

## ОТЗЫВ

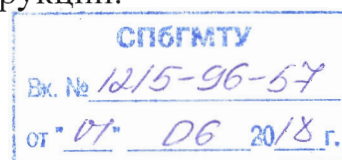
официального оппонента Сухорукова Андрея Львовича на диссертационную работу Пономарева Дмитрия Александровича «Метод численного расчета динамического взаимодействия деформируемых судовых конструкций с водо-воздушной средой», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.08.01 – «Теория корабля и строительная механика».

**Актуальность работы.** Определение напряженно-деформированного состояния корпуса судна при динамических воздействиях в условиях волнения является одной из важнейших задач, решаемых в процессе проектирования. В ходе исторического развития сформировалось несколько подходов к решению данной проблемы, различающихся принятыми допущениями соответствующих математических моделей.

Так при исследовании динамики судна на волнении корпус, как правило, схематизируется абсолютно твердым телом. В ходе решения этой задачи могут быть определены волновые воздействия и параметры движения судна. Затем эти результаты могут быть использованы как исходные данные для определения напряженно-деформированного состояния корпуса. Сам корпус при этом может рассматриваться как неоднородная балка, нагруженная квазистатическими или динамическими нагрузками. Особенность этого подхода связана с первоначальным определением волновых нагрузок и последующим определением напряженно-деформированного состояния конструкции на основе этих данных.

Вместе с тем, сегодня в связи с резким ростом производительности вычислительной техники, появилась возможность решения подобных задач в сопряженной постановке с учетом обратного влияния корпуса объекта и его деформаций на движение водной среды. Кроме того, современные математические модели позволяют рассматривать сложные трехмерные формы корпусов плавучих объектов с возможным учетом структуры и свойств материала конструкции. Именно такой сопряженный подход, основанный на комплексном рассмотрении различных физических процессов в рамках единой математической модели, развивается в диссертационной работе Д.А. Пономарева. Одно из существенных преимуществ данного подхода заключается в повышении степени достоверности и обоснованности результатов определения напряженно-деформированного состояния корпуса судна при сложных, существенно нестационарных режимах волнового нагружения (слеминг).

В этой связи в своей работе Д.А. Пономарев поставил важную и актуальную проблему – разработать метод реализации численных процедур, позволяющих совместно решать основные задачи строительной механики: совместного определения внешних нагрузок, анализа напряженно-деформированного состояния конструкций корпуса и выявления возможных форм наступления предельного состояния конструкций.



Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы их 115 наименований, общий объем диссертации составляет 166 листов.

**Во введении** автор обосновывает актуальность работы, формулирует цель диссертации, а также определяет список задач, которые необходимо решить для достижения поставленной цели. Представлены также научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

**В первой главе** диссертантом проведен обзор работ, которые посвящены проблемам ударных воздействий на конструкции корпусов судов, а также рассмотрены различные виды слеминга. Помимо работ классического подхода, автор выделил направление исследований, основанное на возможностях вычислительной механики. Еще одна часть обзора посвящена исследованиям отечественных и зарубежных авторов в данной области.

**Во второй главе** диссертантом выполнен анализ имеющихся решений задачи взаимодействия конструкции с водо-воздушной средой. Основное внимание уделено теориям Т. Кармана и Г. Вагнера. Кроме того, приведен ряд результатов, полученных на основе математических моделей, развивающих теорию Г. Вагнера. На основе анализа представленных результатов Д.А. Пономаревым сделан обоснованный вывод о необходимости учета реальной геометрии конструкции и переменной скорости погружения для корректного определения гидродинамических нагрузок в задачах ударного взаимодействия конструкций с водо-воздушной средой.

**В третьей главе** автором сформулирована общая задача динамики водо-воздушной среды и деформируемой разрушаемой конструкции. Система дифференциальных уравнений механики сплошной среды построена на основе фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии. При этом в рамках единой математической модели система уравнений разделена на два блока: блок уравнений, описывающий поведение водной и воздушной сред, и блок уравнений, описывающий движение деформируемой конструкции. Автором показано, что для численного решения данной задачи в сопряженной постановке необходимо использование совместного Эйлера-Лагранжева подхода при интегрировании данной системы уравнений механики сплошной среды.

**В четвертой главе** диссертантом описан эффективный численный алгоритм решения сопряженной задачи гидроупругости, который предполагает максимальное использование апробированного опыта применения существующих численных методов, с использованием специализированной расчетной сетки для дискретизации области решения. Автором отмечены преимущества этого подхода для решения данного класса задач.

**Пятая глава** диссертационной работы посвящена верификации, предложенных автором численных процедур. Эта верификация осуществлена на примере погружения в жидкость недеформируемой трехгранной призмы с заданным углом килеватости. Диссертантом сопоставлены полученные результаты численного моделирования с экспериментальными данными и аналитическими решениями других авторов. При этом Д.А. Пономаревым показано, что только при учете движения жидкости вблизи погружаемого тела возможно корректное, согласующееся с экспериментальными данными, определение гидродинамических давлений на корпус конструкции. По результатам верификации автором сделан вывод о возможности применения разработанного численного алгоритма к решению полномасштабных задач взаимодействия судовых конструкций с водо-воздушной средой.

**В шестой главе** автором диссертации проведена демонстрация возможностей разработанного алгоритма численного решения задачи взаимодействия корпуса судна с водо-воздушной средой в условиях волнения. В качестве объекта исследования рассмотрено двухкорпусное судно, аналог пассажирского катамарана проекта 23290. На основе авторского подхода проведена оценка внешних нагрузок, возникающих в результате ударных воздействий водной среды на корпус катамарана. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния конструкций корпуса. Показано, что учет деформируемости корпуса катамарана в рамках решения сопряженной задачи гидроупругости приводит к снижению суммарной внешней нагрузки примерно на 15-20%. Для проведения анализа несущей способности конструктивных элементов автор применил метод подмоделирования, использующий все особенности метода конечных элементов для деформируемых и разрушаемых конструкций.

Подводя итог, диссертант делает основной вывод о работоспособности разработанного метода решения задачи взаимодействия водо-воздушной среды и деформируемой, разрушаемой конструкции, объединяющего новые подходы к пространственной и временной дискретизации, декомпозиции и синтезу совместных решений.

**К новым научным результатам**, полученным в ходе выполнения работы, следует отнести:

1. Метод численного решения задачи взаимодействия деформируемых судовых конструкций с водо-воздушной средой, универсальный по отношению к геометрическим и физико-механическим свойствам объекта.
2. Связанное решение трех проблем строительной механики - определение внешних воздействий, анализ внутренних реакций конструкции и анализ опасных состояний, выполненное впервые с помощью численных моделей на примере судна катамаранного типа из полимерных композиционных материалов.



3. Метод подмоделирования, предложенный для анализа возможных предельных состояний и форм разрушения в междисциплинарной задаче взаимодействия корпуса с внешней средой.

**Практическая значимость работы** не вызывает сомнений. Созданные виртуальные модели на базе численных алгоритмов позволяют получить весь комплекс параметров состояния динамического взаимодействия деформируемых и разрушаемых связей корпусных конструкций судов различных типов при взаимодействии с водо-воздушной средой. Разработанные численные процедуры применимы как для традиционных, так и для перспективных конструкционных материалов, в том числе полимерных композиционных материалов в широком диапазоне их нелинейного деформирования. Результаты работы могут быть использованы в научно-исследовательских и проектных организациях судостроительной промышленности (ФГУП КГНЦ, ФАУ «РМРС», АО "ЦНИИМФ", АО "ЦМКБ "Алмаз", АО «Северное ПКБ», АО «ЦКБ МТ «Рубин», АО «Адмиралтейские верфи» и др.), для оценки экстремальных нагрузок, определения внутренних реакций корпусных конструкций и выявления форм опасных состояний.

**Достоверность** результатов диссертационной работы обеспечена использованием строгих положений механики сплошной среды, строительной механики, применением современных численных методов, решением тестовых задач, сравнением результатов численного моделирования с общепризнанными аналитическими решениями и экспериментальными данными других исследователей.

В качестве **замечаний** по работе можно отметить следующее:

1. Требуется пояснения, почему моменты возникновения первоначальных пиков гидродинамического давления при погружении призмы, полученные в рамках моделей Т. Кармана и Г. Вагнера разнесены по времени (см. рис. 5.17-5.19). Обе теории, в отличие от рассматриваемого численного подхода, базируются на модели несжимаемой жидкости. Соответственно, гидродинамические возмущения должны мгновенно доходить до точек регистрации давлений.
2. При исследовании погружения недеформируемого тела с начальной скоростью (п.5.3) в диссертации не отражено влияние массинерционных характеристик призмы на изменение скорости погружения.
3. С учетом того, что в диссертационной работе исследовалось движение судна лишь в вертикальной плоскости, было бы полезно сопоставить результаты численного решения гидроупругой задачи, полученные авторским методом, с результатами решений, базирующихся на упрощенных подходах (например, на основе подходов, из-

ложенных в книге Р.Бишоп, У. Прайс Гидроупругость судов. Л.: Судостроение, 1983).

4. В диссертационной работе исследуется движение катамарана на регулярном волнении, следовало бы распространить авторский метод решения сопряженной задачи гидроупругости на случай нерегулярного волнения.

### Заключение

В целом указанные замечания не снижают научной значимости работы. Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, в которой разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать, как решение научной задачи по разработке эффективных методов расчета и обоснования выбора конструктивных решений корпусов кораблей и судов, имеющей значение для судостроительной отрасли.

Основные положения диссертации достаточно полно отражены в публикациях автора. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Работа написана хорошим научно-техническим языком. Изложение материала ясное и четкое.

По своему содержанию работа соответствует специальности 05.08.01 – «Теория корабля и строительная механика».

Считаю, что диссертация Д.А. Пономарева отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.01 – «Теория корабля и строительная механика».

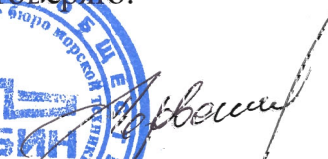
Официальный оппонент,  
заместитель начальника  
проектного отдела АО «ЦКБ МТ «Рубин»,  
доктор технических наук

  
Сухоруков  
Андрей Львович  
«30» МАЯ 2018г.

Адрес: 191119, СПб, ул. Марата,90.  
Тел. (812)494-19-40.  
Эл. почта: su\_andr@yahoo.com

Подпись А.Л. Сухорукова удостоверяю.  
Ученый секретарь НТС  
«АО «ЦКБ МТ «Рубин»»  
кандидат технических наук



  
30.05.2018

С.В. Лозовский