

На правах рукописи



РОГОЖНИКОВА ЕЛЕНА ГРИГОРЬЕВНА

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ВОЗБУЖДАЕМЫХ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ  
ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЕГО РАЗРУШЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ**

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре– 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Амурский гуманитарно-педагогический государственный университет» (г. Комсомольск-на-Амуре) и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема» (г. Биробиджан).

**Научный руководитель:**

**Козин Виктор Михайлович**

доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник лаборатории  
«Механика деформирования» Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки  
Института машиноведения и металлургии  
Дальневосточного отделения Российской академии  
наук (г. Комсомольск-на-Амуре)

**Официальные оппоненты:**

**Стурова Изольда Викторовна**

доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник «Лаборатория  
гидроаэроупругости» Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки  
Института гидродинамики  
им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения  
Российской академии наук (г. Новосибирск)

**Цуприк Владимир Григорьевич**

кандидат технических наук, доцент,  
заместитель директора по учебной  
и воспитательной работе Инженерной школы  
Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Дальневосточный федеральный  
университет»

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное унитарное  
предприятие «Крыловский государственный  
научный центр» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится «08» февраля 2018 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.092.02 при ФГБОУ ВО «Комсомольском-на-Амуре государственном университете» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственного университета» и на сайте организации по адресу: <https://knastu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. физ.-мат. наук



А.Л. Григорьева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Многие страны имеют замерзающие реки, омываемые морями, которые в различной степени и на разные сроки покрываются льдом. Лед является серьезным препятствием на пути судоходства, осложняя, а иногда и делая невозможной своевременную доставку грузов по назначению. В условиях нашей страны, имеющей большое количество рек, кроме решения проблем продления навигации необходимо решать и задачи по борьбе с ледовыми осложнениями в виде заторов и зажоров, т. к. ежегодно весенние наводнения, связанные с ледяными заторами на реках, превращаются в стихийные бедствия с человеческими жертвами и наносят огромный ущерб народному хозяйству.

Имеющийся ледокольный флот не способен в полной мере решить задачу гарантированного разрушения льда. Ограниченная ледопроездимость на мелководье, большие энергетические затраты ледоколов на разрушение ледяного покрова и пр. заставляют совершенствовать существующие и искать принципиально новые способы борьбы со льдом. В этом направлении перспективы открываются в связи с использованием, реализуемого судами на воздушной подушке (СВП) резонансного метода разрушения ледяного покрова (РМРЛ).

Толщина ледяного покрова, разрушаемого СВП резонансным методом, при наиболее характерных давлениях в воздушной подушке (ВП) и известных ледовых условиях (ЛЮ) в наибольшей степени зависят от его массы. Если при выполнении ледокольных работ одиночным СВП его масса может оказаться недостаточной для разрушения ледяного покрова заданной толщины, то эффективность РМРЛ можно повысить за счет интерференции изгибно – гравитационных волн (ИГВ), возбуждаемых в ледяном покрове несколькими СВП.

**Цель работы.** Исследования возможностей повышения эффективности РМРЛ, реализуемого двумя СВП в зависимости от ледовых условий и их взаимного расположения при движении судов фронтом и кильватерным строем.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- на основе вязко-упругой модели Кельвина-Фойгта разработаны математические зависимости, описывающие напряженно-деформированное состояние (НДС), при интерференции ИГВ в плавающей пластине от двух источников в условиях изгибно-гравитационного резонанса (ИГР);
- изучена зависимость ледоразрушающей способности ИГВ, возбуждаемых одновременно двумя СВП, от их взаимного расположения при движении фронтом и кильватерным строем;
- исследовано влияние различных ледовых условий на параметры ИГВ от движения двух нагузков.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена сопоставлением данных теоретических исследований с экспериментальными, полученными в опытовом и ледовом бассейнах, а также с ранее полученными Козиным В.М. результатами при испытаниях крупномасштабных моделей и натурных СВП в полевых условиях.

**Практическая значимость работы.** Экспериментально – теоретически доказана возможность существенного повышения эффективности РМРЛ, реализуемого двумя и, естественно, большим количеством СВП. Полученные результаты позволяют в зависимости от наличия СВП с заданными параметрами и ледовой обстановки определить предельно максимальные расстояния между ними, гарантирующими им необходимую ледоразрушающую способность при движении судов фронтом и кильватерным строем. Это позволяет разработать рекомендации для повышения эффективности РМРЛ с одновременным обеспечением наибольшей безопасности эксплуатации СВП с учетом их плохой управляемости на низких скоростях, т.е. при реализации РМРЛ.

Полученные результаты используются в учебном процессе «Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета» в виде расчетно-графических заданий и аттестационных работ выпускников направлений подготовки 44.03.05 «Педагогическое образование» профили «Математика» и «Физика», 44.04.01 «Педагогическое образование» программа магистерской подготовки «Физика и информационные технологии», а также при выполнении научно-исследовательских работ в лаборатории «Механика деформирования» Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук. По тематике диссертации выполнялись Госзаказы Минобрнауки: «Исследование напряженно-деформированного состояния плавающей ледяной пластины при интерференции резонансных изгибно-гравитационных волн, возбуждаемых внешними нагрузками» № госрегистрации 1.6199.2011; «Исследования несущей способности и закономерностей разрушения ледяного покрова изгибно-гравитационными волнами» № госрегистрации АААА-А16-116093010012-2. В рамках базовой части государственного задания вузам выполнялись: проект № 487 задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания вузу № 2014/422 «Повышение несущей способности ледяного покрова при использовании его в качестве ледовых переправ и грузонесущих платформ», 2014-2016 гг.; инициативный проект №9.4934.2017/БЧ «Определение влияния ледовых условий на несущую способность ледяного покрова при использовании его в качестве ледовых переправ», 2017-2019 гг.

Написана программа для расчета критерия разрушения ледяного покрова в виде предельных прогибов и угла наклона плавающей вязко-упругой пластины при стационарном движении по ней нагрузки (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619950 от 21.10.2013.).

#### **На защиту выносятся:**

- результаты экспериментально – теоретических исследований НДС ледяного покрова при одновременном движении по нему двух нагрузок фронтом и кильватерным строем;
- теоретические обоснования выбора максимальных расстояний между двумя нагрузками, гарантирующих им необходимую ледоразрушающую способность при движении фронтом и кильватерным строем, т.е. повышающих эффективность и безопасность эксплуатации судов при выполнении ледокольных работ;
- результаты исследований влияния ледовых условий на эффективность РМРЛ.

#### **Апробация работы.**

Результаты работы докладывались на:

- международном симпозиуме «Образование, наука и производство: проблемы, достижения и перспективы». Комсомольск-на-Амуре, 2010 г.;
- российской научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в области технологий двойного назначения» и Российской конференции «Школа-семинар по методологическому обеспечению и фундаментальным основам технологий двойного назначения». Комсомольск-на-Амуре, 2011 г.;
- всероссийской научно-практической конференции «Математическое моделирование физических и информационных процессов». Биробиджан, 2012 г.;
- всероссийской конференции «Полярная механика-2014». Санкт-Петербург, 2014 г.;
- международной конференции «International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE-2014)». Busan, Korea, 2014 г.;
- международной научно-технической конференции «Фундаментальные исследования океанотехники и морской инфраструктуры: Теория. Эксперимент. Практика». Комсомольск-на-Амуре, 2015 г.;
- международной конференции «International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE-2015)». Kona, Big Island, Hawaii, USA, 2015 г.;
- всероссийской конференции «Полярная механика-2016». Владивосток, 2016 г.;

- международной конференции «International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE-2016)». Rhodes, Greece, 2016 г.;
- международной конференции «International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE-2017)». San Francisco, CA, USA, 2017 г.;
- всероссийской конференции «Полярная механика-2017». Санкт-Петербург, 2017 г.;
- II Дальневосточной школе-семинаре «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций». Комсомольск – на – Амуре, 2017 г.

Работа в целом докладывалась на заседаниях кафедры информационной безопасности, информационных систем и физики ФГБОУ ВО «Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета» и кафедры технических дисциплин ФГБОУ ВО «Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема».

**Публикации по работе.** По теме диссертации опубликовано 37 работ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы (151 наименование). Объем работы – 131 страница, в том числе 65 рисунков, 3 таблицы.

**Личный вклад автора.** Лично автором получены и выполнены экспериментально-теоретические исследования НДС ледяного покрова при движении по нему нагрузок фронтом и кильватерным строем; на основании теоретических исследований обоснован выбор расстояний между СВП гарантирующих необходимую ледоразрушающую способность при движении фронтом и кильватерным строем; результаты исследований влияния ледовых условий на ледоразрушающую способность СВП.

**Благодарности.** Автор благодарит В.Л. Земляка и А.В. Погорелову за помощь и всестороннее содействие в проведении исследований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, ее научное и практическое значение, сформулированы цель и задачи исследований и основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен аналитический обзор литературы по теме исследования. Современное представление о деформировании и разрушении ледяного покрова ИГВ от действия различных нагрузок получено на основе теоретических и экспериментальных работ отечественных и зарубежных ученых: Брегмана Г.Р., Букатова А.Е., Белякова В.Б., Гаврило В.Л., Голушкевича С.С., Грамузова Е.М., Зубова Н.Н., Зуева В.А., Земляка В.Л., Иванова К.Е., Кашкина Н.Н., Козина В.М., Коробкина А.А., Марченко А.В., Папина А.А., Песчанского И.С., Погореловой А.В., Ткачевой Л.А., Стуровой И.В., Смирнова В.Н., Сытинского А.Д., Хейсина Д.Е., Черкесова Л.В., Крэри А., Керра А.Д., Милинаzzo Ф. и др., Пресса Ф., Робина Г., Сквайера В.А., Такизавы Т., Ханкинса К., Хабахпашевой Т.И. и др. Проанализированы возможности использования СВП для разрушения ледяного покрова резонансным методом.

**Во второй главе** приводится методика моделирования ИГВ с использованием упругой пленки, а также применением естественного ледяного покрова при экспериментах в опытовом и ледовом бассейнах.

Моделирование ИГВ, возбуждаемых в неразрушаемом ледяном покрове, проводилось в опытовом бассейне ФГБОУ ВО «Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета» размерами 5.0×1.8×0.6 м. В качестве модельного льда применялась упругая пленка толщиной 2 мм. Значение модуля упругости пленки составляло  $E_m=2$  МПа, что обеспечивало возможность проведения исследований в масштабе 1:500.

Для моделирования ИГВ, возбуждаемых в естественном ледяном покрове, использовался ледовый бассейн ФГБОУ ВО «Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема» размерами 10×3.0×1.0 м. Модельный лед приготавливался путем

намораживания льда заданной толщины естественным холодом при температуре воздуха  $t = - (9 - 16) ^\circ\text{C}$ . Масштаб моделирования  $\lambda_l=1:50$  выбирался исходя из размеров ледового бассейна, при этом длина бассейна обеспечивала выход на стационарный режим движения моделей нагрузки.

Буксировка моделей судов в опытовом бассейне проводилась в диапазоне скоростей  $v_m=0.33-1.00$  м/с, что при пересчете на натуру соответствовало  $v_n=7.30-22.36$  м/с, а в ледовом бассейне в диапазоне  $v_m=1.2-2.2$  м/с, что при пересчете на натуру составило  $v_n=8.5-15.5$  м/с. При проведении экспериментов варьировалась глубина бассейнов и расстояние между нагрузками при их парном движении фронтом и кильватерным строем.

**В третьей главе** с помощью интегральных преобразований получено решение дифференциального уравнения малых колебаний плавающей вязко-упругой пластины.

Уравнение малых колебаний плавающей вязко-упругой однородной пластины под действием динамической нагрузки принято в виде:

$$\frac{Gh^3}{3} \left( 1 + \tau_\phi \frac{\partial}{\partial t} \right) \nabla^4 w + \rho_e gw + \rho_l h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \rho_e \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} = -q, \quad (1)$$

где:  $G$  – модуль упругости льда при сдвиге;  $G=0.5E/(1+\mu)$ ;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $h$  – толщина пластины;  $\tau_\phi$  – время релаксации деформаций;  $w$  – прогиб льда;  $\rho_l, \rho_e$  – плотность льда и воды;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\nabla$  – оператор набла;  $q$  – система перемещающихся давлений;  $\Phi$  – потенциал движения жидкости, удовлетворяющий уравнению Лапласа  $\Delta\Phi=0$ .

Для упрощения математической постановки задачи вводится новая система координат, совмещенная с движущейся нагрузкой:

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= x - s(t) \\ y_0 &= y \\ z_0 &= z \end{aligned} \right\}$$

Тогда

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} - v \frac{\partial}{\partial x_0};$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - 2v \frac{\partial^2}{\partial t \partial x_0} + v^2 \frac{\partial^2}{\partial x_0^2} - \dot{v} \frac{\partial}{\partial x_0}.$$

Уравнение (1) в новой системе координат переписывается так:

$$\begin{aligned} & \frac{Gh^3}{3} \left( 1 + \tau_\phi \frac{\partial}{\partial t} - \tau_\phi v \frac{\partial}{\partial x_0} \right) \nabla^4 w + \rho_e gw + \rho_l h \left( \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - 2v \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x_0} + v^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x_0^2} - \dot{v} \frac{\partial w}{\partial x_0} \right) + \\ & + \rho_e \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \rho_e v \frac{\partial \Phi}{\partial x_0} = -q. \end{aligned}$$

В стационаре это уравнение примет вид:

$$\frac{Gh^3}{3} \left( 1 - \tau_\phi v \frac{\partial}{\partial x} \right) \nabla^4 w + \rho_e gw + \rho_l h v^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \rho_e v \frac{\partial \Phi}{\partial x} = -q, \quad (2)$$

в котором у переменной  $x$  опущены нули.

Представим функции в уравнении в виде интегралов Фурье:

$$\Phi(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{\infty} k dk \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} (F e^{-kz} + E e^{kz}) e^{ik((x-x_1)\cos\theta + (y-y_1)\sin\theta)} dx_1 dy_1; \quad (3)$$

$$q(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{\infty} k dk \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} q(x_1, y_1) e^{ik((x-x_1)\cos\theta + (y-y_1)\sin\theta)} dx_1 dy_1; \quad (4)$$

$$w(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{\infty} k dk \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} w(x_1, y_1) e^{ik((x-x_1)\cos\theta + (y-y_1)\sin\theta)} dx_1 dy_1. \quad (5)$$

Граничное условие на дне водоема:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{z=-H} = 0, \quad (6)$$

где:

$$H = H_1 - b;$$

$$b = \frac{\rho_l h}{\rho_s};$$

$H_1$  - глубина водоема;  $b$  – глубина погружения льда при статическом равновесии.

Линеаризованное кинематическое условие на поверхности раздела «лёд – вода»:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{z=0} = -v \frac{\partial w}{\partial x}. \quad (7)$$

$$\frac{Gh^3}{3} \left( \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - \tau_\phi v \frac{\partial^5 w}{\partial x^5} - 2\tau_\phi v \frac{\partial^5 w}{\partial x^3 \partial y^2} - \tau_\phi v \frac{\partial^5 w}{\partial x \partial y^4} \right) + \rho_s g w +$$

$$+ \rho_l h v^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \rho_s v \frac{\partial \Phi}{\partial x} = -q. \quad (8)$$

Из граничного условия (6) получим

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^{\infty} k dk \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} (-k F e^{-kz} + k E e^{kz}) e^{ik((x-x_1)\cos\theta + (y-y_1)\sin\theta)} dx_1 dy_1 \right|_{z=-H} = 0;$$

$$-k F e^{kH} = -k E e^{-kH};$$

$$F e^{2kH} = E,$$

тогда выражение для  $\Phi$  примет вид

$$\Phi(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\infty k dk \int_{-\pi}^\pi d\theta \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} (F e^{-kz} + F e^{kz+2kH}) e^{ik((x-x_1)\cos\theta+(y-y_1)\sin\theta)} dx_1 dy_1. \quad (9)$$

Выразим все величины в (8) через одну функцию  $w$ , используя кинематическое условие:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\infty k dk \int_{-\pi}^\pi d\theta \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} (-kF + kF e^{2kH}) e^{ik((x-x_1)\cos\theta+(y-y_1)\sin\theta)} dx_1 dy_1.$$

Найдя необходимые производные, введем замену:  $\lambda=k$ ;  $\alpha=k\cos\theta$ . Тогда вместо одного интеграла от  $-\pi$  до  $\pi$  по переменной  $\theta$  будет 2 интеграла от  $-\lambda$  до  $\lambda$  по переменной  $\alpha$ , а выражение для  $w$  переписется в виде

$$w = -\frac{1}{2\pi^2} \int_0^\infty \lambda d\lambda \int_{-\lambda}^\lambda \frac{d\alpha}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} q(x_1, y_1) \times \\ \times \frac{e^{i((x-x_1)\alpha+(y-y_1)\sqrt{\lambda^2-\alpha^2})}}{\frac{Gh^3}{3} \lambda^4 (1 - i\alpha v \tau_\phi) + \rho_s g - \rho_l h v^2 \alpha^2 - \rho_s v^2 \frac{\alpha^2}{\lambda} \text{cth}(\lambda H)} dx_1 dy_1.$$

Внесем знак « $-$ » в знаменатель и вынесем оттуда  $\rho_s v^2$ , учитывая, что  $\text{cth}(\lambda H) = \frac{1}{\text{th}(\lambda H)}$

$$w = -\frac{1}{2\rho_s v^2 \pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I q(x_1, y_1) dx_1 dy_1,$$

где:

$$I = \int_0^\infty \lambda^2 \text{th}(\lambda H) d\lambda \int_{-\lambda}^\lambda \frac{e^{i((x-x_1)\alpha+(y-y_1)\sqrt{\lambda^2-\alpha^2})} d\alpha}{\left( -\frac{Gh^3 \lambda^5 \text{th}(\lambda H)}{3\rho_s v^2} (1 - i\alpha v \tau_\phi) - \frac{g \lambda \text{th}(\lambda H)}{v^2} + \frac{\rho_l h \lambda \alpha^2 \text{th}(\lambda H)}{\rho_s} + \alpha^2 \right) \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}}.$$

Выделим действительную ( $v_1, v_2$ ) и мнимую ( $u_1, u_2$ ) части интеграла  $I$ . Для этого рассмотрим интеграл  $I$  с использованием формулы Эйлера

$$e^{i\phi} = \cos \phi + i \sin \phi.$$

Обозначим  $\zeta=v_2, \eta=u_2$ . Используя формулу комплексных функций

$$\text{Re} \left( \frac{v_1 + iu_1}{v_2 + iu_2} \right) = \frac{v_2 v_1 + u_2 u_1}{v_2^2 + u_2^2},$$

получаем:

$$\operatorname{Re}(I) = \int_0^{\infty} \lambda^2 \operatorname{th}(\lambda H) \int_{-\lambda}^{\lambda} \frac{v_2 v_1 + u_2 u_1}{v_2^2 + u_2^2} d\alpha d\lambda;$$

$$v_2 v_1 + u_2 u_1 = \xi v_1 + \eta u_1 = \xi \cos\left((x - x_1)\alpha + (y - y_1)\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}\right) + \eta \sin\left((x - x_1)\alpha + (y - y_1)\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}\right)$$

Выделим четные функции по переменной  $\alpha$  в числителе. Для этого используем формулы разложения  $\cos$  суммы и  $\sin$  суммы.

$$w(x, y) = \frac{4q_0}{\pi^2 \rho_e v^2} \int_0^{\infty} \lambda^2 \operatorname{th}(\lambda H) \times$$

$$\times \int_0^{\lambda} \frac{\cos\left(y\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}\right) \sin\left(\alpha \frac{L}{2}\right) \sin\left(\frac{L}{2\omega} \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}\right) (\cos(\alpha x)\xi + \sin(\alpha x)\eta)}{\alpha(\lambda^2 - \alpha^2)(\xi^2 + \eta^2)} d\alpha d\lambda, \quad (10)$$

где:

$$\xi = -\frac{Gh^3 \lambda^5 \operatorname{th}(\lambda H)}{3\rho_e v^2} - \frac{g\lambda \operatorname{th}(\lambda H)}{v^2} + \frac{\rho_s h \lambda \alpha^2 \operatorname{th}(\lambda H)}{\rho_e} + \alpha^2;$$

$$\eta = \frac{Gh^3 \lambda^5 \operatorname{th}(\lambda H) \alpha \tau_\phi}{3\rho_e v}.$$

Для определения суммарных теоретических прогибов ледяного покрова при движении по нему двух нагрузок использовались зависимости:

$$w_k(x, y) = w(x, y) + w(x + L_x, y); \quad (11)$$

$$w_f(x, y) = w(x, y) + w(x, y - L_y), \quad (12)$$

здесь:  $L_x$  – расстояние между нагрузками при движении кильватерным строем;  $L_y$  – расстояние между нагрузками при движении фронтом.

Максимальные нормальные по толщине пластины напряжения записываются в виде:

$$\sigma_x = \frac{6M_x}{h^2}, \quad (13)$$

где:

$$M_x = -\frac{Gh^3}{3} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( w + \tau_\phi \frac{\partial w}{\partial t} \right) + \mu \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left( w + \tau_\phi \frac{\partial w}{\partial t} \right) \right).$$

Вычислив необходимые производные, получим:

$$M_x = \frac{4q_0 Gh^3}{3\pi^2 \rho_6 v^2} \int_0^\infty \lambda^2 th(\lambda H) \int_0^\lambda \left[ \frac{\cos(y\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}) \sin\left(\alpha \frac{L}{2}\right) \sin\left(\frac{L}{2\omega} \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}\right)}{\alpha^2 \left(-\cos(\alpha x)\xi - \sin(\alpha x)\eta - (\lambda^2 - \alpha^2) \sin(y\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}) + v\tau_\phi \alpha^2 \sin(\alpha x)\xi - \cos(\alpha x)\eta - v\tau_\phi \mu \alpha (\lambda^2 - \alpha^2) \cos(y\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}) (\sin(\alpha x)\xi - \cos(\alpha x)\eta)\right)} \right] d\alpha d\lambda.$$

С целью подтверждения достоверности полученных теоретических результатов они сравнивались с данными модельных экспериментов, полученными в опытовом и ледовом бассейнах.

На рис.1. представлены результаты сопоставления расчетов по формулам (11-12) с экспериментальными данными для льда, моделируемого упругой пленкой при следующих значениях параметров, соответствующих натурному СВП «Зубр»:  $L_n=57.3$  м;  $B_n=22.3$  м;  $q_0=4218$  Н/м<sup>2</sup>; характеристиках льда:  $h=1$  м;  $\rho_l=900$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_6=1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $E=2 \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>;  $\mu=0.33$ ;  $H=5$  м.

На рис.2-3 представлены результаты сопоставления расчетов по формулам (11-12) с экспериментальными данными, полученными в ледовом бассейне. Расчеты проводились при максимальной глубине воды и глубине бассейна 40 см при следующих значениях параметров, соответствующих натурному СВП «Мурена»:  $L_n=30.2$  м;  $B_n=13.1$  м;  $q_0=3715$  Н/м<sup>2</sup>; характеристиках льда:  $\rho_l=900$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_6=1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $h=0.5$  м;  $\mu=0.33$ ;  $E=1 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>.

На рис.1-3 показана зависимость относительных прогибов  $\bar{w}$  от взаимного расположения нагрузок:

$$\bar{w} = \frac{w_2}{w_1};$$

где:  $w_2$  – прогиб льда при движении двух нагрузок, движущихся фронтом или кильватерным строем;  $w_1$  – прогиб льда при движении одиночной нагрузки.

Сопоставление полученных данных показывает не только качественное, но и количественное соответствие между результатами теоретических расчетов и результатами экспериментов как по разрушению естественного льда ИГВ (рис. 2-3), так и для модели неразрушаемого ледяного покрова (рис. 1).

Из рис. 1-3 видно, что при движении СВП фронтом ИГВ максимальной амплитуды, как и следовало ожидать, возникали при полном счаливании. При увеличении расстояния между судами происходило уменьшение относительных прогибов волн с приближением к значениям для одиночного судна. При движении СВП кильватерным строем ИГВ максимальной амплитуды возникают при полном счаливании СВП. При увеличении расстояния между судами вследствие интерференции волн от движения двух судов происходит уменьшение их прогибов по сравнению с движением одиночного судна. При дальнейшем увеличении расстояния наблюдается возрастание относительных прогибов. Это объясняется не монотонным, как в случае движения фронтом, а периодичным изменением амплитуд ИГВ при увеличении расстояния между СВП.

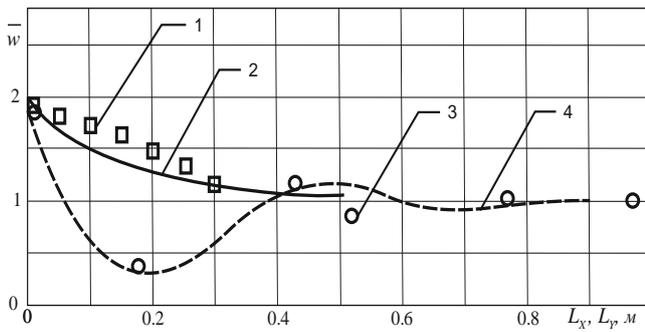


Рис.1. Зависимость относительных прогибов от взаимного расположения нагрузок: 1 – экспериментальные данные при движении фронтом; 2 – расчетные данные при движении фронтом; 3 – экспериментальные данные при движении кильватерным строем; 4 – расчетные данные при движении кильватерным строем.

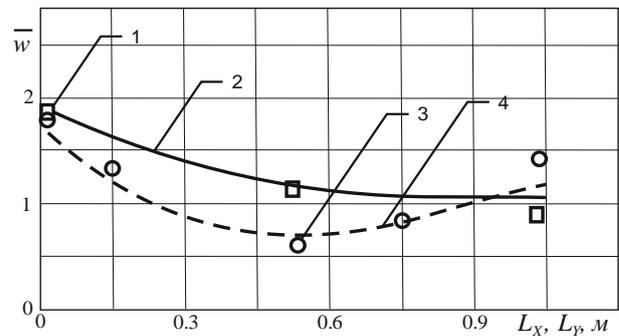


Рис.2. Зависимость относительных прогибов от взаимного расположения нагрузок (максимальная глубина воды): 1 – экспериментальные данные при движении фронтом; 2 – расчетные данные при движении фронтом; 3 – экспериментальные данные при движении кильватерным строем; 4 – расчетные данные при движении кильватерным строем.

Для возможности прогнозирования ледоразрушающих качеств СВП при разрушении

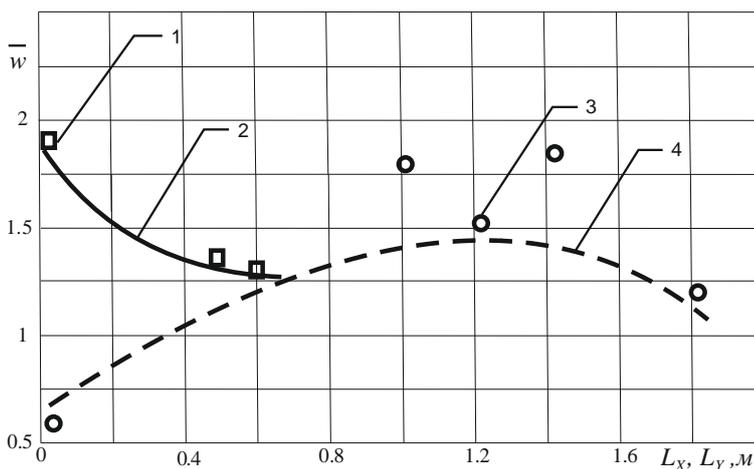


Рис.3. Зависимость относительных прогибов от взаимного расположения нагрузок (глубина бассейна 40 см): 1 – экспериментальные данные при движении фронтом; 2 – расчетные данные при движении фронтом; 3 – экспериментальные данные при движении кильватерным строем; 4 – расчетные данные при движении кильватерным строем.

значения которых оказываются равными или больше найденного  $\sigma_x$ , то за судном, возбуждающим такие ИГВ, будет происходить непрерывное полное разрушение ледяного покрова.

Средняя величина максимальных относительных напряжений  $\bar{\sigma}_x$  определялась по формуле:

$$\bar{\sigma}_x = \frac{\sigma_x}{\sigma_u}, \quad (14)$$

где при  $\sigma_u = 1.2$  МПа (средний предел прочности пресноводного льда на изгиб во время экспериментов)  $\bar{\sigma}_x$  составила  $\sim 2.08$ , т.е. больше 2.

Для проверки работоспособности выбранного критерия разрушения ледяного покрова проведены теоретические расчеты нормальных напряжений  $\sigma_x$  по формуле (13). Расчеты проводились при максимальной глубине воды и глубине бассейна 40 см при значениях параметров модели, соответствующих натурному СВП «Мурена» ( $L_n = 30.2$  м;  $B_n = 13.1$  м;  $q_0 = 3715$  Н/м<sup>2</sup>;  $\rho_n = 900$  кг/м<sup>3</sup>;  $h = 0.5$  м;  $E = 1 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>).

В начале были выполнены расчеты максимальных  $\sigma_x$  в зависимости от скорости движения одного СВП. Результаты расчетов приведены на рис. 4.

Из рис.4 видно, что максимальные значения напряжений превышают средний предел прочности пресноводного льда на изгиб  $\sigma_u$ , т.е. больше 2. При проведении экспериментов в ледовом бассейне с указанными выше параметрами модели и ледовыми условиями происходило полное разрушение ледяного покрова. Затем были рассчитаны  $\sigma_x$  для двух моделей СВП «Мурена» при их движении фронтом и кильватерным строем. После чего по

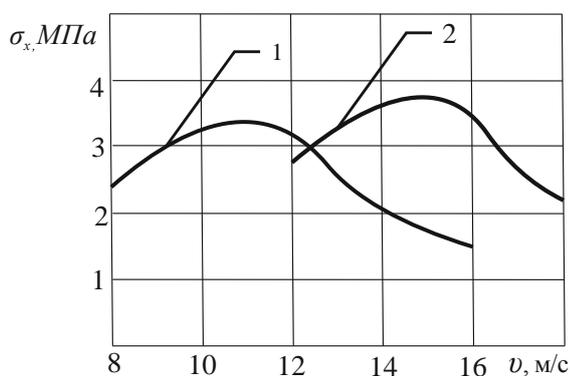


Рис.4. Зависимость  $\sigma_x$  от скорости движения СВП: 1 – глубокая вода; 2 – глубина акватории 20 м.

формуле (14) были вычислены  $\bar{\sigma}_x$ . Из рис. 5-8 видно, что величина  $\bar{\sigma}_x$  превышала значение в 2.1 раза, что соответствовало полному разрушению ледяного покрова, подтвержденному результатами экспериментальных исследований.

Т.о. сопоставление полученных теоретических и экспериментальных данных подтвердило работоспособность выбранного критерия разрушения ледяного покрова, что позволило его использовать для разработки практических рекомендаций по повышению эффективности РМРЛ за счет интерференции ИГВ, возбуждаемых несколькими нагрузками.

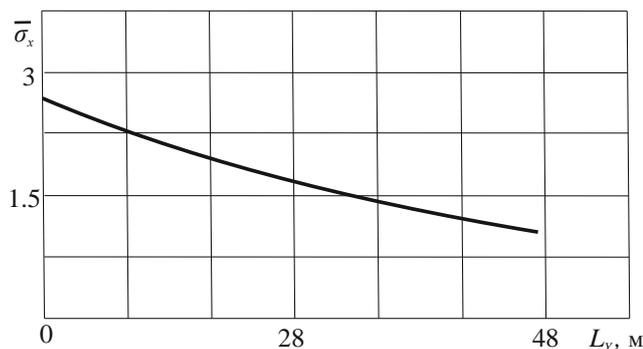


Рис.5. Зависимость  $\bar{\sigma}_x$  от расстояния между СВП при их движении фронтом в условиях глубокой воды.

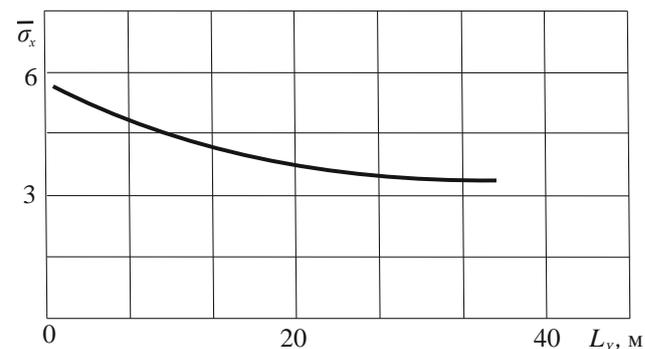


Рис.6. Зависимость  $\bar{\sigma}_x$  от расстояния между СВП при их движении фронтом при глубине акватории 20 м.

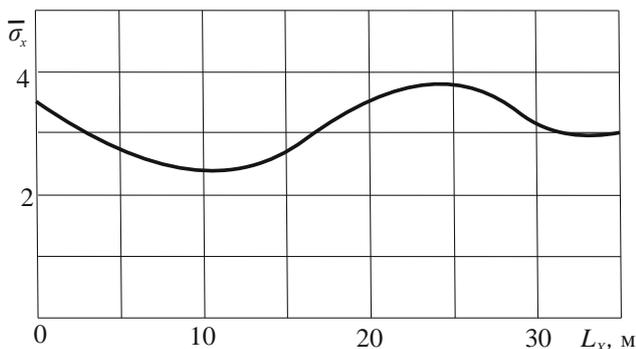


Рис.7. Зависимость  $\bar{\sigma}_x$  от расстояния между СВП при их движении кильватерным строем в условиях глубокой воды.

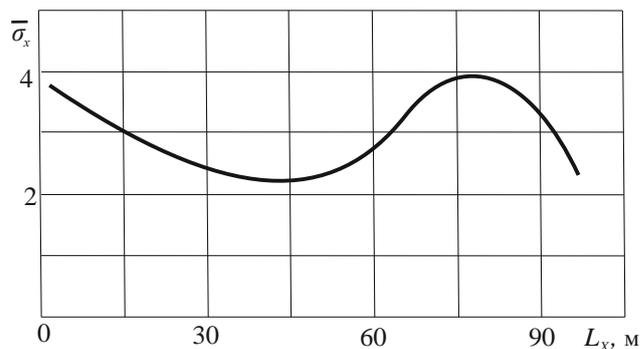


Рис.8. Зависимость  $\bar{\sigma}_x$  от расстояния между СВП при их движении кильватерным строем при глубине акватории 20 м.

**В четвертой главе** приведены рекомендации по использованию интерференции ИГВ, возбуждаемых парными нагрузками, для повышения эффективности разрушения ледяного покрова СВП резонансным методом.

Ледоразрушающая способность СВП определяется его параметрами и зависит от ледовых условий, основными характеристиками которых являются: толщина льда и его физико-механические характеристики; параметры акватории; гидрометеорологические условия и др. Основными параметрами, определяющими способность СВП разрушать лед резонансным методом, как показали экспериментально-теоретические исследования, являются нагрузка на лед от массы судна  $M_c$ , ее интенсивность, т.е.  $P_{ВП}$  (где:  $P_{ВП}$  – давление в воздушной подушке судна) и скорость движения. Если при выполнении ледокольных нагрузка от одного СВП окажется недостаточной для разрушения ледяного покрова заданной толщины при заданных ледовых условиях, то эффективность ледокольных работ (увеличение толщины разрушаемого льда) можно повысить за счет использования нескольких судов, т.е. за счет благоприятной для поставленной задачи интерференции возбуждаемых ими ИГВ.

Так, например, если масса имеющегося СВП  $M_0$  с давлением  $P_{ВП}$  не обеспечивает ему необходимую ледоразрушающую способность (толщину разрушаемого льда, т.е.  $M_0 < M_c$ ), то в зависимости от параметров акватории (ширины, изгибов русла реки, протяженности его прямолинейных участков и др.) выбирают наиболее приемлемые и безопасные виды маневрирования одновременно двух (при необходимости и более) СВП с целью достижения желаемого результата – разрушения ледяного покрова заданной толщины.

Дополнительную нагрузку от массы второго СВП  $M_g$ , способную возбудить систему дополнительных ИГВ, которые накладываясь на основную, возбуждаемую первым СВП (массой  $M_0$ ), позволят разрушить ледяной покров толщиной, превышающей ледоразрушающую способность одиночного судна, определяют по зависимости (15).

$$M_g = M_c - M_0. \quad (15)$$

Дальнейшее применение методики использования интерференции от движения внешних нагрузок по ледяному покрову фронтом рассмотрено на примере СВП «Мурена» ( $L_n=30.2$  м;  $B_n=13.1$  м;  $P_{ВП}=4 \cdot 10^3$  Па) и следующих ЛУ:  $\rho_l=900$  кг/м<sup>3</sup>;  $h=0.7 - 1.2$  м;  $H=5$  м;  $E=5 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup>.

При заданных параметрах одиночное СВП «Мурена» может разрушить лед толщиной 0.72 см. Зависимость  $M_c = f(h, P_{ВП})$ , охватывающая весь диапазон интересующих значений  $h$ , может быть определена с помощью критерия для оценки ледоразрушающей способности движущегося по льду СВП. Для этого, задаваясь рядом значений  $h$  и величиной  $M_c$ , по формуле (13) определяются  $\sigma_x$  для одиночной нагрузки. Если оказывается, что найденные

таким образом значения  $\bar{\sigma}_x$  меньше величины 2.1, то создают дополнительную нагрузку  $M_g$  по формуле (15) и увеличивают ее до выполнения условия  $\bar{\sigma}_x = 2.1$ .

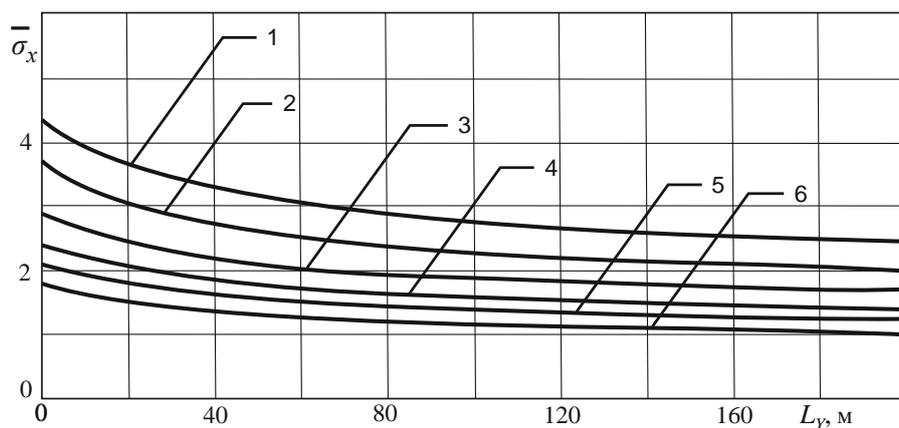


Рис.9. Зависимость  $\bar{\sigma}_x$  от расстояния между СВП при их движении фронтом: 1 –  $h = 0.7$  м; 2 –  $h = 0.8$  м; 3 –  $h = 0.9$  м; 4 –  $h = 1$  м; 5 –  $h = 1.1$  м; 6 –  $h = 1.2$  м.

обеспечивающее достаточную ледоразрушающую способность судам, определяют по рис.9 до выполнения условия  $\bar{\sigma}_x = 2.1$ .

При движении СВП фронтом дополнительную нагрузку  $M_g$  в целях обеспечения безопасности эксплуатации судов, повышения эффективности РМРЛ и увеличения площади разрушаемого льда следует создавать при наибольшем расстоянии между ними.

Использование СВП при движении «фронтом» более перспективно, т.к. есть возможность существенно повысить эффективность РМРЛ при его реализации группой, превышающей два и более судов.

Случай движения двух СВП «Мурена» кильватерным строем.

Если найденные по формуле (13)  $\sigma_x$  для одиночной нагрузки оказываются меньше величины 2.1, т.е. недостаточными для разрушения ледяного покрова заданной толщины, то по формуле (15) создают дополнительную нагрузку  $M_g$  и увеличивают ее до выполнения условия  $\bar{\sigma}_x = 2.1$ .

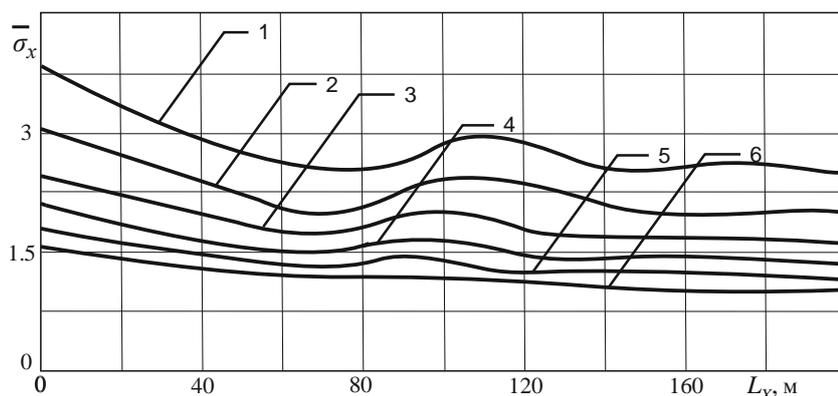


Рис.10. Зависимость  $\bar{\sigma}_x$  от расстояния между СВП при их движении кильватерным строем: 1 –  $h = 0.7$  м; 2 –  $h = 0.8$  м; 3 –  $h = 0.9$  м; 4 –  $h = 1$  м; 5 –  $h = 1.1$  м; 6 –  $h = 1.2$  м.

Результаты таких численных расчетов для двух СВП «Мурена» представлены на рис.9. Следует заметить, что полученная зависимость  $\bar{\sigma}_x = f(L_y)$  позволяет определить максимальное расстояние между двумя СВП, достаточное для разрушения ледяного покрова заданной толщины. Максимальное расстояние между СВП при их движении фронтом,

Результаты численных расчетов для двух СВП «Мурена» ( $L_n=30.2$  м;  $B_n=13.1$  м;  $P_{BII}=4 \cdot 10^3$  Па) при следующих ЛУ:  $\rho_l=900$  кг/м<sup>3</sup>;  $h=0.7 - 1.2$  м;  $H=5$  м;  $E=5 \cdot 10^9$  Н/м<sup>2</sup> представлены на рис.10. Полученная зависимость  $\bar{\sigma}_x = f(L_x)$  позволяет определить расстояние между двумя СВП при их движении кильватерным строем достаточное для разрушения ледяного покрова заданной толщины.

Максимальное расстояние между СВП при их движении кильватерным строем, обеспечивающее достаточную ледоразрушающую способность судам, определяют по рис.10 из условий выполнения  $\bar{\sigma}_x = 2.1$ . При этом следует учитывать, что наиболее безопасным является движение при наибольшем расстоянии между судами.

На основании выполненных исследований следует отметить, что движение СВП кильватерным строем не целесообразно при использовании более двух судов вследствие быстрого затухания возбуждаемых ИГВ.

Из полученных графических зависимостей видно, что далеко не все ледовые условия благоприятно сказываются на способности СВП разрушать ледяной покров резонансным методом, что следует учитывать при необходимости использование двух судов. Так, определенная ледовая обстановка может привести к существенному снижению кривизны профиля ИГВ и, соответственно, их ледоразрушающей способности.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе реологической модели Кельвина-Фойгта разработаны математические зависимости, описывающие НДС, при интерференции ИГВ в плавающей пластине от двух источников в условиях ИГР;

2. Установлена закономерность влияния расстояния между нагрузками и их взаимного расположения на НДС ледяной пластины от движения по ней внешних нагрузок.

3. Разработан метод расчета НДС флотирующей ледяной пластины при воздействии на нее внешних нагрузок.

4. При помощи полученных математических зависимостей выполнен анализ НДС ледяного покрова при движении по нему двух и более нагрузок. Сопоставление полученных теоретических данных с результатами модельных экспериментов подтвердили работоспособность предложенной методики расчета. Это позволяет посредством теоретического прогноза разработать рекомендации для повышения ледоразрушающей способности группы СВП.

5. Подтверждена возможность использования вывода теории мелкой воды относительно определения резонансной скорости при поступательном движении по флотирующей пластине двух нагрузок.

6. Выполненные экспериментально – теоретические исследования возможностей разрушения ледяного покрова ИГВ от движения нескольких СВП в различных ледовых условиях позволяют сделать следующие выводы:

- движение двух и более СВП в ледовых условиях при определенном расположении относительно друг друга позволяет значительно повысить ледоразрушающую способность РМРЛ за счет интерференции возбуждаемых ими ИГВ, т.е. появляется возможность частичного или полного разрушения ледяного покрова толщиной значительно большей, чем при движении одиночного судна;

- при возбуждении ИГВ несколькими СВП интенсивного разрушения льда можно добиться и при скоростях отличных от резонансных за счет интерференции ИГВ, т.е. повысить безопасность реализации РМРЛ двумя и более СВП;

- резонансный метод разрушения ледяного покрова по своей эффективности в экстремальных условиях (предельного мелководья) имеет неоспоримые преимущества перед традиционными технологиями разрушения ледяного покрова;

- достоверность полученных результатов подтверждена использованием для оценки ледоразрушающей способности ИГВ апробированного силового критерия разрушения льда.

7. Проведенные модельные эксперименты с искусственным и естественным льдом показали целесообразность дальнейших исследований по использованию интерференции ИГВ для разрушения ледяного покрова резонансным методом.

8. В ходе модельных экспериментов получены зависимости влияния расстояния между судами и их взаимного расположения на эффективность разрушения ледяного покрова резонансным методом. Установлено, что разрушение ледяного покрова, при движении фронтом более эффективно, чем при движении кильватерным строем.

9. Выполненные экспериментальные исследования позволяют оценить возможности повышения эффективности РМРЛ при его реализации двумя и более СВП с учетом конкретных условий ледовой обстановки.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Рогожникова Е.Г., Козин В.М., Погорелова А.В., Верещагин В.Ю. Повышение эффективности разрушения ледяного покрова судами на воздушной подушке резонансным методом. // Безопасность жизнедеятельности, №9, 2011, С.37-42.
2. Рогожникова Е.Г., Козин В.М., В.Ю. Верещагин, Д.Ю. Кипин. Технологии предотвращения заторообразований на реках при помощи амфибийных судов на воздушной подушке. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – № 1 – 2013. – С.63 – 69.
3. Рогожникова Е.Г., Козин В.М., В.Ю. Верещагин. Способы и устройства для предотвращения и разрушения заторов на реках. // Безопасность жизнедеятельности, № 10, 2011, С. 44-48
4. Рогожникова Е.Г., Козин В.М., Земляк В.Л. Использование интерференции изгибно-гравитационных волн для повышения эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова при парном движении судов на воздушной подушке. // Ученые записки КнАГТУ, № I - 1(29) 2017 «Науки о природе и технике», С. 13 – 21.

### *Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК и входящих в международную систему цитирования Web of Science:*

5. Рогожникова Е.Г., Козин В.М., Земляк В.Л. Повышение эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова при парном движении судов на воздушной подушке.// ПМТФ. 2017. Т. 58, №2. С. 188-192.

### *Публикации в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus:*

6. Rogozhnikova E.G., Pogorelova A.V., Kozin V.M. Movement of two Loadings on the Ice Cover. The twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE-2014). June 15-20. Busan, Korea. pp. 1096-1101.
7. Rogozhnikova E. G., Kozin V.M., Zemlyak V.L. Technologies of Use of Two Hovercrafts for Destruction of the Ice Cover. Proceedings of the Twenty-fifth (2015) International Ocean and Polar Engineering Conference Kona, Big Island, Hawaii, USA, June 21-26, 2015 pp.1879-1883.
8. Rogozhnikova E. G., Kozin V.M., Zemlyak V.L. Studies of Influence of Water Area Depth on the Nature of Destruction of an Ice Cover when Paired Loads are Moving over the Ice Cover. The twenty- -sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE-2016). June 26-July 1, June 15-20. Rhodes, Greece, pp. 1153-1157.
9. Rogozhnikova E. G., Kozin V.M., Zemlyak V.L. Methods of Assessment of Ice-breaking capacity of flexural-gravity Waves generated by Moving Loads. Proceedings of the Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, CA, USA, June 25-30, 2017. pp. 1326-1331.

### *Монография*

10. Рогожникова Е.Г., Козин В.М., Земляк В.Л. и др. Экспериментально-теоретические исследования зависимости параметров распространяющихся в плавающей пластине изгибно-гравитационных волн от условий их возбуждения. Новосибирск. Изд-во: СО РАН. 2016. - 222 с.: ил. ISBN – 978-5-7962-1504-9.

### *Объекты интеллектуальной собственности:*

11. Рогожникова Е.Г., Погорелова А.В. Программа расчета прогибов и угла наклона плавающей вязко-упругой пластины при стационарном движении по ней нагрузки. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619950 от 21.10.2013.
12. Пат. 2457975 РФ, Кл. В63В 35/08. Способ разрушения ледяного покрова на мелководье/ В.М. Козин, А.В. Погорелова, Е.Г. Рогожникова и др. (РФ); заявитель и патентообладатель АмГПГУ, КнАГТУ (RU). – № 2010153801/11 заявл.27.12.2010; опубл. 10.08.2012 Бюл. № 22 – 5с.: ил.
13. Пат. 2457976 РФ, Кл. В63В 35/08. Способ разрушения ледяного покрова на мелководье/ В.М. Козин, А.В. Погорелова, Е.Г. Рогожникова и др. (РФ); заявитель и патентообладатель АмГПГУ, КнАГТУ (RU). – № 2010153802/11 заявл.27.12.2010; опубл. 10.08.2012 Бюл. № 22.
14. Пат. 2507104 РФ, Кл. В63В 35/18. Способ разрушения ледяного покрова/ В.М. Козин, В.Л. Земляк, Е.Г. Рогожникова и др. (РФ); заявитель и патентообладатель АмГПГУ, КнАГТУ (RU). – № 2011147447/11 заявлено 22.11.2011; опубл.20.02.2014 Бюл. № 5– 5 с.: ил.
15. Пат. 2506194 РФ, Кл. В63В 35/08. Способ разрушения ледяного покрова / В.М. Козин, В.Л. Земляк, Е.Г. Рогожникова и др. (РФ); заявитель и патентообладатель ИМиМ ДВО РАН, ПГУ им. Шолом-Алейхема, (RU). – № 2012145912/11; заявл. 26.10.2012; опубл. 10.02.2014. Бюл. № 4 – 7с.: ил.
16. Пат. 2531857 РФ, Кл. В63В 35/08. Способ разрушения ледяного покрова/ В.М. Козин, В.Л. Земляк, Е.Г. Рогожникова и др. (РФ); заявитель и патентообладатель ПГУ им. Шолом-Алейхема (RU) . – № 2013140918/11 заявл.05.09.2013; опубл. 27.10.2014 Бюл. № 30– 5 с.: ил.
17. Пат. 2589190 РФ, Кл. В63В 35/08. Способ разрушения ледяного покрова / В.М. Козин, В.Л. Земляк, Е.Г. Рогожникова и др. (РФ); заявитель и патентообладатель ПГУ им. Шолом-Алейхема, ИМиМ ДВО РАН, АмГПГУ (RU). – № 2015129956/11; заявл. 20.07.2015; опубл. 10.07.2016. Бюл. № 19 – 7с.: ил.
18. Пат. 2601547 РФ, Кл. В63В 35/08. Способ разрушения ледяного покрова / В.М. Козин, В.Л. Земляк, Е.Г. Рогожникова и др. (РФ); заявитель и патентообладатель ПГУ им. Шолом-Алейхема, ИМиМ ДВО РАН, АмГПГУ (RU). – № 2015129953/11 заявл. 20.07.2015; опубл. 10.11.2016 Бюл. № 31– 7с.: ил.
19. Пат. 2601543 РФ, Кл. В63В 35/08. Способ разрушения ледяного покрова / В.М. Козин, В.Л. Земляк, Е.Г. Рогожникова и др. (РФ); заявитель и патентообладатель ПГУ им. Шолом-Алейхема, ИМиМ ДВО РАН, АмГПГУ (RU). – № 2015129824/11 заявл. 20.07.2015; опубл. 10.11.2016 Бюл. № 31– 7с.: ил.
20. Пат. 2601546 РФ, Кл. В63В 35/08. Способ разрушения ледяного покрова / В.М. Козин, В.Л. Земляк, Е.Г. Рогожникова и др. (РФ); заявитель и патентообладатель ПГУ им. Шолом-Алейхема, ИМиМ ДВО РАН, АмГПГУ (RU). – № 2015129901/11 заявл. 20.07.2015; опубл. 10.11.2016 Бюл. № 31– 7с.: ил.
21. Пат. 2601517 РФ, Кл. В63В 35/08. Способ разрушения ледяного покрова / В.М. Козин, В.Л. Земляк, Е.Г. Рогожникова и др. (РФ); заявитель и патентообладатель ПГУ им. Шолом-Алейхема, ИМиМ ДВО РАН, АмГПГУ (RU). – № 2015129902/11 заявл. 20.07.2015; опубл. 10.11.2016 Бюл. № 31– 7с.: ил.
22. Пат. 2601544 РФ, Кл. В63В 35/08. Способ разрушения ледяного покрова / В.М. Козин, В.Л. Земляк, Е.Г. Рогожникова и др. (РФ); заявитель и патентообладатель ПГУ им. Шолом-Алейхема, ИМиМ ДВО РАН, АмГПГУ (RU). – № 2015129826/11 заявл. 20.07.2015; опубл. 10.11.2016 Бюл. № 31– 7с.: ил.
23. Пат. 2601545 РФ, Кл. В63В 35/08. Способ разрушения ледяного покрова / В.М. Козин, В.Л. Земляк, Е.Г. Рогожникова и др. (РФ); заявитель и патентообладатель ПГУ им. Шолом-Алейхема, ИМиМ ДВО РАН, АмГПГУ (RU). – № 2015129828/11 заявл. 20.07.2015; опубл. 10.11.2016 Бюл. № 31– 7с.: ил.

24. Пат. 2603287 РФ, Кл. В63В 35/08. Способ разрушения ледяного покрова / В.М. Козин, В.Л. Земляк, Е.Г. Рогожникова и др. (РФ); заявитель и патентообладатель ПГУ им. Шолом-Алейхема, ИМиМ ДВО РАН, АмГПГУ (RU). – № 2015129898/11 заявл. 20.07.2015; опубл. 27.11.2016 Бюл. № 33– 7с.: ил.
25. Пат. 2603422 РФ, Кл. В63В 35/08. Способ разрушения ледяного покрова / В.М. Козин, В.Л. Земляк, Е.Г. Рогожникова и др. (РФ); заявитель и патентообладатель ПГУ им. Шолом-Алейхема, ИМиМ ДВО РАН, АмГПГУ и др. (RU). – № 2015129896/11; заявл. 20.07.2015; опубл. 27.11.2016. Бюл. № 33 – 7с.: ил.
26. Пат. 2613663 РФ, Кл. В63В 35/08. Способ разрушения ледяного покрова/ В.М. Козин, В.Л. Земляк, Е.Г. Рогожникова и др. (РФ); заявитель и патентообладатель АмГПГУ, ИМиМ ДВО РАН, ПГУ им. Шолом-Алейхема, (RU). – № 2016103294 заявл. 01.02.2016; опубл. 21.03.2017. Бюл. № 9 – 5 с.: ил.

***Публикации в других изданиях:***

27. Рогожникова Е.Г., Козин В.М. Исследование взаимодействия изгибно-гравитационных волн в ледяном покрове от движущихся нагрузок. Международный симпозиум «Образование, наука и производство: проблемы, достижения и перспективы» / Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Математическое, вычислительное и информационное обеспечение технологических процессов и систем». Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «КнАГТУ», 2010. с.202-205.
28. Рогожникова Е.Г., Козин В.М. Одно из направлений повышения эффективности разрушения ледяного покрова СВП резонансным методом. Материалы Российской научно-технической конференции «Фундаментальные исследования в области технологий двойного назначения» и Российской конференции «Школа-семинар по методологическому обеспечению и фундаментальным основам технологий двойного назначения». Россия, Комсомольск-на-Амуре. Изд-во КнАГТУ. 2011.– С.136-138.
29. Рогожникова Е.Г., Козин В.М. Трансформация изгибно-гравитационных волн, возбуждаемых несколькими нагрузками. Сборник материалов Международного научно-образовательного форума "Хэйлунцзян-Приамурье", г. Биробиджан, С.261-262.
30. Рогожникова Е.Г., Козин В.М. Исследования интерференции изгибно-гравитационных волн в ледяном покрове при движении нагрузок. // Математическое моделирование физических и информационных процессов: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Биробиджан, 25 декабря 2012 г. – Биробиджан: Изд-во ФГБОУ ВПО «ПГУ им. Шолом-Алейхема», 2013. С.68–71.
31. Рогожникова Е.Г., Погорелова А.В., Козин В.М. Движение нескольких нагрузок по ледяному покрову. Материалы всероссийской конференции «Новые математические модели механики сплошных сред: построение и изучение», приуроченной к 95-летию академика Л.В. Овсянникова. Новосибирск: институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. – 2014 18-22 апреля, с. 76-77.
32. Рогожникова Е.Г., Козин В.М., Земляк В.Л. Взаимодействие изгибно-гравитационных волн, возбуждаемых в плавающей пластине двумя нагрузками. Сборник докладов международной конференции «Успехи механики сплошных сред», приуроченной к 75-летию академика В.А. Левина. 28 сентября - 30 октября, 2014. Владивосток, Россия. – с. 233-236.
33. Рогожникова Е.Г., Козин В.М., Земляк В.Л. Возможности повышения эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова при движении двух судов на воздушной подушке. Материалы Второй Всероссийской конференции «Полярная механика-2014». Санкт-Петербург, 3-5 июня 2014. С. 31.
34. Рогожникова Е.Г., Козин В.М. Парное движение судов на воздушной подушке по ледяному покрову в условиях изгибно-гравитационного резонанса. Материалы международной научно-техн. конф. «Фундаментальные исследования океанотехники и морской инфраструктуры: Теория. Эксперимент. Практика». Комсомольск-на-Амуре, 12-16 мая 2015 г. - Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ» 2015. С. 248-250.

35. Рогожникова Е.Г., Козин В.М., Земляк В.Л., Кожаев А.В. Рекомендации по использованию интерференции изгибно-гравитационных волн, возбуждаемых в ледяном покрове движущимися нагрузками, для повышения их ледоразрушающей способности. Полярная механика: материалы третьей международной конференции, 27–30 сентября 2016, Владивосток [Электронный ресурс] / науч. ред. А.Т. Беккер; Инженерная школа ДВФУ. – Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. С. 214-224.
36. Рогожникова Е.Г., Козин В.М., Ипатов К.И. Оценка предельной несущей способности ледяного покрова при его разрушении резонансным методом. Материалы четвертой Всероссийской конференции с международным участием «Полярная механика -2017». ФГБУ «ААНИИ» Санкт-Петербург, 14-15 сентября 2017. С. 59-60.
37. Рогожникова Е.Г., Козин В.М. Интерференция изгибно-гравитационных волн при движении двух судов на воздушной подушке по ледяному покрову. Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций: материалы II Дальневосточной школы-семинара, Комсомольск – на – Амуре, 11-15 сентября 2017 г./ редкол.: А.И. Евстигнеев (отв. ред.). [ и др.].- Комсомольск – на– Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2017. С. 64-67.

РОГОЖНИКОВА ЕЛЕНА ГРИГОРЬЕВНА

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ВОЗБУЖДАЕМЫХ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ  
ИЗГИБНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЕГО РАЗРУШЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫМ МЕТОДОМ**

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать  
Формат

Усл. печ.  
Тираж 100 экз.

Уч.-изд.  
Заказ №