. Санкт-Петербург 2003. 288 с.
2. *Gudmestard O.T., Losert S., Alhimenko A.I., Shkhinek K.N.,Torum A., Jensen A.* Engineering aspects related to arctic offshore developments. СПб. Лань.
3. *Шаталина И.Н., Трегуб Г.А.* Ледовые проблемы строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений. ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» 2013. 452 с.
4. *СП 38.13330.2018.* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)
5. *Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М.* Механика разрушения и проблемы освоения Арктики // Арктика: экология и экономика 2015, № 4 (20), С. 20—24.
6. *Казунин И.Д., Альхименко А.И.* Экспериментальные исследования прочности на изгиб сплошного льда и льда с искусственно вмороженными объектами//журнал ААНИИ 2021,
7. *Погодин В.А., Коровкин В.С., Шхинек К.Н., Фомин Ю.Н., Лисовский И.В., Альхименко А.И.* Гидротехнические сооружения морских портов. СПб.: Лан. 2014. 440 с.
8. *Alhimenko A.I., Kazunin I.D., Nikolaevskiy M.U.* The method of ice field strength reduction in port Sabetta on Yamal peninsula // International conference on engineering sciences and technologies. 2015. P 281-286.
9. *Alhimenko A.I., Kazunin I.D., Nikolaevskiy M.U.* A Method of Ice Field Reduction in Port Sabetta Water Area // International Ocean and Polar engineering conference. 2015. P.1875—1878.
10. *Богородский В.В,, Гаврило В.П.* Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. СПб.: Гидрометеоиздат. 1980. 383 с.
11. *Тышко К.П., Черепанов Н.В., Федотов В.И.* Кристаллическое строение морского ледяного покрова. СПб.: Гидрометеоиздат. 2000. 66 с.
12. *Каштелян В.И. А.Я. Рывлин О.В. Фаддеев В.Я. Ягодкин* Ледоколы. Ленинград. Мудостроение. 1972. 288 с.
13. Разработка технологии создания средств подготовки персонала перспективных морских нефтегазовых платформ по отработке операций обеспеченна добычи углеводородов на арктическом шельфе. Пояснительная записка к эскизно*' техническому проекту, выпуск № 40018. СКБВ.466957.101 ГО. Гос. Регистр №9411.1007400.09.089. С-Петербург. Трансзас. 2009. с.401
14. *Казунин И.Д., Коровкин В.С.* Перспективы развития Новороссийского морского порта / Сборник трудов научно-практической конференции с международным участием (неделя науки 2012 года). Инженерно-строительный факультет. С. 47-49.
15. *Белеитьев Л В., Головко В.И., Соколов А.Н., Казунин Д.В., Новиков С.И., Поселснов А.А., Бутурлимов О.В., Хвастунов Л И , Рыбий В.В., Маценко С.В., Лобанов П.Г., Казунин И.Д., Смирнов Р.И, Малюгин АЛ.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011612011: Тренажер морской нефтедобывающей платформы

(Добыча 2011). Зарегистрировано 5 марта 2011г. (Авторское участие 10%: принимал участие в расчете прочностных характеристик, составлении математической модели теплового баланса)

16. *Белеитьев А.В., Головко В.И., Соколов А.Н., Казунин Д.В., Новиков СИ., Поселснов А .А., Бутурлимов О.В., Хвастунов А.П., Рыбий В.В., Маценко С.В., Лобанов П.Г., Казунин И.Д., Смирнов Р.И. Малюгин А.Л.* Патент на полезную модель №104359. Тренажер морских нефтедобывающих платформ. Зарегистрировано 10 мая 2011г. (Авторское участие 10%: принимал участие в расчете прочностных характеристик, составлении математической модели теплового баланса)

17. *Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Смирнов Р.И., Малюгин А.А.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011616397: RTM “Технологическая платформа** (RTM ТП). Зарегистрировано 17 августа 2011г.

18. *Белеитьев А.В., Головко В.И., Соколов А.Н., Казунин Д.В., Новиков С.И., Поселснов А.А., Бутурлимов О.В., Хвастунов Д.П., Рыбий В.В., Маценко С.В., Лобанов П.Г., Казуннн И.Д. . Смирнов Р.И., Малюгин А.А.* Патент на изобретение №2467395: Способ создания изображений трехмерных объектов для систем реального времени. Зарегистрировано 20 ноября 2012г.

19. *Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Смирнов Р.И., Малюгин А.А., Костыгова Д.М., Улмнин Е.Д:* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №201266076: RTM объекта «Подводный добычной комплекс». Зарегистрировано 28 ноября 2012г

20. *Соколов А.Н., Казуннн Д.В., Хвастунов А.П., Бутурлимов О.В., Рыбий В.В., Маценко С.В., Казунин И.Д., Смирнов Р.И., Малюгин А.А., Костыгова Д.М., Ульшин Е.Д.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012660766: RTM объекта «Подводный трубопровод». Зарегистрировано 28 ноября 2012г.

21. *Соколов А.Н., Казунин Д.В., Хвастунов А.П., Рыбий В.В., Казунин ИД., Малюгин А.А., Шаров И.С.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013614766: Программный комплекс тренажера «Подводный добычной комплекс газоконденсатного месторождения». Зарегистрировано 21 мая 2013г.

СОКРАЩЕНИЯ

ИВО	Ирегулярно вмороженные объекты
ГТС	Гидротехнические сооружения
ДУ	– дифференциальное уравнение

Индексы подстрочные и надстрочные

m – количество слоев

вл – вода

вз – воздух

i,j,n,m – индексы.

o – начальное состояние