На правах рукописи

ПЕПЛИН ФЕДОР СЕРГЕЕВИЧ

ДИНАМИКА И УСТОЙЧИВОСТЬ СУДОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ С ГИБКИМ ОГРАЖДЕНИЕМ БАЛЛОНЕТНОГО ТИПА

01.02.06 — Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Нижний Новгород
2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель	**Дмитрий Тимофеевич Чекмарев**, доктор физико-математических наук, доцент
Официальные оппоненты	**Кондратов Дмитрий Вячеславович**, доктор физико-математических наук, доцент, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Институт прикладных информационных технологий и коммуникаций, профессор кафедры «Прикладные информационные технологии».
	Леонтьева Анна Викторовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории информационных технологий и измерительных систем Института проблем машиностроения РАН (филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»).
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта».

Защита состоится 30 июня 2022 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Н. Новгород, пр. Гагарина, 23, корпус 6.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте https://diss.unn.ru/1240.

Автореферат разослан 13 мая 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Горохов Василий Андреевич

Актуальность темы исследования

Диссертация посвящена вопросам математического моделирования динамики амфибийных судов на воздушной подушке (АСВП), гибкое ограждение (ГО) которых выполнено в виде замкнутых надувных гибких оболочек — баллонетов. Такие суда обладают рядом серьезных экономических и эксплуатационных преимуществ перед альтернативными видами транспорта при решении транспортных задач в труднодоступных регионах, таких, как Сибирь, Дальний Восток, Арктическая зона. По проведенным оценкам, авиационный транспорт оказывается в 3 – 5 раз более затратным, причем использование самолетов (нижняя планка оценки) требует еще дополнительно создания дорогостоящей инфраструктуры. Применение же вертолетов ведет к верхней планке оценки. Использование таких судов для решения социальной задачи приближения населения труднодоступных регионов страны к крупным центрам и транспортным развязкам является, в обозримое время, наиболее рациональным с экономической точки зрения. Этот момент находит отражение в «Транспортной стратегии РФ до 2030 года» Государственной программе РФ «Развитие судостроения на 2013 – 2030 годы».

До недавнего времени интерес к АСВП с ГО баллонетного типа был сконцентрирован главным образом на небольших судах до 2 — 3 тонн для нужд пассажирских перевозок и частных заказчиков. Однако в последние годы наблюдается выраженная тенденция к расширению сферы применения судов данного типа, что требует создания судов существенно большего водоизмещения, 40 — 300 тонн.

Тем не менее, существует ряд технических, методологических и организационных вопросов, требующих своего решения для скорейшего применения судов на воздушной подушке к самому широкому классу задач. К таким проблемным вопросам можно отнести недостаточный уровень проходимости и мореходности существующих моделей судов, низкий ресурс конструкций гибкого ограждения, неустойчивые режимы функционирования системы «ВП — ГО» (подлом гибкого ограждения, автоколебания баллонетов, «булыжная мостовая»), вопросы, связанные с масштабированием результатов мореходных испытаний в опытном бассейне, а также несовершенство требований классификационных обществ в части нормирования нагрузок на СВП.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью исследования является разработка и апробация математических моделей динамики и устойчивости АСВП с ГО баллонетного типа.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Формирование математической модели динамики движения АСВП с ГО баллонетного типа, учитывающей работу нагнетательного комплекса, истечение воздуха из воздушной подушки, обусловленное вертикальным движением судна демпфирование ВП и динамику гибкого ограждения.

2. Валидация и верификация предложенных методов путем сравнения результатов рас-

четов по разработанным методикам с результатами модельных экспериментов, а также с результатами применения типовых программных пакетов численного моделирования.

3. Разработка модели устойчивости функционирования подъемного комплекса АСВП с ГО баллонетного типа. Вывод аналитического условия устойчивости АСВП.

4. Применение разработанных методов к решению практических задач динамики СВП, выработка рекомендаций для проектирования АСВП.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель зоны воздушной подушки, учитывающая обусловленное вертикальной скоростью демпфирование и зависимость скорости истечения воздуха из ВП от формы ГО и зазора под ГО. Данная математическая модель имеет вид обыкновенного дифференциального уравнения.

2. Разработана методика численного исследования устойчивости подъемного комплекса АСВП с ГО баллонетного типа. Методика учитывает такие параметры АГДК судна, как: давление в ВП, расход воздуха в ВП, наклон РНХ нагнетателя, форма и количество ярусов баллонетов. Также методика принимает во внимание демпфирование ВП и демпфирование баллонета. В такой общей поставновке задача решена впервые.

3. Впервые выведено аналитическое условие устойчивости подъемного комплекса АСВП с ГО баллонетного типа (неравенство (16)).

4. Численно и аналитически проанализирован масштабный эффект в задачах динамики и устойчивости СВП с ГО баллонетного типа.

5. Сформулированы рекомендации по обеспечению устойчивости подъемного комплекса АСВП с ГО баллонетного типа.

6. Проведен анализ нагрузок, действующих на судно, полученных в соответствии с правилами классификационных обществ в сравнении с результатами расчетов методами прямого численного моделирования.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая, фундаментальная значимость проведенного исследования заключается в создании метода математического моделирования устойчивости и динамики системы, включающей в себя источник энергии для формирования области повышенного давления (нагнетатели), рабочую область повышенного давления (воздушную подушку), частично удерживаемую гибкими элементами (баллонетами). Гибкие элементы деформируются и отклоняются вследствие повышенного давления в рабочей области.

Такие задачи носят выраженный междисциплинарный характер (аэродинамика, нелинейная теория упругости, методы аэроупругости и теории колебаний) и имеют место в различных разделах машиностроения, в частности, при создании амфибийных транспортных средств, а также в биомеханике: динамике различных артерий, вентиляции легких и т.д.

Практическая значимость работы заключается в применении разработанных методов для определения внешних нагрузок, действующих на судно при различных вариантах движения, для расчета характеристик ходкости, остойчивости, а также для обеспечения устойчивости функционирования подъемного комплекса СВП. Выполнение моделирования по разработанным методикам может способствовать рациональному выбору аэрогидродинамической компоновки перспективных моделей АСВП с ГО баллонетного типа на самых ранних этапах проектирования. Кроме того, результаты диссертации могут использоваться для формирования предложений по корректировке регламентирующих требований классификационных обществ в части определения внешних нагрузок на корпус и гибкое ограждение судна.

Методология и методы исследования

При формировании математической модели динамики движения использовались уравнения движения абсолютно твердого тела (уравнения Эйлера).

Численное интегрирование уравнений динамики СВП осуществлялось с использованием явного метода Эйлера первого порядка.

Численное интегрирование уравнений определения деформированной формы баллонета выполнялось методом установления.

Решение гидро- и аэродинамических задач выполнялось путем интегрирования методом конечных объемов осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса несжимаемой жидкости, замыкаемых полуэмперической моделью турбулентности SST.

При анализе устойчивости работы подъемного комплекса СВП был задействован метод исследования корней характеристического уравнения. При выводе аналитического критерия устойчивости использовался критерий Рауса-Гурвица.

Основные пололжения, выносимые на защиту

1. Математическая модель эволюции давления в зоне воздушной подушки.

2. Методика численного моделирования устойчивости подъемного комплекса АСВП с ГО баллонетного типа.

3. Аналитическое условие устойчивости АСВП с ГО баллонетного типа.

4. Результаты исследования масштабного эффекта в задачах динамики и устойчивости СВП.

5. Результаты анализа нагрузок, регламентируемых правилами классификационных обществ.

6. Рекомендации по выбору проектных параметров для обеспечения устойчивого функционирования подъемного комплекса.

Достоверность результатов

Достоверность результатов обеспечивается

1. Строгим использованием математического аппарата и основных законов механики.

2. Совпадением полученных результатов в частных случаях с результатами, полученными путем моделирования методами конечного объема и конечного элемента с использованием лицензионных версий широко известных программных продуктов (Ansys CFX, Ansys LS-DYNA, номер лицензии 1069197 от 07.01.2020), а также с аналитическими решениями.

3. Совпадением полученных результатов с результатами натурного и модельного эксперимента.

4. Соответствием выявленных эффектов эффектам, наблюдаемым на практике.

Апробация результатов

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях

1. Международная научно-техническая конференция «Пром - Инжиниринг», Санкт - Петербург, 16 – 19 мая 2017 г.

2. XX Юбилейная Международная конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам, Алушта, 24 – 31 мая 2017.

3. 14th International Conference on Fast Sea Transportation, Nantes, France, 27 – 29 September 2017.

4. Семинар по быстроходным судам памяти Валентина Константиновича Трешкова, Санкт-Петербург, 17 ноября 2017.

5. XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки), Нижний Новгород, 22 – 23 мая 2018.

6. XII Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018), Алушта, 24 – 31 мая 2018.

Результаты диссертации были внедрены в практику проектирования АСВП с ГО баллонетного типа ООО СК «АЭРОХОД» и использовались в процессе проектирования судов пр. А20П, А25ПС, А750.

Публикации

Автором диссертации опубликовано 10 статей по теме работы, из них 3 в журналах из «Списка...» ВАК или индексируемых в базах Scopus и/или WoS.

Также опубликованы 2 статьи в журнале «Научно–технический сборник Российского морского регистра», 1 статья в журнале «Научные проблемы водного транспорта» и 4 доклада в сборниках трудов конференций:

Личный вклад автора

Автор диссертации принимал активное участие в постановке задач, технической реализации и анализе всех результатов диссертационной работы. Численное моделирование, программирование вычислительных алгоритмов, вывод аналитических зависимостей выполнены автором диссертации полностью самостоятельно. Соавторы опубликованных работ осуществляли общее руководство проводимыми исследованиями и оказывали консультативную поддержку на всех этапах работы.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из 4 глав, содержит 127 страниц, 51 рисунок, 6 таблиц, список литературы состоит из 148 наименований.

Благодарности

Данная работа была бы невозможной без деятельного участия многих людей. Прежде всего, необходимо отметить роль В.В. Шабарова, светлой памяти которого посвящается данная работа. Также автор выражает благодарность научному руководителю Д.Т. Чекмареву и П.С. Кальясову за помощь в постановке задач и обсуждении результатов, а также за поддержку на всех этапах работы. Наконец, необходимо отметить роль сотрудников ООО СК «АЭРОХОД», участвовавших в проектировании, натурных, стендовых и модельных испытаниях АСВП с ГО баллонетного типа пр. А8, А20П, А20ПС, А25ПС, А750.

Работа выполнялась при финансовой поддержке следующих программ, а именно:

1. Результаты параграфов 2.3 и 4.2 получены в рамках Государственного задания Минобрнауки России (№ 0729-2020-0054).

2. Результаты параграфа 4.3 получены в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (внутренний номер Н-496-99-2021-2023).

Содержание работы

Во введении приводится обоснование актуальности работы, характеризуется ее научная новизна и обозначаются положения, выносимые на защиту.

В первой главе дана общая характеристика основных отличительных черт аэрогидродинамических компоновок судов на воздушной подушке с гибким ограждением баллонетного типа. Указаны преимущества двухъярусной схемы гибкого ограждения по сравнению с одноярусной, которые заключаются в повышении характеристик ходкости, проходимости, мореходности, остойчивости и непотопляемости. Показано, что разделение зоны воздушной подушки на четыре секции посредством введения центрального баллонета и промежуточного гибкого ограждения позволяет обеспечить рациональное значение дифферента судна с целью достижения баланса между скоростью хода и устойчивостью движения. Дана качественная характеристика вертикальным резонансным автоколебаниям системы «воздушная подушка — баллонеты». Также в первой главе приведен обзор литературы по теме диссертации.

Вторая глава посвящена построению математической модели динамики движения судна на воздушной подушке с гибким ограждением баллонетного типа. Уравнения движения судна описываются тремя скалярными уравнениями динамики трансляционного движения твердого тела, тремя уравнениями для вращений, а также тремя кинематическими соотношениями, связывающими компоненты вектора угловой скорости ω с углами крена γ, дифферента ψ и рыскания φ:

$$\begin{gathered}
\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{1}{m}\mathbf{F} \\
\frac{d\omega_x}{dt} = \frac{M_x - (I_z - I_y)\omega_y\omega_z}{I_x} \qquad \frac{d\gamma}{dt} = \omega_x - \tan\psi\,(\omega_y\cos\gamma - \omega_z\sin\gamma) \\
\frac{d\omega_y}{dt} = \frac{M_y - (I_x - I_z)\omega_x\omega_z}{I_y} \qquad \frac{d\psi}{dt} = \omega_z\cos\gamma + \omega_y\sin\gamma \\
\frac{d\omega_z}{dt} = \frac{M_z - (I_y - I_x)\omega_x\omega_y}{I_z} \qquad \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{\cos\psi}\,(\omega_y\cos\gamma - \omega_z\sin\gamma)
\end{gathered} \tag{1}$$

Силы и моменты в (1) могут быть представлены в виде

$$\begin{gathered}
\mathbf{F} = \mathbf{F}_{\mathrm{AC}} + \mathbf{F}_{\mathrm{Surf}} + \mathbf{F}_{\mathrm{Rudd}} + \mathbf{F}_{\mathrm{Prop}} \\
\mathbf{M} = \mathbf{M}_{\mathrm{AC}} + \mathbf{M}_{\mathrm{Surf}} + \mathbf{M}_{\mathrm{Rudd}} + \mathbf{M}_{\mathrm{Prop}}
\end{gathered} \tag{2}$$

Подстрочный индекс AC в (2) означает, что сила или момент действуют на твердое тело со стороны воздушной подушки, Surf — от контакта с опорной поверхностью, Rudd — усилие на рулях управления, Prop — тяговое усилие от винтов. Первые два слагаемых в представлении сил и моментов (2) вычисляются на каждом шаге интегрирования по аналитическим или полуэмпирическим закономерностям в соответствии с методикой, изложенной в главе 2. Последние два слагаемых определяются из аппроксимированных результатов CFD расчетов.

Избыточное давление в воздушной подушке p представляется в виде суммы двух компонент:

$$p = p_{\mathrm{qs}} + p_{\mathrm{damp}}. \tag{3}$$

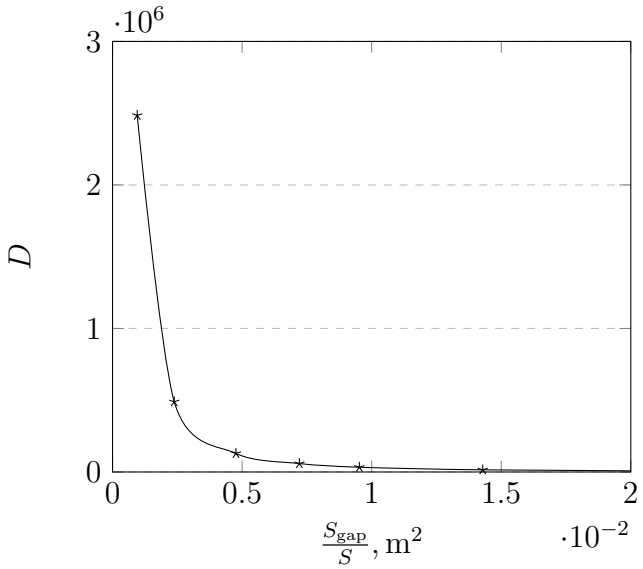


Рисунок 1 – Коэффициент демпфирования $D(S_{\text{gap}})$

Первый член представляет собой стационарную составляющую давления. Он зависит исключительно от текущего положения судна. Второй член — это демпфирующее давление ВП, отвечающее за изменение давления вследствие наличия вертикальной скорости $\dot{H}$.

Стационарная часть давления p_{qs} может быть определена из закона изменения массы воздуха в зоне ВП:

$$\frac{dp_{\text{qs}}}{dt} = \frac{np_a}{W}\left(Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} - \frac{dW}{dt}\right) \tag{4}$$

Объемный расход воздуха, вытекающего из зоны ВП Q_{out} может быть вычислено следующим образом:

$$Q_{\text{out}} = \chi\sqrt{\frac{2p_{\text{qs}}}{\rho}}S_{\text{gap}} \tag{5}$$

Объемный расход воздуха Q_{in}, нагнетаемого вентиляторами в зону ВП, вычисляется с помощью расходно-напорной характеристики вентилятора:

$$Q_{\text{in}} = Q_{\text{in}}(p_{\text{qs}}). \tag{6}$$

Уравнения (4), (5) и (6) представляют собой модель стационарной части давления в зоне ВП.

Демпфирующее давление определяется в соответствии с формулой:

$$p_{\text{damp}} = D(S_{\text{gap}})\rho\left(-\frac{Q_{\text{in}}}{S}\dot{H} + \frac{1}{2}\dot{H}^2\right)S, \tag{7}$$

Значения коэффициента $D(S_{\text{gap}})$ для различных зазоров определяются путем проведения серии самостоятельных CFD расчетов. Функция $D(S_{\text{gap}})$, используемая в настоящей работе, представлена на рис. 1.

Демпфирующее давление определяется из результатов CFD расчетов как разница между средним давлением в области ВП и стационарной частью давления p_{qs}, полученной по

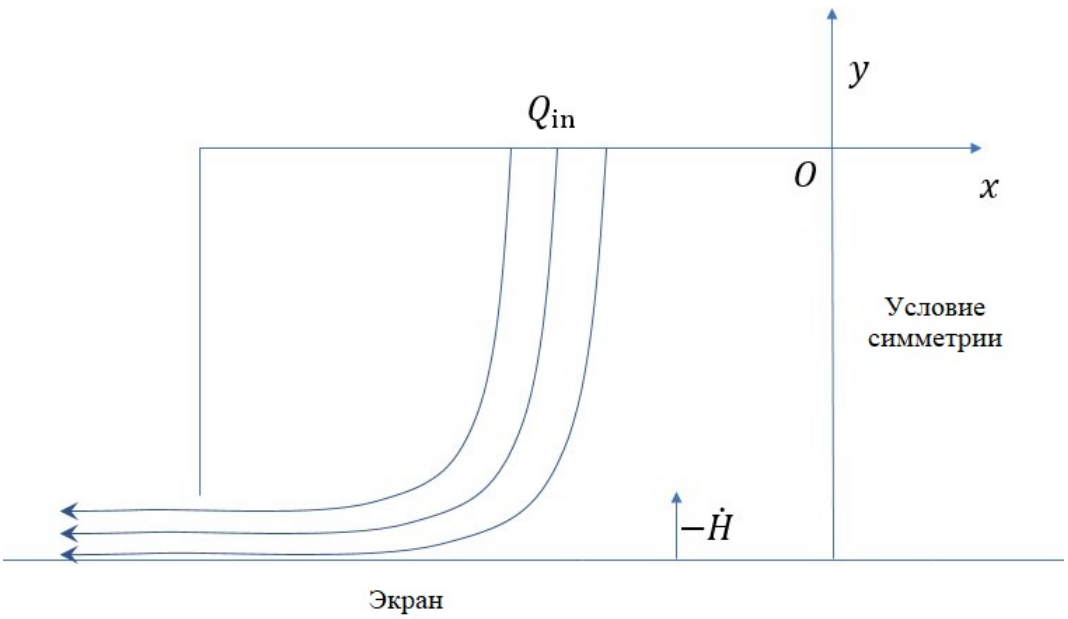


Рисунок 2 – Схема определения демпфирования ВП

формуле (4). Схематически постановка задачи показана на рисунке 2. Моделировалась четверть секции ВП.

При моделировании движения над водной поверхностью на каждом шаге интегрирования должна быть определена форма свободной поверхности в зоне воздушной подушки. Данная информация необходима для корректного определения замыва баллонета, а также для вычисления объема ВП, что, в свою очередь, оказывает большое влияние на значение давления воздуха в ВП. В главе 2 содержится описание методики численного определения формы деформированной поверхности под движущейся зоной повышенного давления и приведены результаты моделирования для различных чисел Фруда и Эйлера.

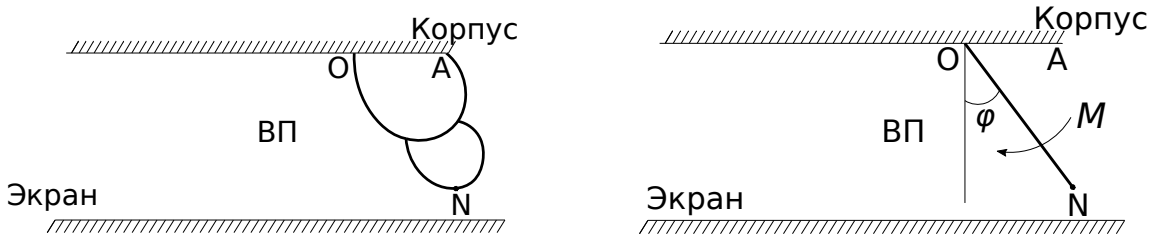
Также в главе 2 представлены способы определения контактных усилий при движении по водной поверхности и по твердому экрану. Методика определения нагрузок на гибкое ограждение при движении по твердой поверхности основана на представлении поперечного сечения баллонета в виде гибкой нерастяжимой нити. Определение реакций на скеги при движении по воде основывается на понятии присоединенных масс.

Глава 3 посвящена построению математической модели устойчивости системы подъемного комплекса судна на воздушной подушке.

При анализе устойчивости подъемного комплекса СВП используется упрощенное представление гибкого ограждения как жесткого стержня, шарнирно прикрепленного к корпусу судна (рис. 3). Будем называть такую модель эквивалентным стержнем. Динамика эквивалентного стержня описывается следующим уравнением:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = pL\frac{l^2}{2} + M\left(\varphi, \frac{d\varphi}{dt}\right). \tag{8}$$

Первый член в правоч части уравнения (8) — это момент, действующий на баллонет



(a) Поперечное сечение баллонета (b) Математическая модель

Рисунок 3 – Эквивалентный стержень — математическая модель баллонета

со стороны воздушной подушки. Данный момент стремится повернуть скег вовне из ВП, поэтому его значение всегда положительное.

Второй член в (8), $M(\varphi, \dot{\varphi})$ — это момент сопротивления скега, возникающий как ответная реакция скега на внешний момент от давления воздушной подушки. Данный момент стремится повернуть баллонет внутрь ВП, следовательно, его значения всегда отрицательные.

Комбинируя уравнение (8) с законом эволюции давления в зоне воздушной подушки (4) и с уравнением вертикального движения твердого тела, получим следующую систему:

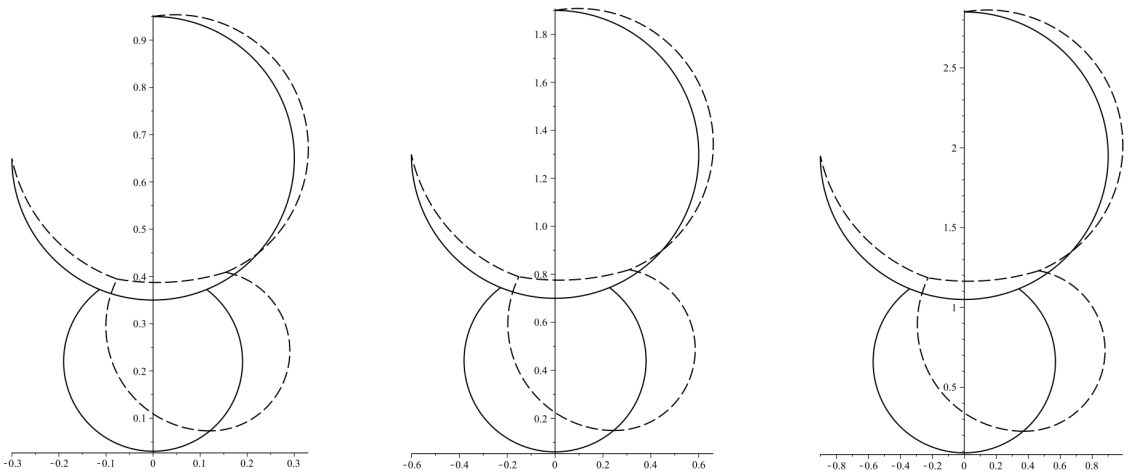
$$\begin{gathered} m\frac{d^2H}{dt^2} = pS - mg + Y(\dot{H}) \\ \frac{dp}{dt} = \frac{np_a}{W}\left(Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} - S\frac{dH}{dt} - \frac{1}{2}Ll^2\frac{d\varphi}{dt}\right) \\ I_\varphi\frac{d^2\varphi}{dt^2} = pL\frac{l^2}{2} + M\left(\varphi, \frac{d\varphi}{dt}\right) \end{gathered} \tag{9}$$

Уравнения (9) можно упростить, предположив, что все процессы внутри ВП протекают значительно быстрее по сравнению с вертикальным движением судна $\dot{H}$. В таком случае первое уравнение в (9) может быть отброшено, равно как и член $\frac{dH}{dt}$ во втором уравнении системы (9). Таким образом, получим следующие уравнения:

$$\begin{gathered} \frac{dp}{dt} = \frac{np_a}{W}\left(Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}} - \frac{1}{2}Ll^2\frac{d\varphi}{dt}\right) \\ I_\varphi\frac{d^2\varphi}{dt^2} = pL\frac{l^2}{2} + M\left(\varphi, \frac{d\varphi}{dt}\right) \end{gathered} \tag{10}$$

Системы уравнений (9) и (10) представляют собой две математические модели устойчивости подъемного комплекса СВП с ГО баллонетного типа. В дальнейшем уравнения (9) будем называть полной моделью. Уравнения (10) будем именовать упрощенной моделью. Так как демпфирующее давление в ВП возникает вследствие наличия вертикальной скорости судна, то в системе (10) соответствующее слагаемое отсутствует.

Значения момента сопротивления M в окрестности положения равновесия могут быть



(a) Судно A (b) Судно B (c) Судно C

Рисунок 4 – Деформированные состояния баллонетов

представлены в виде:

$$M\left(\varphi, \frac{d\varphi}{dt}\right)\bigg|_{\varphi_0} = \frac{\partial M}{\partial \varphi}\bigg|_{\varphi_0} \Delta\varphi + \frac{\partial M}{\partial \dot{\varphi}}\bigg|_{\varphi_0} \Delta\dot{\varphi} + O(\Delta\varphi^2) + O(\Delta\dot{\varphi}^2). \tag{11}$$

Первое слагаемое в (11) отражает вклад энергии сжатого воздуха внутри баллонета. Второе слагаемое описывает аэродинамическое сопротивление, которое испытывает баллонет при вращении вовне подушки. Для определения первого слагаемого требуется нахождение формы поперечного сечения баллонета под действием давления в воздушной подушке. В настоящей работе используется метод определения формы оболочки, основанный на теории гибкой нерастяжимой нити, уравнения которой замыкаются условиями неразрывности и неизменности длины дуг, составляющих форму оболочки. Примеры определения деформированных форм ограждений трех гипотетических судов представлены на рисунке 4. Второе слагаемое разложения (11) определяется численно с использованием CFD моделирования, аналогичной методике определения демпфирующего давления ВП.

Линеаризация системы (9) приводит к уравнениям:

$$\begin{gathered} m\frac{d^2\Delta H}{dt^2} = \Delta p S + \frac{\partial Y}{\partial \dot{H}}\bigg|_0 \Delta\dot{H} \\ \frac{d\Delta p}{dt} = \frac{np_a}{W_0}\left(\frac{\partial Q_{\text{in}}}{\partial p}\bigg|_0 \Delta p - \frac{\partial Q_{\text{out}}}{\partial p}\bigg|_0 \Delta p - \frac{\partial Q_{\text{out}}}{\partial H}\bigg|_0 \Delta H - \frac{\partial Q_{\text{out}}}{\partial \varphi}\bigg|_0 \Delta\varphi \right. \\ \left. - \frac{1}{2}Ll^2\frac{\Delta\varphi}{dt} - S\frac{d\Delta H}{dt}\right) \\ I_\varphi \frac{d^2\Delta\varphi}{dt^2} = \Delta p L\frac{l^2}{2} + \frac{\partial M}{\partial \varphi}\bigg|_0 \Delta\varphi + \frac{\partial M}{\partial \dot{\varphi}}\Delta\dot{\varphi} \end{gathered} \tag{12}$$

Характеристическое уравнение системы (12) является алгебраическим уравнением пятого порядка. Вертикальное движение судна будет устойчивым тогда и только тогда, когда действительные части всех корней этого уравнения будут отрицательными. Аналитиче-

ское исследование корней характеристического уравнения системы (12) затруднительно, поэтому соответствующий анализ может быть выполнен только численно.

Устойчивость упрощенной системы (10) может быть исследована аналогично. Характеристическое уравнение соответствующей линеаризованной системы является полиномом третьей степени:

$$a_3\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_1\lambda + a_0 = 0, \tag{13}$$

причем все коэффициенты уравнения (13) являются положительными. Применяя критерий Рауса-Гурвица к (13), получим условия устойчивости:

$$a_1 > 0, \qquad D = \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} > 0, \qquad a_3 > 0. \tag{14}$$

Следовательно, устойчивость судна определяется знаком D. Если считать $\left.\frac{\partial M}{\partial \dot{\varphi}}\right|_0$ малой величиной, то D приближенно равно:

$$\begin{aligned} D \approx \widetilde{D} &= -I_\varphi \frac{L^2 l^4}{4}\left(\frac{np_a}{W_0}\right)^2\left(\left.\frac{\partial Q_{\text{in}}}{\partial p}\right|_0 - \frac{Q_0}{2p_0}\right) - I_\varphi \chi_0 \sqrt{\frac{2p_0}{\rho}}\frac{l^2 l^3}{2}\frac{np_a}{W}\sin\varphi_0 = I_\varphi \frac{L^2 l^3}{2}\widetilde{\widetilde{D}} \\ \widetilde{\widetilde{D}} &= -\frac{l}{2}\left(\left.\frac{\partial Q_{\text{in}}}{\partial p}\right|_0 - \frac{Q_0}{2p_0}\right) - \chi_0\sqrt{\frac{2p_0}{\rho}}\sin\varphi_0. \end{aligned} \tag{15}$$

Отброшенные члены в $\widetilde{\widetilde{D}}$ положительны. Тогда достаточное условие устойчивости имеет вид:

$$\frac{l}{2}\left(\left.\frac{\partial Q_{\text{in}}}{\partial p}\right|_0 - \frac{Q_0}{2p_0}\right) + \chi_0\sqrt{\frac{2p_0}{\rho}}\sin\varphi_0 < 0. \tag{16}$$

Если в (16) положить $\varphi_0 = 0$, то может быть получено условие устойчивости скегового судна на воздушной подушке, которое также может быть выведено из уравнения (5.33) книги O.M. Faltinsen «Hydrodynamics of high-speed vehicles».

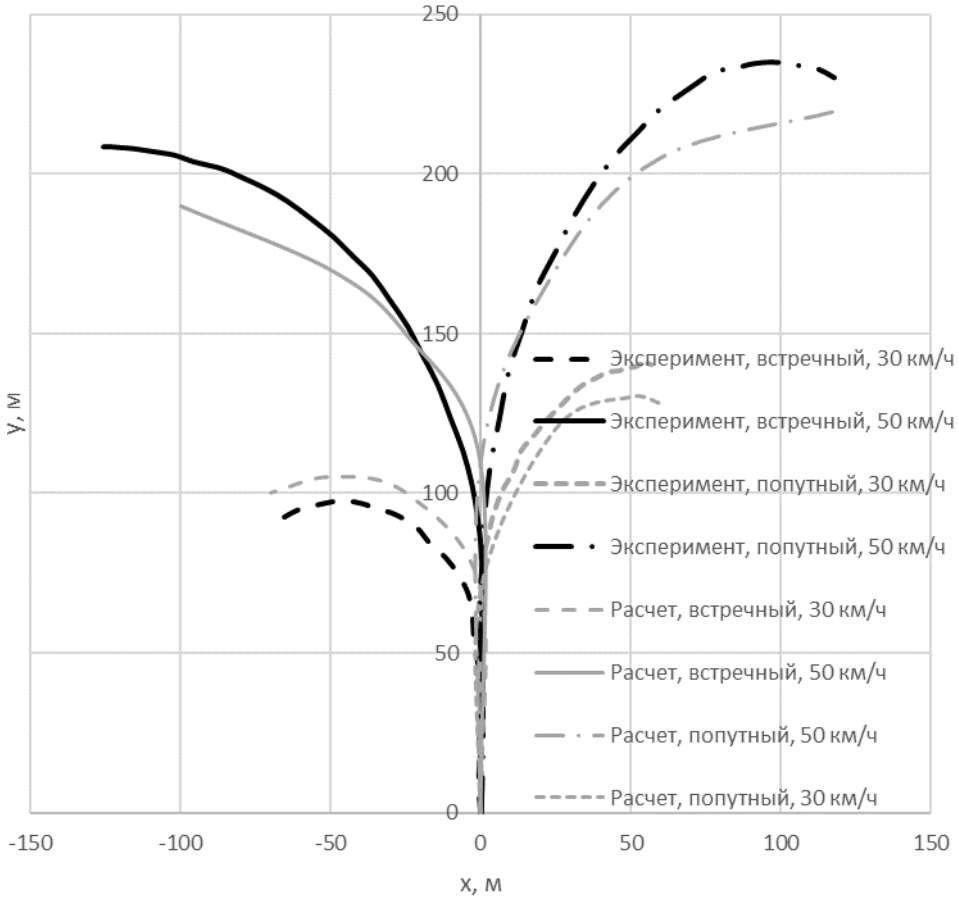
В четвертой главе представлены результаты апробации методик моделирования динамики и устойчивости СВП, а также применение их к актуальным исследовательским и проектным задачам.

Математическая модель динамики движения СВП была валидирована путем сравнения результатов расчета с результатами буксировочных испытаний в скоростном опытном бассейне и с натурными испытаниями, а также путем сопоставления результатов моделирования с результатами расчета методом конечных элементов. Так, на рисунке 5 представлены результаты моделирования разворота судна и их сравнение с результатами натурных испытаний.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод об относительно удовлетворительном описании предложенной математической моделью движения судна и о целесообразности дальнейшего развития представленной методологии.

Также в данной главе исследован эффект масштаба в задачах динамики СВП. Данный вопрос имеет большое значение как в теории гидродинамического подобия, так и в прак-

(a) Разворот судна



(b) Результаты численного и физического моделирования

Рисунок 5 – Валидация математическое модели

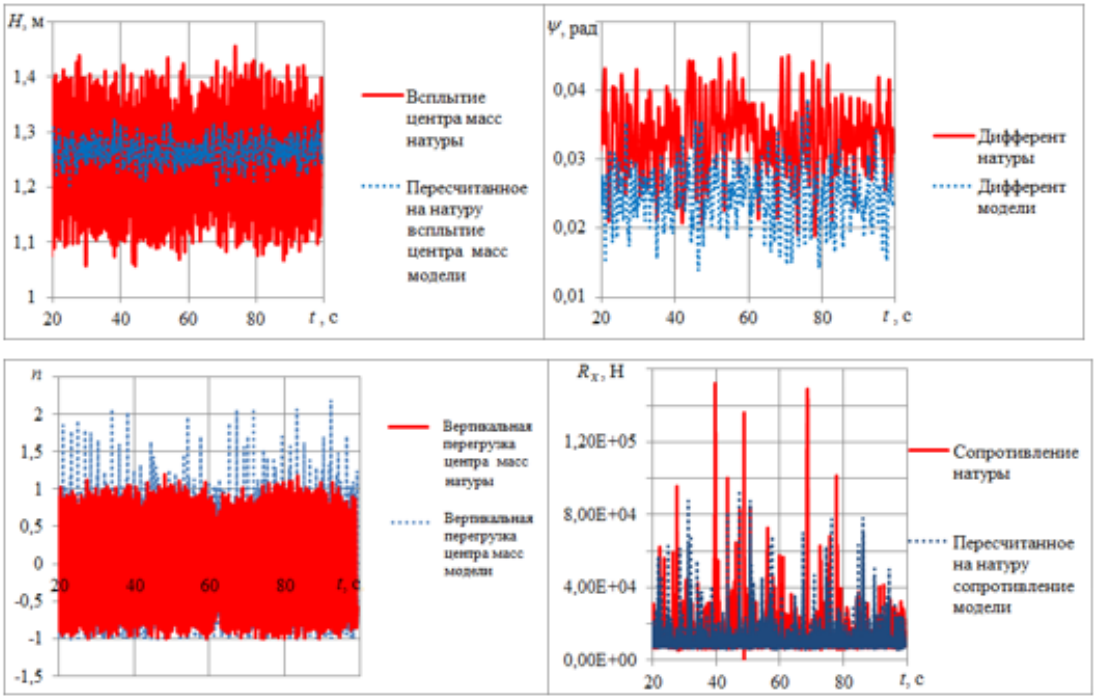


Рисунок 6 – Масштабный эффект в задаче мореходности

тике проектирования новых моделей судов. Показано, что традиционное моделирование по числу Фруда приводит к значительному завышению вертикальных перегрузок, что может привести к нерациональным решениям в процессе проектирования, а также искажает требования регламентирующих обществ. Представление о расхождении в значениях динамических параметров судна, полученных на натурном образце и путем масштабирования результатов с уменьшенной модели может быть получено из данных рисунка 6, где показаны результаты расчета динамики СВП при движении по водной поверхности встречным курсом к волне.

В связи с последним обстоятельством были проанализированы правила РМРС и РРР на предмет внешних нагрузок, действующих на судно. Показано, что величины продольных изгибающих моментов, определенные по Правилам РРР, заметно меньше продольных изгибающих моментов, полученных по Правилам РМРС. Распределение продольных изгибающих моментов по длине СВП в Правилах РРР и РМРС различно.

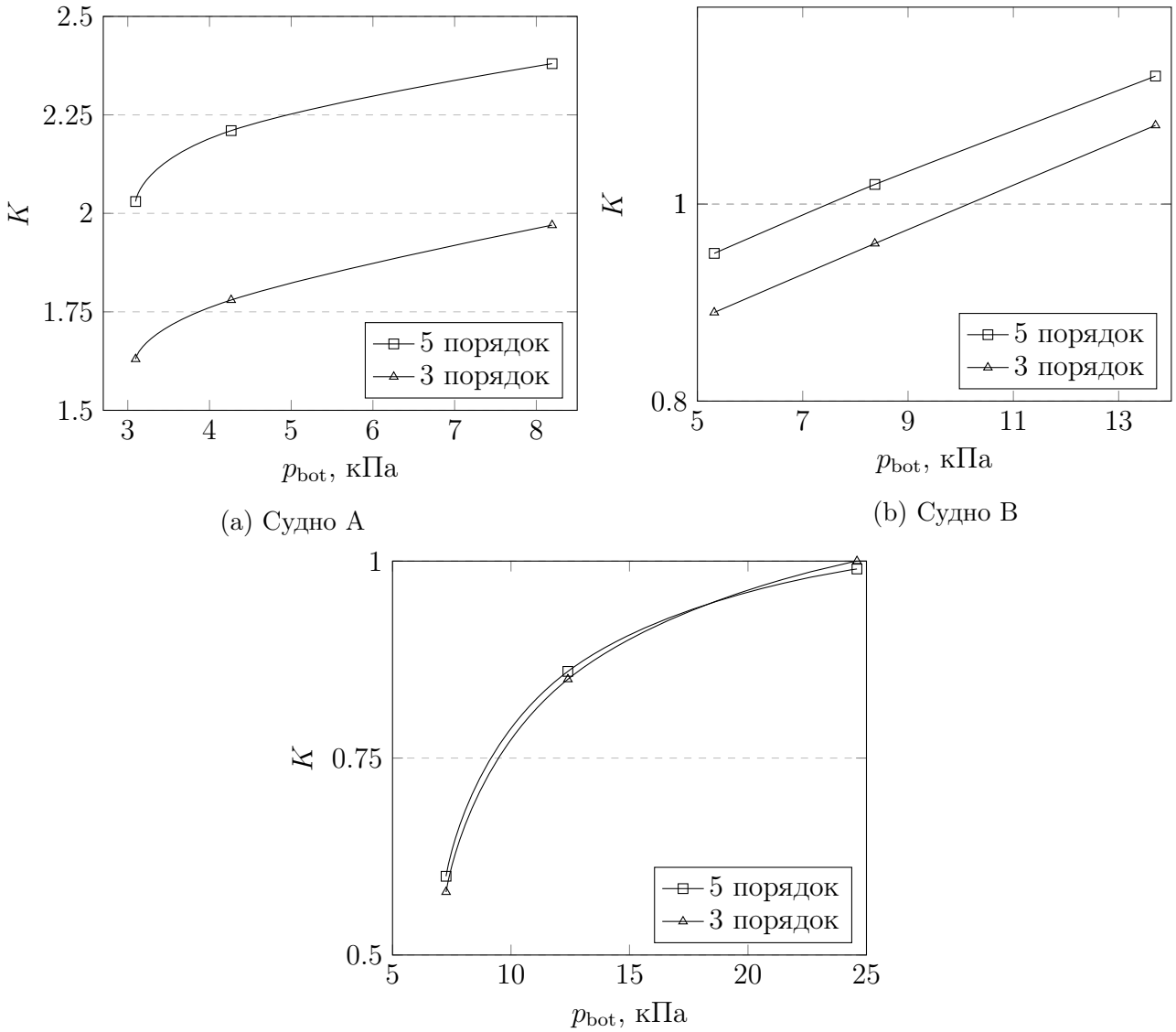
Одной из причин расхождения результатов является используемое в Правилах РРР допущение об отсутствии силового контакта понтона СВПА и моста СВПС с водой в режиме парения на ВП.

В Правилах РМРС при определении динамической составляющей изгибающего момента на волнении весьма грубо учитывается движение СВП по дифференту. В Правилах РРР это движение игнорируется. Это вторая причина расхождения результатов, полученных по Правилам РМРС и РРР.

Максимальные напряжения, возникающие в конструкции СВП, далеко не всегда находятся в соответствии с величинами ускорений в центре масс судна. С этой точки зрения,

методики определения продольных изгибающих моментов как по Правилам РРР, так и по Правилам РМРС дают низкое качество результатов. При этом результаты по Правилам РРР имеют тенденцию к ошибке в опасную сторону в части прочности конструкции СВПС, а результаты, получаемые по Правилам РМРС, ведут к необоснованному росту весовых характеристик и снижению конкурентных экономических показателей как СВПА, так и СВПС.

В главе 4 также была апробирована методика определения устойчивости подъемного комплекса СВП, теоретические основы которой изложены в главе 3. Расчеты проведены применительно к трем гипотетическим судам A, B и C с водоизмещениями 4.1, 32.8 и 110.7 тонн соответственно. Характеристики судов B и C получены масштабированием по числу Фруда с судна A. Декременты колебаний показаны на рисунке 7. Движение устойчиво тогда и только тогда, когда декремент больше единицы.



(a) Судно A

(b) Судно B

(c) Судно C

Рисунок 7 – Декременты затуханий

Из представленных рисунков видно, что более грубая модель (10) приводит к более

низким значениям декремента затухания по сравнению с уточненной моделью (9). Обе модели показывают, что с ростом давления в баллонетах декремент увеличивается.

Также на рисунке 7 продемонстрировано влияние эффекта масштаба на устойчивость подъемного комплекса СВП, которое состоит в том, что при моделировании по числу Фруда устойчивость системы падает с ростом водоизмещения. Решением вопроса может стать рост давления в скегах, которых бы опережал рост водоизмещения. Однако более предпочтительным представляется увеличение абсолютной величины наклона расходно - напорной характеристики вентилятора $\left.\frac{\partial Q_{\text{in}}}{\partial p}\right|_0$ в два и более раз или увеличение $\left.\frac{\partial M}{\partial \dot{\varphi}}\right|_0$ в 6 и более раз, а также изменение геометрии скегов (количество ярусов, их радиусы, внедрение системы интерцепторов) с целью снижения коэффициента истечения воздуха из-под зоны воздушной подушки. Именно последняя мера применена в процессе проектирования судна проекта А25ПС.

Отметим, что упомянутые выше закономерности, проиллюстрированные в диссертации на примере вымышленных судов, имеют место в действительности и наблюдались на судах проектов А8, А20, А25.

Эффект масштаба может быть проиллюстрирован также аналитически путем анализа уравнения (4).

Заключение

В диссертационной работе построены и апробированы две тесно связанные между собой математические модели: одна из них предназначена для моделирования динамики движения СВП с гибкими скегами во временной области, вторая позволяет определять характеристики устойчивости подъемного комплекса судна.

Методика моделирования динамики движения, изложенная в главе 2, основана на уравнении непрерывности массы воздуха, поступающей в зону воздушной подушки и вытекающей из нее. Силы на баллонетах определяются исходя из гипотезы независимых друг от друга плоских поперечных сечений. Насыщение математической модели выполняется с помощью самостоятельных CFD расчетов, таких, как вычисление демпфирования ВП и определение формы свободной поверхности под зоной ВП.

Данная модель была апробирована путем сравнения результатов ее применения с результатами экспериментов и конечно-элементных расчетов. С помощью методики был исследован масштабный эффект в задачах динамики судов на воздушной подушке и проанализированы внешние нагрузки, регламентируемые Правилами РРР и РМРС.

Модель устойчивости подъемного комплекса СВП основана на том же уравнении эволюции давления в зоне ВП, что и модель динамики движения, однако использует упрощенное представление баллонета как стержня, шарнирно закрепленного к корпусу. Данная модель может быть представлена в двух вариантах: укороченном, учитывающем лишь взаимодействие «ВП — гибкие скеги», а также полном, допускающем изменение вертикальной координаты судна. Из укороченной модели получено аналитическое условие устойчивости, в частном случае совпадающее с известным критерием устойчивости судна с жесткими

скегами.

Методика определения устойчивости была применена к трем гипотетическим судам. На их примере показано, что упрощенная модель дает заниженные характеристики устойчивости, т.е. работает «в запас». Проиллюстрировано влияние масштабного эффекта на устойчивость подъемного комплекса. Предложено варианты решения проблем, связанных с потерей устойчивости СВП. Продемонстрированные результаты согласуются с опытом проектирования СВП с ГО баллонетного типа, в частности, объясняют появление автоколебаний «ВП — ГО» на натурных судах при моделировании по числу Фруда с уменьшенных моделей.

Публикации по теме диссертации

Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК по специальности 01.02.06, либо индексируемых в базах Scopus и Web of Science:

1. V. Shabarov, F. Peplin, P. Kalyasov, V. Shaposhnikov. Analytical and numerical investigation of the lift system stability of the air cushion vehicle fitted with closed inflated side seals. — Applied Ocean Research — 2022. — Т. 120 — С. 103045. (**Scopus, Web of Science**)

2. Шабаров В. В., Пеплин Ф. С. Условия устои чивости несущего комплекса судна на воздушнои подушке с гибкими скегами //Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2019. – №. 2 (39). (**ВАК**)

3. Shabarov V., Kaliasov P., Peplin F. Influence of ground effect on longitudinal aerodynamic damping of wing-in-ground effect vehicles // Ship Technology Research. — 2020. — Т. 67, № 2. — С. 101—108. (**Scopus, Web of Science**)

Иные публикации:

4. Жидков А. В., Пеплин Ф. С., Шабаров В. В. Масштабный эффект в задачах динамики движения судов на воздушной подушке //Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2020. – №. 60-61. – С. 56-65. (**ВАК**)

5. Пеплин Ф. С., Чекмарев Д.Т., Охотин К.А., Шабаров В.В. Остойчивость судов на воздушной подушке с гибким ограждением баллонетного типа на эксплуатационных режимах //Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. – 2019. – №. 54-55. – С. 31-38. (**ВАК**)

6. Шабаров В. В., Чекмарев Д.Т., Туманин А.В., Пеплин Ф.С. Определение демпфирующих сил, возникающих при вертикальных колебаниях судна на воздушной подушке на крейсерском режиме движения //Научные проблемы водного транспорта. – 2018. – №. 55. (**ВАК**)

7. Пеплин Ф., Охотин К. Математическое моделирование остойчивости судов на воздушной подушке с гибким ограждением баллонетного типа // XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки). — 2018. — С. 189 – 190.

8. Peplin F., Shabarov V., Tumanin A. Determination of loads acting on the ballonet type board seal of amphibious hovercrafts // Proceedings of 14th conference on Fast Sea Transportation. — 2017. — С. 400 – 407.

9. Шабаров В.В., Пеплин Ф.С., Туманин А.В., Чекмарев Д.Т. О моделировании внешних нагрузок при движении судна на воздушной подушке баллонетного типа // Материалы XX Юбилейной Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным системам (ВМСППС'2017). — 2017. — С. 123 – 124.

10. Шабаров В.В., Чекмарев Д.Т., Пеплин Ф.С., Охотин К.А. Определение кривых статической остойчивости амфибийного судна на воздушной подушке с гибким ограждением баллонетного типа // Материалы XII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018). — 2018. — С. 520 – 521.

.

Подписано в печать 28.04.2022. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1. Заказ № 706. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии университета им. Н.И. Лобачевского
603000, г. Нижний Новгород, ул. Б. Покровская, 37