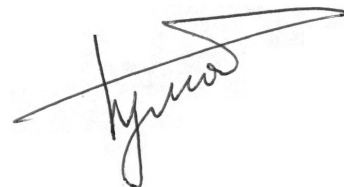


На правах рукописи

Туманин Андрей Владимирович



**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИКИ И ДИНАМИКИ
ГИБКОГО ОГРАЖДЕНИЯ БАЛЛОНЕТНОГО ТИПА
АМФИБИЙНОГО СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ**

Специальность 01.02.06 – динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Новгород - 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им.Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Любимов Александр Константинович

Научный консультант: кандидат технических наук,
доцент
Шабаров Василий Владимирович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Грамузов Евгений Михайлович

доктор физико-математических наук,
профессор
Кочетков Анатолий Васильевич

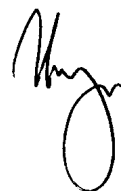
Ведущая организация: ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова»,
г. Санкт-Петербург

Защита состоится 28 июня 2012 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при Нижегородском государственном университете по адресу: 603950, ГСП 1000, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп.б.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Автореферат разослан 25 мая 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук, проф.



Игумнов Л.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Амфибийность, высокая скорость, отсутствие необходимости в специально оборудованных причалах, почти круглогодичный период эксплуатации и более высокая, по сравнению с альтернативными транспортными средствами, эффективность пассажиро- и грузоперевозок являются уникальными преимуществами амфибийных судов на воздушной подушке (АСВП) в условиях труднодоступных регионов Крайнего Севера, Сибири, Дальнего Востока, а также мелководных районов, включая шельфы Северного Ледовитого океана и Каспийского моря.

Специфика эксплуатации АСВП ставит перед проектантами, помимо обеспечения ходовых и амфибийных качеств, жесткие требования по надежности и ремонтпригодности разрабатываемых АСВП. Из опыта проектирования и эксплуатации подобных судов известно, что наиболее важной и ответственной системой АСВП является гибкое ограждение (ГО) воздушной подушки (ВП), решающее задачу формирования области повышенного давления под корпусом судна. Методы физического модельного и натурного экспериментов в части изучения детального поведения элементов ГО при действии реальных нагрузок при всех их преимуществах имеют известные недостатки: дороговизну, длительность и неполную информативность. Для обоснованного выбора оптимальной компоновки судна, повышения ресурса, а также уменьшения стоимости производства, эксплуатации и ремонта ГО необходимо разрабатывать проблемно-ориентированные математические модели ГО АСВП.

Целью работы является выбор и тестирование схем расчета статики и динамики ГО баллонетного типа АСВП, позволяющих формировать рациональную аэрогидродинамическую компоновку судна и осуществлять оценку прочности конструкции ГО.

В соответствии с изложенной целью в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Выбор и обоснование схем расчета ГО АСВП с ориентацией на методы вычислительной механики деформируемого тела и вычислительной аэрогидродинамики;
2. Проведение физических натурных, лабораторных и стендовых испытаний с последующей проверкой результатов вычислительного моделирования по результатам соответствующих физических экспериментов;
3. Исследование статики и динамики ГО баллонетного типа в аэрогидроупругой постановке в составе несущего комплекса АСВП с ориентацией на методы вычислительной механики деформируемого тела и вычислительной аэрогидродинамики;
4. Исследование нагрузок на ГО и перегрузок в центре тяжести судна при движении АСВП по модельной твердой пересеченной местности на основе методов вычислительной механики.

Научная новизна исследований состоит в постановке задач и выборе расчетных схем для организации вычислительного эксперимента по моделированию ГО баллонетного типа, базирующегося на современных пакетах вычислительной механики деформируемого тела и аэрогидродинамики, а также их связи для решения задач проектирования АСВП.

Практическая значимость заключается в использовании предложенных схем расчета в проектировании АСВП с ГО баллонетного типа для обоснованного выбора аэрогидродинамической компоновки, а также оценки прочности ГО исходя из эксплуатационных требований технического задания на конкретное проектируемое АСВП.

Достоверность результатов, полученных на основе вычислительных экспериментов, подтверждена серией стендовых, лабораторных, а так же натурных испытаний АСВП «Хивус-10» и «Хивус-48».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Постановки задач взаимодействия упругих элементов ГО с водной и воздушными средами в составе несущего комплекса АСВП, включая выбор и обоснование расчетных схем, а также алгоритмы и результаты решения этих задач;
2. Результаты по выбору, обоснованию расчетных схем и постановки задач динамики АСВП с ГО баллонетного типа на твердой поверхности, а также результаты их решения;
3. Методики и результаты стендовых, лабораторных исследований материалов и элементов ГО АСВП;
4. Сравнительные результаты математического моделирования стендовых и натурных испытаний элементов и материалов ГО баллонетного типа.

Личный вклад автора. На базе вычислительного эксперимента предложен подход по определению формы и напряженно-деформированного состояния ГО баллонетного типа АСВП с учетом его взаимодействия с ВП, набегающими воздушным и водным потоками. Представлена схема решения задач динамики АСВП с ГО баллонетного типа на недеформируемой опорной поверхности в допущении об отсутствии ВП. Разработаны методики и проведены серии стендовых, лабораторных и натурных испытаний по исследованию формы и материалов ГО АСВП баллонетного типа. Сопоставление результатов вычислительных и физических экспериментов подтверждает достоверность расчетов и позволяет использовать их в проектировании АСВП. По результатам моделирования ГО баллонетного типа дан ряд рекомендаций на изменение элементов компоновки с целью повышения как ресурсных характеристик ГО, так и ходовых качеств АСВП в целом.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены:

1. VIII молодежная школа-конференция «Лобачевские чтения-2009», г.Казань, 2009г.
2. XV Нижегородская сессия молодых ученых (тех. науки), Красный Плес, 2010г.
3. XV Нижегородская сессия молодых ученых (мат. науки), Красный Плес, 2010г.
4. XVI Нижегородская сессия молодых ученых (тех. науки), Красный Плес, 2011г.
5. Четвертая Всероссийская молодежная научно-инновационная школа «Математика и математическое моделирование», г.Саров, 2010г.
6. Пятая Всероссийская молодежная научно-инновационная школа «Математика и математическое моделирование», г.Саров, 2011г.
7. 13-ый Международный научно-промышленный форум «Великие реки/ICEF», г.Нижний Новгород, 2011г.
8. X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г.Нижний Новгород, 2011г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 11 работ, из которых 4 статьи, в том числе 3 – из перечня ВАК.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем составляет 120 стр., включая 53 рисунка, 6 таблиц, а также библиографию, содержащую 120 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы исследований, приводятся характеристики ГО современных АСВП, кратко формулируются основные проблемы проектирования ГО, а также ставятся цель и задачи настоящей работы.

В **первой главе** приводится обзор известных исследований в области

расчетов формы и прочности ГО классического типа АСВП, а также формулируются основные допущения при подобных расчетах.

В диссертационной работе рассматриваются АСВП с ГО баллонетного типа (см. рис. 1), которые сочетают в своей конструкции амфибийные качества с ходкостью, остойчивостью, устойчивостью и, следовательно, безопасностью в эксплуатации скеговых СВП. В то же время, амфибийные качества этих судов несколько ниже, чем у АСВП с ГО классического типа. Бортовая часть описываемого ГО баллонетного типа представляет собой соединенные между собой два пневмобаллона, образующих так называемый надувной «скег». Каждый пневмобаллон представляет собой надувной поплавок обтекаемой формы, состоящий из внешних прочных защитных оболочек и внутренних герметичных секционированных камер. Подошвы скегов усилены полиуретановым покрытием для уменьшения износа вследствие трения с подстилающей поверхностью.

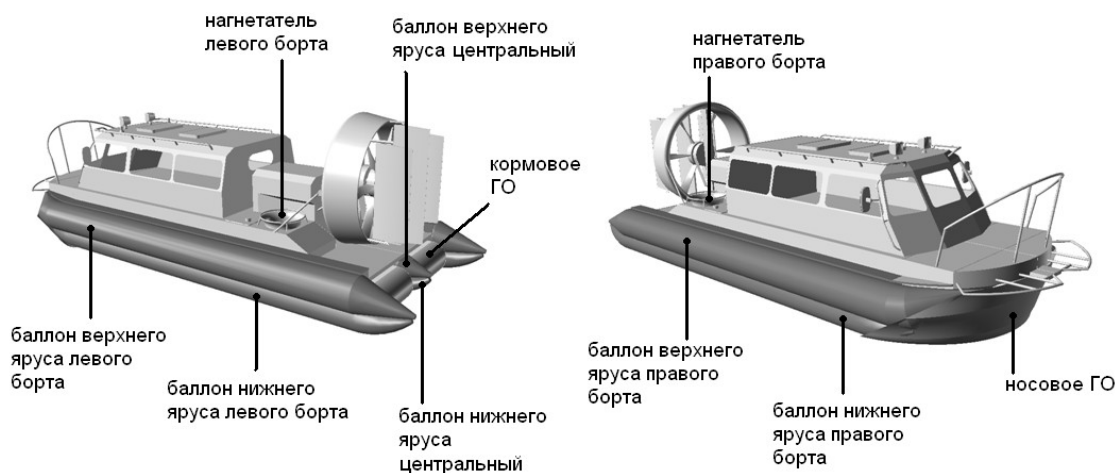


Рис. 1 Состав несущего комплекса с ГО баллонетного типа на примере компоновки АСВП «Хивус-10»

Точное прогнозирование поведения ГО только по результатам физических модельных экспериментов невозможно вследствие масштабных эффектов, связанных с отсутствием подобия по числам Коши, Эйлера, Вебера и Рейнольдса. Конструктивные решения в этих случаях вполне могут приниматься по результатам вычислительных экспериментов при условии, что методики и

результаты вычислительных экспериментов предварительно проверены результатами физических экспериментов. При этом условия физических и вычислительных экспериментов должны быть максимально близки. Фактически, сочетание физического модельного эксперимента, в котором присутствуют масштабные факторы, и вычислительного эксперимента, в котором возможна реализация любых чисел подобия, дает принципиальную возможность моделировать поведение ГО в натуральных условиях в вычислительном эксперименте.

Во **второй главе** представлены теоретические основы расчета ГО баллонетного типа, базирующиеся на трехмерной геометрически нелинейной модели оболочки и модели турбулентного течения двухфазной жидкости.

Деформирование оболочки описывается на основе поведения ее срединной поверхности по теории С.П. Тимошенко, учитывающей деформацию поперечного сдвига. Изложены особенности явного и неявного подходов к интегрированию уравнений статики и динамики оболочечных конструкций. Рассмотрены основные аспекты численной реализации на основе метода конечных элементов в современных комплексах вычислительной механики твердого тела ANSYS Mechanical и ANSYS AUTODYN. Математическая модель течения двухфазной жидкости представлена осредненными уравнениями Навье-Стокса, которые замыкаются моделью турбулентности Ментера. Численная реализация расчетов аэрогидродинамики жидкости рассмотрена на примере комплекса ANSYS CFX.

В диссертационной работе рассматривается метод решения задач взаимодействия «жидкость – твердое тело», основанный на основе связи программ вычислительной механики твердого тела ANSYS Mechanical и вычислительной аэрогидродинамики ANSYS CFX CFD. На каждом временном шаге, итерационный цикл связанной задачи до удовлетворения условий сходимости последовательно выполняет решение системы уравнений движения жидкости, осуществляет интерполяцию нагрузок на расчетную сетку части задачи, отвечающей за

динамику (статика) деформируемого твердого тела, производит решение системы уравнений движения (или равновесия) твердого тела, проводит интерполяцию перемещений на расчетную сетку гидродинамической части задачи и перестраивает сетку расчетной области гидродинамической части задачи (рис. 2).

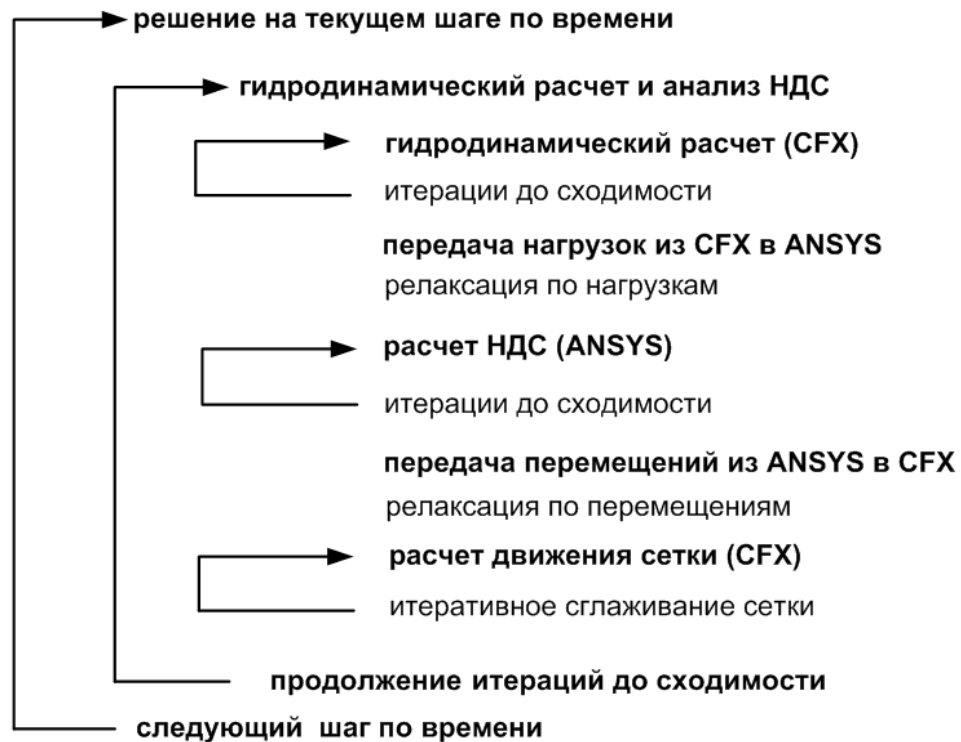


Рис. 2 Схема решения задачи аэроупругости в ANSYS Mechanical и ANSYS CFX

Предложенный алгоритм решения задач аэроупругости с использованием пакетов ANSYS Mechanical и ANSYS CFX протестирован на задаче обтекания потоком воздуха пластинки, подвешенной на пружинах. В зависимости от массы пластинки и жесткостей пружин получены колебания аэроупругой системы различного характера. Произведено сравнение результатов численного исследования в пакетах прочности и гидрогазодинамики с результатами аналитического решения, применимого для малых углов атаки. Сопоставление аналитических и вычислительных результатов свидетельствует о возможности применения вычислительных пакетов для решения задач аэроупругости со значительными перемещениями элементов конструкции от

действия аэрогидродинамических сил, резко зависящих, в свою очередь, от геометрии деформируемой конструкции.

В работе выделены и рассмотрены постановки трех проблемных задач ГО баллонетного типа:

1) Аэрогидроупругое взаимодействие бортового ГО баллонетного типа в составе несущего комплекса АСВП с потоком жидкости

Упругая конструкция ГО АСВП находится в поле действия аэродинамических нагрузок от ВП и набегающего потока, а также гидродинамических нагрузок от движения АСВП по водной поверхности. Надувные скеги, являющиеся бортовой частью ГО находятся под действием внутреннего давления, начальная величина которого задана. Масса воздуха, закачанного в ярусы скега, считается постоянной. Также считается заданной посадка судна, определяемая углом дифферента и погружением кормового ограждения относительно статического (невозмущенного) уровня воды.

Математическая постановка задачи состоит в совместном решении систем уравнений движения упругой конструкции ГО и уравнений движения жидкости. Уравнения движения жидкости замыкаются SST моделью турбулентности Ментера. Пересчет величины внутреннего давления в нижнем и верхнем ярусах скега в деформированной конфигурации проводится по политропному закону.

Расчетная область задачи обтекания модели АСВП (рис. 3) представляет собой объем пространства в виде параллелепипеда $ABCDEFGH$, внутри которого находится модель АСВП. Гибкими считаются только бортовые элементы ГО – пневмобаллоны верхнего 8 и нижнего 7 ярусов. В зону ВП, ограниченную областью с вершинами $KLMNPRST$, подается воздух через шахту нагнетателя 9. При этом массовый расход воздуха зависит от среднего давления в воздушной подушке, который в свою очередь зависит от истечения воздуха через зазор между поверхностью воды и нижним ярусом деформируемого ГО 7. На границах LR и IJ верхнего яруса ГО 8 в упругой части задачи ставится условие закрепления.

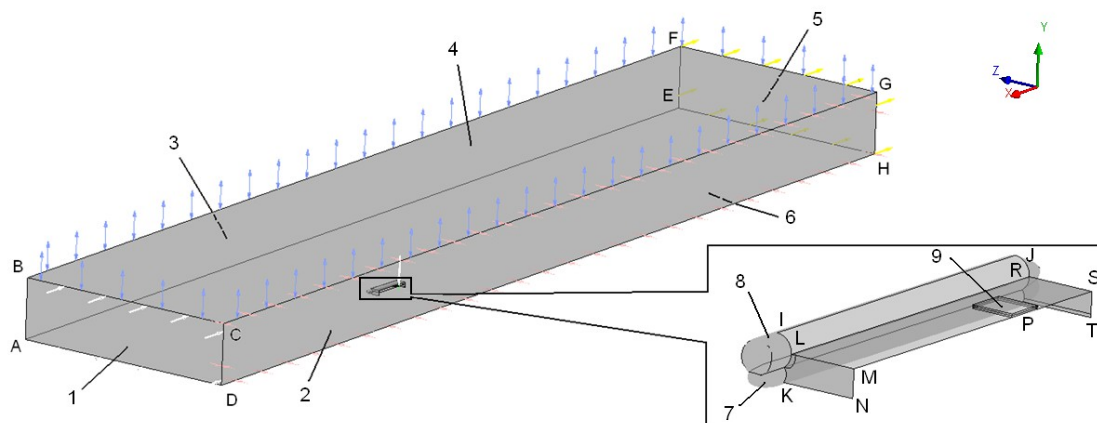


Рис. 3 Расчетная область аэрогидродинамической части задачи взаимодействия бортового ГО с потоком жидкости

На входной и выходной границах 1 и 2 , а также на боковой границе 3 , задаются компоненты скорости обращенного потока (скорость обращенного потока численно равна скорости АСВП на исследуемом режиме движения); на верхней границе расчетной области 4 – нулевая величина избыточного давления; на нижней границе 6 – скорость невозмущенного потока либо условие прилипания и непротекания при моделировании аэрогидродинамики АСВП в водоеме конечной глубины. При исследовании продольных аэрогидродинамических характеристик АСВП на грани 2 используются условия симметрии.

2) Аэроупругое взаимодействие носового ГО с набегающим потоком воздуха

Упругая конструкция носового ГО АСВП находится в поле действия аэродинамических нагрузок от ВП и набегающего потока. Рис. 4 иллюстрирует расчетную область рассматриваемой задачи обтекания модели АСВП, которая представляет собой объем пространства в виде параллелепипеда $ABCDEFGH$, внутри которого находится модель АСВП. Гибким считается только носовой элемент ГО 7 . В области ВП с вершинами $KLMNST$ задается внутреннее давление. На границах NK и NM деформируемого носового ГО 7 в упругой части задачи ставится условие закрепления.

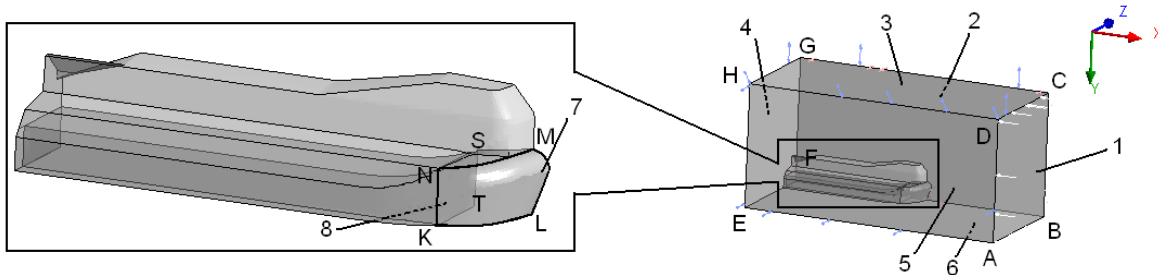


Рис. 4 Расчетная область задачи аэроупругости носового ГО

На входной границе 1 (рис. 4) задается скорость обращенного потока, численно равная скорости АСВП на исследуемом режиме движения, на верхней границе расчетной области 3 – нулевая величина избыточного давления, на нижней границе 6 – скорость невозмущенного потока, на выходной границе 4 – величина нормальной скорости, численно равной скорости невозмущенного потока. На боковых границах 2 и 5 расчетной области задаются компоненты скорости, равные по величине компонентам скорости невозмущенного потока.

В вычислительных экспериментах рационально рассматривать только $\frac{1}{2}$ модели АСВП, отсекаемой диаметральной плоскостью. При этом на диаметральной плоскости 2 (грань $BCGF$) выставляются граничные условия симметрии.

3) Взаимодействие ГО баллонетного типа с твердой поверхностью

В рамках физической постановки задачи рассматривается корпус АСВП с ГО баллонетного типа (см. рис. 5). Масса воздуха, закачанного в ярусы скега, считается постоянной. Давление в надувных скегах при их деформации изменяется по политропному закону. Положение центра масс ($x_{ц.м.}, y_{ц.м.}, z_{ц.м.}$), значение массы (M), а также инерционные свойства судна (I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}) в полном грузу и порожнем считаются известными. Влиянием ВП пренебрегается, т.к. рассматриваются предельные значения нагрузок. На границах AA', BB', CC', DD', EE' и FF' ставятся условия закрепления. Элементы корпуса судна и опорная поверхность считаются абсолютно жесткими.

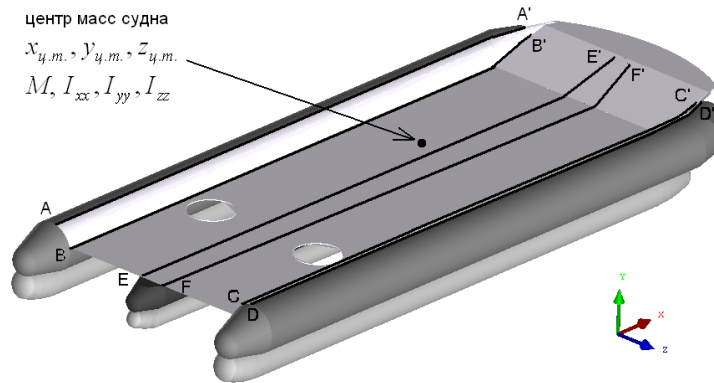


Рис. 5 Модель АСВП в постановке задачи движения по твердой поверхности

Опорная поверхность рассматривается в виде уступа с перепадом высот h , а также в виде плоскости с препятствием в виде полуцилиндра радиуса R . Между элементами ГО и опорной поверхностью ставятся контактные условия взаимодействия.

В третьей главе представлены результаты лабораторных, стендовых и натурных экспериментов, выполненных с целью обеспечения необходимыми данными и тестирования последующих вычислительных исследований.

Рассматриваемый материал ГО Vinyplan 6580 является композиционным материалом с укладкой нитей основы и утка под углом 90^0 . Для использования в расчетах ортотропной модели материала в случае тонкой оболочки необходимо определить шесть независимых параметров: два модуля упругости I рода, один из коэффициентов Пуассона, модуль сдвига в плоскости оболочки и два продольно-поперечных модуля сдвига. Определение указанных параметров проводилось на основе испытаний образцов материала на растяжение (см. рис. 6) и трехточечный изгиб. Лабораторные эксперименты с целью определения прочностных свойств материала ГО на разрыв проводились как в случае материала с нулевой наработкой, так и для материала после длительного периода эксплуатации. Установлено, что прочностные характеристики на разрыв испытанных образцов материала ГО, бывшего в эксплуатации 500-600 часов, снижаются до 25% по основе и до 60% по утку.

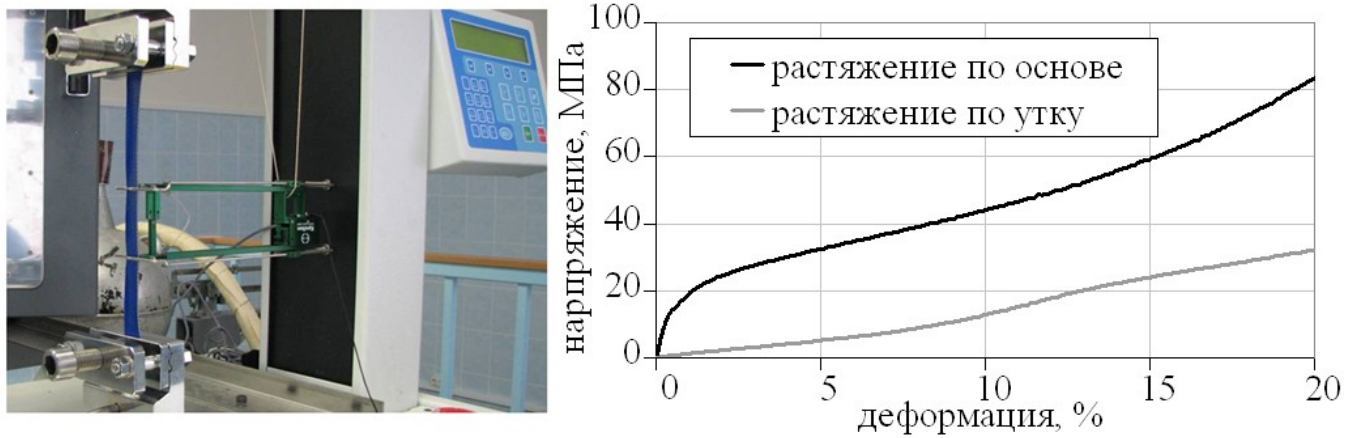
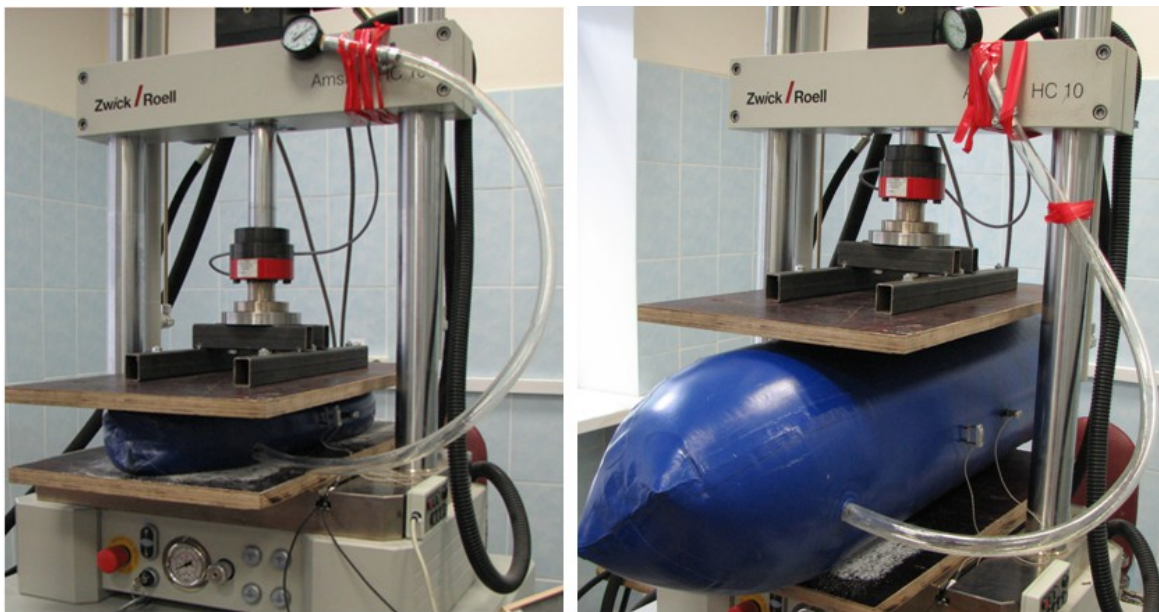


Рис. 6 Испытания на растяжение и диаграмма деформирования образцов материала ГО

Проведена серия стендовых испытаний по сжатию пневматических баллонов, результаты которой использовались для проверки схемы решения задач контактного взаимодействия пневматических элементов ГО с опорной поверхностью. На рис. 7 проиллюстрированы фрагменты испытаний над двумя масштабными образцами пневмобаллонов. В процессе испытаний варьировалась величина начальной закачки баллонов, фиксировались изменение давления внутри баллона и величина сжимающей силы от времени



Образец №1

Образец №2

Рис. 7 Стенд по обжатию пневматического баллона

Максимальное рассогласование результатов экспериментов и соответствующих расчетов, выполненных в программе ANSYS AUTODYN, по давлению внутри баллона и силе на опоре не превышает 10%. По анализу характера складкообразования можно судить о схватывании эффектов на переходе цилиндрической части в коническую. Результаты сопоставления данных экспериментальных и соответствующих численных исследований свидетельствуют об адекватности математической модели пневматического баллона в части напряженно-деформированного состояния и внешних нагрузок.

Подготовлен и проведен натурный эксперимент с целью отработки и тестирования математической модели несущего комплекса ГО АСВП. В ходе испытаний определение формы деформированной поверхности надувного скега на натурном судне проводилось путем замера координат характерных точек на поверхности нижнего яруса. Эксперименты проводились с работающими нагнетателями на режиме висения судна над твердым экраном. Сопоставление результатов вычислительных и физических экспериментов показывает, что использованная расчетная схема в целом адекватно прогнозирует форму ГО баллонетного типа и может быть использована для определения формы ГО АСВП баллонетного типа на начальных стадиях проектирования.

В **четвертой главе** представлены результаты моделирования задач статики и динамики ГО баллонетного типа на примере компоновок серийных АСВП «Хивус-10» и «Хивус-48», имеющих полное водоизмещение 2.2 тонны и 16 тонн соответственно.

1) Моделирование несущего комплекса АСВП при учете упругости бортового ГО

Результаты расчетов включают в себя изменение во времени распределений давлений в воздушной подушке АСВП, распределений внутренних усилий и перемещений конструкции скега, а также параметры аэрогидродинамического сопротивления судна. На рис. 8 представлены форма свободной поверхности раздела сред и перемещения скега при движении АСВП по водной поверхности.

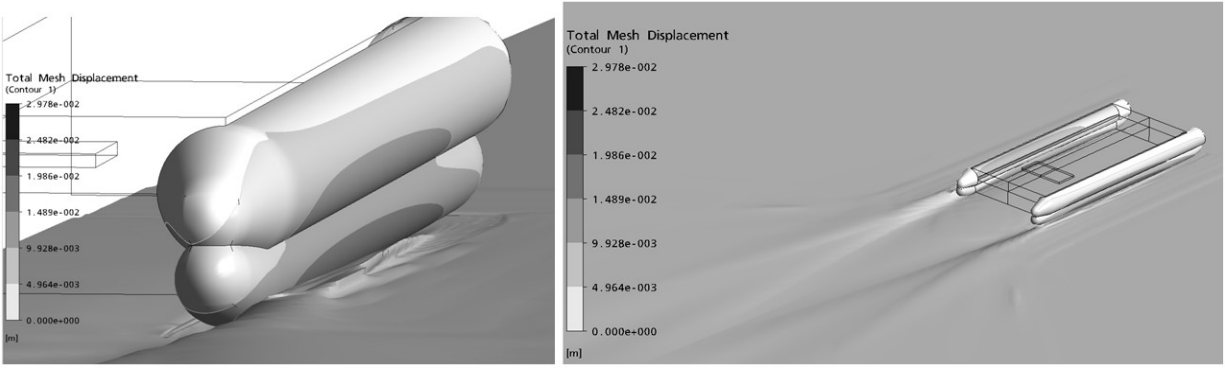


Рис. 8 Поле перемещений баллонета и форма свободной поверхности при движении АСВП на крейсерском режиме

В целом, по результатам вычислительных экспериментов моделирования взаимодействия упругих элементов ГО АСВП с водовоздушным потоком в составе компоновки несущего комплекса можно сделать следующие выводы:

1. При отсутствии ветро-волновых возмущений ГО баллонетного типа на АСВП «Хивус-10», «Хивус-48» находятся в автоколебательном режиме. Амплитуда и частота колебаний зависят, в том числе, от величины массы воздуха, закачанного в баллонет (рис. 9);

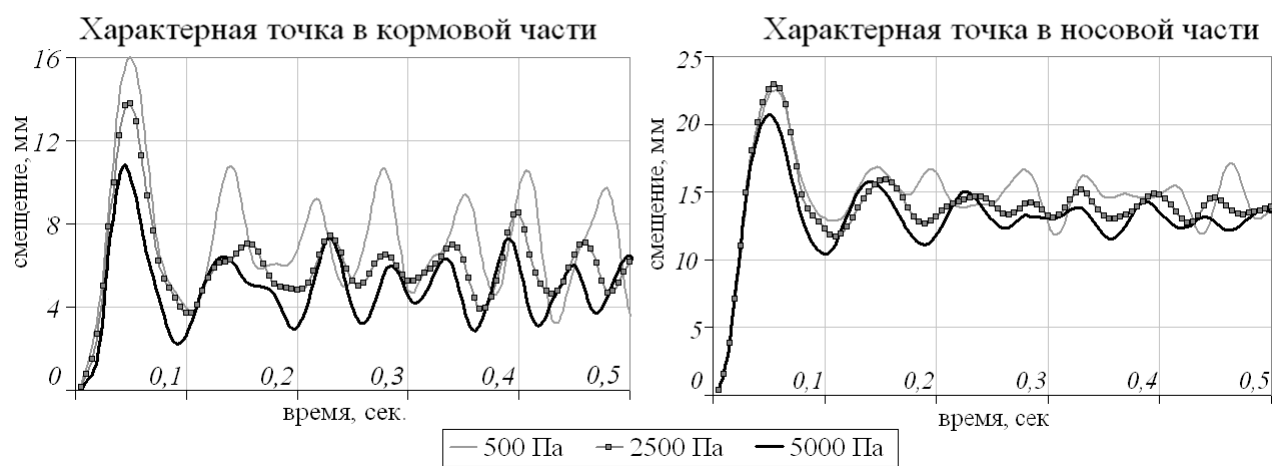


Рис. 9 Зависимости относительных смещений характерных точек ГО от времени и начальной закачки баллонета при движении АСВП на скорости 60км/ч по водной поверхности

2. При увеличении ширины зоны крепления скега к корпусу судна и отсутствии ветроволновых возмущений наблюдается тенденция к затуханию колебаний скега, в пределе реализуется решение, получаемое при мгновенно отвердевшем ГО;

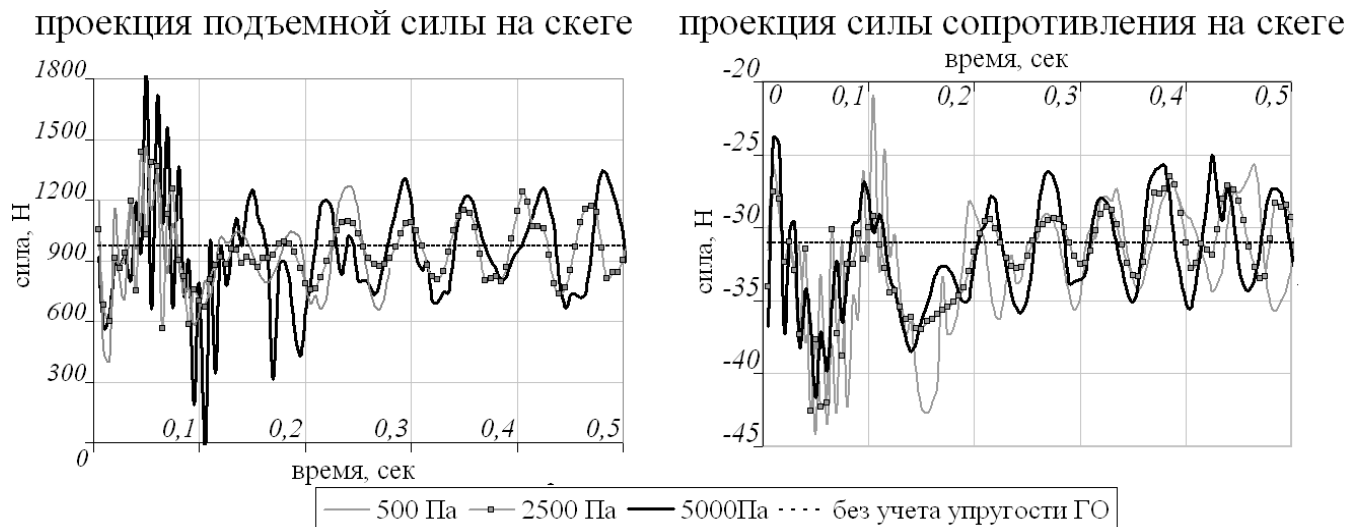


Рис. 10 Зависимости подъемной силы и силы сопротивления движению на нижнем ярусе ГО от времени и различной начальной закачке баллонетов при движении АСВП со скоростью 60 км/ч по водной поверхности

3. Увеличение глубины погружения баллонета ведет к уменьшению амплитуды колебаний ГО;

4. Для исследованных компоновок АСВП «Хивус-10» отмечается, что при превышении относительной по радиусу баллонета ($R_{ВЯ}$) ширины крепления баллонета к корпусу судна ($l_{кр}$) некой величины $l_{кр} = l_{кр} / R_{ВЯ}$ средние значения подъемной силы и силы сопротивления движению не зависят от упругости ГО и амплитуд колебаний скегов (рис. 10). В проектных проработках при выполнении указанного условия и применении используемых на АСВП типах нагнетателей, а также относительных размеров ВП и относительных скоростных характеристиках АСВП, аэрогидродинамические характеристики вполне могут определяться исходя из формы, принимаемой баллонетами только под действием внутренних давлений закачанного в них воздуха.

2) Моделирование носового ГО АСВП в аэроупругой постановке

Результаты решения задачи об обтекании корпуса АСВП «Хивус-48» потоком воздуха без учета упругости выступают в качестве начальных условий для аэроупругой задачи.

Согласно рис. 11, в зависимости от давлений в области ВП образуется «вдавленная» область по центру нижней части носового ГО в месте действия максимальных давлений от набегающего потока воздуха. Причем интегральная величина этого давления возрастает вследствие формирования неблагоприятной с точки зрения обтекания геометрией носового ГО. С падением давления в ВП увеличивается максимальная величина прогиба. Как и в случае бортового ГО, носовая часть функционирует в колебательном режиме. Частота и амплитуда колебаний зависят от соотношения давления в ВП и скорости набегающего потока. Представленные в работе расчеты проводились до соотношения динамического давления набегающего потока воздуха к статическому давлению в ВП, равного 1. До величины 0.8 поведение ГО устойчиво.

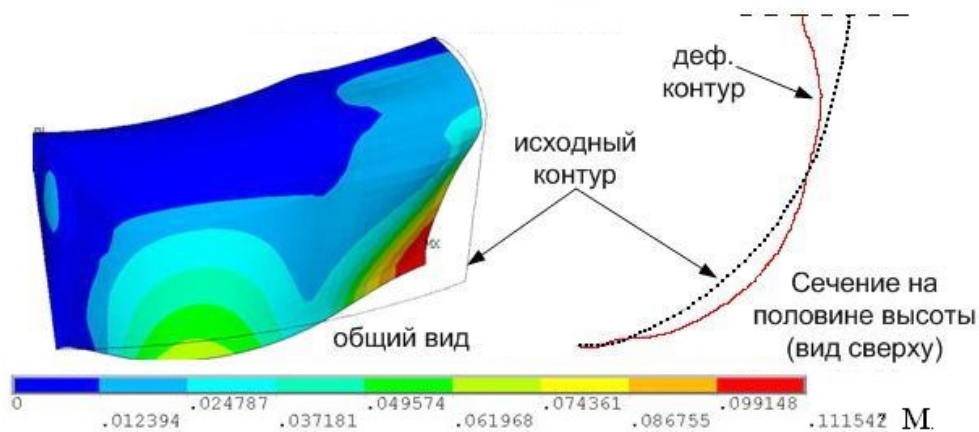


Рис. 11 Форма носового ГО АСВП «Хивус-48» при давлении в ВП 500Па и скорости обтекания 60км/ч

3) Моделирование предельных нагрузок на корпус и ГО АСВП при движении по твердой поверхности

Вычислительные эксперименты проведены для различных водоизмещений АСВП на двух характерных типах препятствий – «уступ» и «бревно», первое из которых характеризуется высотой уступа, а второе описывается радиусом полуцилиндра. Коэффициент трения между ГО и опорной поверхностью принят равным 0.5.

На основании проведенных исследований можно резюмировать следующее:

1. Перегрузка в центре тяжести АСВП с ростом водоизмещения падает при одинаковых значениях безразмерной высоты преодолеваемого препятствия; напряжения в конструкции ГО с ростом водоизмещения увеличиваются. На рис. 12 и рис. 13 представлены результаты вычислительных экспериментов в виде зависимостей перегрузок в центре тяжести судна и максимальных эквивалентных напряжений в ГО от водоизмещения и безразмерной высоты препятствия. Полученные результаты аппроксимированы как функции водоизмещения и безразмерной высоты препятствия и используются для оценки перегрузок и нагрузок на ГО, возникающих при движении АСВП по недеформированной пересеченной поверхности;

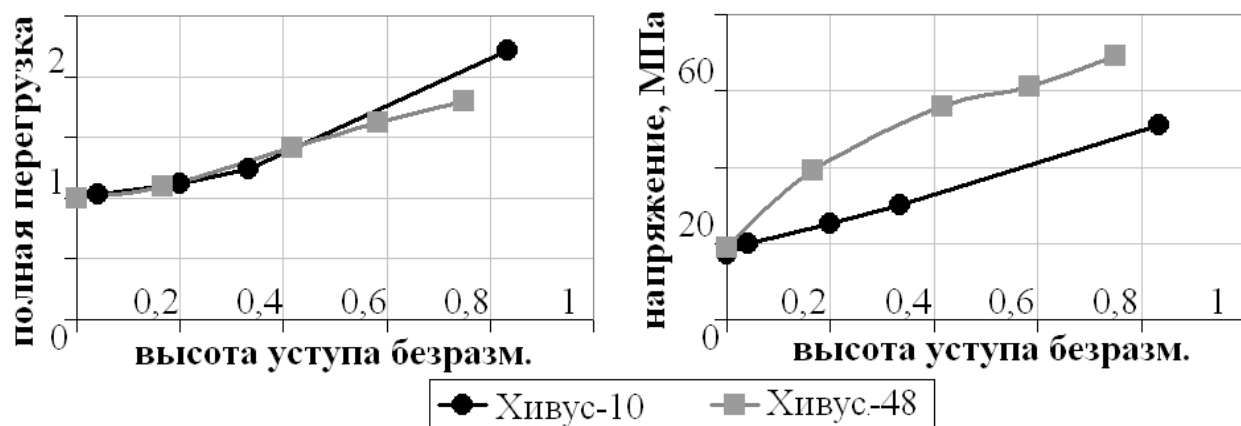


Рис. 12 Полная перегрузка в центре тяжести судна и максимальные напряжения в ГО от безразмерной высоты уступа

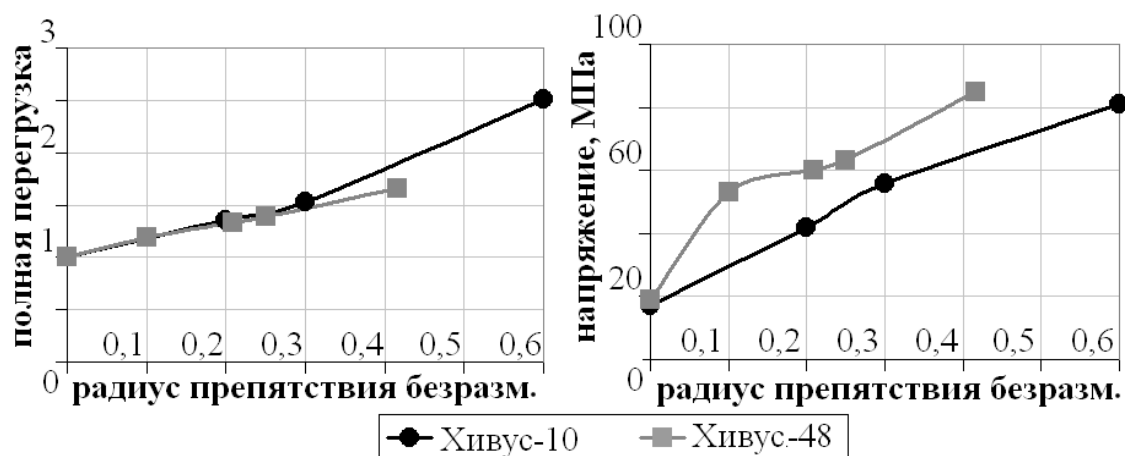


Рис. 13 Полная перегрузка в центре тяжести судна и максимальные напряжения в ГО от безразмерного радиуса

2. Расчетные напряжения при преодолении препятствий достигают максимальных значений в носовой и кормовой областях нижнего яруса скега ГО в местах перехода цилиндрической части баллона в коническую. Согласно имеющемуся опыту эксплуатации подобных судов именно в этих зонах обычно происходит разрушение материала ГО;

3. По полученным результатам представляется возможным осуществить связь между прочностными характеристиками материала, используемого в конструкции ГО и полным водоизмещением судна (рис. 14). Эта связь позволяет указать верхнюю оценку водоизмещения для данного материала или же выработать требования к материалу ГО при проектировании АСВП заданного водоизмещения;

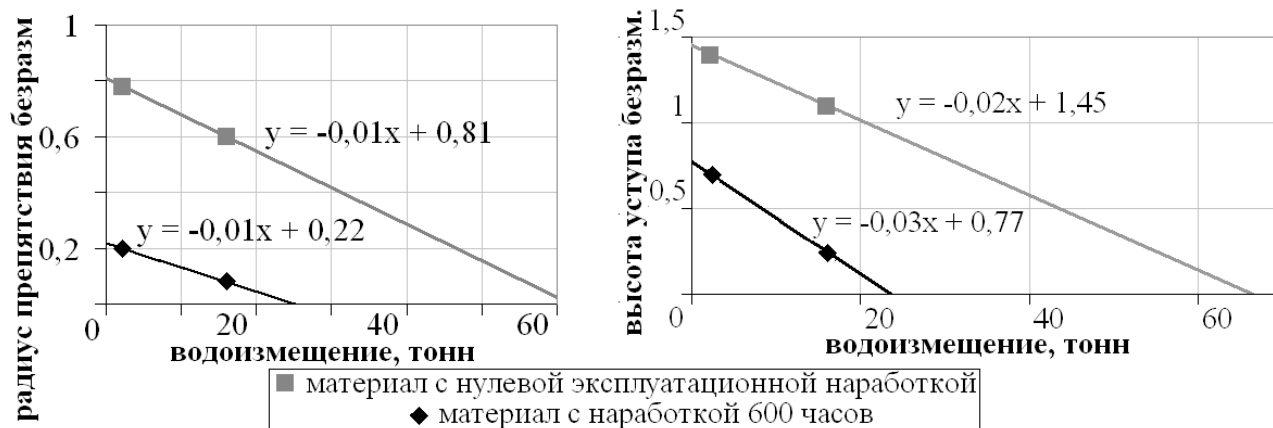


Рис. 14 Зависимость предельного безразмерного радиуса препятствия (слева) и предельной безразмерной высоты уступа (справа) от водоизмещения АСВП и изношенности материала ГО

4. Для АСВП с ГО баллонетного типа появилась возможность обоснованной оценки предельной высоты преодолеваемых препятствий исходя, как из нормируемых Российским Речным Регистром перегрузок, так и прочности ГО. При этом ограничения на высоту препятствий различны для материала ГО с нулевой наработкой и материала ГО, бывшего в эксплуатации (см. рис. 14).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении сформулированы основные результаты исследований, представленных в диссертации:

1. Предложен и протестирован подход по решению задач аэрогидроупругости АСВП с ГО баллонетного типа на основе применения связи программных комплексов ANSYS Mechanical и ANSYS CFX. Решена задача моделирования аэрогидроупругого взаимодействия бортового ГО баллонетного типа, применяемого на АСВП типа «Хивус», с ВП, водным и воздушным потоками, в том числе при прямом моделировании работы нагнетателей. Получены результаты для случая движения АСВП по водной поверхности в отсутствии ветро-волновых возмущений в виде аэрогидродинамических нагрузок, действующих на баллонет, изменения геометрической формы баллонета. Расчеты показывают, что даже при отсутствии ветро-волновых возмущений ГО баллонетного типа, применяемые в настоящее время на АСВП, функционируют в автоколебательном режиме. Амплитуда и частота колебаний зависят, в том числе, от величины массы воздуха, закачанного в баллонет – начального статического избыточного давления в баллонете. Для компоновки несущего комплекса АСВП «Хивус-10» сделан вывод о допустимости предположения об абсолютной жесткости ГО в аэрогидродинамических расчетах. Получены результаты аэрогидроупругого взаимодействия носового ГО с потоком воздуха. Как и в случае бортового ГО, частота и амплитуда колебаний зависят от давления в ВП и скорости набегающего потока;

2. По результатам лабораторных испытаний материала ГО получены характеристики ортотропной модели материала. В ходе экспериментальных работ по оценке прочности на разрыв композиционных материалов, используемых в конструкции ГО, установлены количественные зависимости снижения прочностных свойств материалов ГО с течением времени. Результаты стендовых и натурных экспериментов систематизированы и использованы при проверке расчетных схем. Получено качественное и количественное совпадение результатов вычислительных экспериментов с результатами соответствующих физических экспериментов;

3. На основе вычислительного эксперимента с использованием программного комплекса ANSYS AUTODYN рассмотрен и протестирован подход к решению задач контактного взаимодействия пневматической конструкции с твердой поверхностью. Поставлена и решена задача по вычислительному моделированию движения АСВП по пересеченной местности с учетом массово-инерционных характеристик судна в конечноэлементной программе ANSYS AUTODYN. Получены зависимости перегрузок и напряжений в ГО от высоты преодолеваемых препятствий. На основе полученных данных предложен вариант оценки нагрузок на корпус судна и прочности ГО АСВП при движении по пересеченной местности. Представленные результаты позволяют приступить к обоснованному формированию требований к материалам ГО, предельным преодолеваемым высотам в зависимости от водоизмещения.

Публикации по теме диссертации

Статьи, входящие в перечень изданий, утвержденных ВАК

1. Туманин, А.В. Математическое моделирование несущего комплекса судов на воздушной подушке (СВП) / П.С. Кальясов., А.В. Туманин, В.В. Шабаров, А.К. Якимов // Морской вестник : сб.ст. – СПб. : Мор.Вест., 2011. – №. 1. - С.104–107.
2. Туманин, А.В. Расчетно-экспериментальное исследование формы бокового гибкого ограждения судна на воздушной подушке (СВП) / А.В. Туманин, П.С. Кальясов, А.К. Якимов, Н.В. Леонтьев // Морской вестник : сб. ст. – СПб. : Мор Вест., 2011. - №4. - С.103-107.
3. Туманин, А.В. Численное исследование гибких ограждений амфибийных судов на воздушной подушке с учетом аэрогидроупругих эффектов / А.В. Туманин, П.С. Кальясов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского : сб. ст. - Н.Новгород : Из-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011.- №4, ч.2. - С. 337–338.

**Статьи в журналах и сборниках,
труды и тезисы докладов научных конференций**

4. Туманин, А.В. Тестирование методики решения задач аэрогидроупругости в ANSYS на задаче обтекания пластинки, поддерживаемой системой пружин / А.В. Туманин, П.С. Кальясов - ННГУ им. Н.И. Лобачевского. - М, 2009. - 18 С. - Деп. в ВИНТИ, №676-В2009.
5. Туманин, А.В. Методика решения задач аэрогидроупругости в ANSYS на примере обтекания пластинки, удерживаемой в потоке системой пружин / А.В. Туманин // Труды математического центра Н.И. Лобачевского : тез. докл. всерос. конф. «Лобачевские чтения - 2009», Казань, 1 - 5 нояб. 2009г., - Казань, 2009. - Т.39. - С.256-257.
6. Туманин, А.В. К определению формы бокового гибкого ограждения судна на воздушной подушке (СВП) / А.В. Туманин // тез. докл. конф. «15 Нижегород. сессия молод. уч. (техн. науки)», Красный Плес , 15 - 19 фев. 2010г., - Н. Новгород, 2010. - С. 122-123.
7. Туманин, А.В. О расчете пневматических конструкций методами Розенброка, / А.В.Туманин // тез. докл. конф. «15 Нижегород. сессия молод. уч. (мат. науки)», Красный Плес , 25 - 28 мая 2010г., - Н. Новгород, 2010. - С. 144-145.
8. Туманин, А.В. Моделирование элементов гибкого ограждения судна на воздушной подушке (СВП) с использованием комплекса ANSYS // тез. докл. 4 всеросс. молод. науч.-иннов. шк. «Математика и математическое моделирование», Саров, 19 - 22 апреля 2010г. - Саров, 2010. - С. 43–44.
9. Туманин, А.В. Исследование аэрогидроупругости гибких ограждений амфибийного судна на воздушной подушке / А.В Туманин, П.С. Кальясов // тез. докл. конф. «16 Нижегород. сессия молод. уч. (тех. науки)», Красный Плес , 14 - 17 фев. 2011г., - Н.Новгород, 2011. - С. 110-111.
10. Туманин, А.В. Моделирование аэрогидроупругих эффектов элементов

оболочечных конструкций / А.В Туманин, П.С. Кальясов // тез. докл. 5 всеросс. молод. науч.-иннов. шк. «Математика и математическое моделирование», Саров, 11 - 14 апреля 2010г. - Саров, 2011. - С. 58-59.

11. Туманин, А.В. Математическое моделирование формы и НДС гибких ограждений (ГО) баллонетного типа для амфибийных судов на воздушной подушке (СВП) // тез. докл. 3-го междунар. науч.-пром. форума «Великие реки/ICEF», Н.Новгород, 15 - 18 мая 2011г. - Н.Новгород. 2011. - С. 430-431.