

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи



Лебедев Артем Алексеевич

**Исследование резонансных методов разрушения ледяного  
покрова для повышения экономической эффективности  
движения судов**

Направление подготовки  
09.04.03 – «Прикладная информатика»

**АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

2022

Никитина  
Елена Николаевна

**Проверено**

29.06.2022 Зачтено Библиотека

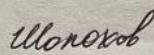
Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет»

Научный руководитель:



Козин Виктор Михайлович  
Доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник Института  
машиноведения и металлургии  
Дальневосточного отделения Российской  
академии наук

Рецензент:



Шолохов Александр Валентинович  
Инженер программист 2-категории  
Отдела внедрения и эксплуатации  
корпоративных систем, филиала ПАО  
«Объединенной авиастроительной  
корпорации», Комсомольского-на-Амуре  
авиационного завода им. Ю.А.Гагарина

Защита состоится 24 июня 2022 г. в 14.00 на заседании  
государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки  
09.04.03 «Прикладная информатика» в Комсомольском-на-Амуре  
государственном университете по адресу: 681000, г. Комсомольск-на-Амуре,  
пр. Ленина, 27, ауд. 204/5.

Автореферат разослан 10 июня 2022г.

Секретарь ГЭК



Е.В. Абрамсон

## **Общая характеристика диссертационной работы**

**Актуальность темы исследования.** Многие страны имеют замерзающие реки, омываются 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 прочее заставляют совершенствовать существующие и искать принципиально новые способы борьбы со льдом. В этом направлении перспективы открываются в связи с использованием, реализуемом судами на воздушной подушке (СВП) резонансного метода разрушения ледяного покрова (РМРЛ).

**Цель работы.** Исследование возможностей повышения эффективности РМРЛ, реализуемого СВП в зависимости от ледовых условий и мелководья.

### **Задачи работы:**

- 1 Исследовать преимущества судна на воздушной подушке при реализации способа разрушения ледяного покрова;
- 2 Произвести оценку эффективности разрушения льда судном на воздушной подушке резонансным методом в сравнении с методом давления судами ледокольного типа

3 Провести экспериментальные исследования взаимодействия судна на воздушной подушке с ледяной поверхностью.

4. Исследовать и провести расчеты напряженно-деформированного состояния ледяного покрова при движущейся нагрузке.

5 Дать оценку экономической эффективности использования судов данного класса для разрушения льда

**Научная новизна работы.** Впервые исследованы влияния мелководья на параметры ИГВ.

**Практическая значимость работы.** В процессе выполнения работы установлено существенное увеличение высоты ИГВ при выходе СВП на мелководье. Это позволяет существенно увеличить толщину разрушаемого льда, т.е. повысить эффективность резонансного метода.

**Личный вклад автора.** Заключается в совместной с научным руководителем постановке задач исследования, формулировке положений и выводов, выносимых на защиту, и написании статей по теме исследования.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы. Диссертация содержит 138 страниц; 57 рисунка, 15 таблиц, список литературы, состоящий из 118 наименований.

## Основное содержание работы

**Во введении** приведена актуальность, научная новизна, практическая значимость работы, определены цели и задачи исследования.

**В первой главе** «Анализ исследований по разрушению ледяного покрова резонансными методами» рассмотрены физико-механические особенности структуры ледяного покрова и его поведения при определенных механических воздействиях на него. Рассмотрена история создания методики для изучения и разработки теории по разрушению поверхности льда на основе исследования физико-механических свойств пластин. Дано понятие о резонансном методе разрушения ледяного покрова. Описана теория физических процессов, происходящих при распространении изгибно-гравитационных волн в сплошном ледяном покрове.

Ледяной покров принято рассматривать как изотропную пластину, лежащую на упругом основании специального вида, свойства которого соответствующим образом меняются в зависимости от характера действующей на лед нагрузки. В связи с этим были проанализированы работы, в которых рассматривались не только непосредственно колебания ледяного покрова, но и родственные задачи механики.

Вопросы, связанные с расчетами неограниченных пластин на упругом основании, имеют большое практическое значение и изучены достаточно полно. Однако имеется ряд еще нерешенных задач, Большие математические трудности, встречающиеся при решении дифференциальных уравнений изгиба пластин на упругом основании, а также сложность получаемых решений часто делают практически неприменимыми для инженерных расчетов полученные теоретические выводы.

Теоретические исследования по колебаниям пластин на упругом основании целесообразно разделить на две группы:

- исследования колебаний бесконечных пластин из различных материалов, лежащих на упругом основании, свойства которого могут быть заданы определенными зависимостями;

- исследования колебаний ледяного покрова, плавающего на поверхности воды.

Специфические свойства льда и своеобразие условий работы ледяного покрова значительно усложняют волновые процессы, происходящие в плавающей ледяной пластине, по сравнению с колебаниями пластин, лежащих на упругом основании. Это существенно ограничивает хорошо разработанную теорию изгиба плит на упругом основании в применении к колебаниям ледяного покрова. Однако некоторые общие принципы рассмотрения задач обеих групп дают возможность использовать известные решения задач изгиба пластины на упругом основании для анализа поведения ледяного покрова.

**Во второй главе** «Использование судна на воздушной подушке для разрушения ледяного покрова резонансным способом» рассмотрен один из способов разрушения ледяного покрова с использованием судна на воздушной подушке. Исследованы преимущества судна на воздушной подушке при реализации резонансного способа разрушения льда. Изучен опыт использования судна на воздушной подушке «Вояджер» для разрушения льда разной толщины. Произведена оценка эффективности разрушения льда судном на воздушной подушке резонансным методом в сравнении с методом давления судами ледокольного типа.

Поиски эффективных средств и методов разрушения ледяного покрова привели к появлению большого количества термических, физико-технических и механических способов ослабления и разрушения льда.

В настоящее время у нас в стране самым надежным, простым и эффективным средством разрушения льда и продления навигации являются ледоколы и ледокольные приставки. Об этом свидетельствуют проведенный анализ и существующая тенденция к увеличению ледокольного флота.

Несмотря на это, имеется ряд соображений, заставляющих искать принципиально новые способы разрушения льда. Принцип применения значительной мощности, который преобладает в современном ледоколостроении, малоэффективен. Так, увеличение мощности ледоколов более чем в 6 раз позволило увеличить толщину преодолеваемого льда только два раза. Такое недостаточное повышение ледопроеходимости можно объяснить несовершенством способа ломки льда ледоколами, требующего больших затрат мощности.

Увеличение мощности арктических ледоколов, которые значительное время работают во льдах, является экономически оправданным. Сезонное использование по прямому назначению мощных речных ледоколов может оказаться экономически невыгодным. К тому же для речных ледоколов требование повышения ледопроеходимости, а соответственно, и мощности противоречит требованию ограничения осадки ледоколов  $T$ . Рост мощности при неизменной осадке приводит к увеличению ширины судна  $B$ , которая в основном и определяет сопротивление льда. Кроме того, увеличение ширины приводит к изменению гидродинамической картины обтекания корпуса битым льдом, большая часть которого будет проходить под днищем и попадать в винты. Большие отношения  $B/T$  приводят также к значительной (9-10 баллов) засоренности канала битым льдом. Неэффективно использование ледоколов при разрушении заторов и при работе в условиях обильной шуги и снежицы.

Преодоление ледяного покрова предельной толщины совершается на малых скоростях непрерывного движения судна (0,6-0,8 м/с) и характеризуется чрезвычайно низким пропульсивным к.п.д., порядка 8-12%. При этом подавляющая часть энергии ледокола расходуется двигателями на бесполезное перемешивание масс воды и льда, т.е. такие двигатели, как гребные винты, в подобных режимах движения не могут эффективно переработать мощность главных двигателей. Кроме того, ограниченность осадки речных ледоколов не позволяет создать движительный комплекс с

оптимальными параметрами.

В последнее время хорошо себя зарекомендовало использование на внутренних водных путях ледакольно-ледоочистительных приставок (ЛЛП). Применение ЛЛП позволяет улучшить качество прокладываемого во льду канала и несколько повысить ледапроходимость состава "приставка-толкач". Однако неизменный по существу принцип разрушения ледачного покрова ЛЛП не позволяет в полной мере устранить все выше перечисленные недостатки процесса ломки льда ледаколами. Таким образом, одним из направлений по совершенствованию ледакольных средств является изыскание принципиально новых средств разрушения ледачного покрова.

Открытые сравнительно недавно ледаоразрушающие свойства судов на воздушной подушке заинтересовали специалистов за рубежом и у нас в стране. Впервые разрушение льда было реализовано в Канаде, хотя предположения о возможности использования СВП для разрушения льда вначале высказывались сотрудниками ДАНИИ, а само это явление было замечено еще при испытаниях СВП "Сормович" на Волге. Появление значительных деформаций льда при движении по нему СВП отмечалось и в процессе испытаний первых отечественных СВП проф. В.Л. Левкова. Однако этим фактам придали значения и в дальнейшем работы в этом направлении не проводились.

За рубежом, в первую очередь в США, Канаде, Финляндии, ФРГ, в настоящее время осуществляются специальные программы по исследованию ледаоразрушающих возможностей СВП. В частности, в Канаде при Министерстве транспорта страны создан Комитет по изучению проблем разрушения льда с помощью СВП. В этой области канадскими учеными уже в течение ряда лет проводятся натурные и модельные исследования, теоретические проработки.

С точки зрения эффективного использования и безопасности эксплуатации для осуществления резонансного способа пригодны пока что водоизмещающие суда и СВП. Вместе с тем резонансные скорости являются



практически недостижимыми при движении ледоколов даже в среднем по толщине льду, что делает затруднительным их использование для разрушения льда этим методом. К тому же движение ледокола во льду с большой скоростью небезопасно. В то время как СВП, намного меньшие по массе и мощности главных двигателей, способны разрушать лед значительной толщины. Объяснить это можно тем, что у СВП на создание воздушной подушки расходуется около 36% полной мощности. Следовательно, больше половины мощности судна расходуется на преодоление сопротивления движению, которое при резонансных скоростях в основном состоит из волнового. При РСРЛ энергия, затрачиваемая на волнообразование, является полезной. Ледокол же тратит свою мощность на преодоление сопротивления льда, в общем балансе которого даже при критических скоростях волновое сопротивление составляет незначительную часть. Кроме того, при движении ледокола в сплошных льдах встают проблемы обеспечения ледовой прочности, маневренности и заклинивания во льдах.

Преимуществами СВП являются также отсутствие непосредственного контакта судна со льдом, проходимость над заснеженным ледяным покровом, безопасность движения над битым льдом и чистой водой. Практическое отсутствие осадки у СВП позволяет разрушать в лед в бассейнах любой глубины. Это качество проявилось при предотвращении сильного наводнения на реке Прери в Северной Канаде, когда для ликвидации возникающих заторов было использовано СВП «Вояжер», разрушавшее лед на глубине воды всего в несколько сантиметров.

Использование СВП для реализации РСРЛ целесообразно еще и потому, что в этом типе транспортного средства возможно сочетание транспортных и ледокольных функций, а вездеходные качества СВП делают возможной их круглогодичную эксплуатацию. В летний период СВП могут использоваться как обычные суда для перевозки грузов, пассажиров, в качестве перегрузочного средства, а также для перевозки грузов по

заболоченной и пересеченной местности, в труднодоступные места. Широко применяемый модульный принцип постройки средних СВП позволяет легко переоборудовать судно из транспортного в пассажирское путем установки на нем стандартного салона. В период нарастания льда СВП может использоваться как ледокольно-транспортное средство. Если толщина ледяного покрова превысит предельное с точки зрения ледоразрушающих свойств СВП значение, то судно опять может использоваться как транспортное или пассажирское средство.

Для разрушения резонансным способом льда значительной толщины необходима волна большой амплитуды, для возбуждения которой потребуется транспортное средство с массой в сотни тонн. Трудно представить иное, чем СВП, средство, обладающее такой массой и возможностью безопасно двигаться над льдом с большой скоростью. Перспективы развития СВП свидетельствуют о неуклонной тенденции к росту водоизмещения этих судов. Так, например, программой ARPA, разработанной Управлением перспективного планирования научно-исследовательских работ при министерстве обороны США и осуществляемой с 1970 г., предусмотрено создание арктического СВП полной массой 1000 т. Целесообразность создания таких крупных СВП для работы в ледовых условиях продемонстрировали и натурные испытания СВП SK-5.

Возможность изготовления корпуса СВП по модульному принципу позволяет отдельные секции судна перевозить на самолетах, автомобильных и железнодорожных платформах и т.д. Это в значительной мере облегчает процесс доставки СВП к месту назначения.

К преимуществам СВП также относятся их способность преодолевать различные препятствия и высокая мобильность. Обладая большой скоростью и амфибийностью, СВП смогут быстро перемещаться в районы, где возникнет необходимость в разрушении льда.

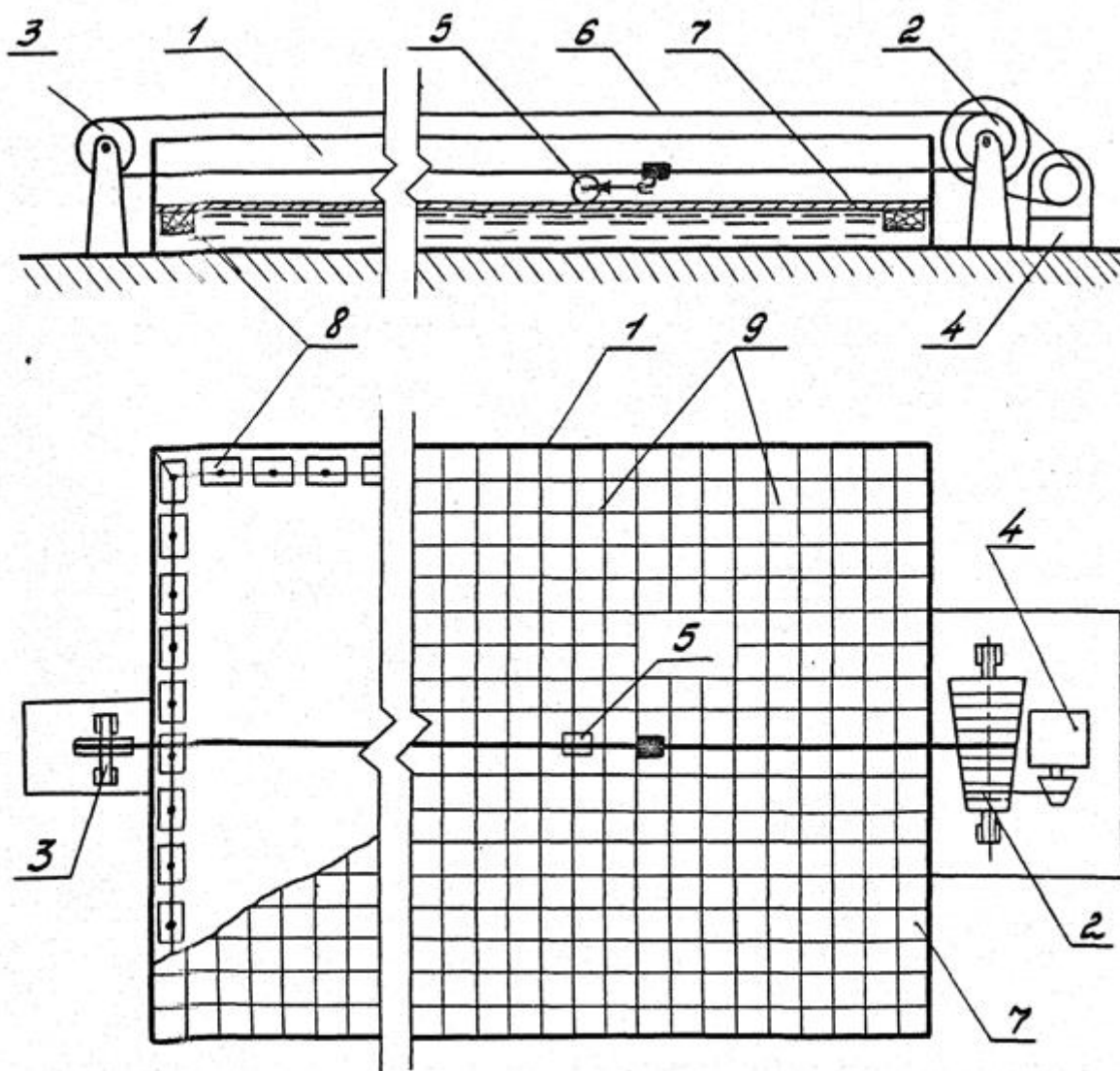
**В третьей главе «Экспериментальные исследования взаимодействия судна на воздушной подушке с ледяным покровом»** описана исследовательская часть по взаимодействию судна на воздушной подушке с ледяной поверхностью. Материалом исследования послужили упругие пленки, имитирующие поверхность льда. Экспериментальные исследования проводились на базе лаборатории механики сплошных сред Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета (АмГПГУ) с использованием искусственной модели льда.

Теория волновых колебаний ледяного покрова пока еще не разработана настолько, чтобы дать ответы на практические задачи разрушения льда ИГВ от движущегося по нему СВП.

Натурные исследования поведения ледяного покрова под действием различных динамических нагрузок весьма трудоемки. Нестабильность во времени и многообразие свойств ледяного покрова, зависимость их от погодных условий и влияние на них различных факторов (снег, течение и др.) создают дополнительные трудности в получении достоверных результатов. Уменьшить трудоемкость экспериментальных исследований, обеспечить стабильность свойств объекта исследований, получить устойчивые результаты и тем самым существенно облегчить стоящие перед экспериментаторами задачи можно с помощью модельных испытаний.

Способы проведения модельного эксперимента и законы подобия при моделировании ИГВ в ледяном покрове пока не рассматривались. При выполнении настоящей работы возникла потребность в исследовании возможности моделирования колебаний ледяного покрова при ИГР в лабораторных условиях. Для этого изучалась возможность имитации ледяного покрова упругими пленками, что позволило бы для анализа характера деформаций ледяной пластины отказаться от использования в экспериментах естественного льда. Принципиальная возможность такого подхода выявлена в ходе натурных наблюдений за поведением ледяного покрова при действии на него внешних возмущающих нагрузок.

Эксперименты показали, что при распространении в ледяном покрове ИГВ последний ведет себя как эластичная пленка. Это, а также упругое поведение льда при кратковременных нагрузках позволяет в подобных случаях рассматривать ледяной покров как упругую изотропную плиту.



1 – бассейн; 2 – конусный вариатор (носовой блок); 3 – кормовой блок; 4 – электродвигатель; 5 – буксируемый груз; 6 – бесконечный тросик; 7 – резиновая пленка; 8 – деревянные поплавки; 9 – разметка на пленке

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

ИГВ возбуждались движущимся по пленке 7 грузом 5. Для обеспечения плавучести и свободного опирания резиновой пленки по периметру бассейна 1 укладывались свободно перемещающиеся деревянные полавки 8. Скорость буксировки груза регулировалась при помощи

конусного вариатора 2 и изменением числа оборотов электродвигателя 4. Интересующий диапазон изменения скоростей, определяемый толщиной слоя воды, выбирался с учетом размеров бассейна так, чтобы сделать минимальным влияние отраженных волн на волновую систему около движущегося груза.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что качественно, а некоторые параметры колебаний ледяного покрова и количественно моделируются по предложенной методике вполне удовлетворительно. Это позволяет в лабораторных условиях предварительно исследовать вопросы, теоретическое исследование которых затруднительно. Так, сравнительно просто удалось исследовать характер деформации упругой пластины, имитирующей ледяной покров, при различных режимах движения сосредоточенной нагрузки. Результаты этих экспериментов оказались полезными при анализе теоретических решений. Для количественной оценки величины амплитуды ИГВ при ИГР и коэффициента резонансного усиления необходимо моделировать и вязкостные свойства льда.

Таким образом, в рамках упругой модели льда основные черты поведения ледяного покрова под действием динамических нагрузок можно исследовать с помощью подобных модельных экспериментов. Для более тонкого анализа, например, для оценки разрушающих усилий, когда существенную роль играют мелкомасштабные процессы, следует проводить эксперименты с естественным льдом. Однако необходимость совместного выполнения условий  $F_r$  и  $Ch$  существенно затрудняют модельные испытания, так как для таких экспериментов требуется модельный лед с ослабленными прочностными свойствами. Способ приготовления такого льда (способ ААНИИ) требует специального ледового бассейна и дорогостоящего оборудования. В связи с этим в последующих модельных экспериментах применялся естественный лед. Масштаб модельных экспериментов определялся величиной  $\beta$ . Поскольку получаемый модельный лед по физико-механическим свойствам мало отличался от свойств натурального ледяного

покрова, то пересчет результатов испытаний на лед значительной толщины (0,5-1,0 м) был невозможен. Полученные экспериментальные данные использовались только для сравнительной оценки значений разрушающих нагрузок.

**В четвертой главе** «Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния ледяного покрова от действия судна на воздушной подушке» исследованы и проведены расчеты напряженно-деформированного состояния ледяного покрова при движущейся нагрузке.

Теория волновых колебаний льда и методы оценки несущей способности покрова позволяет решить некоторые инженерные задачи по разрушению льда. Однако проведенный анализ показал непригодность существующих теоретических решений для определения величины нагрузки, разрушающей ледяной покров резонансным способом, хотя и позволил наметить направление для получения нужного решения. В настоящем разделе диссертации предпринята попытка теоретического исследования основных закономерностей разрушения ледяного покрова ИГВ с целью получения зависимостей, позволяющих обоснованно подойти к выбору параметров СВП, возбуждающих такие волны, а также оценить ледоразрушающие свойства судов, основные параметры которых известны.

Очень часто лед рассматривается как упругий изотропный материал, а для изучения его НДС привлекают аппарат теории изгиба упругих пластин. Однако в действительности лед отчетливо проявляет свойства квазиизотропной среды, причем соотношения между напряжениями и деформациями носят вязкоупругий характер. С. Бернштейн в 1912 году в работе "Ледяная железнодорожная переправа" писал: "... Поведение льда под нагрузкой представляется в таком виде: после единовременного упругого прогиба, наступающего сейчас же за установкой нагрузки, деформации продолжают возрастать замедленно в течение приблизительно трех часов, достигая к этому времени двойной и даже тройной величины". Одновремен-

но с этим многие экспериментаторы считают, что при кратковременных нагрузках определяющей является упругая деформация льда.

При воздействии внешних усилий на ледяной покров неупругие свойства льда влияют на характер его изгиба по-разному в зависимости от режима нагрузки и вида напряженного состояния. И.С. Песчанский отмечает, что лед работает упруго до разрушения, если период действия нагрузки не превышает 0,5-1,0 мин. В этом случае пластическая деформация не успевает развиться и разрушение льда определяется в основном упругой деформацией, а для сравнительно малых, но длительных нагрузок, характерно разрушение ледяного покрова с малой упругой и большой пластической деформацией. К подобному выводу пришли и авторы других работ. Пластические деформации во льду появляются даже при незначительных напряжениях, особенно при малых скоростях нагружения.

**В заключении** была дана оценка экономической эффективности использования судов данного класса для разрушения льда.

#### **Основные выводы**

Произведена оценка эффективности разрушения льда судном на воздушной подушке резонансным методом в сравнении с методом давления судами ледокольного типа.

Проведены экспериментальные исследования на базе лаборатории механики сплошных сред Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета (АмГПГУ) с использованием искусственной модели льда.

Дана оценка экономической эффективности использования судна на воздушной подушке для разрушения льда.

### **Список работ, опубликованных по теме диссертации**

1 Лебедев А.А. Использование маневрирования судов на воздушной подушке для повышения эффективности резонансного метода разрушения ледяного покрова // РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ: ОПЫТ, ПРОБЛЕМЫ, ПРОГНОЗЫ сборник статей Международной научно-практической конференции – 2022. – С.159-163.

2 Лебедев, А. А. Увеличение ледоразрушающей способности резонансных изгибно-гравитационных волн за счет их интерференции // СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ сборник статей IV Международной научно-практической конференции – 2022. – С.50-56.