

Министерство науки и высшего образования
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской
технический университет»
(СПбГМТУ)

УДК 629.12.011

На правах рукописи

Овчинников Кирилл Дмитриевич

**ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ
ШАХТЕ ПРИ КАЧКЕ СУДНА НА ВОЛНЕНИИ**

05.08.01 – Теория корабля и строительная механика

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., профессор
Рыжов Владимир Александрович

Санкт-Петербург
2018

Содержание

Введение.....	6
1 Обзор методов исследования колебаний жидкости в шахте судна на волнении.....	15
1.1 Общие сведения	15
1.2 Исторический обзор.....	18
1.3 Рекомендации классификационных обществ	27
1.3.1 Правила Бюро Веритас	27
1.3.2 Правила Дет Норске Веритас.....	28
1.4 Анализ теоретических методов предсказания колебаний жидкости в шахте судна на волнении.....	33
1.5 Выводы к главе 1	46
2 Определение гидродинамических характеристик судна при качке с помощью современных средств вычислительной гидромеханики.....	48
2.1 Общие сведения	48
2.2 Описание экспериментальных методов свободных и вынужденных колебаний	51
2.3 Подготовка численного моделирования.....	58
2.3.1 Описание пакета OpenFOAM	58
2.3.2 Математическое описание задачи	59
2.3.3 Постановка задачи в пакете OpenFOAM.....	63
2.3.4 Моделирование регулярного волнения	74
2.3.5 Алгоритм выполнения численного моделирования.....	77
2.4 Адаптация расчетного метода	80

2.5 Численное моделирование метода свободных колебаний	82
2.6 Численное моделирование метода вынужденных колебаний на тихой воде	85
2.7 Численное моделирование продольной качки	89
2.8 Численное моделирование бортовой качки	93
2.9 Выводы к главе 2	94
3 Экспериментальное исследование динамики судна с шахтным устройством	97
3.1 Планирование эксперимента. Выбор исследуемых параметров....	97
3.2 Экспериментальное оборудование.....	99
3.2.1 Опытный бассейн	99
3.2.2 Измерение угловых и линейных перемещений модели.....	101
3.2.3 Измерение колебаний жидкости в шахте	105
3.3 Создание опытной модели	107
3.3.1 Выбор исследуемого корпуса	107
3.3.2 Изготовление модели.....	109
3.3.3 Изготовление сменных модулей	111
3.3.4 Установка измерительного оборудования	112
3.4 Проведение экспериментального исследования.....	115
3.4.1 Тарировка модели	115
3.4.2 Выбор параметров волнения.....	116
3.4.3 Исследование параметров вертикальной и килевой качки ...	116
3.4.4 Исследование параметров бортовой качки	119
3.5 Результаты экспериментального исследования.....	123

3.5.1 Результаты испытаний вертикальной и килевой качки на встречном волнении.....	124
3.5.2 Результаты испытаний бортовой качки на тихой воде.....	126
3.5.3 Результаты испытаний бортовой качки на лаговом волнении.....	132
3.6 Пересчет результатов модельных испытаний на натурный объект.....	136
3.7 Выводы к главе 3.....	138
4 Анализ динамики судна с шахтным устройством.....	141
4.1 Оценка возможности численного моделирования динамики судна с шахтным устройством	141
4.1.1 Численное моделирование продольной качки на встречном волнении.....	141
4.1.2 Численное моделирование бортовой качки на лаговом волнении.....	149
4.2 Анализ продольной качки судна с различными конфигурациями шахтного устройства на встречном волнении	155
4.2.1 Численное моделирование продольной качки модели серии 60 с различными конфигурациями шахтного устройства на встречном волнении.....	155
4.2.2 Численное моделирование продольной качки модели DTMB 5415 с различными конфигурациями шахтного устройства на встречном волнении.....	158
4.3 Анализ влияния месторасположения шахты на динамические характеристики судна	162
4.4 Анализ колебаний жидкости в шахте судна на волнении	167

4.4.1 Расчет колебаний жидкости в различных конфигурациях шахтного устройства.....	167
4.4.2 Расчет колебаний жидкости в шахте судов различных размерений	175
4.5 Практические рекомендации по определению характеристик качки судна, оборудованного шахтным устройством, и характера колебаний жидкости в шахте	179
4.5 Выводы к главе 4.....	182
Заключение	188
Список использованной литературы	190
Приложение А (обязательное) – Результаты экспериментального исследования.....	204
А.1 Результаты испытаний вертикальной и килевой качки на встречном волнении.....	204
А.1.1 Модель с модулем № 1	204
А.1.2 Модель с модулем № 2	206
А.1.3 Модель с модулем № 3	208
А.2 Результаты испытаний бортовой качки на тихой воде	211
А.3 Результаты испытаний бортовой качки на лаговом волнении....	226
А.3.1 Модель с модулем № 1	226
А.3.2 Модель с модулем № 2	227
А.3.3 Модель с модулем № 3	229

Введение

Интенсивное развитие морской техники связано с появлением морских объектов с новыми техническими решениями, предназначенными для реализации сложных проектов в области исследования и освоения Мирового океана. Одним из таких технических решений является шахтное устройство, позволяющее вести работы непосредственно изнутри судна или платформы.

Шахтные устройства в настоящее время используются на морских объектах: на научно-исследовательских судах для обеспечения водолазных работ, а также работ с автономными и телеуправляемыми аппаратами, на буровых судах для обеспечения работ турелей и райзеров, на кабелеукладочных судах для обеспечения работ по укладке кабеля, на спасательных судах для спуска и подъема водолазного колокола и крупногабаритных глубоководных исследовательских аппаратов.

В шахте, имеющей свободную поверхность, возникают колебательные движения забортной воды. В обычных условиях эти колебания не опасны, однако в случае попадания судна в резонансную зону динамические процессы, происходящие внутри шахты, могут привести к повреждениям судна и выходу из строя судового оборудования. Для предотвращения опасных последствий, которые могут появиться при использовании шахтного устройства, необходимо корректно прогнозировать параметры качки судна и связанные с этим параметры колебаний жидкости в шахте. Только при понимании характера поведения жидкости в шахте судна можно грамотно разрабатывать этапы проведения технических работ с использованием шахтного устройства.

К настоящему времени число теоретических и экспериментальных работ, посвященных указанной тематике, ограничено, поэтому, ввиду практической значимости, требуется развитие исследований по учету влияния шахт на поведение судов.

Базисом для проведения и развития подобных исследований являются результаты работ, посвященных прогнозированию качки судов; результаты работ, посвященных моделированию гидродинамических характеристик морских объектов при различных ограничениях, накладываемых на характеристики внешней среды (в рамках моделей идеальной жидкости, вязкой жидкости); результаты экспериментальных исследований, посвященных динамике судов на волнении.

Среди работ, посвященных прогнозированию параметров качки морских объектов, можно выделить следующих авторов: И.К. Бородай и Ю.А. Нецветаев [5, 6], С.Н. Благовещенский и А.Н. Холодилин [3], В.В. Семенов-Тянь-Шанский [33], А.Н. Шмырев, В.А. Мореншильдт и С.Г. Ильина [46], Я.И. Войткунский [35], Ю.В. Ремез [32], М.Д. Хаскинд [44], В.В. Луговский [19], Р.В. Борисов [4] и В.Ю. Семенова [34], J.M.J. Journée и W.W. Massie [90], O.M. Faltinsen [61, 62] и другие.

Методы вычислительной гидродинамики, основанные на решении уравнений Навье-Стокса в различных постановках, и применяемые для определения гидродинамических характеристик морских объектов, в том числе и сложной формы, активно развивались в последние 20 лет.

Значительных результатов в этой области достигли российские и зарубежные учёные, среди которых следует отметить Н.В. Корнева [15, 45, 48], А.Р. Бесядовского [2], М.П. Лобачёва [9, 14, 18], И.В. Ткаченко [38, 39, 40], Д.В. Никущенко [21, 22], А.Е. Таранова [36], Н.В. Тряскина [41], А.А. Зубову [13], J.H. Ferziger и M. Peric [65], Tu Jiyuan [123] и других.

Разработанные ранее методики определения динамических характеристик морских объектов на волнении были основаны либо на теории идеальной жидкости, либо на эмпирических данных. Точность подобных методик недостаточно высока при изучении динамики судов с различными выступающими частями или устройствами.

Применение современных средств вычислительной гидродинамики позволило решать указанные задачи в полностью вязкостной постановке, что

обеспечивает для начальных стадий проектирования более качественное прогнозирование поведения судна или платформы на морском волнении.

К настоящему времени использование расчетных методов, благодаря их относительной дешевизне, стало практически обязательным этапом проектирования при отработке обводов корпуса судна, существенно снизив необходимый объем экспериментальных исследований.

Именно вопросу разработки методики численного моделирования динамики морских объектов при качке в полностью вязкостной постановке задачи и реализации расчетных методов для качественной и количественной оценки гидродинамических характеристик морских объектов при качке на тихой воде и волнении, в том числе оборудованных шахтным устройством, посвящена диссертационная работа.

Использование указанной методики в практике проектно-конструкторских организаций и научно-исследовательских институтов позволит значительно упростить решение проблемы обоснования формы и месторасположения шахтного устройства, а также эффективно предсказывать характеристики колебаний жидкости в шахте, влияющие на эксплуатационные и мореходные свойства судна. Это определяет **актуальность** диссертационного исследования.

Целью работы является разработка методики численного моделирования динамики морских объектов при качке в полностью вязкостной постановке задачи, позволяющей реализовать расчетные методы оценки гидродинамических характеристик морских объектов, в том числе оборудованных шахтным устройством, на тихой воде и волнении, а также разработка практических рекомендаций по оценке характеристик качки судна, оборудованного шахтным устройством, и характеристик колебаний жидкости в шахте.

В соответствии с указанной целью ставятся следующие **задачи** диссертационного исследования:

1 Обзор и анализ существующих методов расчета характеристик колебаний жидкости в шахте судна на волнении.

2 Разработка методики численного моделирования динамики морских объектов при качке в полностью вязкостной постановке задачи и реализация расчетных методов для качественной и количественной оценки гидродинамических характеристик морских объектов на тихой воде и волнении.

3 Анализ применимости расчетных методов оценки гидродинамических характеристик морских объектов, в том числе оборудованных шахтным устройством, при качке.

4 Анализ влияния наличия шахтного устройства различных размеров и месторасположения на характеристики качки судна.

5 Анализ динамики жидкости в шахте судна на волнении.

6 Разработка практических рекомендаций для ранних стадий проектирования по определению характеристик качки судна, оборудованного шахтным устройством, и характеристик колебаний жидкости в шахте.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовался комплексный подход, включающий в себя физический эксперимент и численное моделирование вязких турбулентных течений, основанных на решении уравнений Навье-Стокса, осредненных по методу Рейнольдса.

Научная новизна диссертационного исследования:

1 Разработана методика численного моделирования динамики морских объектов при качке в полностью вязкостной постановке задачи.

2 Проведена качественная и количественная верификация разработанных расчетных методов оценки гидродинамических характеристик морских объектов при качке, в том числе при наличии шахтного устройства и при анализе характера колебаний жидкости в шахте.

3 По результатам модельного физического эксперимента проведен анализ влияния наличия шахтного устройства различных размеров на характеристики продольной и бортовой качки на регулярном волнении.

4 По результатам численного эксперимента проведен анализ влияния размеров и месторасположения шахтного устройства на характеристики качки судна и анализ характера колебаний жидкости в шахте.

5 Разработаны практические рекомендации по определению характеристик качки судна, оборудованного шахтным устройством, и характеристик колебаний жидкости в шахте.

Теоретическая и практическая ценности работы:

1 Разработанный алгоритм и предложенная схема реализации численного моделирования, сформированные в методику численного моделирования динамики морских объектов при качке в полностью вязкостной постановке задачи, позволяют реализовать расчетные методы оценки гидродинамических характеристик морских объектов при качке с использованием программного комплекса с открытым кодом OpenFOAM.

2 Разработанные расчетные методы оценки гидродинамических характеристик морских объектов при качке позволяют эффективно предсказывать инерционно-демпфирующие свойства, а также амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики различных морских объектов, в том числе оборудованных шахтным устройством.

3 Разработанные расчетные методы оценки гидродинамических характеристик морских объектов при качке позволяют эффективно предсказывать характеристики колебаний жидкости в шахте судна на волнении.

4 Данные, полученные по результатам модельного физического и численного экспериментов, о параметрах продольной и бортовой качки судна, оборудованного шахтным устройством, и о характере колебаний жидкости в шахте при качке позволяют эффективно предсказывать динамические характеристики морских объектов.

5 Разработанные практические рекомендации по предсказанию характеристик качки судна, оборудованного шахтным устройством, и колебаний жидкости в шахте могут быть использованы в практике проектно-конструкторских организаций на ранних стадиях проектирования, а также при разработке правил и рекомендаций Регистра.

Основные положения, выносимые на защиту:

1 Методика численного моделирования динамики морских объектов при качке в полностью вязкостной постановке задачи.

2 Расчетные методы оценки гидродинамических характеристик морских объектов при качке, основанные на численном моделировании вязких турбулентных течений, и результаты их верификации.

3 Систематические данные динамических характеристик морских объектов, оборудованных шахтным устройством, и колебаний жидкости в шахте судна при качке на волнении в зависимости от размеров и месторасположения шахтного устройства.

4 Практические рекомендации по определению характеристик качки судна, оборудованного шахтным устройством, и характера колебаний жидкости в шахте на волнении (для ранних стадий проектирования).

Внедрение результатов работы.

Разработанные расчетные методы оценки гидродинамических характеристик при качке морских объектов, в том числе оборудованных шахтным устройством, используется в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям подготовки «Теория корабля и гидромеханика» и «Компьютерное и математическое моделирование в науке и технике», а также при выполнении научно-исследовательских работ в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете.

Разработанные расчетные методы оценки гидродинамических характеристик морских объектов при качке использовались в работах АО «ЦМКБ «Алмаз».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1 Доклад «Численное моделирование качки судна с шахтным устройством на встречном волнении» на «Открытой конференции ИСП РАН им. В.П. Иванникова», Москва, 22-23 ноября 2018.

2 Доклад «High-performance computations in ship hydromechanics» на конференции «International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering», Санкт-Петербург, 6-8 июня 2016.

3 Доклад «Численное моделирование качки полупогружной платформы на регулярном волнении» на «12-ой Международной выставке и конференции по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ», Санкт-Петербург, 18 сентября 2015.

Публикации:

1 В изданиях, рекомендованных Перечнем рецензируемых научных изданий ВАК:

1) Овчинников К.Д. Численное моделирование качки судна с шахтным устройством на встречном волнении. Труды ИСП РАН, том 30, вып. 5, 2018 г., стр. 235-248 (на английском языке) [25]. Авторская доля – 100 %.

2) Лавриненко А.В., Ермолаева Е.В., Франк М.О., Овчинников К.Д., Тряскин Н.В. Выбор формы корпуса автономного необитаемого надводного аппарата с помощью современных средств вычислительной гидродинамики. Морские интеллектуальные технологии. № 4 (42) т. 1 2018, стр. 71-75 [17]. Авторская доля – 20 %.

3) Овчинников К.Д. Оценка влияния наличия шахты на характеристики продольной качки судна с помощью современных средств вычислительной гидромеханики. Морские интеллектуальные технологии. № 2 (40) т. 1 2018, стр. 62-66 [24]. Авторская доля – 100 %.

4) Овчинников К.Д. Определение гидродинамических характеристик судна при качке с помощью современных средств вычислительной

гидромеханики. Морские интеллектуальные технологии. № 1 (39) т. 1 2018, стр. 38-42 [23]. Авторская доля – 100 %.

5) Овчинников К.Д., Ткаченко И.В., Тряскин Н.В. Численное моделирование качки полупогружной платформы на регулярном волнении. Морские интеллектуальные технологии. № 2 (28) т. 1 2015, стр. 14-18 [27]. Авторская доля – 33 %.

2 В прочих изданиях:

1) Овчинников К.Д., Ткаченко И.В., Тряскин Н.В., Чепурко С.И. High-performance computations in ship hydromechanics. International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering. Collection of Papers. Труды Международной конференции по судостроению и океанотехнике: Сборник статей / СПбГМТУ, НТОС им. акад. Крылова. – СПб: СПбГМТУ, 2016 – 730 с [26]. Авторская доля – 25 %.

2) Овчинников К.Д., Ткаченко И.В., Тряскин Н.В. Численное моделирование качки полупогружной платформы на регулярном волнении. Труды 12-й Международной конференции и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ, 15-18 сентября 2015 года, Санкт-Петербург [28]. Авторская доля – 33 %.

3) Овчинников К.Д., Тряскин Н.В., Чепурко С.И. Исследование формы корпуса подводных аппаратов. Вооружение, военная техника и боеприпасы. Сборник научных статей. Форум лучших студентов технических вузов России, X Международная выставка «Вооружение, военная техника и боеприпасы» (Russia Arms Expo 2015), 10 сентября 2015 года, г. Нижний Тагил: в 2-х частях / Под ред. А.А.Александрова и В.К. Балтяна — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. - 252 с. - Часть I [29]. Авторская доля – 33 %.

3 Патенты, свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и т.д.:

1) Григоров М.Ю., Овчинников К.Д., Тюшкевич В.В. База данных нестационарных и стационарных гидродинамических характеристик обтекателей. Свидетельство о государственной регистрации базы данных

№ 2016620385, дата поступления 03.02.2016 г., дата государственной регистрации в Реестре баз данных 28.03.2016 г [7]. Авторская доля – 33 %.

Структура и объём диссертации. Диссертация изложена на 203 страницах, включает 81 рисунок, 21 таблицу и одно приложение. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Список литературы включает 146 наименований.

1 Обзор методов исследования колебаний жидкости в шахте судна на волнении

1.1 Общие сведения

Шахтой (англ. – moonpool) называется «колодец», используемый на различных типах судов, таких как, кабелеукладочных, добычных и буровых, спасательных, исследовательских, снабжения и обеспечения. Эта шахта предназначена для спуска и подъема различного оборудования, водолазов или спасательных колоколов, кабелей или райзеров, защищенных от воздействия внешнего волнения. Шахты бывают открытыми – сквозными, с палубными закрытиями для предотвращения заливаемости внутрь корпуса судна и с днищевыми закрытиями для уменьшения влияния наличия шахты на сопротивление судна. Различные типы шахт схематично представлены на рисунке 1.1.

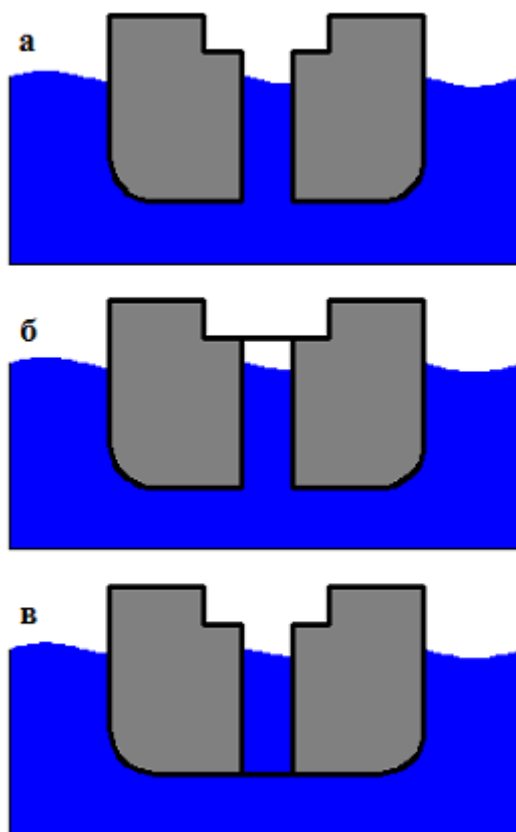


Рисунок 1.1 – Типы шахт, используемые на судах:
а – открытая, б – с палубным закрытием, в – с днищевым закрытием

При работах на стопе шахта всегда будет открытой, тогда как при переходе к месту работ или при работах на ходу шахта может быть с палубными и днищевым закрытием.

В шахте, имеющей свободную поверхность, на волнении возникают колебательные движения масс жидкости. В обычных условиях амплитуды колебаний жидкости в шахте не больше амплитуд набегающих на судно волн. Однако, при определенных условиях, в шахте могут возникать резонансные колебания жидкости, амплитуда которых может быть в четыре раза больше амплитуды набегающего волнения, что может привести к повреждениям судна или судового оборудования, находящегося в шахте [73].

Изучению поведения жидкости в шахте судна посвящено большое количество работ. Здесь можно выделить два основных направления исследований:

- влияние открытой шахты на сопротивление при движении судна и
- колебания жидкости в шахте судна на волнении при отсутствии скорости хода.

Первое направление получило большее распространение, поскольку некоторые суда используют шахту при движении, а также потому что не всегда рационально с конструктивной точки зрения использовать сложное и дорогостоящее закрытие шахт [75, 108, 115, 118, 127].

На настоящий момент второе направление менее изучено, однако ряд классификационных сообществ выпустил наставления по расчетам и ограничениям использования шахтного спуско-подъемного устройства [72, 102].

При движении жидкости в шахте возникают разные режимы колебаний, которые называются поршневым режимом (англ. – piston mode) и слошинговым режимом (англ. – sloshing mode). При поршневом режиме считается, что свободная поверхность практически не деформируется и перемещается вертикально вверх и вниз. При слошинговом режиме преобладают наклоны свободной поверхности относительно продольной и

поперечной плоскостей судна. Считается, что поршневой режим присущ шахтам круглого и квадратного сечений, тогда как слошинговый режим преобладает в шахтах прямоугольного сечения [114].

С точки зрения анализа, слошинговый режим сложнее поршневого. С другой стороны, это разделение достаточно условное, так как на практике всегда будет наличие взаимодействия двух режимов. В настоящей работе первостепенное внимание уделяется поршневому режиму колебаний жидкости в шахте судна на волнении.

1.2 Исторический обзор

Первым, кто занялся изучением шахтного устройства судов, был японский исследователь К. Фукуда [67]. В работе представлены результаты экспериментального исследования моделей судов в двух постановках: колебания жидкости в шахте при неподвижной (зафиксированной) модели и влияние колебаний жидкости в шахте на судно при движении модели. Исследования на волнении не проводились. Несмотря на это были получены очень важные и до сих актуальные сведения, среди которых можно выделить формулу для частоты собственных колебаний жидкости в шахте судна, рад/с:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{T + 0,41\sqrt{S}}}, \quad (1.1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

T – осадка судна в районе расположения шахты, м;

S – площадь горизонтального сечения шахты, м².

Величину $0,41\sqrt{S}$ называют присоединенной массой шахты или присоединенной осадкой. Следует отметить, что формула собственной частоты очень схожа с формулой собственной частоты колебаний пружинного маятника.

Следующая серьезная работа была проведена А.Б. Аальбертсом [47]. В работе представлены теоретические подходы к изучению колебаний жидкости в шахте судна, а также колебаний судна, оборудованного шахтой, и их сопоставление с экспериментальными данными.

Основная часть экспериментального исследования производилась для секции судна размерами 1 x 1 м (длина x ширина), оборудованного шахтами круглого сечения диаметрами 0,2 и 0,3 м, на тихой воде и волнении. На тихой воде выполнялись испытания свободных и вынужденных колебаний. При некоторых испытаниях изменялась осадка модели для проверки влияния этого параметра на исследуемые характеристики.

А.Б. Аальбертсом использовалось уравнение для относительных вертикальных колебаний жидкости в шахте судна с учетом колебаний самого судна с расположением центра тяжести системы в центре шахты:

$$(\rho S(T + h) + a_h)\ddot{h} + b_h\dot{h} + b_2h|\dot{h}| + \rho gSh + (d_{hz} + \rho S(T + h) + a_h)\ddot{z} + (e_{hz} + b_h)\dot{z} + \rho gSz = F_{wh}, \quad (1.2)$$

дополненное уравнением вертикальных колебаний судна:

$$(D + a_z)\ddot{z} + b_z\dot{z} + c_zz + d_{zh}(\ddot{z} + \ddot{h}) + e_{zh}(\dot{z} + \dot{h}) = F_{wz}, \quad (1.3)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³;

h – относительные колебания жидкости в шахте, м;

a_h – потенциальный коэффициент присоединенной массы, кг/с;

b_h – потенциальный коэффициент демпфирования, кг/с;

b_2 – квадратичный коэффициент демпфирования, кг/м²;

c_h – коэффициент восстанавливающей силы, кг/с²;

$d_{hz} = d_{zh}$ – потенциальный коэффициент присоединенной массы, учитывающий взаимовлияние вертикальной качки судна и абсолютных колебаний жидкости в шахте, кг;

$e_{hz} = e_{zh}$ – связывающий коэффициент демпфирования, кг/с;

z – вертикальные колебания судна, м;

F_{wh} – возмущающая сила колебаний жидкости в шахте, Н;

D – массовое водоизмещение судна, кг;

a_z – коэффициент присоединенной массы судна, кг;

b_z – коэффициент демпфирования судна, кг/с;

c_z – коэффициент восстанавливающей силы судна, кг/с²;

F_{wz} – возмущающая сила вертикальных колебаний судна, Н.

В рамках работы были проведены следующие испытания, результаты которых сравнивались с теоретическими значениями:

1 Метод свободных колебаний на тихой воде, который описывался следующим уравнением:

$$(\rho S(T + h) + a_h)\ddot{h} + b_h\dot{h} + b_2h|\dot{h}| + \rho gSh = 0. \quad (1.4)$$

Целью испытаний был анализ присоединенных масс шахты, линейного (потенциального) демпфирования и вязкостной части демпфирующих сил.

2 Метод вынужденных вертикальных колебаний на тихой воде, который описывался следующим уравнением:

$$\begin{aligned} (\rho S(T + h) + a_h)\ddot{h} + b_h\dot{h} + b_2\dot{h}|\dot{h}| + \rho gSh \\ + (d_{hz} + \rho S(T + h) + a_h)\ddot{z} + (e_{hz} + b_h)\dot{z} + \rho gSz = 0. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Исследованию подвергались влияние изменения осадки, влияние амплитуды вертикальных колебаний судна и влияние диаметра шахты.

3 Метод определения главной части возмущающих сил на волнении при отсутствии колебаний судна, который был описан следующим уравнением:

$$(\rho S(T + h) + a_h)\ddot{h} + b_h\dot{h} + b_2\dot{h}|\dot{h}| + \rho gSh = F_{wh}. \quad (1.6)$$

В данном случае исследовалась резонансная зона без учета колебаний судна, а также влияние демпфирующих пластин, устанавливаемых внутри шахты.

4 Колебания судна с шахтой на волнении, которые описываются системой из уравнений (1.2) и (1.3).

На данном этапе сравнивались теоретические предсказания с результатами эксперимента, как относительных колебаний жидкости в шахте судна, так и самого судна. Показано, что наличие шахты диаметром 0,2 м оказывает слабое влияние на амплитудно-частотную характеристику судна.

Среди отечественных статей того времени, посвященных тематике колебаний жидкости в шахте судна можно выделить работу Рахманина Н.Н. [30]. Из основных результатов представленного исследования можно выделить следующие:

1 В шахте при качке судна возбуждается главный четный тон колебаний свободной поверхности, характеризующий изменение ее среднего уровня, и бесконечное число нечетных тонов волновых колебаний этой поверхности относительно ее переменного уровня.

2 Представлены формулы для оценки приращений коэффициентов устойчивости и демпфирования бортовой качки при расположении шахты не в зоне диаметральной плоскости.

О. М. Фалтинсен в своей монографии [62] представил сильно упрощенное уравнение вертикальных колебаний жидкости в шахте, представляющее собой уравнение колебаний пружинного маятника с демпфированием:

$$\ddot{h} + b_2 \dot{h} |\dot{h}| + \frac{g}{T} h = F_{wh}. \quad (1.7)$$

Никаких рекомендаций по определению значений коэффициента демпфирования b_2 в работе [62] не дано.

Ж. Матюсак в работе [100] представил поэтапный вывод уравнения вертикальных колебаний жидкости в шахте судна. Уравнение выведено аналогично уравнению А.Б. Аальбертса [47], но с корректировкой некоторых сил, действующих на столб жидкости в шахте судна. При этом уравнение не связано в систему с уравнением вертикальной качки судна.

Уравнение вертикальных колебаний жидкости в шахте судна в связанной с судном системе координат (относительных колебаний жидкости в шахте) представлено в следующем виде:

$$(\ddot{h} + \ddot{z}) \left[T + h + \frac{2}{3} R C_A \right] + \dot{h} |\dot{h}| + \frac{1}{2} (\dot{h})^2 + g(h + z) = \frac{1}{\rho} p_{FK}, \quad (1.8)$$

где C_A – коэффициент присоединенной массы шахты;

R – радиус шахты, м, в случае шахты прямоугольного сечения $R = \sqrt{bl/\pi}$, где b и l – длина и ширина шахты, м;

p_{FK} – давления Фруда-Крылова в районе расположения шахты, Па, определяемые по формуле:

$$p_{FK} = \rho g a_w \exp(-\omega^2 \zeta/g) \sin(\omega_e t + \alpha), \quad (1.9)$$

где ζ – глубина погружения днищевого открытия шахты $\zeta = T - z$;

ω_e – кажущаяся частота, определяемая по следующей формуле:

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g} V_S \cos\beta, \quad (1.10)$$

где ω – частота волны, рад/с;

V_S и β – скорость и курсовой угол к волнению судна соответственно (встречное волнение при $\beta = 180^\circ$).

В работе также представлен расчет поправки в случае, если шахта имеет закрытие сверху (рисунок 1.1, б).

Для верификации представленного уравнения в работе показаны результаты сравнения теоретических вычислений с экспериментальными данными. Эксперимент проводился на зафиксированной модели с шахтой круглого сечения на регулярном волнении. Согласно представленным данным уравнение позволяет с малой погрешностью рассчитать амплитуду вертикальных колебаний жидкости в шахте судна на волнении при отсутствии качки модели.

В работах [104, 105, 106] Б. Молин представил уравнения для расчета собственных частот вертикальных колебаний жидкости в шахте судна при поршневом и слошинговом режимах. Представленные в работах уравнения считаются эталонными при расчетах присоединенной массы (осадки) шахтного устройства судов. Результаты аппроксимации этих уравнений представлены в документах классификационных обществ [72, 102].

При дальнейшем исследовании динамики жидкости в шахте судна и судна с шахтой разделились на два направления:

1 Теоретические и экспериментальные исследования двухмерных задач [63, 77, 109, 124]. Данное направление интересно тем, что авторы стараются получить математическое понимание того, что происходит с жидкостью в шахте судна.

2 Экспериментальные исследования трехмерных моделей, а также применение методов вычислительной гидромеханики к решению реальных проектных задач [58, 97, 99, 114, 122, 129]. Данные исследования направлены

на получение сведений, позволяющие прогнозировать поведение судов, оборудованных шахтами.

Среди этого перечня статей для практического применения следует выделить работы [77, 99, 114].

В работе [77] рассмотрена двумерная задача, которая решается тремя способами: экспериментально, потенциальным методом и полностью вязкостным методом, реализованным в программном комплексе Ansys Fluent. Показано, что потенциальные подходы завышают резонансную амплитуду вертикальных колебаний воды в шахте судна, тогда как нерезонансная зона моделируется хорошо. При этом результаты полностью вязкостного решателя хорошо согласуются с экспериментальными данными на всех значениях исследуемых частот. Также следует отметить исследование влияния шахты на гидродинамические характеристики судна. В диапазоне частот, близком к резонансному, значения коэффициентов присоединенных масс и демпфирования сильно отличаются от такового для судна без шахты. При этом значения коэффициентов достаточно хорошо предсказываются как потенциальными подходами, так и полностью вязкостными.

В работе [99] представлена интересная интерпретация системы уравнений вертикальных колебаний судна и вертикальных колебаний жидкости в шахте. Судно и шахта рассматриваются как отдельные объекты, колебания которых влияют друг на друга. В этом случае система уравнений представлена следующим образом:

$$(M + a_z)\ddot{z} + b_z\dot{z} + c_z z + d_{zh}\ddot{h} + e_{zh}\dot{h} = F_{wz}, \quad (1.11)$$

$$d_{hz}\ddot{z} + e_{hz}\dot{z} + (\rho ST + a_h)\ddot{h} + b_h\dot{h} + c_h h = F_{wh}. \quad (1.12)$$

Данное уравнение схоже с системой из уравнений (1.2) и (1.3).

Также в работе представлены результаты испытаний судна для добычи, переработки и хранения нефтепродуктов цилиндрического типа с шахтным устройством больших относительных размеров.

В работе [114] представлены результаты испытаний модели навалочного судна с различными конфигурациями: без шахты, с шахтами круглого и

квадратного сечения, а также двумя шахтами прямоугольного сечения. Заякоренная модель с различными конфигурациями испытывалась на встречном регулярном волнении. В работе представлены амплитудно-частотные характеристики вертикальной, килевой и бортовой качки, показанные на рисунках 1.2 – 1.4 соответственно.

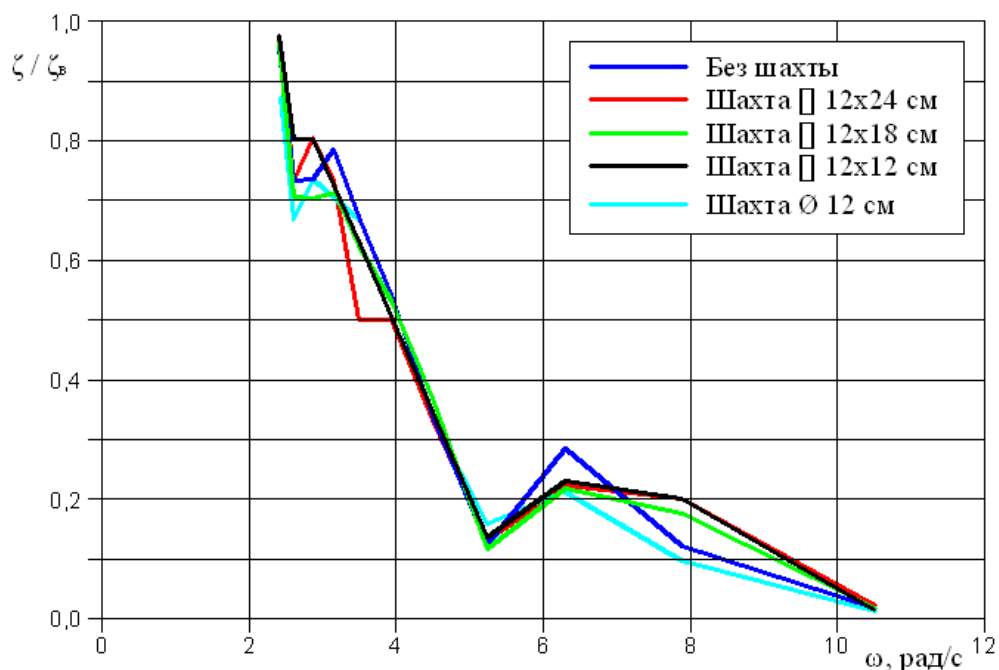


Рисунок 1.2 – Амплитудно-частотные характеристики вертикальной качки судна без шахты и с шахтами различных сечений

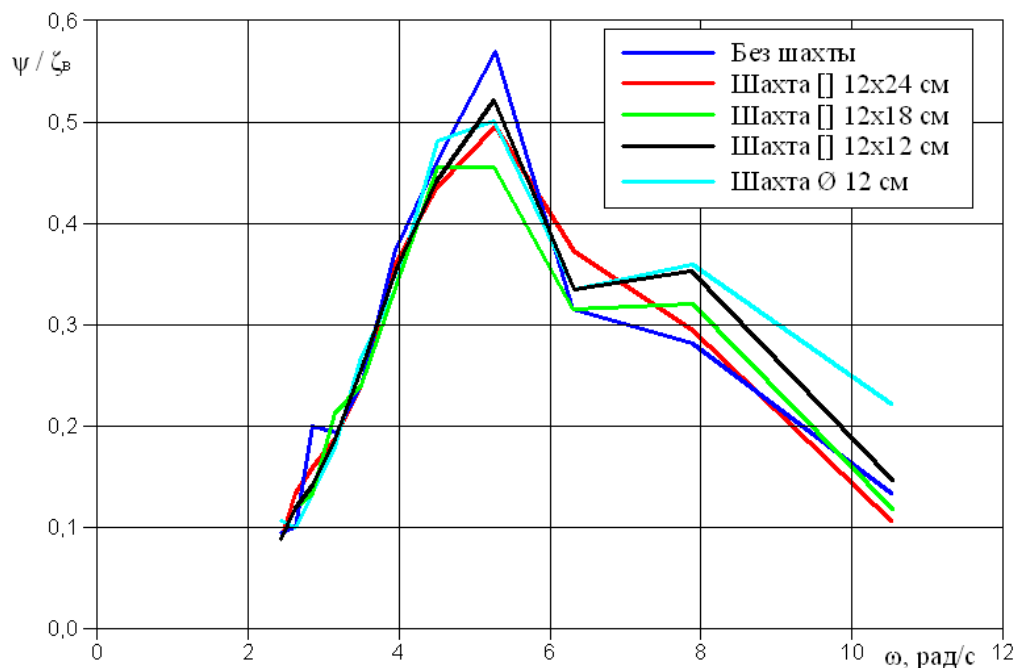


Рисунок 1.3 – Амплитудно-частотные характеристики килевой качки судна без шахты и с шахтами различных сечений

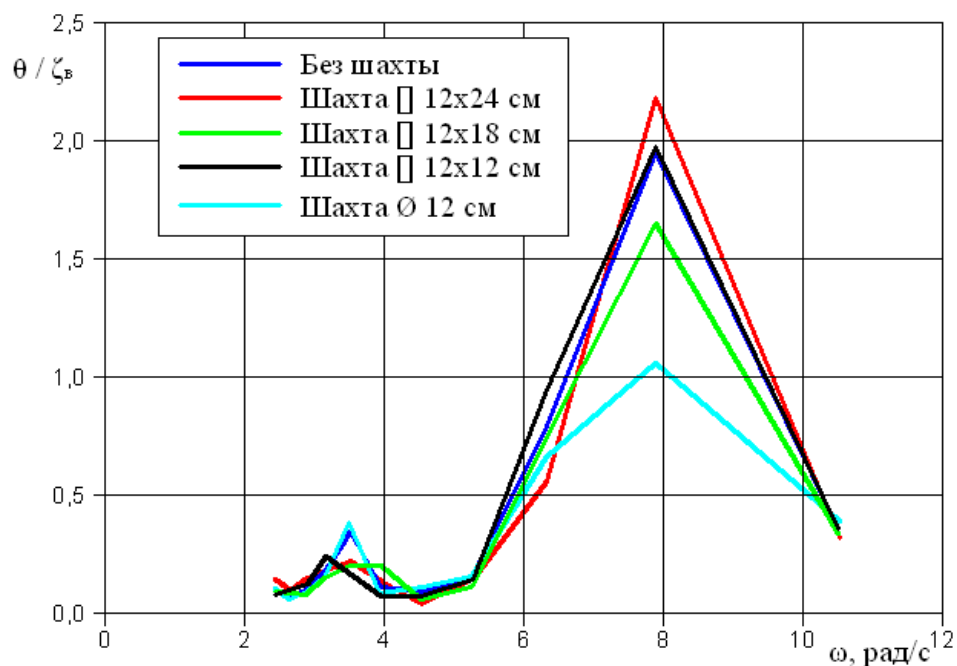


Рисунок 1.4 – Амплитудно-частотные характеристики бортовой качки судна без шахты и с шахтами различных сечений

Анализируя данные, представленные на рисунках 1.2 – 1.4, следует обратить внимание на следующее:

1 Шахтное устройство практически не влияет на вертикальные колебания судна;

2 Наличие шахтного устройства незначительно изменяет амплитудно-частотную характеристику килевых колебаний судна;

3 Шахта круглого сечения значительно уменьшает бортовые колебания судна, тогда как другие конфигурации шахтного устройства влияют незначительно.

Следует обратить особое внимание на то, что модель во время испытаний была заякорена.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить следующее, справедливое для заякоренного судна:

1 При расположении шахтного устройства вблизи центра качания судна вертикальные колебания судна могут быть рассчитаны как для судна без шахты;

2 При расположении шахтного устройства на диаметральной плоскости, но не в центре качания судна, вертикальные колебания судна в районе расположения шахты могут быть рассчитаны как для судна без шахты с погрешностью в безопасную сторону;

3 При расположении шахтного устройства не в диаметральной плоскости необходимо учитывать влияние шахты на колебания судна;

4 Шахтное устройство может быть использовано как успокоитель бортовой качки. Такое свойство шахты рассматривалось в работе [111].

1.3 Рекомендации классификационных обществ

Поскольку шахтное устройство сейчас используется на сравнительно большом количестве морских судов различного назначения, естественно, что классификационные общества выпускают правила по оценочным расчетам.

В свободном доступе были найдены Правила Бюро Веритас [72] и Дет Норске Веритас [102].

1.3.1 Правила Бюро Веритас

Основные тезисы Правил Бюро Веритас, касающиеся резонансной зоны поршневого режима [72]:

1 Собственный период вертикальных колебаний жидкости в шахте судна с постоянным горизонтальным сечением (шахта с вертикальными стенками) определяется по формуле, с:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{T + k\sqrt{S}}{g}}, \quad (1.13)$$

где k – форм-фактор, зависящий от формы горизонтального сечения шахты, принимаемый равным 0,479 для круглого сечения, 0,473 – для квадратного и 0,460 – для прямоугольного с отношением длины к ширине равным два.

2 Собственный период вертикальных колебаний жидкости в шахте судна с переменным горизонтальным сечением (шахта с наклонными стенками и/или шахта, имеющая «ступеньки») определяется по формуле, с:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{M_{eq}}{\rho S(0)g}}, \quad (1.14)$$

где $S(0)$ – площадь горизонтального сечения шахты на уровне днища судна, м²;

M_{eq} – эквивалентная масса жидкости в шахте, т, определяемая по формуле

$$M_{eq} = \rho S(0) \left(\int_0^T \frac{S(T)}{S(z)} dz + \frac{S(T)}{S(0)} k \sqrt{S(0)} \right), \quad (1.15)$$

где $S(T)$ – площадь горизонтального сечения шахты на уровне свободной поверхности, м²;

$S(z)$ – площадь горизонтального сечения шахты на уровне z от днища судна, м².

3 Опасная зона при

$$0,6 < \frac{T_0}{T_w} < 1,3, \quad (1.16)$$

где T_w – период набегающего волнения, с.

4 Давления на уровне z от днища судна при околорезонансном режиме, кН/м², определяются по формуле

$$p = 1,025g(H - z), \quad (1.17)$$

где H – высота шахты, м.

Фактически в Правилах [72] описаны рекомендации для предотвращения попадания в резонансную зону вертикальных колебаний жидкости в шахте судна при проектировании судна.

1.3.2 Правила Дет Норске Веритас

Правила Дет Норске Веритас [102] гораздо более обширные, чем Правила Бюро Веритас [72]. Документ посвящен моделированию и анализу морских операций. В нем охвачено множество морских операций и рекомендаций к их расчетам при проектировании, в том числе при спуско-подъемных операциях через шахтное устройство.

Рассмотрим основные формулы и рекомендации документа [102]:

1 Допущения:

- Размеры шахты малы по сравнению с шириной корпуса судна.

- Рассматриваются только вертикальные колебания воды и аппарата в шахте.

- Эффект «блокирования» движений воды в шахте аппаратом умеренный;

- Учитываются только вертикальные силы, возникающие на стенках шахты.

2 Уравнение абсолютных колебаний жидкости в шахте:

$$(M_h + a_h)\ddot{q} + b_s(\dot{q} - \dot{z})|\dot{q} - \dot{z}| + b_b(\dot{q} - \dot{z}_b)|\dot{q} - \dot{z}_b| + c_h q = F_{wh}, \quad (1.18)$$

где M_h – масса жидкости в шахте, кг;

a_h – присоединенная масса жидкости в шахте, кг;

q – вертикальные колебания жидкости в шахте судна, м;

b_s – коэффициент демпфирования относительных колебаний между жидкостью в шахте и судном, кг/м;

z – вертикальные колебания судна в районе расположения шахты, м;

b_b – коэффициент демпфирования относительных колебаний между жидкостью в шахте и аппаратом в шахте, кг/м;

z_b – вертикальные колебания аппарата в шахте, м;

$c_h = \rho g S$ – коэффициент восстанавливающей силы, кг/с²;

F_{wh} – возмущающая сила колебаний жидкости в шахте, Н.

3 Резонансный период для шахты произвольной формы в поперечном сечении определяется по формуле:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \sqrt{\int_0^T \frac{S(T)}{S(z)} dz + \frac{S(T)}{S(0)} k \sqrt{S(0)}}, \quad (1.19)$$

где k – параметр формы шахты в горизонтальном сечении, принимаемый $k = 0,46$ для шахт прямоугольной формы, $k = 0,47$ – квадратной формы и $k = 0,48$ – круглой формы.

Если шахтное устройство имеет вертикальные стенки, формула принимает следующий вид:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \sqrt{T + k\sqrt{S}}. \quad (1.20)$$

Формулы (1.19) и (1.20) полностью аналогичны формулам (1.14) с учетом (1.15) и (1.13).

4 Линеаризованное уравнение абсолютных вертикальных колебаний жидкости в шахте судна при отсутствии аппарата в шахте:

$$(M_h + a_h)\ddot{q} + b_{s1}(\dot{q} - \dot{z}) + c_h q = F_{wh}, \quad (1.21)$$

где b_{s1} – линеаризованный коэффициент демпфирования относительных колебаний между жидкостью в шахте и судном, кг/м.

Передаточная функция абсолютных вертикальных колебаний жидкости в шахте по отношению к набегающим на судно волнам при отсутствии аппарата представлена в комплексном виде:

$$\frac{q}{a_w} = \frac{G_w + i\omega b_{s1} G_s}{-\omega^2 M + i\omega b_{s1} + c_h} = \frac{G_w - 2i\eta G_s \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2i\eta \frac{\omega}{\omega_0}}, \quad (1.22)$$

где a_w – амплитуда набегающих волн, м;

ω – частота набегающих волн, рад/с;

$G_s = z/a_w$ – передаточная функция (амплитуда и фаза) вертикальных колебаний судна;

$G_w = F_{wh}/a_w$ – передаточная функция возмущающей силы (амплитуда и фаза);

$M = M_h + a_h$ – полная масса водяного столба в шахте, кг;

η – безразмерный коэффициент демпфирования;

i – мнимая единица;

$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ – частота собственных колебаний жидкости в шахте судна, рад/с.

Передаточная функция возмущающей силы определяется по следующей формуле:

$$G_w = \frac{F_{wh}}{a_w} = \rho S (g e^{-k_w T} - \omega^2 k \sqrt{S} G_s), \quad (1.23)$$

где $k_w = \omega^2/g$ – волновое число.

При определении значений передаточных функций G_s и G_w введено дополнительное допущение о том, что возмущающая сила может быть оценена как для судна без шахты.

Амплитудно-частотная характеристика относительных колебаний жидкости в шахте судна по отношению к набегающим волнам при отсутствии аппарата определяется по формуле:

$$\frac{h}{a_w} = \left| \frac{q - z}{a_w} \right| = \left| \frac{q}{a_w} - G_s \right|. \quad (1.24)$$

5 Безразмерный коэффициент демпфирования (отнесенный к критическому значению демпфирования) для шахты без специальных устройств и аппарата равен $\eta = 0,08 - 0,09$. При таком значении амплитудно-частотная характеристика относительных колебаний жидкости в шахте судна может достигать значения 3.

Линеаризованный коэффициент демпфирования относительных колебаний между жидкостью в шахте и судном, кг/м, определяется по формуле:

$$b_{s1} = 2\eta\sqrt{c_h M}. \quad (1.25)$$

Коэффициент демпфирования относительных колебаний между жидкостью в шахте и судном, кг/м, может быть определен по формуле:

$$b_s = \frac{3\pi}{8} \omega h_a 2\eta\sqrt{c_h M}, \quad (1.26)$$

где h_a – амплитуда относительных колебаний жидкости в шахте.

6. Использование современных средств вычислительной гидромеханики не рекомендуется для анализа динамики шахтного устройства с крупным аппаратом (площадь горизонтального сечения аппарата занимает более 80 % площади горизонтального сечения шахты) и/или с аппаратом, динамика которого сильно отличается от динамики судна (например, при использовании системы управления аппарата внутри шахты или если объект подвешен на демпфере). Несмотря на то, что численное моделирование позволяет анализировать взаимодействие жидкости в шахте с аппаратом,

предсказания сил могут быть неточными, так как трудно сопоставить динамические характеристики судна на волнении и реакцию спускаемого объекта.

Помимо вышеуказанного в документе даны рекомендации к расчету сил, действующих на аппарат в шахтном устройстве на волнении, а также наглядно показана эффективность некоторых устройств, демпфирующих вертикальные колебания жидкости в шахте.

1.4 Анализ теоретических методов предсказания колебаний жидкости в шахте судна на волнении

Следующие уравнения могут быть применены для расчета амплитуд вертикальных колебаний жидкости в шахте судна на волнении:

1 Система из уравнений (1.2) и (1.3), представленная в работе А.Б. Аальбертса [47].

2 Уравнение (1.8) Ж. Матюсака [100].

3 Уравнения Правил Дет Норске Веритас [102]:

а) Уравнение (1.18) для абсолютных колебаний жидкости в шахте судна при наличии аппарата в шахте.

б) Уравнение (1.22) для передаточной функции абсолютных колебаний жидкости в шахте судна при отсутствии аппарата в шахте при использовании линеаризованного уравнения (1.21).

в) Уравнение (1.24) для амплитудно-частотной характеристики относительных колебаний жидкости в шахте судна при отсутствии аппарата.

Рассмотрим представленные уравнения подробнее.

Уравнение А.Б. Аальбертса для расчета колебаний жидкости в шахте судна – единственное уравнение, входящее в связывающую с вертикальной качкой судна систему. Это дает большой диапазон применения уравнения, поскольку остальные уравнения рассчитаны на шахты, размеры которых малы по сравнению с шириной судна.

Для решения системы уравнений А.Б. Аальбертса необходимо заранее вычислить следующие дополнительные величины, связанные с наличием шахты на судне: присоединенная масса a_h , линейный коэффициент демпфирования b_h , квадратичный коэффициент демпфирования b_2 , связывающий коэффициент присоединенной массы d_{hz} и связывающий коэффициент демпфирования e_{hz} .

Расчет присоединенной массы, вероятно, должен производиться по формуле, представленной в работе Фукуды [67].

Вычисления линейного и квадратичного коэффициентов демпфирования можно произвести по эмпирическим графикам, полученным А.Б. Аальбертсом при испытаниях, на которых представлены зависимости для шахты круглого сечения $b_h\sqrt{R} = f(R^3)$ и $b_2R = f(R^3)$. В ином случае для линейного коэффициента демпфирования можно воспользоваться результатами вычислений по потенциальной теории, так же как и для связывающих коэффициентов присоединенной массы d_{hz} и демпфирования e_{hz} . Следует отметить, что согласно данным А.Б. Аальбертса, связывающие коэффициенты хорошо вычисляются по потенциальной теории, тогда как значения линейного коэффициента демпфирования сильно занижены.

А.Б. Аальбертс в своей работе [47] показал хорошую применимость предложенных им уравнений, однако ввиду отсутствия рекомендаций по определению коэффициентов, входящих в уравнения, данный подход не рекомендуется к использованию.

Ж. Матюсак в работе [100] модернизировал уравнение А.Б. Аальбертса в частный вид, в котором принимаются следующие допущения:

- 1 Поток жидкости невязкий.
- 2 Рассматриваются только вертикальные колебания жидкости, не зависящие от других видов колебаний.
- 3 Дифракция и излучение давлений от корпуса судна не учитываются.
- 4 Набегающие волны существенно длиннее ширины судна.

При этом уравнение для вертикальных колебаний судна уже не рассматривается, поскольку считается, что влияние шахты на динамические характеристики судна незначительно.

Ж. Матюсак серьезно преобразовал демпфирующую часть сил, зависящую от скорости перемещения жидкости в шахте судна, а также убрал влияние связывающих коэффициентов присоединенной массы и демпфирования и демпфирующих сил, вызванных перемещениями судна.

По результатам преобразований уравнение стало проще, так как количество неизвестных параметров уменьшилось до одного – присоединенная масса шахты a_h .

Для присоединенной массы шахты была предложена следующая зависимость:

$$a_h = \rho S \frac{2}{3} R C_A, \quad (1.27)$$

где C_A – коэффициент присоединенной массы шахты;

R – радиус шахты, м, в случае шахты прямоугольного сечения $R = \sqrt{bl/\pi}$, где b и l – длина и ширина шахты, м;

S – площадь горизонтального сечения шахты на уровне свободной поверхности, м².

Рекомендации по расчету коэффициента C_A отсутствуют, однако в верификационных расчетах значение принято $C_A = 1$.

В работе [100] также представлены результаты верификации преобразованного уравнения на примере испытаний модели неуказанного морского объекта с осадкой $T = 0,3$ м с шахтным устройством радиусом $R = 0,11$ м на волнении. При этом модель была зафиксирована и исследовались только перемещения жидкости в шахте. В этом случае уравнение колебаний жидкости в шахте использовалось в следующем виде:

$$\ddot{h} \left[T + h + \frac{2}{3} R C_A \right] + \dot{h} |\dot{h}| + \frac{1}{2} (\dot{h})^2 + gh = \frac{1}{\rho} p_{FK}. \quad (1.28)$$

Графики амплитудно-частотной характеристики, полученные по результатам вычислений формуле (1.28) методом Рунге-Кутты 4 порядка и по результатам эксперимента, представлены на рисунке 1.5. На рисунке 1.5 введено новое обозначение: λ – длина волны.

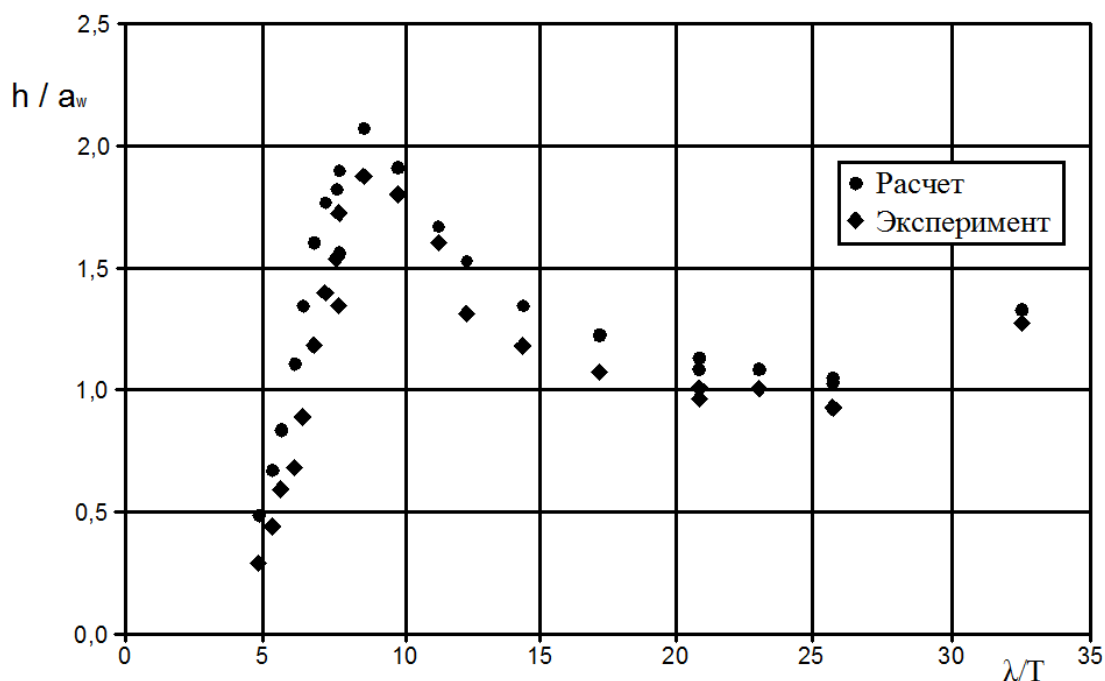


Рисунок 1.5 – Результаты модельных испытаний и расчетов вертикальных колебаний жидкости в шахте зафиксированного судна [6]

Согласно данным, представленным на рисунке 1.5, представленное уравнение хорошо описывает вертикальные колебания жидкости в шахте некачающегося судна.

Однако при самостоятельной попытке проверить достоверность представленных результатов, была обнаружена ярко выраженная нелинейность результатов, представленная зависимостью от высоты набегающего волнения. Результаты вычислений при различных значениях крутизны волнения (отношения высоты волны к ее длине), а также основные точки, полученные по результатам эксперимента [100], представлены на рисунке 1.6.

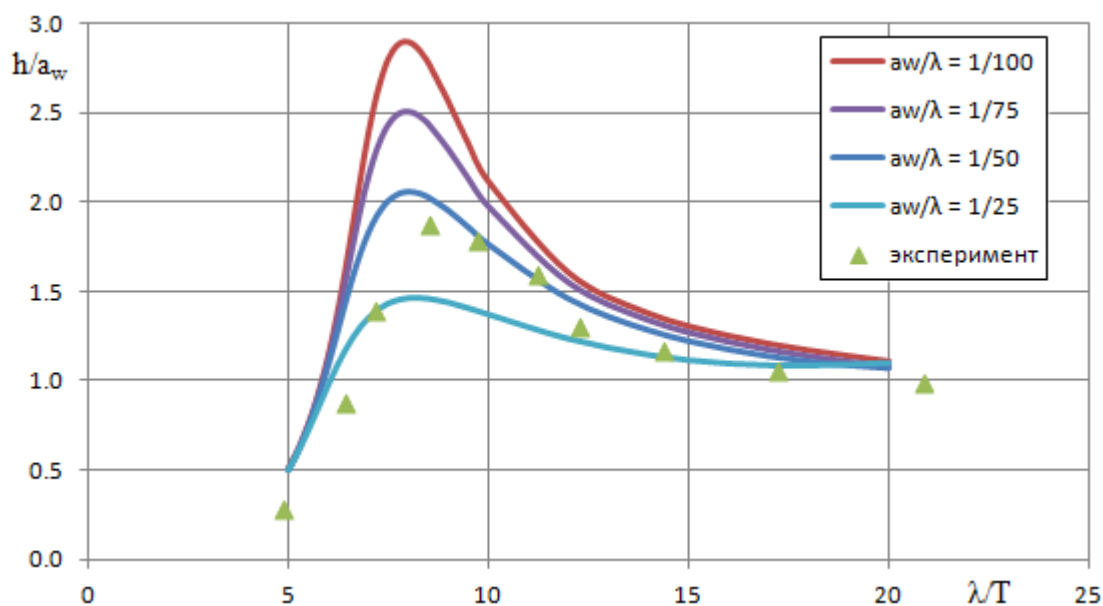


Рисунок 1.6 – Результаты вычисления вертикальных колебаний жидкости в шахте судна в зависимости от значения крутизны набегающего регулярного волнения

После обработки результатов, представленных на рисунке 1.6, было заключено, что нелинейность возникает из-за наличия в уравнении квадратичного демпфирования с линейными коэффициентами и учета колебаний жидкости при расчете полной массы водяного столба. Последний фактор имеет очень слабое влияние.

При дальнейшем анализе была сделана попытка привести уравнение к линейному виду путем преобразования квадратичного демпфирования в линейное:

$$\left[T + \frac{2}{3} RC_A \right] \ddot{h} + \frac{b_{s1}}{\rho S} \dot{h} + gh = \frac{1}{\rho} p_{FK}, \quad (1.29)$$

где b_{s1} – линеаризованный коэффициент демпфирования относительных колебаний, кг/м.

Тогда при дальнейших преобразованиях получаем уравнение для амплитудно-частотной характеристики относительных вертикальных колебаний жидкости в шахте некачающегося судна:

$$\left(\frac{h}{a_w} \right)_f = \frac{\omega_0^2 e^{-k_w T}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4b_{s2}^2 \omega^2}}, \quad (1.30)$$

где $2b_{s2} = \frac{b_{s1}}{\rho S(T+a_h)}$ – удвоенный относительный линейризованный коэффициент демпфирования.

Относительный линейризованный коэффициент демпфирования b_{s2} связан с безразмерным коэффициентом демпфирования η , представленным в Правилах [102], следующим уравнением:

$$b_{s2} = \eta \omega_0. \quad (1.31)$$

На рисунке 1.7 представлена амплитудно-частотная характеристика при подборе относительного линейризованного коэффициента демпфирования $b_{s2} = 0,65$ ($\eta \approx 0,12$). Значение безразмерного коэффициента демпфирования η несколько выше рекомендованного Правилами [102], что может быть связано с отсутствием колебаний судна. На рисунке 1.7 дополнительно представлены основные точки, полученные по результатам эксперимента [100].

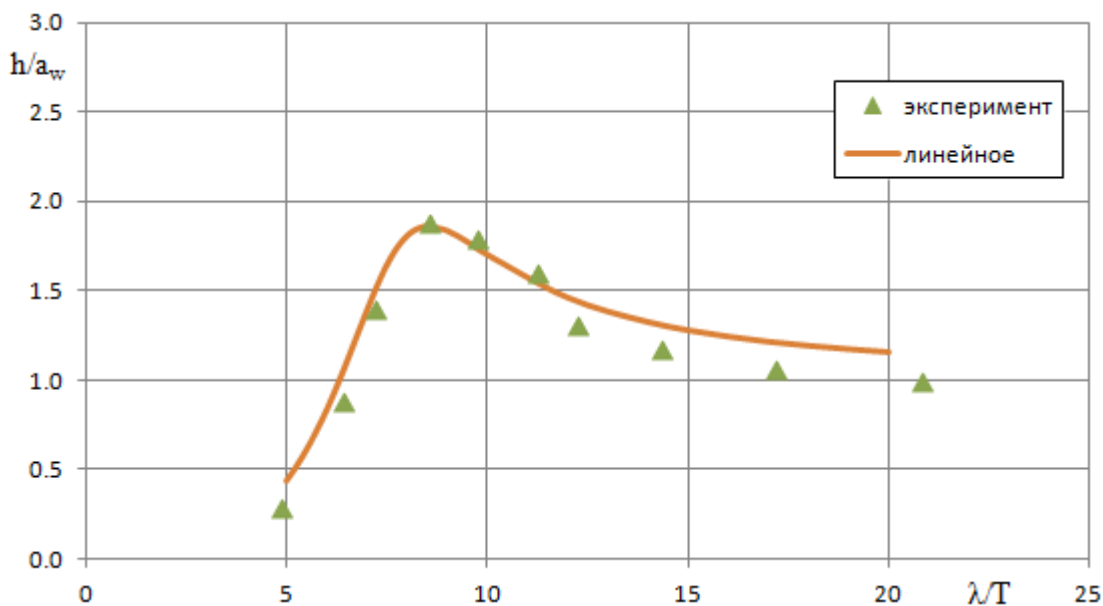


Рисунок 1.7 – Результаты вычисления вертикальных колебаний жидкости в шахте некачающегося судна при использовании линейризованного уравнения колебаний

В случае линейризации уравнения относительных вертикальных колебаний качающегося судна (1.8) получен следующий вид:

$$(\ddot{h} + \ddot{z})[T + a_h] + \frac{b_{s1}}{\rho S} \dot{h} + g(h + z) = \frac{1}{\rho} p_{FK}, \quad (1.32)$$

$$\ddot{h} + \ddot{z} + 2b_{s2}\dot{h} + \omega_0^2(h + z) = \omega_0^2 e^{-k_w T} a_w \sin \omega t, \quad (1.33)$$

$$\ddot{h} + 2b_{s2}\dot{h} + \omega_0^2 h = \omega_0^2 e^{-k_w T} a_w \sin \omega t - \ddot{z} - \omega_0^2 z. \quad (1.34)$$

В целом можно заключить, что в уравнениях (1.8) и (1.28) коэффициенты квадратичного демпфирования, не зависящие от частоты волнения и колебаний жидкости в шахте, приняты неверно.

Основное уравнение из Правил [102] описывает абсолютные колебания жидкости в шахте судна. Считается, что колебания судна при этом не зависят от наличия шахтного устройства. При отсутствии аппарата в шахтном устройстве линеаризованное уравнение представлено в виде уравнения (1.21).

Здесь следует обратить внимание на то, как в дальнейшем представляется передаточная функция колебаний судна. Согласно Правилам [102] принято следующее обозначение:

$$z = G_s a_w. \quad (1.35)$$

При этом передаточная функция учитывает как амплитуду колебаний (амплитудно-частотную характеристику), так и фазовый сдвиг. Такое представление возможно только при использовании комплексной передаточной функции [53]:

$$G_s = RAO_z e^{-i\delta_z}, \quad (1.36)$$

где $RAO_z = |G_s|$ – амплитудно-частотная характеристика вертикальных колебаний судна;

$\delta_z = \arg(G_s)$ – фазово-частотная характеристика вертикальных колебаний судна;

i – мнимая единица.

Действительно, в отечественной литературе часто встречается определение, что амплитудно-частотная характеристика – это модуль передаточной функции [4].

Представленная форма передаточной функции удобна тем, что в ней отсутствуют зависимости от времени, и она полностью описывает связь между набегающим волнением и колебаниями судна.

Принимая во внимание представленный вид передаточной функции вертикальных колебаний судна, уравнение (1.22) передаточной функции абсолютных вертикальных колебаний жидкости в шахте судна также имеет комплексный вид.

Если судно зафиксировано (не имеет колебаний), амплитудно-частотная характеристика вертикальных колебаний жидкости в шахте судна может быть описана следующим уравнением:

$$\left(\frac{h}{a_w}\right)_f = \left| \frac{G_w}{-\omega^2 M + i\omega b_{s1} + c_h} \right| = \frac{\omega_0^2 e^{-k_w T}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4b_{s2}^2 \omega^2}}, \quad (1.37)$$

где $G_w = \frac{F_{wh}}{a_w} = \rho g S e^{-k_w T}$ – передаточная функция возмущающей силы при отсутствии колебаний судна.

Представленное уравнение полностью идентично уравнению (1.30).

Если судно не зафиксировано, то есть имеет вертикальные колебания, то амплитудно-частотная характеристика относительных вертикальных колебаний жидкости в шахте будет определяться по формуле (1.24):

$$\frac{h}{a_w} = \left| \frac{q - z}{a_w} \right| = \left| \frac{q}{a_w} - G_s \right| = \left| \frac{G_w - G_s \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2i\eta \frac{\omega}{\omega_0}} \right|. \quad (1.37)$$

При обратном преобразовании уравнения амплитудно-частотной характеристики в линейризованное дифференциальное уравнение относительных вертикальных колебаний жидкости в шахте судна получаем следующее:

$$\ddot{h} + 2b_{s2}\dot{h} + \omega_0^2 h = F_{wh}/M - \ddot{z} - \omega_0^2 z. \quad (1.38)$$

Принимая возмущающую силу равной

$$F_{wh} = \rho g S e^{-k_w T} a_w \sin \omega t, \quad (1.39)$$

получаем уравнение (1.34), выведенное ранее:

$$\ddot{h} + 2b_{s2}\dot{h} + \omega_0^2 h = \omega_0^2 e^{-k_w T} a_w \sin \omega t - \ddot{z} - \omega_0^2 z.$$

Однако в Правилах [102] показано, что возмущающая сила включает в себя не только силы от давления Фруда-Крылова, но и силу, вызванную колебаниями судна:

$$F_{wh} = \rho g S e^{-k_w T} a_w \sin \omega t + \rho S a_h \ddot{z}. \quad (1.40)$$

В этом случае уравнение относительных колебаний жидкости в шахте судна на волнении принимает итоговый вид:

$$\ddot{h} + 2b_{s2}\dot{h} + \omega_0^2 h = \omega_0^2 e^{-k_w T} a_w \sin \omega t - \ddot{z}(1 - \bar{a}_h) - \omega_0^2 z, \quad (1.41)$$

где $\bar{a}_h = \frac{a_h}{M} = \frac{k\sqrt{S}}{T+k\sqrt{S}}$ – коэффициент присоединенной массы шахты.

Здесь можно заключить, что линеаризованный вид уравнений относительных колебаний жидкости в шахте судна, представленных в работе Ж.Матюсака [100] и в Правилах [102], одинаковый, за исключением возмущающей силы.

Проведем оценку влияния части возмущающей силы, вызванной колебаниями судна, на амплитудно-частотные характеристики относительных и абсолютных колебаний жидкости в шахте судна. На рисунке 1.8 представлены амплитудно-частотные характеристики с учетом и без учета части возмущающей силы, вызванной колебаниями судна (поправки), условного морского объекта с передаточной функцией вертикальной качки, показанной на рисунке 1.9. В расчетах приняты осадка $T = 0,3$ м, шахта круглого горизонтального сечения радиусом $R = 0,11$ м с вертикальными стенками, безразмерный коэффициент демпфирования $\eta = 0,09$. Здесь следует обратить внимание, что амплитудно-частотная характеристика абсолютных колебаний без учета поправки зависит только от параметров шахты и волнения, и никак не связана с формой корпуса и качкой судна.

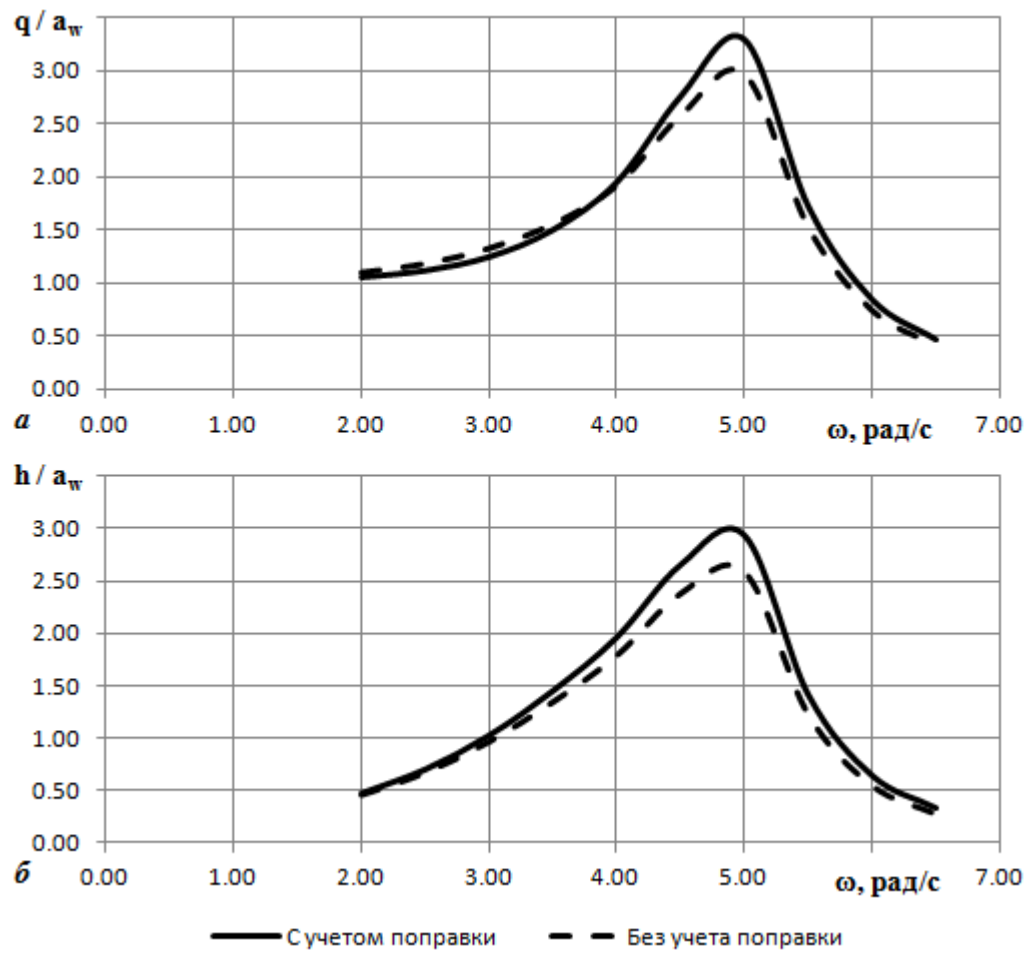


Рисунок 1.8 – Амплитудно-частотные характеристики колебаний жидкости в шахте судна: а – Абсолютных колебаний; б – Относительных колебаний

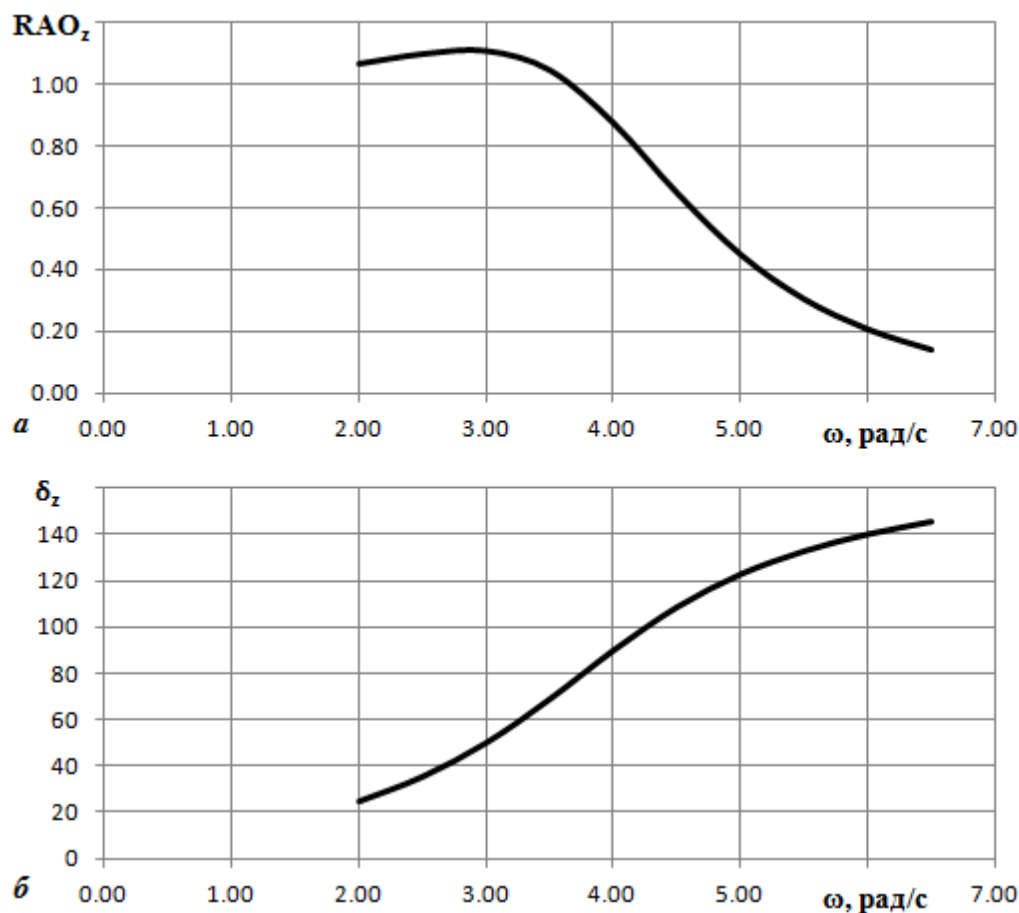


Рисунок 1.9 – Передаточная функция вертикальных колебаний условного морского объекта, принятая для анализа амплитудно-частотной характеристики колебаний жидкости в шахте судна: а – Амплитудно-частотная характеристика, б – Фазово-частотная характеристика

Анализируя данные, представленные на рисунке 1.8, следует заключить, что амплитудно-частотная характеристика без учета поправки имеет заниженные значения, поэтому учет колебаний судна при расчете возмущающей силы необходим.

По результатам анализа теоретических методов предсказания колебаний жидкости в шахте судна на волнении можно заключить, что Правила Дет Норске Веритас [102] являются наиболее обширными, точными и полными, и могут быть рекомендованы для предварительных оценок динамики жидкости в шахте при выполнении операций в море.

Проведем анализ влияния параметров вертикальной качки судна (значения амплитудно-частотной характеристики и фазового сдвига) на значение пика амплитудно-частотной характеристики колебаний жидкости в

шахте судна. Для анализа были проведены расчеты шахты круглого сечения радиусом $R = 0,11$ м при осадке судна $T = 0,3$ м при собственной частоте колебаний жидкости в шахте равной $\omega_0 = 4,992$ рад/с. По результатам анализа построены графики, представленные на рисунке 1.10. На графиках представлены зависимости амплитудно-частотной характеристики колебаний жидкости в шахте судна в зависимости от значения фазового сдвига вертикальной качки, линии различных цветов соответствуют различным значениям амплитудно-частотной характеристики качки.

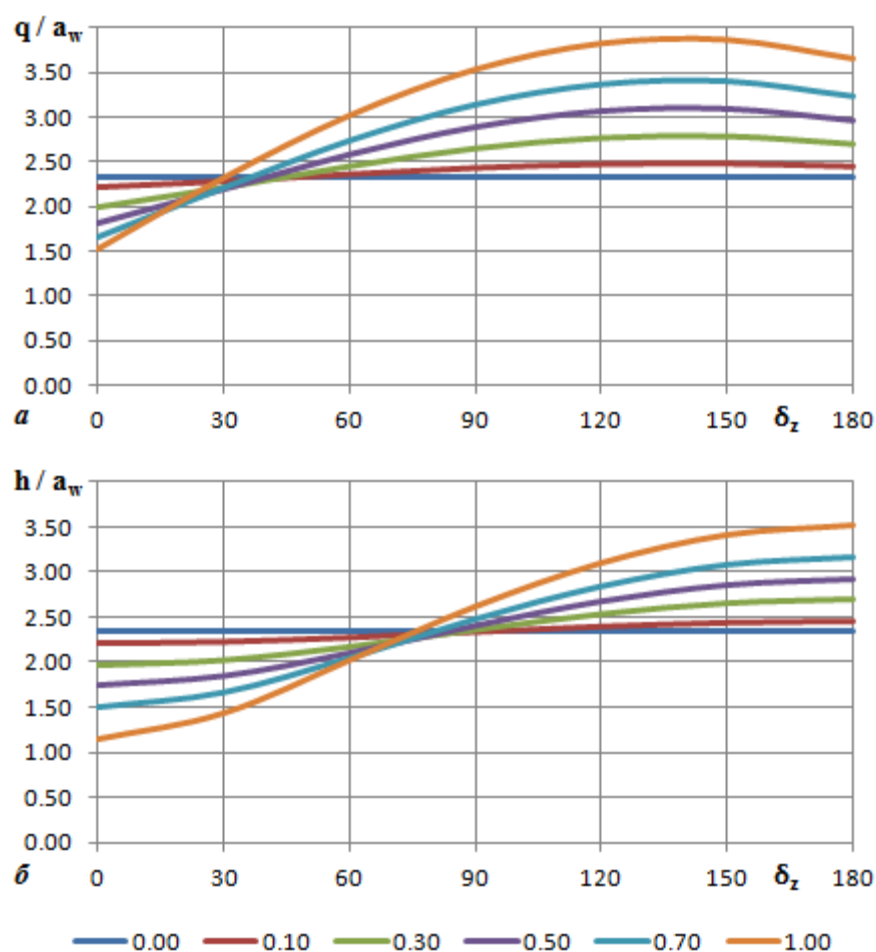


Рисунок 1.10 – Влияние параметров вертикальной качки судна на значение пика амплитудно-частотных характеристик колебаний жидкости в шахте: а – Абсолютных колебаний; б – Относительных колебаний

Анализируя данные, представленные на рисунке 1.10, можно сделать следующие выводы:

1 Значения амплитудно-частотной характеристики вертикальной качки обеспечивают диапазон значений амплитудно-частотных характеристик колебаний жидкости в шахте. При этом значения колеблются вокруг фиксированного значения, соответствующего амплитудно-частотной характеристике колебаний жидкости в шахте некачающегося судна. При уменьшении значения амплитудно-частотной характеристики вертикальной качки судна, диапазон значений амплитудно-частотной характеристики колебаний жидкости в шахте уменьшается.

2 Значение фазового сдвига вертикальной качки судна играет определяющую роль при определении значения амплитудно-частотных характеристик колебаний жидкости в шахте судна.

Следует акцентировать внимание на то, что в Правилах принят ряд допущений, таких как малость размеров шахты по сравнению с шириной судна (при этом критерий малости не определен) и учет только вертикальных сил на стенках шахты. Дополнительно можно отметить, что представленные уравнения никак не связаны с размерами и формой корпуса, не производится учет месторасположения шахтного устройства, а также нет учета влияния наличия шахты на колебания самого судна.

Из представленного выше формируются задачи диссертационного исследования:

- Анализ влияния шахтного устройства различных размеров и месторасположения на характеристики качки судна;
- Анализ динамики жидкости в шахте судна на волнении;
- Разработка практических рекомендаций к предсказанию характеристик качки судна, оборудованного шахтным устройством.

1.5 Выводы к главе 1

В настоящей главе произведен анализ зарубежной и отечественной литературы, посвященной динамике судов с шахтами, а также исследованиям колебаний жидкости в шахте судна на волнении. Показано, что данная тематика является актуальной.

Представлены рекомендации классификационных обществ Бюро Веритас и Дет Норске Веритас к решению данной задачи. Правила Бюро Веритас акцентируют внимание только на вероятность возникновения резонанса колебаний жидкости в шахте, не рассчитывая при этом амплитуды этих колебаний. Руководство Дет Норске Веритас более полное, позволяющее сделать полноценную оценку динамики колебаний жидкости в шахте при осуществлении спуско-подъемных операций в море.

Автором были проанализированы три уравнения, описывающие колебания жидкости в шахте судна на волнении. Только уравнение (1.2) А.Б. Аальбертса [47] связано в систему с уравнением вертикальной качки судна. Уравнения (1.8) из работы [100] и (1.24) из рекомендаций Дет Норске Веритас [102] являются независимыми при условии выполнения принятых допущений, таких как малость размеров шахты, учет только вертикальных колебаний жидкости в шахте и учет только вертикальных составляющих сил, действующих на поток жидкости в шахте.

По результатам анализа уравнение (1.2) не было рекомендовано для использования ввиду отсутствия указаний по определению входящих в уравнение коэффициентов.

Уравнение (1.8) было проанализировано в нелинейном виде, в результате чего было показано, что коэффициенты квадратичного демпфирования, не зависящие от частоты волнения и колебаний жидкости в шахте, приняты неверно. Также было представлено, что при линеаризации этот недостаток нивелируется.

Было показано, что в линеаризованном виде уравнения (1.8) и (1.24) одинаковы за исключением учета возмущающей части силы, вызванной колебаниями судна, которая представлена в Правилах Дет Норске Веритас [102]. Было представлено, что указанную составляющую возмущающей силы необходимо учитывать при расчетах.

По результатам, представленным в главе 1, можно заключить, что уравнения и рекомендации, представленные в Правилах Дет Норске Веритас [102] являются наиболее полными и точными, и могут быть рекомендованы для предварительных оценок динамики жидкости в открытой шахте судна на волнении при выполнении морских операций.

Однако в Правилах [102] принят ряд допущений, и представленные уравнения никак не связаны с размерами и формой корпуса, не произведен учет месторасположения шахтного устройства, а также нет учета влияния наличия шахты на колебания самого судна.

Выполненный анализ существующих к настоящему времени работ и классификационных правил позволяет сделать вывод о необходимости развития исследований в области динамики судна, оборудованного шахтным устройством, по следующим направлениям:

- Анализ влияния шахтного устройства различных размеров и месторасположения на характеристики качки судна;
- Анализ динамики жидкости в шахте судна на волнении;
- Разработка практических рекомендаций к предсказанию характеристик качки судна, оборудованного шахтным устройством.

2 Определение гидродинамических характеристик судна при качке с помощью современных средств вычислительной гидромеханики

2.1 Общие сведения

Для качающегося судна можно вывести уравнение колебаний на основании решения уравнения динамики твердого тела, имеющего шесть степеней свободы. Предполагая, что центр тяжести корабля находится в начале координат, колебания являются линейными гармониками, пренебрегая квадратичными членами и вводя предположение о малости амплитуд колебаний можно записать следующее уравнение качки корабля [54]:

$$F_j(t) = \sum_{k=1}^6 M_{jk} \ddot{\eta}_k, \quad (2.1)$$

где j – индекс сил ($j = 1...6$), k – индекс колебаний ($k = 1...6$). Здесь η_1 , η_2 и $\eta_3 = z = \zeta$ обозначают линейные колебания относительно осей x , y и z соответственно и называются продольно-горизонтальными, поперечно-горизонтальными и вертикальными колебаниями соответственно. Составляющие $\eta_4 = \theta$, $\eta_5 = \psi$ и η_6 обозначают вращательные движения вокруг осей x , y и z соответственно и называются бортовыми и килевыми колебаниями и рысканием.

Составляющая M_{jk} обозначает инерционную матрицу.

Составляющая $F_j(t)$ обозначает матрицу внешних сил, которая представляется как результат действия всех сил разной природы вместе с учетом их взаимного влияния друг на друга. Вводя предположение о малости амплитуд колебаний, появляется возможность линеаризовать матрицу внешних сил и разделить на следующие составляющие: $F_{Ej}(t)$ - возмущающие волновые силы, $F_{HDj}(t)$ - гидродинамические силы, $F_{HSj}(t)$ - гидростатические силы.

Тогда общее уравнение колебаний судна будет выглядеть следующим образом:

$$F_{Ej}(t) = \sum_{k=1}^6 M_{jk} \ddot{\eta}_k - F_{HDj}(t) - F_{HSj}(t). \quad (2.2)$$

Гидродинамические и гидростатические силы можно представить следующим образом:

$$F_{HDj} = - \sum_{k=1}^6 (A_{jk} \ddot{\eta}_k + B_{jk} \dot{\eta}_k), \quad (2.3)$$

$$F_{SDj} = - \sum_{k=1}^6 C_{jk} \eta_k, \quad (2.4)$$

где A_{jk} – матрица присоединенных масс, B_{jk} – матрица демпфирующих сил и C_{jk} – матрица восстанавливающих сил.

В этом случае общее уравнение колебаний можно представить в следующем виде:

$$F_{Ej}(t) = \sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk}) \ddot{\eta}_k + B_{jk} \dot{\eta}_k + C_{jk} \eta_k]. \quad (2.5)$$

Возмущающие силы $F_{Ej}(t)$ можно разделить на две составляющие: главная часть $F_{FKj}(t)$ (или сила Фруда-Крылова) и дополнительная $F_{ADj}(t)$ (или дифракционная сила). Главная составляющая возмущающих сил представляет собой силы, возникающие на судне, не имеющем степеней свободы, и пропорциональна амплитуде набегающей волны. Дифракционная часть представляет собой дополнительные силы, возникающие вследствие присутствия качающегося судна на пути у набегающей волны, и пропорциональна амплитудам скорости и ускорения набегающей волны.

Таким образом, уравнение колебаний судна принимает следующий вид:

$$F_{FKj}(t) + F_{ADj}(t) = \sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk}) \ddot{\eta}_k + B_{jk} \dot{\eta}_k + C_{jk} \eta_k]. \quad (2.5)$$

Гидродинамическими характеристиками судна будем называть составляющие уравнения A_{jk} и B_{jk} .

Определению гидродинамических характеристик и возмущающих сил, действующих на судно, посвящено большое число работ, например [51, 52, 64, 66, 74, 78, 79, 89, 93, 94, 120, 126, 132], поскольку именно они определяют мореходность морского объекта.

2.2 Описание экспериментальных методов свободных и вынужденных колебаний

При использовании современных средств вычислительной гидромеханики прибегают к численному моделированию экспериментальных подходов, поэтому необходимо знать как проводятся эксперименты по определению характеристик судна при качке. Рассмотрим наиболее распространенные методы при модельных испытаниях – методы свободных и вынужденных колебаний.

Метод свободных колебаний используется при изучении качки на тихой воде с целью определения периода свободных затухающих бортовых колебаний, коэффициента демпфирования бортовой качки и присоединенного момента инерции.

Для определения искомых величин методом свободных колебаний спущенная на воду модель наклоняется экспериментатором на некоторый угол, затем отпускается, и начинает совершать свободные затухающие колебания, которые записываются с помощью кренографа. Вид получаемой осциллограммы затухающих колебаний представлен на рисунке 2.1. При этом бортовая качка описывается любым из следующих уравнений:

$$(M_{44} + A_{44})\ddot{\eta}_4 + B_{44}\dot{\eta}_4 + C_{44}\eta_4 = 0, \quad (2.6)$$

$$(M_{44} + A_{44})\ddot{\eta}_4 + B_{44}\dot{\eta}_4 + Dh_0\eta_4 = 0, \quad (2.7)$$

$$\ddot{\eta}_4 + 2\nu_4\dot{\eta}_4 + \omega_4^2\eta_4 = 0, \quad (2.8)$$

где D – весовое водоизмещение судна,

h_0 – начальная поперечная метацентрическая высота,

$\nu_4 = \frac{B_{44}}{2(M_{44} + A_{44})}$ – относительный коэффициент демпфирования бортовой

качки,

$\omega_4 = \sqrt{\frac{Dh_0}{(M_{44} + A_{44})}}$ – собственная частота бортовой качки.

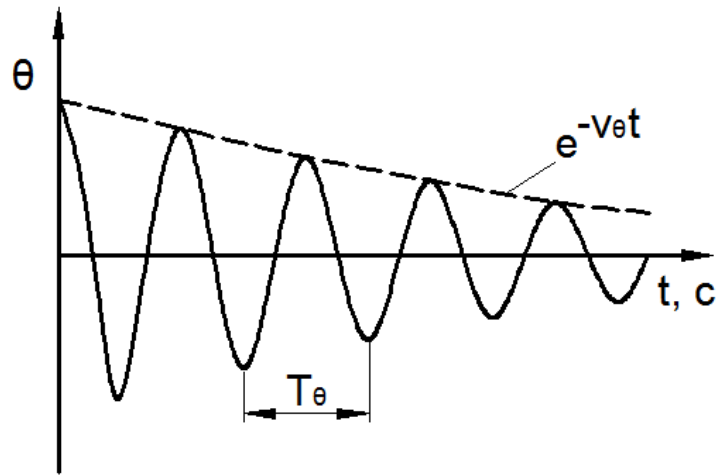


Рисунок 2.1 – Осциллограмма затухающих бортовых колебаний

Решение уравнения (2.8) при начальных условиях $\eta_4 = \eta_{40}$, $\dot{\eta}_4 = 0$ при $t = 0$ имеет вид

$$\eta_4 = \eta_{40} e^{-v_4 t} \cos \omega'_4 t, \quad (2.9)$$

где $\omega'_4 = \sqrt{\omega_4^2 - v_4^2}$. Поскольку $\omega_4^2 \gg v_4^2$, обычно принимают $\omega'_4 = \omega_4 = 2\pi/T_4$, где T_4 – период затухающих (собственных) колебаний.

Суммарный момент инерции связан с периодом затухающих колебаний следующим соотношением:

$$M_{44} + A_{44} = Dh_0 \tau_4^2 / (4\pi^2). \quad (2.10)$$

Вычитая из полученного значения величину момента инерции модели (определенную теоретически или экспериментально при тарировке модели), вычисляется присоединенный момент инерции A_{44} .

При линейном законе сопротивления, то есть при $v_4 = \text{const}$, отношение двух последовательных амплитуд равно:

$$\frac{\eta_{4k}}{\eta_{4k+1}} = e^{v_4 \tau_4 / 2}, \quad (2.11)$$

Откуда

$$\ln \eta_{4k} - \ln \eta_{4k+1} = v_4 \tau_4 / 2. \quad (2.12)$$

Величина $v_4 \tau_4 / 2$ определяет убывание натуральных логарифмов двух последовательных амплитуд и называется логарифмическим декрементом.

Разлагая $e^{v_4\tau_4/2}$ в ряд, ограничиваясь двумя первыми членами разложения и вводя понятие безразмерного коэффициента демпфирования бортовой качки $\mu_4 = v_4/\omega_4$, получаем следующую формулу:

$$\mu_4 = \Delta\eta_{4\tau/2}/(\pi\eta_{4k}), \quad (2.13)$$

где $\Delta\eta_{4\tau/2} = \eta_{4k} - \eta_{4k+1}$ – убыль амплитуд за полупериод колебаний, η_{4k} – амплитуда в начале рассматриваемого полупериода.

По кривой затухающих свободных колебаний можно определить коэффициенты демпфирования и при более общих законах (квадратичном, двучленном и другие). При выполнении практических расчетов бортовой качки чаще всего пользуются безразмерным линеаризованным коэффициентом демпфирования, который вычисляется по вышеприведенной формуле, но рассматривают как функцию амплитуды качки η_{4k} или амплитуды угловой скорости $\dot{\eta}_{4k}$. Поскольку метод свободных колебаний не позволяет определить коэффициенты демпфирования при частотах, отличных от собственных, принимают $\dot{\eta}_{4k} = \eta_{4k}\omega_4$.

При большом демпфировании свободные колебания быстро затухают и их обработка сопровождается большими погрешностями. Исходя из этого при моделировании вертикальных и килевых колебаний, а также бортовой качки моделей, имеющих сложные обводы и большое количество выступающих частей, единственно возможным экспериментальным методом является метод вынужденных колебаний.

Метод вынужденных колебаний на тихой воде может быть реализован двумя способами:

1 С помощью раскачивающего устройства, устанавливаемого на модели, которое создает возмущающий момент, изменяющийся по гармоническому закону, данный метод иногда называют методом вынужденных моментов [110];

2 С помощью колебательной системы, например, платформы Гью-Стюарта, имеющей шесть степеней свободы, задающей модели колебания по заданному гармоническому закону [90].

В первом случае заданными величинами являются частота колебаний и возмущающий момент, искомыми – амплитуда колебаний. Во втором случае заданными считаются частота и амплитуда колебаний, искомыми – возмущающий момент. После обработки зависимостей искоемых величин определяются значения присоединенных масс и моментов инерции и демпфирующих сил и моментов [4, 90].

Рисунок 2.2 графически показывает разницу между осциллограммами и методикой проведения представленных методов [76].

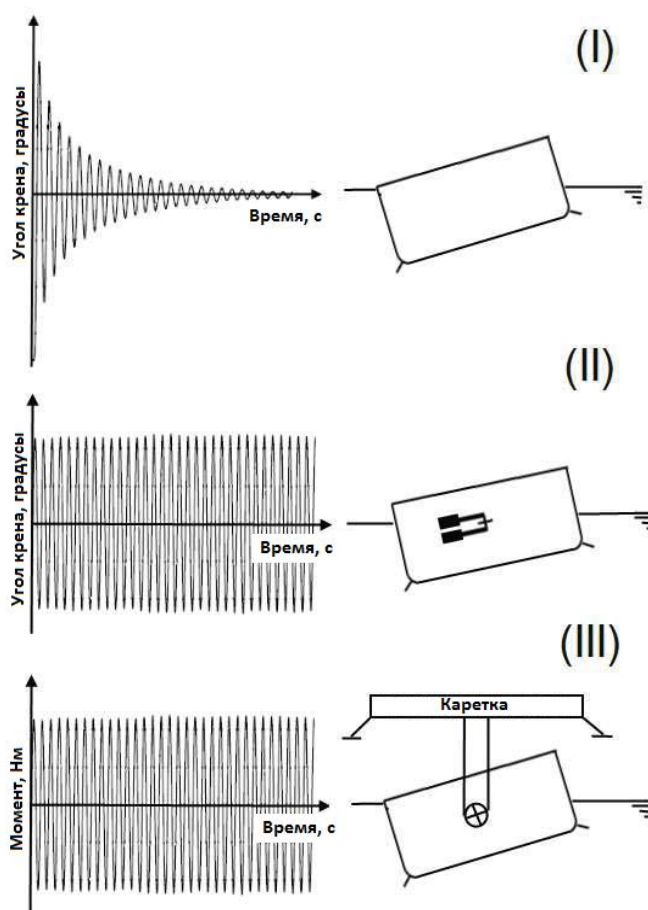


Рисунок 2.2 – Методы изучения гидродинамических сил судна при качке: I – Метод свободных колебаний, II – Метод вынужденных колебаний с помощью раскачивающего устройства, III – Метод вынужденных колебаний с помощью колебательной системы

При реализации метода вынужденных колебаний с помощью колебательной системы амплитуда качки описывается следующим уравнением:

$$\eta_k(t) = \eta_{k0} \sin \omega t. \quad (2.14)$$

В этом случае возмущающие силы будут также подчинены гармоническому закону:

$$F_{Ej}(t) = F_{Ej0} \sin(\omega t + \varepsilon_{F_{Ej}}). \quad (2.15)$$

Уравнение качки преобразуется в следующий вид:

$$F_{Ej0} \sin(\omega t + \varepsilon_{F_{Ej}}) = \sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk})\ddot{\eta}_k + B_{jk}\dot{\eta}_k + C_{jk}\eta_k]. \quad (2.16)$$

Учитывая, что колебания модели заданы уравнением (2.14) получаем:

$$\begin{aligned} & F_{Ej0} \cos \varepsilon_{F_{Ej}} \sin \omega t + F_{Ej0} \sin \varepsilon_{F_{Ej}} \cos \omega t \\ &= \sum_{k=1}^6 [\eta_{k0} \{-(M_{jk} + A_{jk})\omega^2 + C_{jk}\} \sin \omega t \\ &+ \eta_{k0} B_{jk} \omega \cos \omega t], \end{aligned} \quad (2.17)$$

откуда имеем:

$$\text{при } \omega t = \pi/2: \quad A_{jk} = \frac{C_{jk} - \frac{F_{Ej0}}{\eta_{k0}} \cos \varepsilon_{F_{Ej}}}{\omega^2} - M_{jk}, \quad (2.18)$$

$$\text{при } \omega t = 0: \quad B_{jk} = \frac{\frac{F_{Ej0}}{\eta_{k0}} \sin \varepsilon_{F_{Ej}}}{\omega}. \quad (2.19)$$

При статических испытаниях можно получить и значения восстанавливающих сил:

$$\text{при } \dot{\eta}_k(t) = 0 \text{ и } \ddot{\eta}_k(t) = 0: \quad C_{jk} = \frac{F_{Ej}}{\eta_k}. \quad (2.20)$$

Значения возмущающей силы, находящейся в фазе или в противофазе с колебаниями, можно найти интегрированием всего количества N периодов T измеренного сигнала $F_{Ej}(t)$, умноженного на $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$ соответственно:

$$F_{Ej0} \cos \varepsilon_{F_{Ej}} = \frac{2}{NT} \int_0^{NT} F_{Ej}(t) \cos \omega t dt, \quad (2.21)$$

$$F_{Ej0} \sin \varepsilon_{F_{Ej}} = \frac{2}{NT} \int_0^{NT} F_{Ej}(t) \sin \omega t dt. \quad (2.22)$$

Данные формулы представляют собой ничто иное, как компоненты первого порядка преобразования Фурье сигнала $F_{Ej}(t)$ [90].

В таблице 2.1 представлено сравнение рассмотренных методов [76].

Таблица 2.1 – Сравнение экспериментальных методов определения гидродинамических характеристик судна при качке

Характеристика	Метод свободных колебаний	Метод вынужденных колебаний с помощью раскачивающего устройства	Метод вынужденных колебаний с помощью колебательной системы
Исследование бортовой качки	Да	Да	Да
Исследование продольной качки	Нет	Нет	Да
Реальные колебания судна	Да	Да	Нет / Да ¹
Стабильность колебаний	Нет	Да	Да
Высокие значения амплитуд	Нет ²	Да	Да
Различные значения частот	Нет	Да	Да
Наличие скорости хода	Нет ²	Да	Да
Временные и экономические затраты	Низкие	Средние	Высокие
Возможность численного моделирования	Да	Нет	Да

Примечания:

1 Нет для бортовой качки, так как не соблюдается равнообъемность наклонов, да для продольной качки;

2 Сопровождается большими погрешностями.

Метод вынужденных колебаний применяют не только при испытаниях на тихой воде, но и на волнении. В этом случае раскачивающим устройством служит само регулярное волнение, создаваемое волнопродуктором. Основной целью таких испытаний является определение амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик различных видов качки [4].

2.3 Подготовка численного моделирования

В качестве программного продукта реализации современных средств вычислительной гидромеханики выбран комплекс OpenFOAM. Данный комплекс является свободно распространяемым и позволяет решать широкий спектр задач, не уступая при этом таким коммерческим продуктам как Ansys Fluent и Star-CCM+.

2.3.1 Описание пакета OpenFOAM

OpenFOAM (англ. – Open Field Operation And Manipulation) – это пакет с открытым исходным кодом на языке программирования C ++, созданный для проведения численного моделирования проблем механики твердого тела и жидкости. Задачи генерации сетки, дискретизации уравнений и матричных манипуляций могут быть выполнены с использованием приложений, которые включены в «сборку» исходных кодов и библиотек OpenFOAM. В основном они написаны с использованием метода объектно-ориентированного программирования, что значительно упрощает манипуляции. Пакет позволяет подготавливать огромное количество пользовательских приложений, которые решают рассматриваемую проблему [50].

OpenFOAM был создан Генри Уэллером в 1989 году под названием «FOAM» и был выпущен с открытым исходным кодом как «OpenFOAM» Генри Уэллера, Криса Гринсфилда и Маттиса Янссена в декабре 2004 года. С тех пор OpenFOAM по-прежнему разрабатывается. В 2014 году на GitHub публично вышла линия разработки OpenFOAM, известная как «OpenFOAM-dev» [139].

Первоначально программа предназначалась для прочностных расчетов, но в результате многолетнего академического и промышленного развития на сегодняшний момент позволяет решать множество различных задач механики сплошных сред (не ограничиваясь ею), в частности:

- Прочностные расчеты;

- Гидродинамика ньютоновских и неньютоновских вязких жидкостей как в несжимаемом, так и сжимаемом приближении с учётом конвективного теплообмена и действием сил гравитации. Для моделирования турбулентных течений возможно использование RANS-моделей, LES- и DNS-методов. Возможно решение дозвуковых, околозвуковых и сверхзвуковых задач;
- Задачи теплопроводности в твёрдом теле;
- Многофазные задачи, в том числе с описанием химических реакций компонент потока;
- Задачи, связанные с деформацией расчётной сетки;
- Сопряжённые задачи;
- Некоторые другие задачи, при математической постановке которых требуется решение дифференциальных уравнений в частных производных в условиях сложной геометрии среды;
- Распараллеливание расчёта для запуска на многопроцессорных системах (в том числе кластерных) [133].

2.3.2 Математическое описание задачи

Уравнение Навье-Стокса для несжимаемой жидкости определяется как система из уравнения сохранения импульса (2.23) и уравнения неразрывности (2.24), которые в дифференциальной форме выглядят следующим образом [110]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\Delta u + \frac{1}{\rho}f, \quad (2.23)$$

$$\nabla \cdot u = 0, \quad (2.24)$$

где u – вектор скорости потока,

p – скалярное давление,

f – объемная сила (например, гравитация),

ρ – плотность жидкости,

ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Применяя интегрирование по объему заданной расчетной области и используя формулу Гаусса-Остроградского для преобразования объемного интеграла в поверхностный, уравнения Навье-Стокса преобразуются в интегральный вид. Разделяя объем заданной расчетной области на множество контрольных объемов и применяя схемы пространственной и временной дискретизации, образуются уравнения в форме метода конечного объема [110], который реализован в комплексе OpenFOAM [50].

Свободная поверхность в пакете OpenFOAM моделируется с помощью метода объема жидкости. Для многофазного потока вводится дополнительная скалярная величина $\alpha \in [0,1]$, которая показывает количество воды в контрольном объеме. Динамическое предсказание величины α определяется в соответствии с уравнением [110]:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (u\alpha) = 0. \quad (2.25)$$

Однако при использовании уравнения (2.25) на разделе сред происходит размытие, которое нивелируется введением дополнительного слагаемого [50]:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (u\alpha) + \nabla \cdot (u_r(1 - \alpha)\alpha) = 0, \quad (2.26)$$

где u_r – поле скорости, нормальное к границе раздела сред, применяемое для искусственного сжатия значения α на свободной поверхности.

Значения плотности и динамической вязкости определяются по формулам [103]:

$$\rho = \alpha\rho_1 + (1 - \alpha)\rho_2, \quad (2.27)$$

$$\mu = \alpha\mu_1 + (1 - \alpha)\mu_2, \quad (2.28)$$

где ρ_1 и ρ_2 – плотности входящих в двухфазный поток жидкостей (например, вода и воздух);

μ_1 и μ_2 – значения динамической вязкости входящих в двухфазный поток жидкостей.

При высоких числах Рейнольдса ($\approx 10^6$ для моделей судов и $\approx 10^9$ для полноразмерных судов) вычисления прямым численным моделированием сопровождаются либо большими временными издержками, либо большими вычислительными мощностями, поэтому для моделирования турбулентных потоков обычно используются уравнения Навье-Стокса осредненные по времени, называемые уравнениями Рейнольдса. Эти уравнения получены из уравнений Навье-Стокса путем разбиения полей скорости и давления на среднее значение и флуктуацию [110]:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad (2.29)$$

$$p = \bar{p} + p', \quad (2.30)$$

где \bar{u}_i и \bar{p} – средние значения скорости и давления,

u'_i и p' – флуктуация (пульсация) скорости и давления.

Подставляя уравнения (2.29) и (2.30) в уравнения Навье-Стокса (2.23) и (2.24), формируется новый член, называемый напряжениями Рейнольдса. Этот член включает в себя неизвестные, которые могут быть определены только с помощью эмпирических данных. Уравнения Рейнольдса выглядят следующим образом [110]:

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = 0, \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{u'_i u'_j}] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right], \quad (2.32)$$

где $\overline{u'_i u'_j}$ – напряжения Рейнольдса.

Идея модели турбулентности состоит в том, чтобы разрешить большие вихревые структуры в расчетной области и представить высокочастотную турбулентную часть в рамках турбулентной модели. При решении задач корабельной гидромеханики наибольшую популярность получила двухпараметрическая модель турбулентности $k-\omega$ SST [101]. Эта турбулентная модель адаптивно переключается между моделью $k-\epsilon$ на дальнем расстоянии от объекта и моделью $k-\omega$ внутри турбулентного пограничного слоя [110].

Для расчета турбулентного обтекания судна с помощью модели турбулентности k - ω SST необходимо задать начальные и граничные условия для турбулентной кинетической энергии, турбулентной частоты и скорость диссипации турбулентности. Для этого могут быть использованы эмпирические формулы:

$$k = \frac{3}{2} (UI)^2, \quad (2.33)$$

$$\omega = \frac{\sqrt{k}}{l}, \quad (2.34)$$

$$\varepsilon = 0,09^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l}, \quad (2.35)$$

где k – турбулентная кинетическая энергия,

ω – турбулентная частота,

ε – скорость диссипации турбулентности,

U – средняя скорость потока,

I – интенсивность турбулентности,

l – масштаб длины турбулентности.

Для определения значений интенсивности турбулентности и масштаба длины турбулентности можно воспользоваться рекомендациями [144].

Совместное решение уравнений Рейнольдса (2.31) и (2.32), и уравнения метода объема жидкости (2.26) позволяет определить главный вектор гидродинамической силы F_p и главный момент гидродинамических сил относительно центра масс M_p .

Движение твёрдого тела, обладающего шестью степенями свободы, может быть описано динамическими уравнениями Эйлера [90]:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{X}_C &= F_X = F_{pX} \\ m\ddot{Y}_C &= F_Y = F_{pY} \\ m\ddot{Z}_C &= F_Z = mg - F_A + F_{pZ} \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

$$\left. \begin{aligned} J_x \ddot{\theta} &= M_x + (J_y - J_z) \omega_y \omega_z \\ J_y \ddot{\psi} &= M_y + (J_z - J_x) \omega_z \omega_x \\ J_z \ddot{\varphi} &= M_z + (J_x - J_y) \omega_x \omega_y \end{aligned} \right\} \quad (2.37)$$

где X_C, Y_C и Z_C – координаты центра тяжести,

m – масса тела,

F_A – сила Архимеда,

J_x, J_y и J_z – моменты инерции,

θ, ψ и φ – угловые перемещения тела,

M_x, M_y и M_z – проекции пары моментов $M = M^A + M^P$, здесь M^A – момент архимедовой силы и M^P – главный момент гидродинамических сил относительно центра масс.

2.3.3 Постановка задачи в пакете OpenFOAM

Программный комплекс OpenFOAM имеет большое количество расчетных схем, в том числе моделирование течений двухфазной жидкости со свободной поверхностью (например, вода и воздух).

Для решения поставленной задачи выбран хорошо себя зарекомендовавший решатель interDyMFoam. Название решателя можно расшифровать следующим образом: «inter» – моделирование течений двухфазной жидкости со свободной поверхностью, «DyM» – динамически изменяемая расчетная область, «Foam» – решатель комплекса OpenFOAM.

Для решения задачи в программном комплексе OpenFOAM необходимо сформировать папку с файлами, каждый из которых будет описывать те или иные условия решения задачи.

Примерная структура папки для решения одной задачи в пакете OpenFOAM решателем interDyMFoam представлена на рисунке 2.3.

\Задача		
0		Папка начальных условий
	U	Скорость
	p	Давление
	k	Турбулентная кинетическая энергия
	omega	Скорость диссипации турбулентности
	alpha.water	Разделение фаз
	pointDisplacement	Перемещение границ
	constant	Папка постоянных величин
	polyMesh	Папка расчетной области
	boundary	Граничные условия
	faces	Грани
	neighbour	Границы
	points	Точки
	triSurface	Папка трехмерных моделей для внедрения в расчетную область
	hull.stl	
	dynamicMeshDict	Настройки динамики расчетной области
	g	Настройки гравитации
	transportProperties	Настройки параметров фаз жидкости
	turbelunceProperties	Настройки модели турбулентности
	system	Папка системных файлов
	controlDict	Контроль времени выполнения
	fvSchemes	Настройки численных схем
	fvSolution	Настройки численных решателей
	decomposeParDict	Распараллеливание расчета
	blockMeshDict	Файл создания базовой расчетной области
	snappyHexMeshDict	Файл преобразования расчетной области
	topoSet	Файлы зонального улучшения расчетной области
	refineMeshDict	

Рисунок 2.3 – Структура папки для решения задачи в пакете OpenFOAM

2.3.3.1 Начальные и граничные условия

Для решения задачи необходимо поставить граничные условия. Схема границ представлена на рисунке 2.4.

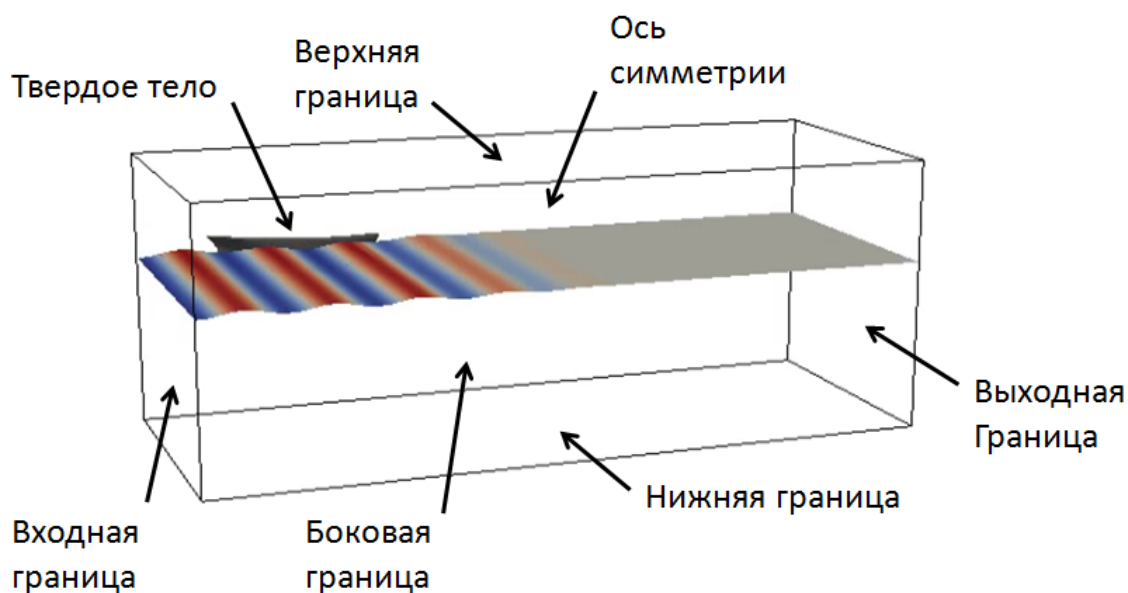


Рисунок 2.4 – Схема границ расчетной области

На входной границе расчетной области задаются следующие условия:

- По скорости, фазе и параметрам турбулентности – заданные значения;
- По давлению – частная производная по нормали равна нулю, так называемый нулевой градиент.

На выходной границе для всех параметров задается нулевой градиент.

На боковой и нижней границах для всех параметров может быть задано либо условие проскальзывания, обеспечивающее минимальное влияние на поведение исследуемого объекта, либо нулевой градиент для всех параметров. При исследовании поведения объекта на мелководье нижняя граница должны быть задана как стенка: по скорости – условия прилипания и непротекания, по давлению – нулевой градиент, по параметрам турбулентности – пристеночные граничные условия.

На верхней границе по скорости и давлению задаются специальные граничные условия, используемые только при моделировании двухфазных сред, учитывающие взаимные изменения скорости и давления при моделировании. Для параметров турбулентности задается нулевой градиент.

Для оси симметрии задают условия симметрии. В случае, если задача несимметрична ось симметрии убирается и ставится вторая боковая граница.

Для твердого тела задаются условия стенки.

В начальный момент времени полагается, что известны компоненты вектора скорости, давления, параметры турбулентности и распределение объемной фракции жидкости.

2.3.3.2 Создание расчетной области

По умолчанию программный комплекс OpenFOAM определяет трехмерную сетку из случайных многогранников, ограниченных случайными полигональными гранями, то есть элементы могут иметь сколь угодно количество поверхностей. Количество ребер не ограничено и нет ограничений на их положение [10]. Однако считается, что наилучшими расчетными свойствами обладают так называемые структурированные сетки – сетки, состоящие только из параллелепипедов.

Для построения структурированных сеток в составе OpenFOAM представлена утилита blockMesh. Эта утилита неспособна строить сетки сложной формы и создана для создания базовой расчетной области, состоящей из набора трехмерных гексаэдрических блоков.

В созданной базовой области с помощью утилит topoSet и refineMesh производится зональное улучшение сетки в необходимых регионах. Среди таких регионов можно выделить свободную поверхность, зону волнообразования и зону расположения корпуса судна.

Далее в расчетную область с помощью утилиты snappyHexMesh помещается поверхность исследуемого тела, производится привязка сетки к поверхности тела, а также удаляются элементы сетки внутри поверхности.

Все утилиты входят в состав программного комплекса OpenFOAM. Примерная схема построения расчетной представлена на рисунке 2.5.

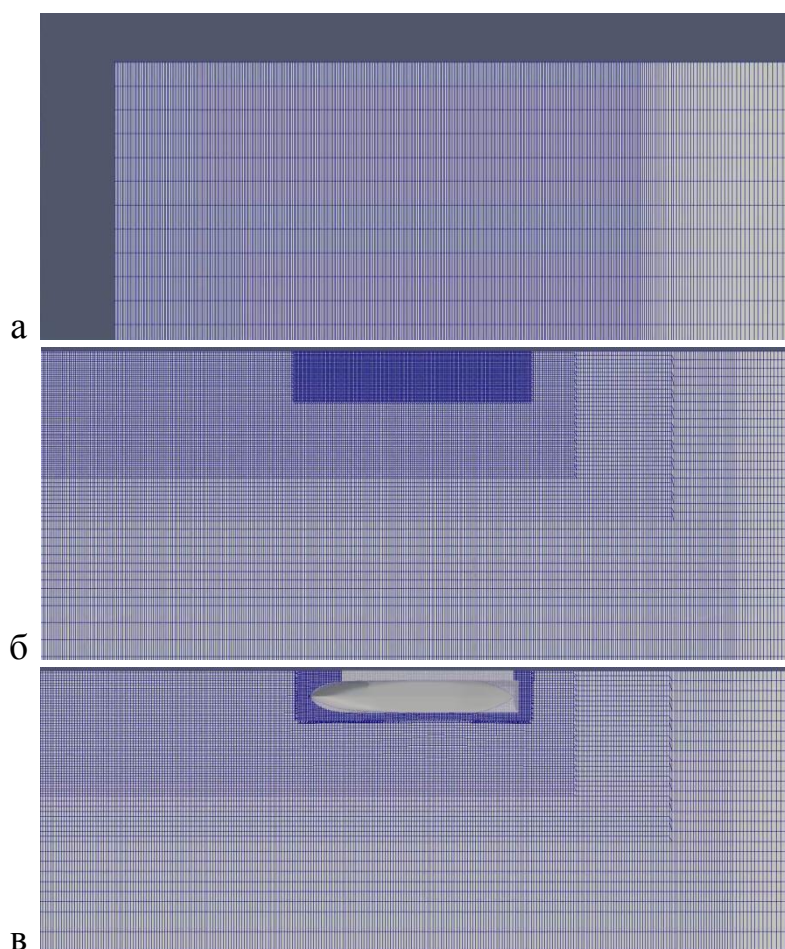


Рисунок 2.5 – Стадии создания расчетной области:
а – Базовая область;
б – Область с зональными улучшениями;
в – Область с исследуемым телом

Качество расчетной области определяется четырьмя важными показателями: ортогональностью, закрученностью, коэффициентом пропорциональности и коэффициентом роста. При этом количество ячеек является второстепенным показателем, так как оно зависит от выполнения первостепенных требований и рекомендаций к построению сетки.

Ортогональность определяется положением ячеек в пространстве. В идеальном случае каждая следующая ячейка не должна менять свое положение по отношению к предыдущей.

Закрученность ячейки определяется ее видом. В идеальном случае закрученность ячейки равна нулю, когда все грани ячейки не поменяли свой угол поворота.

Коэффициент пропорциональности показывает как вытянута ячейка. Коэффициент пропорциональности вычисляется отношением площадей граней ячейки. В идеальном случае форма всех ячеек должна быть близка к кубу.

Коэффициент роста показывает отношение объемов наибольших ячеек к наименьшим, окружающим расчетный узел. В идеальном случае все ячейки должны быть одного объема.

Геометрическое качество сетки важно для предотвращения следующих ошибок моделирования:

1 Источники ошибок дискретизации (неортогональность и быстрое изменение размеров ячеек вводит ошибки в аппроксимацию уравнений);

2 Увеличение (усиление) ошибок дискретизации (поправки, вводимые для устранения невязок, могут дать нефизичные значения);

3 Трудности решения линеаризованных уравнений (большие коэффициенты пропорциональности требует использования большей точности вычислений) [136].

В реальных условиях при разработке расчетной области вокруг тел сложной формы, таких как корпус судна, обеспечить идеальное выполнение всех четырех критериев либо очень сложно, либо невозможно, поэтому есть ряд рекомендаций по максимально-возможным значениям этих критериев, при которых не оказывается влияние на результаты моделирования. Например, коэффициент пропорциональности должен быть не более 100, а коэффициент роста – не более 20 [136].

С точки зрения экономии вычислительных ресурсов, при построении расчетных областей прибегают к улучшению сеточного разрешения (степени измельчения ячеек) в необходимых местах, например, уровень раздела сред воздух-вода и исследуемое тело, и ухудшают сеточное разрешение ближе к границам сетки.

2.3.3.3 Выбор параметров деформации расчетной области

Для моделирования динамики судна могут быть использованы следующие подходы [110]:

1 Колебание всей расчетной области. Самый простой подход, который требует хорошего сеточного разрешения раздела сред воздух-вода при больших наклонениях. При этом при больших наклонениях возможны серьезные деформации свободной поверхности [60].

2 Деформация расчетной области относительно исследуемого тела. Наиболее популярный метод, получивший широкое распространение при решении задач ходкости корабля. Исследуемое тело описывается не только геометрией, но и необходимыми характеристиками, такими как масса, координаты центра масс и моменты инерции относительно трех осей. Минус данного подхода в том, что при больших перемещениях исследуемого тела расчетная область может деформироваться настолько сильно, что повлияет на выходные данные или даже «разрушит» расчет.

3 Метод скользящей связи (англ. – sliding interface method). Данный метод использует два региона в расчетной области: подвижный и стационарный. Регионы связаны с помощью граничных условий. Данный подход получил большое распространение при моделировании турбин и гребных винтов. Данный подход применим только для угловых колебаний.

4 Метод перекрывающихся сеток (англ. – overset method). Данный метод использует две расчетные области: небольшую область вокруг исследуемого тела и большую основную область. Только область вокруг тела подвижна. Две расчетные области «перекрывают» друг друга и связаны математически. Данный метод получает большое распространение, но на данный момент присутствует только в платных версиях программного комплекса OpenFOAM.

В данной работе используется метод деформации расчетной области относительно исследуемого тела, работа которого представлена на рисунке 2.6 [139].

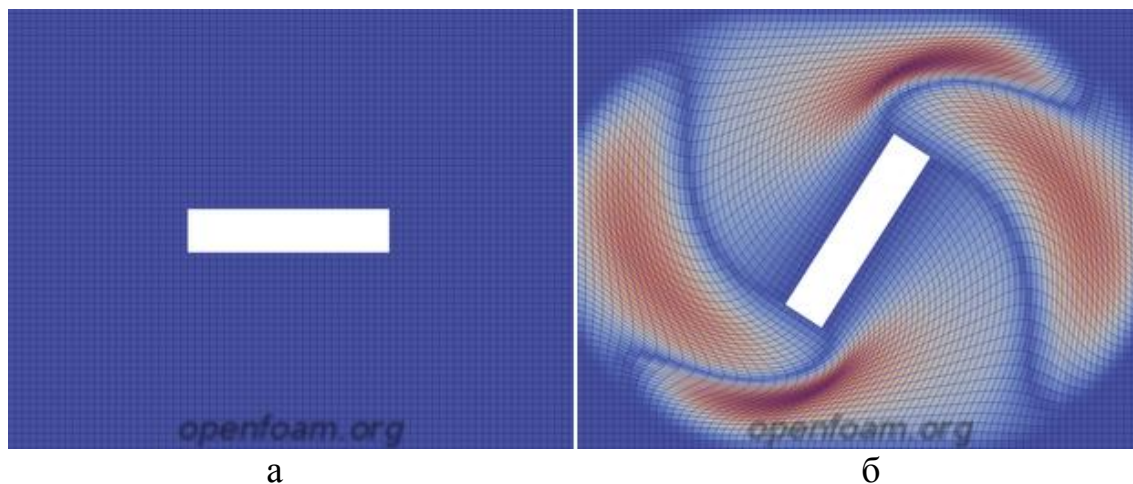


Рисунок 2.6 – Деформация расчетной области в результате поворота прямоугольника: а – начальное состояние, б – после поворота прямоугольника

В файле `dynamicMeshDict` задаются следующие характеристики твердого тела: масса, координаты центра тяжести, главные моменты инерции массы твердого тела, вокруг которого происходит изменение расчетной области, расстояние от тела, в котором происходит морфинг сетки, а так же количество степеней свободы. Варьируя количество степеней свободы, можно убрать неинтересующие виды качки.

2.3.3.4 Выбор параметров фаз жидкости

Для решения поставленной задачи задаются две среды: воздух и вода. Характеристики сред представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Характеристики моделируемых сред

Характеристика, единица измерения	Воздух	Вода
Тип жидкости	Ньютоновская	Ньютоновская
Плотность, кг/м ³	1,20	1000
Коэффициент кинематической вязкости, м ² /с	$1,50 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$

2.3.3.5 Выбор расчетного алгоритма

Для решения уравнений Рейнольдса и уравнений метода объема жидкости в форме метода конечного объема жидкости используются различные алгоритмы, такие как SIMPLE, PISO и PIMPLE.

Все алгоритмы обеспечивают выполнение законов сохранения импульса и массы для контрольного объема. Таким образом, обеспечивается выполнение этих законов и для всей расчетной области [43].

Самым общим алгоритмом является алгоритм PIMPLE. Он получен путем скрещивания алгоритмов SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations - полу-неявный метод для связывающих давление уравнений [140]) и PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator - неявный по давлению с разделением операторов [138]). В алгоритме PIMPLE есть так называемые внутренние корректировки массопереноса, полей давления и скорости в расчетной области от метода PISO и внешние корректировки от метода SIMPLE, количество которых задается перед началом решения задачи. Внутренние корректировки позволяют избавиться от накопления погрешности. Внешние корректировки, помимо защиты от накопления погрешности, позволяют увеличить расчетное число Куранта, тем самым увеличить скорость решения задачи.

Схема алгоритма PIMPLE представлена на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 – Схема алгоритма PIMPLE

Число Куранта или критерий Куранта-Фридрихса-Леви является необходимым условием устойчивости явного численного решения некоторых дифференциальных уравнений в частных производных. Как следствие, во многих компьютерных симуляциях временной шаг должен быть меньше определённого значения, иначе результаты будут неправильными.

Физически число Куранта означает, что частица жидкости за один шаг по времени не должна продвинуться больше, чем на один пространственный шаг [143]. Для выполнения этого условия обычно принимают число Куранта $Co < 1$.

При решении алгоритмом PIMPLE число Куранта может быть гораздо больше единицы, потому что в этом схеме используется несколько внешних корректировок, которые успешно решают все невязки внутри одного временного шага. Поскольку число Куранта может быть увеличено, то время вычислений может быть уменьшено без влияния на результаты

моделирования. Именно поэтому алгоритм PIMPLE пользуется большой популярностью.

Если в алгоритме PIMPLE количество внешних корректировок задано один, то алгоритм PIMPLE превращается в алгоритм PISO. Если при этом и количество внутренних корректировок задано один, то будет использоваться алгоритм SIMPLE.

2.3.3.6 Регистрация процесса численного моделирования

В процессе выполнения расчетов создается файл регистрации данных о процессе моделирования. Примерная структура файла регистрации данных представлена на рисунке 2.8.

```
Interface Courant Number mean: 4.86812e-07 max: 0.253202
Courant Number mean: 2.3037e-05 max: 0.810571
deltaT = 0.000794281
Time = 2.00079

Centre of mass: (0.19645 0 0.0660475)
Linear velocity: (-0 -0 -0.000289148)
Angular velocity: (0.00470178 -0.00273703 3.87415e-05)
Execution time for mesh.update() = 0.16 s
GAMG: Solving for pcorr, Initial residual = 1, Final residual = 0.065268, No Iterations 4
time step continuity errors : sum local = 8.86357e-11, global = 9.65223e-12, cumulative = 1.54635e-11
smoothSolver: Solving for alpha.water, Initial residual = 2.52223e-08, Final residual = 1.87335e-12, No Iterations 1
Phase-1 volume fraction = 0.500021 Min(alpha) = -3.85105e-14 Max(alpha) = 1.00015
MULES: Correcting alpha.water
MULES: Correcting alpha.water
MULES: Correcting alpha.water
Phase-1 volume fraction = 0.500021 Min(alpha) = -7.07796e-09 Max(alpha) = 1.00015
GAMG: Solving for p_rgh, Initial residual = 0.00273489, Final residual = 2.26593e-06, No Iterations 19
time step continuity errors : sum local = 7.16369e-12, global = 1.42307e-12, cumulative = 1.68866e-11
GAMG: Solving for p_rgh, Initial residual = 0.000362677, Final residual = 3.6226e-07, No Iterations 12
time step continuity errors : sum local = 1.12982e-12, global = -4.0766e-15, cumulative = 1.68825e-11
GAMG: Solving for p_rgh, Initial residual = 3.78819e-05, Final residual = 4.68817e-08, No Iterations 20
time step continuity errors : sum local = 1.45763e-13, global = 2.42428e-16, cumulative = 1.68827e-11
smoothSolver: Solving for omega, Initial residual = 1.29871e-06, Final residual = 7.42511e-11, No Iterations 1
smoothSolver: Solving for k, Initial residual = 3.59758e-06, Final residual = 2.07076e-09, No Iterations 1
ExecutionTime = 4.33 s ClockTime = 5 s

forces forces output:
sum of forces:
  pressure : (5.81918 -14.1716 826.248)
  viscous : (-0.0072122 -0.00567025 0.00176722)
  porous : (0 0 0)
sum of moments:
  pressure : (14.205 -102.99 1.24276)
  viscous : (-0.000539799 0.000252477 -0.00653595)
  porous : (0 0 0)
```

Данные о числе Куранта и времени моделирования

Данные о динамике исследуемого тела

Данные о процессе моделирования

Данные о силах на исследуемом теле

Рисунок 2.8 – Пример файла регистрации данных программного комплекса OpenFOAM

Файл регистрации данных используется для обработки результатов численного моделирования. В случае необходимости регистрации дополнительных параметров, например, уровня раздела сред (волнения), вводятся соответствующие функции в файл controlDict.

2.3.4 Моделирование регулярного волнения

Численное моделирование регулярного волнения в программном комплексе OpenFOAM может быть осуществлено следующими методами:

1 С помощью специального граничного условия `groovyBC` [134], устанавливаемого дополнительно;

2 С помощью специального решателя `waves2Foam` [85, 135], компилируемого дополнительно;

3 С помощью встроенных граничных условий и функций, появившихся в версии OpenFOAM-5.0 [137].

В первом случае на входной границе задается специальное граничное условие, которое можно охарактеризовать, как волнопродуктор, в котором задаются характеристики регулярной волны. Граничных условий или зон для гашения волны у выходной границы не предусмотрено. При этом процесс запуска вычислений не меняется.

Во втором случае используется специально разработанный решатель. При использовании этого решателя расчетная область разделяется на три части: зона генерации волны со специальными граничным и объемным условиями у входной границы, зона распространения волны, где может находиться исследуемый объект, и зона гашения волны, которая также называется «численным берегом».

В третьем случае на входной границе устанавливается специальное граничное условие – волнопродуктор, в котором задаются характеристики волны и некоторые другие параметры моделирования, используемые в том числе для гашения волны. Дополнительно для гашения волны у выходной границы используется специальная функция, генерируемая для объемной зоны.

Среди проблем численного моделирования волнения можно выделить следующие:

1 Стабильность волны с течением времени;

2 Стабильность уровня свободной поверхности с течением времени;

3 Отсутствие отраженных от выходной границы волн.

Последние два пункта актуальны только при отсутствии скорости хода исследуемого морского объекта или течения, так как при наличии скорости хода стандартные граничные условия успешно работают.

Для задания стабильного волнения, то есть волнения, которое не искажается с течением времени, необходимо грамотно разработать расчетную область, а именно определить количество ячеек на высоту и длину волны. Рекомендации к количеству ячеек на высоту и длину волны при использовании решателя waves2Foam представлены в работах [41, 131]. Следует отметить, что рекомендации разнятся: если в работе [41] требуют не менее 30 ячеек на высоту и 120 ячеек на длину волны, то в работе [131] говорят о достаточности 30 ячеек на высоту и 30 ячеек на длину волны.

Стабильность уровня свободной поверхности с течением времени и отсутствие отраженных волн от выходной границы при отсутствии скорости хода достигается обычно с помощью зоны гашения волны. Дополнительное влияние может оказать правильный выбор выходного граничного условия.

Исходя из вышесказанного, численное моделирование регулярного волнения для решения задач корабельной гидромеханики возможно только с помощью специального решателя waves2Foam и «новых» функций OpenFOAM-5.0. Поскольку решатель waves2Foam не является стандартным для OpenFOAM и должен устанавливаться дополнительно, то в дальнейшем численное моделирование волнения будет производиться с помощью встроенных функций OpenFOAM-5.0.

Поскольку рекомендации к количеству ячеек на высоту и длину волны были разработаны только для решателя waves2Foam, то необходимо выработать таковые для внутренних функций OpenFOAM. Для этого выполнено численное моделирование двумерных регулярных волн длиной $\lambda = 5$ м и высотой $h_b = 0,1$ м при различном количестве ячеек на высоту и на длину волны.

В таблице 2.3 представлено процентное отклонение высоты волны от заданного, полученное при анализе результатов численного моделирования при вариации количества ячеек на высоту и на длину волны. Моделирование выполнялось в течение времени, равного более чем 10 периодам волны, что является достаточным для анализа динамики морских объектов [83].

Таблица 2.3 – Отклонение высоты волны от заданного в зависимости от количества ячеек на высоту и на длину волны

Количество ячеек на высоту волны	Количество ячеек на длину волны		
	25	50	75
8	18 %	6 %	4 %
12	28 %	6 %	4 %
16	24 %	4 %	4 %
20	34 %	4 %	2 %
30	32 %	4 %	2 %

Анализируя таблицу 2.3, можно заключить, что функции OpenFOAM для задания волнения менее требовательные к количеству ячеек на высоту волны, чем решатель waves2Foam, и достаточное количество для анализа динамики морских объектов равно 8. Количество ячеек по длине волны, достаточное для стабильного моделирования волнения, равно 50.

Для качественного моделирования динамики морских объектов на волнении необходимо создание качественной расчетной области не только в зоне разделения сред, но и в общих масштабах. Рекомендуемые размеры расчетной области при численном моделировании динамики морских объектов на волнении представлены на рисунке 2.9. На рисунке 2.9 введено обозначение L – длина морского объекта или длина волнения, в зависимости от того, что больше.

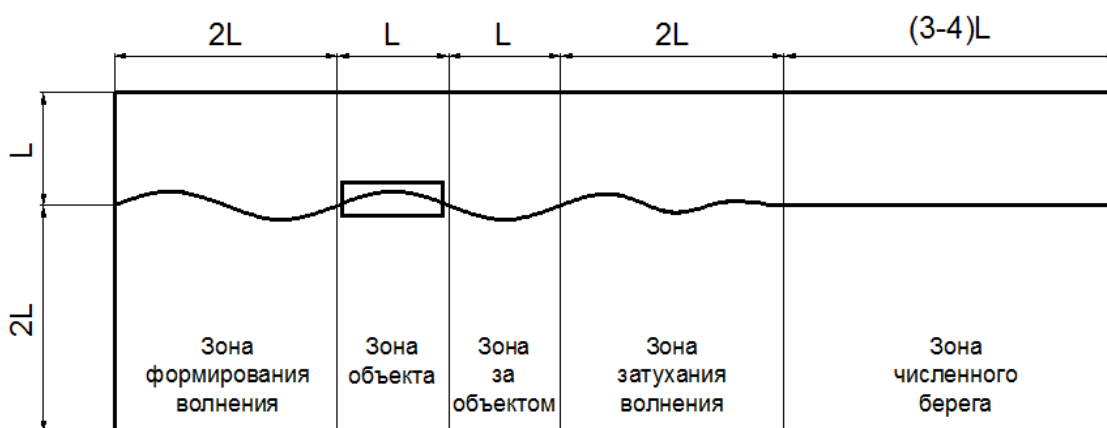


Рисунок 2.9 – Рекомендуемые размеры расчетной области при численном моделировании динамики морских объектов

2.3.5 Алгоритм выполнения численного моделирования

Для решения различных задач с помощью современных средств вычислительной гидродинамики необходимо руководствоваться общим алгоритмом, включающим в себя три этапа: подготовка численного моделирования, выполнение моделирования и обработка результатов. Общий алгоритм выполнения численного моделирования представлен на рисунке 2.10.

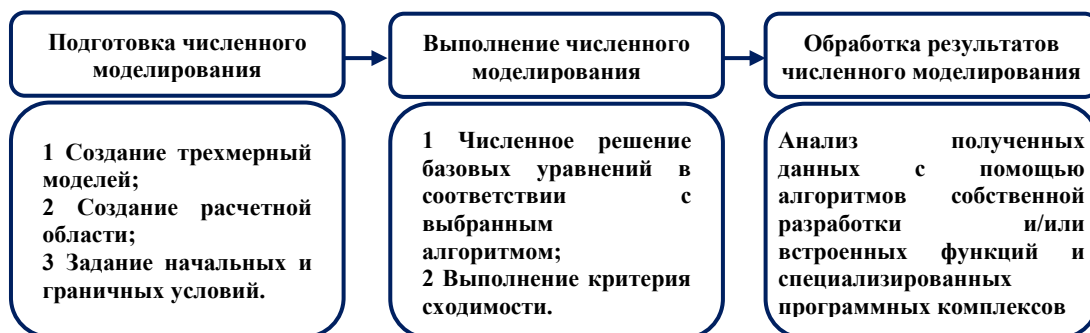


Рисунок 2.10 – Общий алгоритм выполнения численного моделирования

При решении задач о динамике морских объектов на тихой воде или волнении в программном комплексе OpenFOAM алгоритм выполнения численного моделирования преобразуется в частный вид, представленный на рисунке 2.11.



Рисунок 2.11 – Алгоритм выполнения численного моделирования динамики морских объектов в программном комплексе OpenFOAM

На основании разработанного алгоритма, представленного на рисунке 2.11, и предложенных параметров численной схемы, представленных в пункте 2.3.3, сформирована методика численного моделирования динамики морских объектов при качке в полностью вязкостной постановке задачи. На основании сформированной методики реализуются расчетные методы оценки гидродинамических характеристик морских объектов на тихой воде и волнении с использованием программного комплекса с открытым кодом OpenFOAM.

Далее представлены результаты верификации расчетных методов оценки сопротивления судна на тихой воде, периода собственных колебаний и коэффициента демпфирования бортовой качки при моделировании метода свободных колебаний, инерционно-демпфирующих сил вертикальной и

килевой качки при моделирования метода вынужденных колебаний на тихой воде и параметров продольной качки судна на встречном волнении.

2.4 Адаптация расчетного метода

Перед моделированием методов свободных и вынужденных колебаний была выполнена проверка расчетного метода на более простом примере – вычислении сопротивления модели судна. Численное моделирование на данный момент считается достаточно простым и точным методом определения сопротивления [56, 59, 86, 87, 95].

Для расчета сопротивления моделировалось обтекание модели DTMB 5415 (корабль класса Арлей Бёрк) на трех скоростях хода, соответствующих числам Фруда $Fr = 0,140$, $Fr = 0,281$ и $Fr = 0,412$.

Модель DTMB 5415 представлена в двух вариантах исполнения: голый корпус и корпус со скуловыми килями (рисунок 2.12). Для расчета сопротивления использовалась модель с голым корпусом.

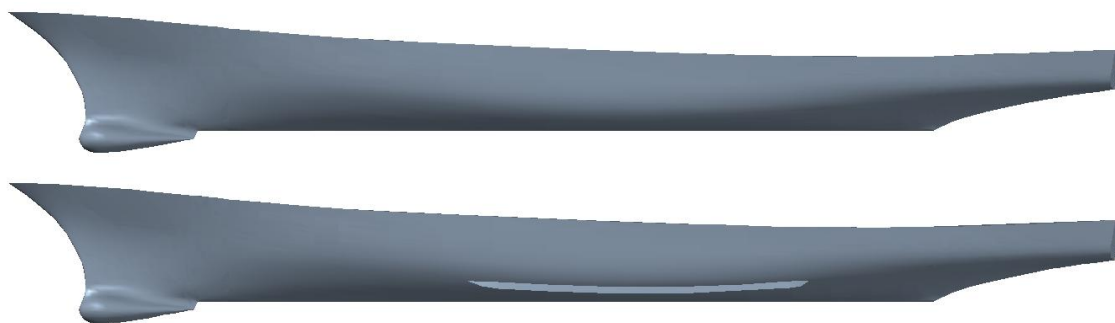


Рисунок 2.12 – Модель DTMB 5415:
сверху – голый корпус,
снизу – корпус со скуловыми килями

При вычислениях модель имела две степени свободы – вертикальные и килевые колебания. Характеристики модели представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Характеристики корпуса DTMB 5415

Характеристика	Значение
Длина между перпендикулярами, м	3,048
Ширина, м	0,409
Осадка, м	0,132
Водоизмещение, кг	83,5
Аппликата центра тяжести, м	0,163
Момент инерции относительно продольной оси, кг·м ²	1,915
Момент инерции относительно поперечной оси, кг·м ²	48,5

Результаты экспериментального исследования модели DTMB 5415 представлены в работе [71].

Для выполнения моделирования была создана полная расчетная область без условия симметрии со следующими характеристиками: количество ячеек ~ 3,75 млн, максимальный коэффициент пропорциональности ~ 78, максимальный коэффициент закрученности ~ 3,6, средняя неортогональность ~ 4. Расчетная область была создана без условия симметрии для того, чтобы потом использовать данную сетку при моделировании метода свободных колебаний.

В таблице 2.5 представлены результаты вычисления полного сопротивления модели DTMB 5415 по результатам эксперимента и численного моделирования в программном комплексе OpenFOAM.

Таблица 2.5 – Результаты вычисления полного сопротивления модели DTMB 5415

Число Фруда Fr	Скорость v , м/с	Полное сопротивление R_t , Н			
		По результатам эксперимента	По результатам численного моделирования	Погрешность	
				Абсолютная	Относительная
0,140	0,7645	1,79	1,71	0,08	4,8 %
0,281	1,536	7,43	7,35	0,08	1,1 %
0,412	2,253	23,36	23,32	0,04	0,2 %

Анализируя данные, представленные в таблице 2.5, можно заключить о хорошей применимости расчетного метода.

2.5 Численное моделирование метода свободных колебаний

Для моделирования метода свободных бортовых колебаний использовалась модель DTMB 5415 (корабль класса Арлей Бёрк, ВМС США). О возможности моделирования метода свободных колебаний написано в работах [70, 110].

Экспериментальные данные, используемые для верификации результатов численного моделирования, представлены в работах [82, 110].

Характеристики корпуса DTMB 5415 представлены в таблице 2.4.

Моделирование производилось при двух начальных углах крена $\theta_0 = 10^\circ$ и $\theta_0 = 20^\circ$ для двух вариантов исполнения модели: голый корпус и корпус со скуловыми киллями (рисунок 2.12). При этом модель имела скорость хода, соответствующую числу Фруда по длине $Fr = 0,138$.

При моделировании использовалась расчетная область, представленная в главе 2.4 или аналогичная ей.

В таблице 2.6 представлены значения периодов свободных бортовых колебаний модели DTMB 5415 по результатам эксперимента и численного моделирования в программном комплексе OpenFOAM.

Таблица 2.6 – Значения периодов свободных бортовых колебаний модели DTMB 5415 по результатам эксперимента и численного моделирования

Вариант исполнения	Начальный угол крена θ_0	Период свободных бортовых колебаний T_0 , с		
		По результатам эксперимента	По результатам численного моделирования	Погрешность
Голый корпус	10°	1,59	1,65	3,7 %
Голый корпус	20°	1,60	1,64	2,4 %
Корпус со скуловыми киллями	10°	1,61	1,70	5,2 %
Корпус со скуловыми киллями	20°	1,62	1,69	4,4 %

На рисунках 2.13 и 2.14 представлены безразмерные осциллограммы затухающих колебаний голого корпуса и корпуса со скуловыми киями соответственно модели DTMB 5415, полученные по результатам эксперимента и численного моделирования в программном комплексе OpenFOAM. По оси ординат безразмерных осциллограмм представлено отношение фактического угла крена θ к начальному углу крена θ_0 , по оси абсцисс – отношение фактического момента времени t к периоду собственных колебаний T_θ .

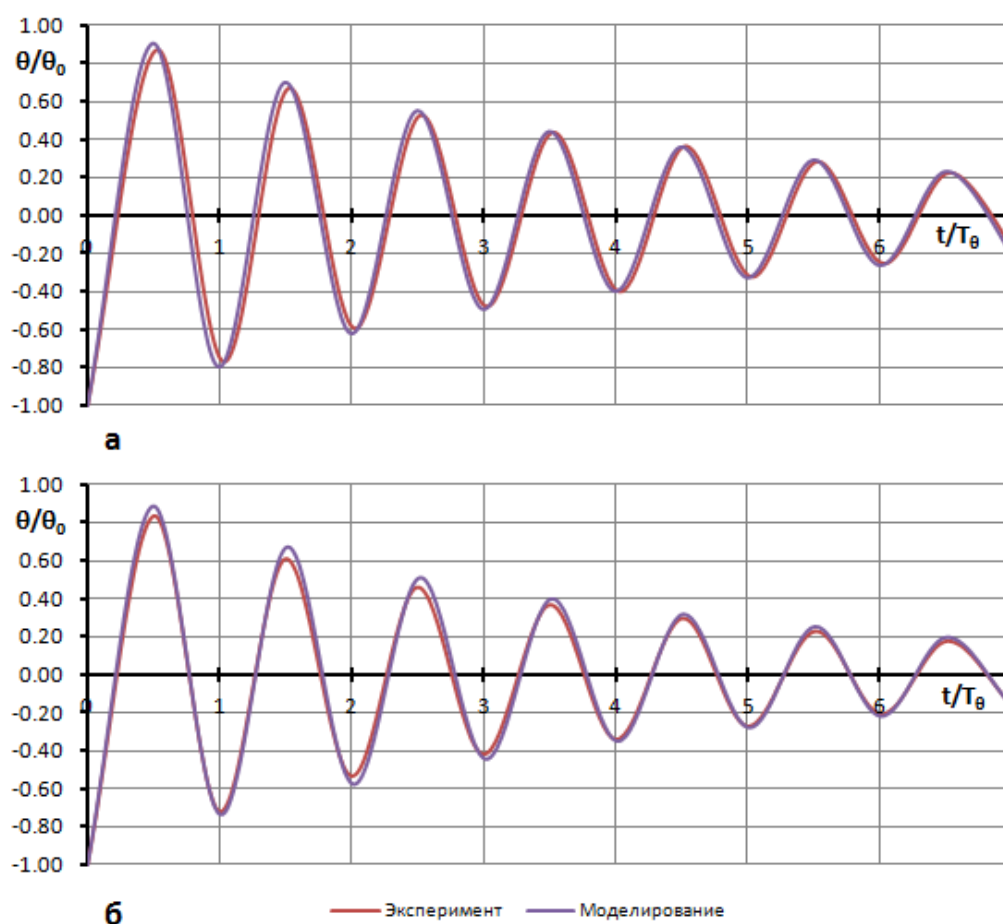


Рисунок 2.13 – Безразмерные осциллограммы затухающих колебаний модели DTMB 5415 (голый корпус):
а – начальный угол крена $\theta_0 = 10^\circ$,
б – начальный угол крена $\theta_0 = 20^\circ$

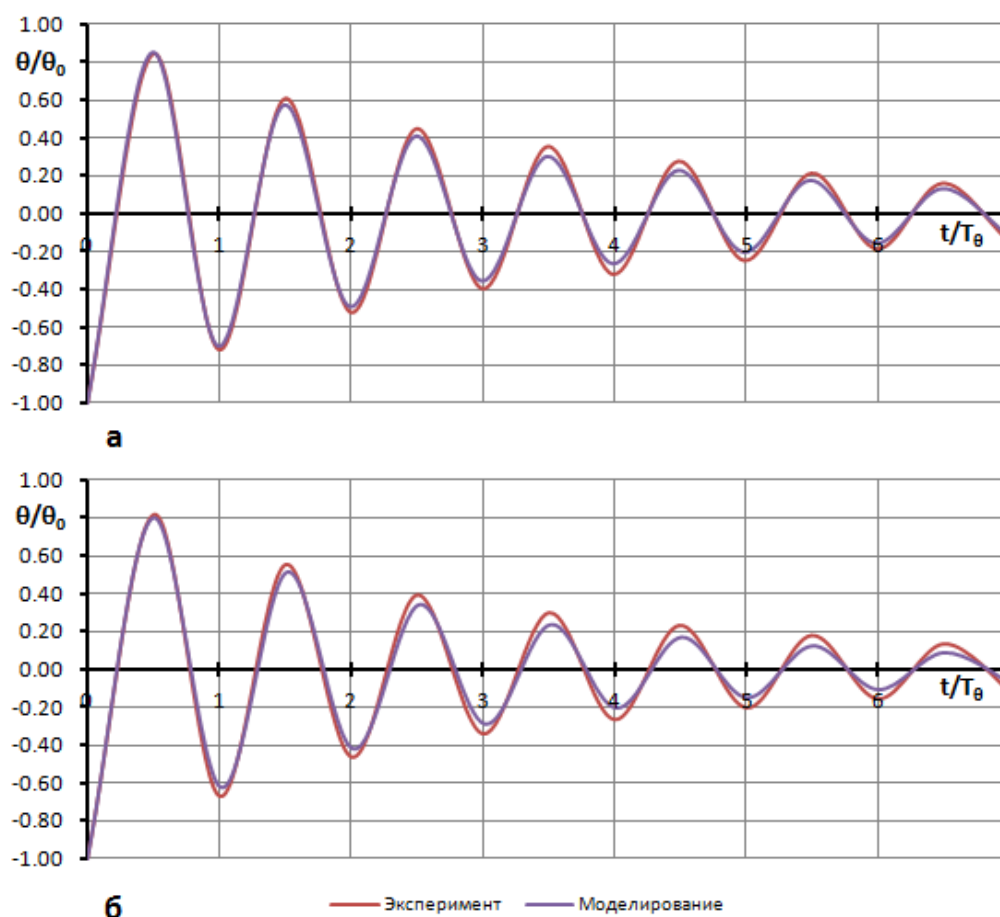


Рисунок 2.14 – Безразмерные осциллограммы затухающих колебаний модели DTMB 5415 (корпус со скуловыми киями):

а – начальный угол крена $\theta_0 = 10^\circ$,

б – начальный угол крена $\theta_0 = 20^\circ$

Анализируя рисунок 2.13, можно заключить о хорошей сходимости получаемых осциллограмм при моделировании голого корпуса. При моделировании корпуса со скуловыми киями, согласно рисунку 2.14, затухание бортовых колебаний происходит быстрее, чем при постановке эксперимента. При этом при начальном угле крена $\theta_0 = 10^\circ$ разница в демпфировании бортовых колебаний незначительна, тогда как при начальном угле крена $\theta_0 = 20^\circ$ сопротивление качки существенно выше при моделировании.

Анализируя рисунок 2.14 при начальном угле крена $\theta_0 = 20^\circ$, интересно отметить, что наибольший прирост демпфирования наблюдается при угле крена $\theta < 10^\circ$. Это примечательно, потому как при постановке эксперимента начальный угол крена обычно стараются принять как можно выше.

2.6 Численное моделирование метода вынужденных колебаний на тихой воде

Возможность применения метода вынужденных колебаний в средствах вычислительной гидромеханики проверялась для задач вертикальной и килевой качки аналитического корпуса Виглей (англ. – Wigley). Эффективность применения численного моделирования метода вынужденных колебаний в двухмерной постановке задачи без скорости хода показана в работе [54].

Экспериментальные данные исследования характеристик корпуса Виглей представлены в [88].

Характеристики исследуемого корпуса представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Характеристики корпуса Виглей

Характеристика	Значение
Длина между перпендикулярами, м	3,00
Ширина, м	0,30
Осадка, м	0,1785
Водоизмещение, кг	94,6
Апplikата центра тяжести, м	0,170
Момент инерции относительно поперечной оси, кг·м ²	53,2
Коэффициент полноты мидельшпангоута	0,909

Проекция корпус теоретического чертежа исследуемого корпуса представлена на рисунке 2.15 [88].

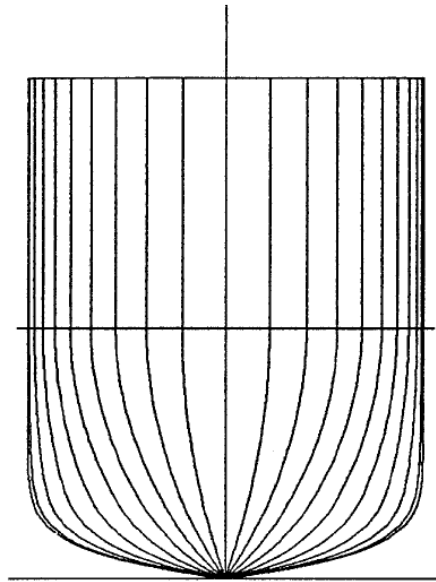


Рисунок 2.15 – Проекция корпуса теоретического чертежа корпуса Виглей

Корпус Виглей исследовался при скорости хода, соответствующей числу Фруда по длине $Fr = 0,20$. Моделирование производилось отдельно для вертикальной качки и килевой качки. Амплитуда вертикальных колебаний задана $z_a = 0,05$ м. Амплитуда килевых колебаний – $\psi_a = 3^\circ$.

Для выполнения численного моделирования была создана расчетная область с осью симметрии со следующими характеристиками: количество ячеек $\sim 0,6$ млн, максимальный коэффициент пропорциональности ~ 98 , максимальный коэффициент закрученности $\sim 2,8$, средняя неортогональность $\sim 7,6$.

По результатам моделирования вертикальных вынужденных колебаний были получены коэффициенты присоединенных масс A_{33}'' , демпфирующих сил B_{33}'' и моментов A_{53}'' и B_{53}'' в зависимости от безразмерной частоты колебаний ω'' . По результатам моделирования килевых вынужденных колебаний были получены коэффициенты присоединенных масс A_{55}'' , демпфирующих сил B_{55}'' и моментов A_{35}'' и B_{35}'' в зависимости от безразмерной частоты колебаний ω'' . Обработка данных и обезразмеривание величин производились согласно [88].

На рисунках 2.16 и 2.17 представлены результаты вычислений коэффициентов гидродинамических характеристик корпуса Виглей по результатам эксперимента и численного моделирования в программном комплексе OpenFOAM.

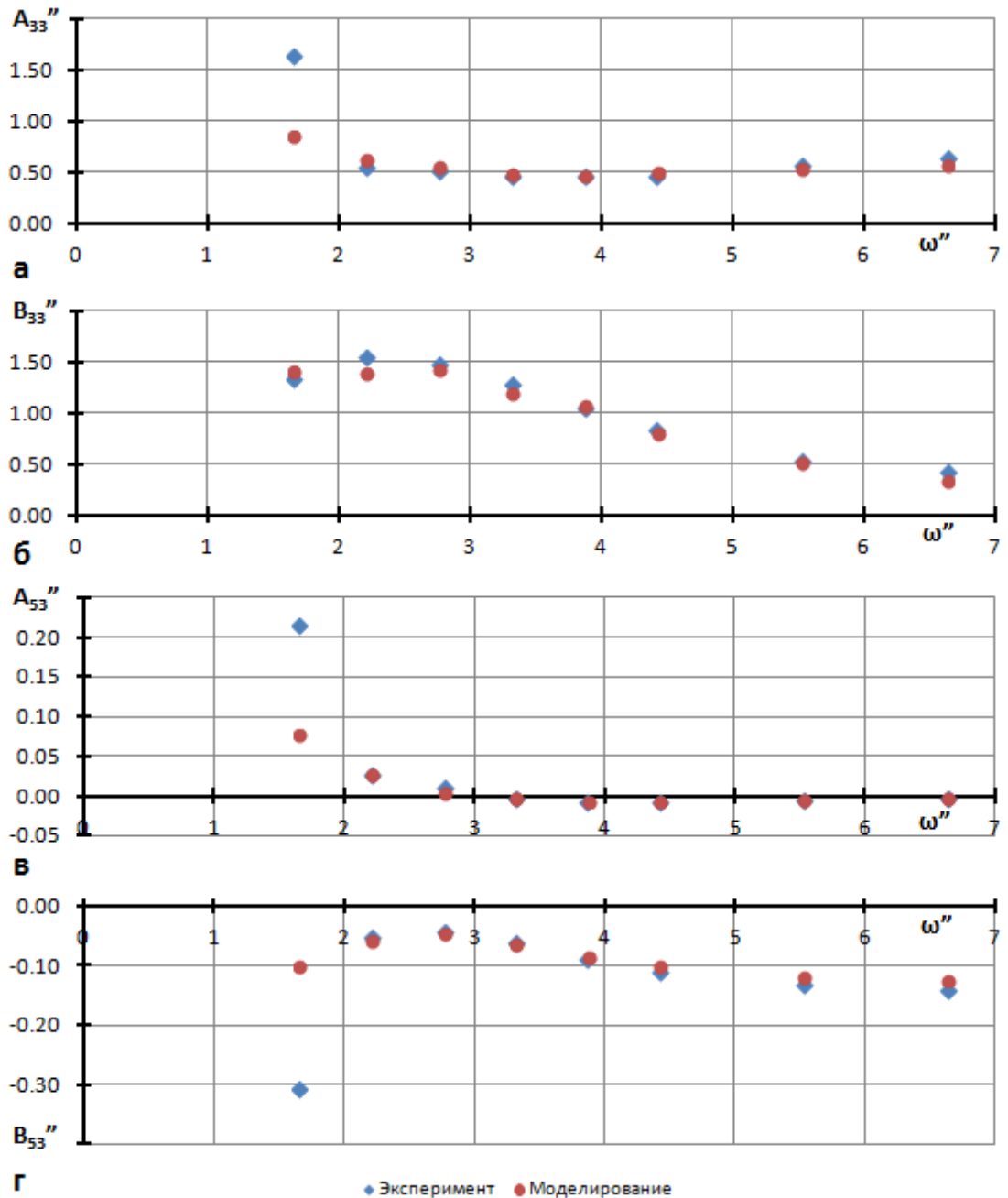


Рисунок 2.16 – Зависимости коэффициентов гидродинамических характеристик модели корпуса Виглей от безразмерной частоты ω'' : а – присоединенных масс A_{33}'' , б – демпфирующих сил B_{33}'' , в и г – моментов A_{53}'' и B_{53}''

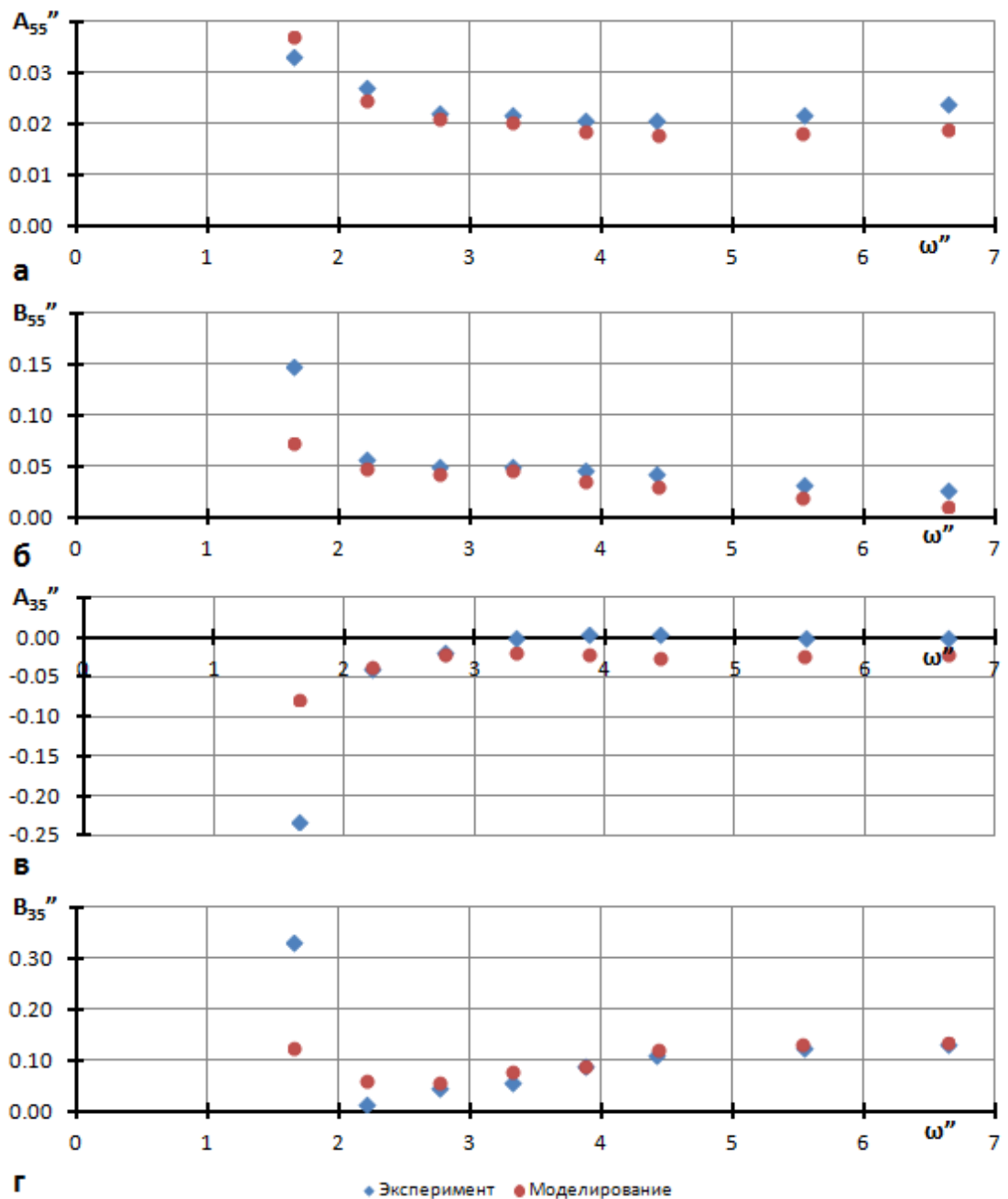


Рисунок 2.17 – Зависимости коэффициентов гидродинамических характеристик модели корпуса Виглей от безразмерной частоты ω'' : а – присоединенных моментов инерции A_{55}'' , б – демпфирующих моментов B_{55}'' , в и г – моментов A_{35}'' и B_{35}''

Анализируя рисунок 2.16, можно заключить о хорошей сходимости результатов моделирования вертикальных вынужденных колебаний с данными эксперимента. При этом, согласно рисунку 2.17, моделирование килевых колебаний дает удовлетворительную сходимость. Несмотря на это, погрешность получаемых данных мала, и можно говорить о возможности моделирования вертикальных и килевых вынужденных колебаний.

2.7 Численное моделирование продольной качки

Согласно рекомендациям международной конференции опытовых бассейнов исследование качки на регулярном волнении следует производить при следующих условиях [83]:

1 Отношение высоты волны к ее длине или высоты волны к длине модели должно быть постоянным (рекомендуемое отношение высоты волны к ее длине примерно 1/50);

2 Длины волн должны варьироваться в диапазоне от 0,5 до 2 длин исследуемого объекта;

3 Оптимальное количество колебаний при испытаниях для анализа характеристик качки не менее 10.

Моделирование продольной качки производилось для модели DTMB 5415 (корабль класса Арлей Бёрк, ВМС США). Об эффективном использовании численного моделирования для расчетов продольной качки судна написано в работах [14, 41, 116, 117, 125, 130].

Экспериментальные данные, используемые для верификации результатов численного моделирования, представлены в [81].

Характеристики корпуса DTMB 5415 представлены в таблице 2.4.

Модель DTMB 5415 исследовалась в варианте исполнения без выступающих частей – голый корпус (рисунок 2.12). Моделирование производилось при двух скоростях хода, соответствующих числам Фруда по длине $Fr = 0$ и $Fr = 0,28$. Курсовой угол к волнению равен $\beta = 180^\circ$ (встречное волнение). Модель имела две степени свободы – вертикальные и килевые колебания.

Для выполнения численного моделирования была создана расчетная область с осью симметрии со следующими характеристиками: количество ячеек ~ 1,5 млн, максимальный коэффициент пропорциональности ~ 57, максимальный коэффициент закрученности ~ 2,4, средняя неортогональность ~ 4,3.

По результатам моделирования получены амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики вертикальной и килевой качки, представленные на рисунках 2.18 – 2.21. На рисунках 2.18 – 2.21 приняты следующие обозначения: $2\zeta/h_B$ – безразмерная амплитуда вертикальных колебаний судна (отношение абсолютных вертикальных колебаний ζ к амплитуде набегающего волнения $h_B/2$, где h_B – высота набегающего волнения), φ_ζ – фаза вертикальных колебаний судна, ψ/α_B – безразмерная амплитуда килевых колебаний судна (отношение абсолютных килевых колебаний ψ к углу волнового склона набегающего волнения α_B), φ_ψ – фаза вертикальных колебаний судна, ω – частота, рад/с.

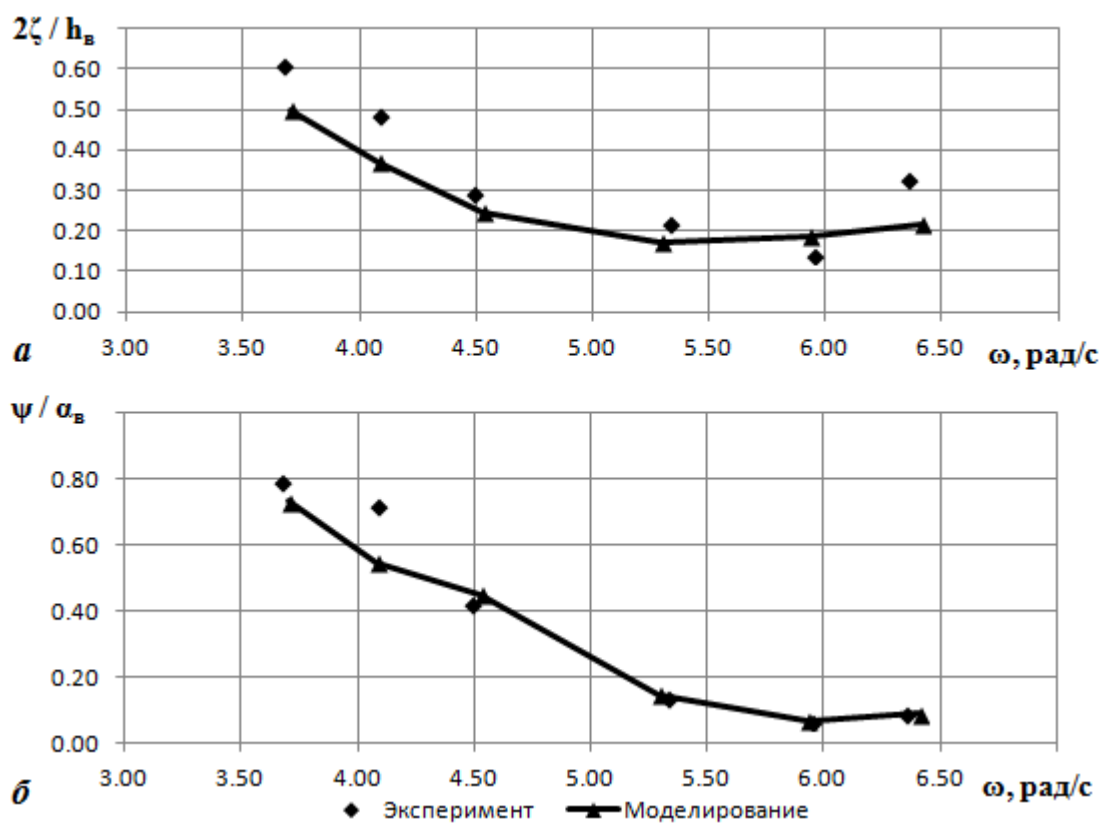


Рисунок 2.18 – Амплитудно-частотные характеристики вертикальной (а) и килевой (б) качки при скорости хода, соответствующей числу Фруда $Fr = 0$

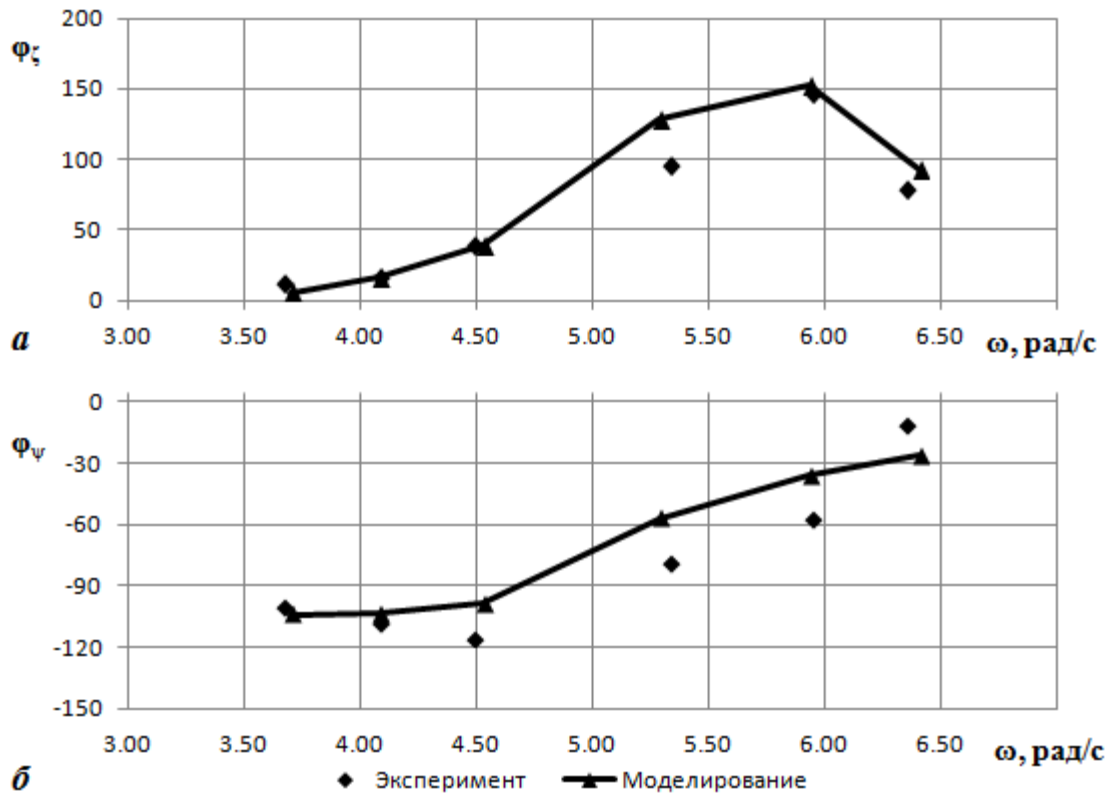


Рисунок 2.19 – Фазово-частотные характеристики вертикальной (а) и килевой (б) качки при скорости хода, соответствующей числу Фруда $Fr = 0$

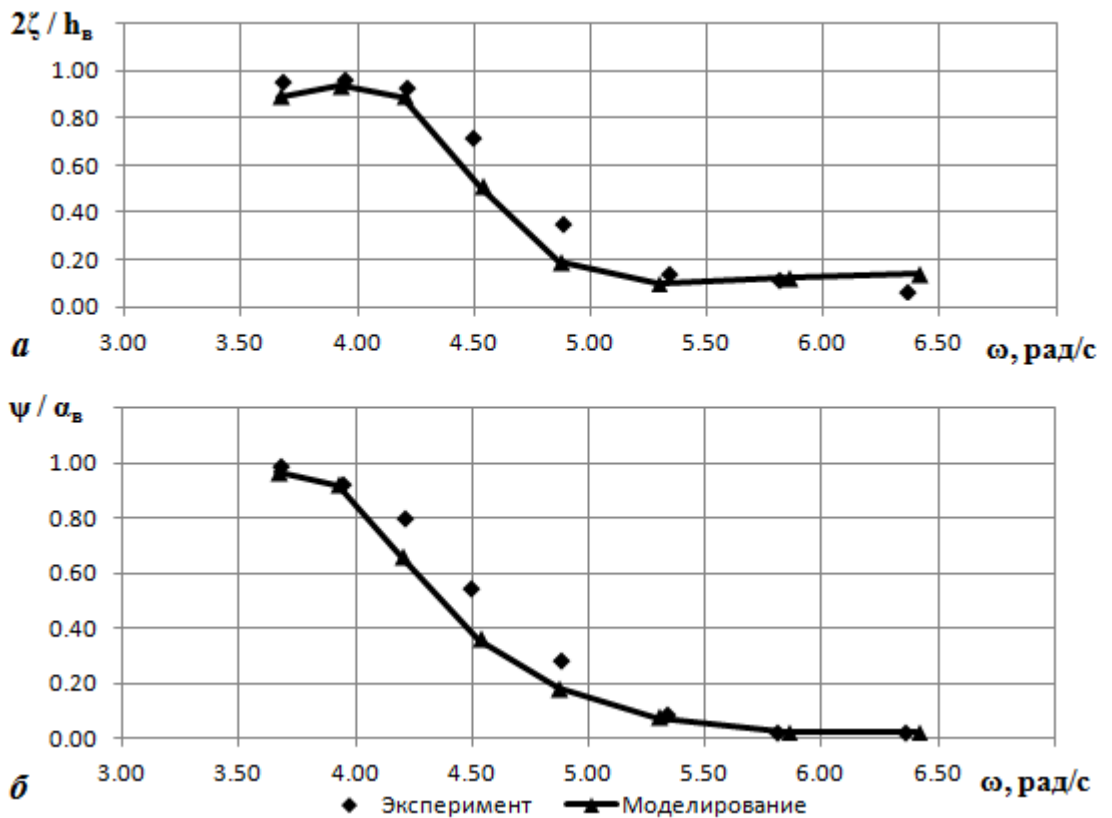


Рисунок 2.20 – Амплитудно-частотные характеристики вертикальной (а) и килевой (б) качки при скорости хода, соответствующей числу Фруда $Fr = 0,28$

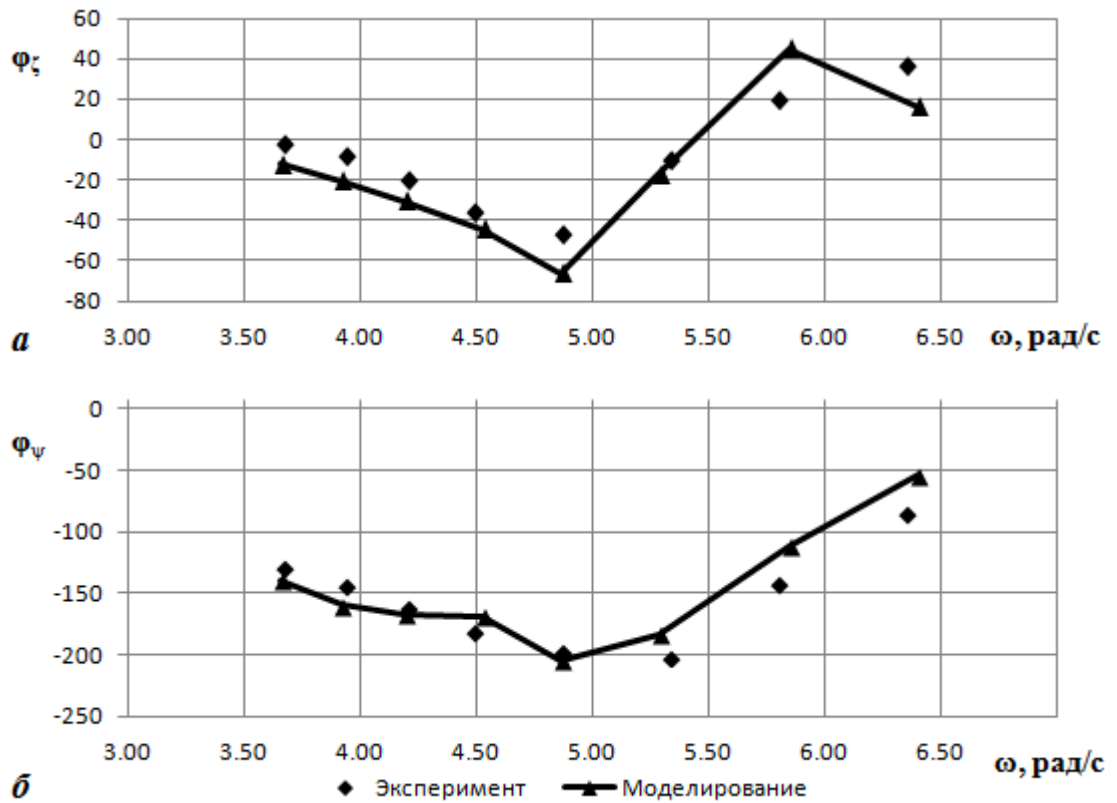


Рисунок 2.21 – Амплитудно-частотные характеристики вертикальной (а) и килевой (б) качки при скорости хода, соответствующей числу Фруда $Fr = 0,28$

Анализируя рисунки 2.18 – 2.21 можно заключить, что численное моделирование позволяет хорошо оценить амплитудно-частотную и фазово-частотную характеристику вертикальной и килевой качки как без скорости хода, так и на ходу. Однако также показано, что существуют зоны, где по результатам численного моделирования амплитуды и фазы качки отличаются от полученных при модельных испытаниях.

2.8 Численное моделирование бортовой качки

Принципиально численное моделирование бортовой качки ничем не отличается от моделирования продольной качки. Однако в данном случае большую роль играют вязкостные составляющие гидродинамических сил, действующие на модель. Об успешном использовании численного моделирования для расчетов параметров бортовой качки написано в работах [41, 57, 80].

В действительности в открытом доступе достаточно сложно найти информацию об экспериментальном исследовании бортовой качки. По результатам поиска были найдены только работы в отчетах Международной конференции опытовых бассейнов [112, 113]. В обеих работах недостаточно данных для качественной оценки возможности применения численного моделирования в районе пика амплитудно-частотной характеристики. На основании этого, численное моделирование бортовой качки будет верифицироваться по результатам проведения эксперимента, описанного в следующей главе.

2.9 Выводы к главе 2

В главе рассмотрено применение современного комплекса вычислительной гидромеханики OpenFOAM для определения гидродинамических характеристик морских объектов.

Современные средства вычислительной гидромеханики позволяют воспроизвести модельные испытания с помощью компьютерного моделирования.

Автором была представлена подробная информация о подготовке численного моделирования динамики морских объектов на тихой воде и на волнении. Даны рекомендации для качественного моделирования регулярного волнения. Описан алгоритм выполнения численного моделирования. Сформированы расчетные методы оценки гидродинамических характеристик морских объектов при качке.

Рассмотрено применение в рамках численного моделирования метода свободных колебаний на тихой воде, а также методов вынужденных колебаний на тихой воде и на волнении с целью определения гидродинамических и динамических характеристик судна.

Показано, что численное моделирование позволяет с достаточно хорошей точностью определить сопротивление морского объекта.

Для верификации численного моделирования метода свободных колебаний рассчитывалась модель DTMB 5415 (корабль класса Арлей Бёрк, ВМС США). Расчеты производились при разных начальных условиях: голый корпус и корпус со скуловыми килями, начальный угол крена $\theta_0 = 10^\circ$ и $\theta_0 = 20^\circ$. Моделирование производилось при скорости хода, соответствующей числу Фруда по длине $Fr = 0,138$.

Расчеты показали хорошую сходимость с экспериментальными данными. Период свободных колебаний при расчетах голого корпуса и корпуса со скуловыми килями отличался от экспериментальных данных не более чем на 5 %.

Затухание качки при моделировании голого корпуса практически не отличается от экспериментальных данных, тогда как при моделировании корпуса со скуловыми киями наблюдается расхождение. Примечательно, что расхождение незначительно при наибольших углах крена, и возрастает при убывании амплитуд качки.

Для верификации численного моделирования метода вынужденных колебаний рассчитывалась модель корпуса Виглей (англ. – Wigley). Расчеты производились при скорости хода, соответствующей числу Фруда по длине $Fr = 0,2$. Моделировались вертикальные и килевые вынужденные колебания.

Расчеты показали достаточно хорошую сходимость с экспериментальными данными при моделировании вертикальных и килевых вынужденных колебаний.

Для верификации численного моделирования оценки характеристик продольной качки выполнялись расчеты модели DTMB 5415 (корабль класса Арлей Бёрк, ВМС США) в варианте исполнения корпуса без скуловых килей. Моделирование производилось при числах Фруда по длине $Fr = 0$ и $Fr = 0,28$.

По результатам моделирования были получены амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики вертикальной и килевой качки. Расчеты показали достаточно хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Численное моделирование бортовой качки выполнено не было ввиду отсутствия достаточного количества и качества экспериментальных данных. Верификация оценки параметров бортовой качки с помощью современных средств вычислительной гидромеханики будет произведена далее.

Результаты верификации расчетных методов оценки гидродинамических характеристик судна при качке показали возможность и достоверность использования предложенных инструментов численного моделирования в качестве альтернативы потенциальным, эмпирическим, полуэмпирическим и экспериментальным методам исследования качки судов.

Главными преимуществами численного моделирования являются скорость и стоимость. Для получения результатов достаточно иметь только теоретический чертеж исследуемого корпуса и его характеристики. В целом можно заключить, что современный комплекс вычислительной гидромеханики OpenFOAM позволяет с достаточно хорошей точностью определять гидродинамические и динамические характеристики морских объектов на тихой воде и на волнении. Данный пакет будет использоваться для анализа продольной и бортовой качки судна с шахтой, а также для анализа колебаний жидкости в шахте судна на волнении. Поскольку найти качественные данные с испытаниями подобных судов практически невозможно, было решено провести собственный эксперимент, о котором написано в следующей главе.

3 Экспериментальное исследование динамики судна с шахтным устройством

3.1 Планирование эксперимента. Выбор исследуемых параметров

Экспериментом называют целенаправленное воздействие на объект исследования с целью получения о нем достоверной информации [31].

Под планированием эксперимента понимают ряд мероприятий, направленных на достоверное получение сведений о работе исследуемого объекта.

В общем случае планирование и организация экспериментального исследования состоит из следующих этапов [31]:

- Постановка задачи;
- Сбор информации об объекте исследования;
- Выбор способа решения задачи;
- Проверка выбранного способа решения задачи;
- Реализация выбранного способа решения задачи;
- Анализ и интерпретация результатов.

Основной целью выполняемого экспериментального исследования является определение характеристик качки судна с шахтным устройством.

Второстепенной целью является определение характеристик динамики жидкости в шахте при качке судна на волнении.

Для решения поставленной задачи проводится модельный эксперимент и исследуются следующие характеристики:

- Амплитудно-частотные характеристики вертикальной и килевой качки модели судна без шахты;
- Амплитудно-частотные характеристики вертикальной и килевой качки модели судна с различными конфигурациями шахтного устройства;
- Осциллограммы затухающих бортовых колебаний модели судна без шахты на тихой воде;

- Осциллограммы затухающих бортовых колебаний модели судна с различными конфигурациями шахтного устройства на тихой воде;
- Амплитудно-частотные характеристики бортовой качки модели судна без шахты;
- Амплитудно-частотные характеристики бортовой качки модели судна с различными конфигурациями шахтного устройства.

Все испытания проводятся при отсутствии скорости хода, как наиболее актуальный случай использования шахтного устройства на реальных судах.

Испытания модели без шахты проводятся для определения влияния наличия шахтного устройства на динамические характеристики судна.

Для проведения модельного эксперимента создана модель с днищевой модульной системой в районе расположения абсциссы центра величины. Модульная система позволяет использовать одну модель для решения задач по испытаниям объекта без шахты и с различными конфигурациями шахтного устройства.

В качестве эталонной модели было выбрано судно серии 60 с коэффициентом общей полноты $\delta = 0,60$ [121].

Исследуемые конфигурации шахтного устройства имеют круглое сечение и диаметр, достигающий 25 % ширины судна.

Рассмотрим используемое экспериментальное оборудование, в которое входят опытовый бассейн, системы измерения угловых и линейных перемещений, а также системы измерения уровня воды и параметров волнения.

3.2 Экспериментальное оборудование

3.2.1 Опытный бассейн

Местом проведения экспериментального исследования является опытный бассейн кафедры теории корабля Санкт-Петербургского государственного морского технического университета.

Основные размеры опытного бассейна:

- Длина по зеркалу воды $L_B = 35,7$ м;
- Ширина котлована $B_B = 5,5$ м;
- Наибольшая глубина воды $H_B = 2,5$ м.

Опытный бассейн предназначен для модельных испытаний характеристик ходкости и качки на тихой воде и на волнении.

Для исследования параметров сопротивления моделей в бассейне предусмотрены как гравитационная система, так и система типа Фруда [11].

Для создания волнения используется плунжерный волнопродуктор, у которого волнообразование вызывают возвратно-поступальные вертикальные перемещения частично погруженного тела (плунжера). Регулируя амплитуду и частоту колебаний плунжера, можно получить систему волн различной длины, высоты и частоты [4]. Установленный волнопродуктор может создавать только двухмерное регулярное волнение.

Согласно рекомендациям и требованиям Международной конференции опытовых бассейнов к мореходным испытаниям [83] эксперименты на двухмерном регулярном волнении должны проводиться следующим образом:

- Для судов обычных обводов испытания должны быть проведены на всех скоростях хода в обязательном диапазоне длин волн от половины до двух длин модели. Большой диапазон может потребоваться для лучшего описания резонансной зоны. Либо отношение высоты волны к длине модели, либо отношение высоты волны к её длине должно быть постоянным (рекомендуемое значение отношения высоты волны к её длине равно $1/50$).

- Для новых типов судов или судов с необычным типом обводов и для того, чтобы исследовать начало больших и экстремальных амплитуд (около резонансных частот, параметрическая бортовая качка) испытания должно проводиться на длинах волн до четырех длин модели и более. Для этих же целей отношение высоты волны к её длине может быть от $1/30$ до $1/20$ и меньше, в зависимости от возможностей модели.

- При определении колебаний модели рекомендуется использовать амплитуду и период как минимум 10 циклов. В ином случае необходимо применение спектрального анализа, как и в случае с испытаниями на нерегулярном волнении, для определения амплитуд и периода волнения и качки модели.

Согласно рекомендациям и требованиям Международной конференции опытовых бассейнов [84] обработка результатов модельных испытаний на регулярном волнении должна производиться следующим образом:

- В процессе испытаний рекомендуется проверять записи сигналов параметров волнения и качки. Если уровень шума очень высокий, могут потребоваться специальные алгоритмы обработки. В ином случае обработка описана далее.

- Анализируемый временной интервал должен быть выбран аккуратно: он должен начинаться после установления регулярного волнения и заканчиваться до возвращения отраженных волн. Если установление регулярной волны проходит долго, то можно при анализе использовать время, когда вернулась первая отраженная волна. Итоговый выбор должен быть компромиссным. Рекомендуется минимизировать влияние отраженных волн, особенно при испытаниях на стопе.

- На практике рекомендуемое число циклов записи находится в промежутке от 10 до 20. Нижний предел зависит от параметров волнения и опытового бассейна. При исследовании моделей с большим собственным периодом и/или важными нелинейными эффектами количество циклов может быть увеличено.

- Период колебаний определяется из записей качки. Существует несколько способов определения периода: а) Спектральный анализ; б) Вычисление среднего арифметического значения из общего времени записи к числу совершенных за это время колебаний; в) Метод наименьших квадратов.

- В случае низкочастотной тенденции применение фильтра высоких частот рекомендуется к спектральному анализу для уменьшения влияния ошибок.

- Амплитуда и фаза волнения и качки должны определяться стандартным анализом Фурье.

3.2.2 Измерение угловых и линейных перемещений модели

Для определения параметров линейных перемещений объекта используются акселерометры, угловых колебаний – гироскопы.

Акселерометры и гироскопы – приборы, измеряющие параметры линейных и угловых перемещений подвижных объектов для решения задач их ориентации, навигации и управления [20].

Фактически, акселерометр – прибор измерения кажущегося ускорения (геометрической разности между абсолютным ускорением и ускорением силы тяжести) [20]. Схема работы простейшего акселерометра представлена на рисунке 3.1. Груз закреплён на пружине. Демпфер подавляет колебания груза. Чем больше ускорение, тем сильнее деформируется пружина, изменяя показания прибора [141].

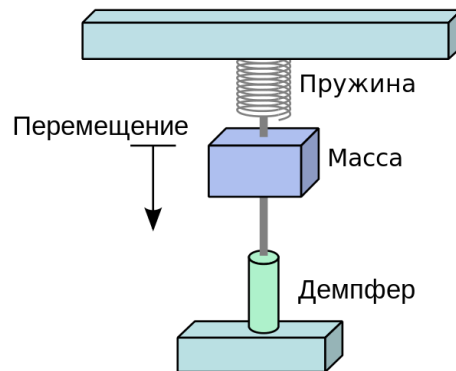


Рисунок 3.1 – Схема работы простейшего акселерометра [141]

Акселерометры разделяются на три основных типа: макромеханические, интегральные и микромеханические [20].

Точность преобразования акселерометрами ускорения в электрический сигнал определяется величинами смещения нуля, погрешностью шкалы, а также температурным и временным дрейфом этих параметров. Шум, содержащийся в выходном сигнале, определяет разрешающую способность устройства, важную при определении малых ускорений [20].

Гироскопы делятся на два основных типа: свободные гироскопы, задача которых заключается в «сохранении» заданного направления, и измерители угловой скорости объекта, на котором они установлены. Последние в свою очередь подразделяются в зависимости от принципа действия, например, лазерные и волоконно-оптические, механические, волновые твердотельные и микромеханические [20].

Важнейшими характеристиками гироскопов являются диапазон измерений, масштабный коэффициент и его стабильность, остаточный дрейф, массогабаритные и эксплуатационные параметры и характеристики [20].

В последнее время все большее распространение получают микроэлектромеханические системы (МЭМС). МЭМС – это системы, включающие в себя взаимосвязанные механические и электрические компоненты микронных размеров. На основе МЭМС технологий было сделано большое количество устройств, таких как сопла струйного принтера,

акселерометры, магнетометры, гироскопы, микрометры и микрозахваты, датчики давления и расходомеры [8].

Одним из примеров совместной реализации МЭМС датчиков акселерометров и гироскопов для определения положения объекта в пространстве является модуль MPU-6050 [107], который и был использован в рамках диссертационного исследования.

В модуль MPU-6050 входят трехосевой акселерометр и трехосевой гироскоп. Иногда такой датчик называют шестиосевым. Гироскоп имеет возможность измерять угловые скорости в диапазонах ± 250 , ± 500 , ± 1000 и ± 2000 °/с, имеет встроенные функции низкочастотной обработки шума и фильтр низких частот, а также интегрированный аналого-цифровой преобразователь. Акселерометр способен измерять линейные ускорения в диапазонах $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ и $\pm 16g$, имеет интегрированный аналого-цифровой преобразователь. Соединение с контроллером или компьютером производится по связи I²C.

Модули, основанные на МЭМС датчиках, обычно имеют относительно высокие уровни шума и дрейфа. Несмотря на это, они находят широкое применение при разработках навигационных систем беспилотных летательных аппаратов [20].

Для уменьшения влияния шума на работу измерительной системы рекомендуют использовать фильтры. Среди наиболее распространенных фильтров следует отметить фильтр Кальмана [91], альфа-бета фильтр [42] и фильтр Маджвика [96].

Необходимость использования фильтра объясняется, в первую очередь, необходимостью получать фактические линейные и угловые перемещения объекта в режиме реального времени. Наиболее простой способ получать показания перемещений объекта в реальном времени – это одинарное или двойное интегрирование угловых скоростей и линейных ускорений по времени.

Однако в случае испытаний модели судна на регулярном волнении, процесс качки носит не стохастический, а гармонический характер. Ввиду этого для получения реальных значений угловых и линейных перемещений есть возможность использовать не прямое численное интегрирование, а постобработку реализаций угловых скоростей и линейных ускорений. В основе постобработки лежит дифференциальное свойство гармонического процесса:

$$\eta_k = \eta_{k0} \sin(\omega t + \varphi_k), \quad (3.1)$$

$$\dot{\eta}_k = \eta_{k0} \omega \cos(\omega t + \varphi_k), \quad (3.2)$$

$$\ddot{\eta}_k = -\eta_{k0} \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_k), \quad (3.3)$$

где η_k – угловое или линейное перемещение;

η_{k0} – амплитуда гармонического процесса;

ω – круговая частота процесса;

t – время;

φ_k – фаза.

Таким образом, имея амплитуды угловых скоростей и линейных ускорений и круговую частоту процесса можно определить амплитуды угловых и линейных перемещений объекта.

Для реализации данной постобработки необходим качественный анализ реализаций, нахождение амплитуды и частоты процесса. Для этого используется разложение реализации в ряд Фурье [90]:

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n\omega t + \varphi_n), \quad (3.4)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt, \quad (3.5)$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad (3.6)$$

$$\varphi_n = \text{atan} \left(\frac{b_n}{a_n} \right), \quad (3.7)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cos(n\omega t) dt \text{ with } n > 0, \quad (3.8)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \sin(n\omega t) dt, \quad (3.9)$$

где $F(t)$ – случайная периодическая функция;

a_0 – математическое ожидание процесса;

c_n и φ_n – амплитуда и фаза n -го гармонического процесса;

ω – круговая частота;

a_n и b_n – коэффициенты Фурье.

3.2.3 Измерение колебаний жидкости в шахте

Колебания жидкости в шахте вызваны набегающими волнами и колебаниями судна. В целом, для оценки колебаний жидкости в шахте судна можно рассматривать устройства для измерения элементов волн, которые называются волномерами, и приборы для записи волновых колебаний свободной поверхности моря, называемые волнографами [16].

К волномерам относятся волномерные рейки и вехи. Одним из наиболее точных методов регистрации колебаний в точке является кино съемка волномерной вехи или рейки с делениями, который, однако, является очень трудоемким и используется, как правило, в качестве эталона [16].

Волнограф позволяет регистрировать величины, характеризующие волновые движения или измерять их элементы с наибольшей достоверностью. Волнографы можно разделить на электродные, поплавковые, буйковые, а также на измерители гидростатического давления и альтиметры. Сюда же относят так называемые оптические методы и обычно отдельно рассматривают судовые волнографы – приборы, установленные на борту судна [16].

Одним из самых распространенных типов волнографов является струнный или резистивный волнограф. Принцип измерения основан на зависимости легко измеряемого параметра, например сопротивления, от длины надводной части. При прохождении волны меняется уровень воды в точке измерения, приводя к изменению сопротивления струны [37]. Схема работы струнного волнографа представлена на рисунке 3.2.

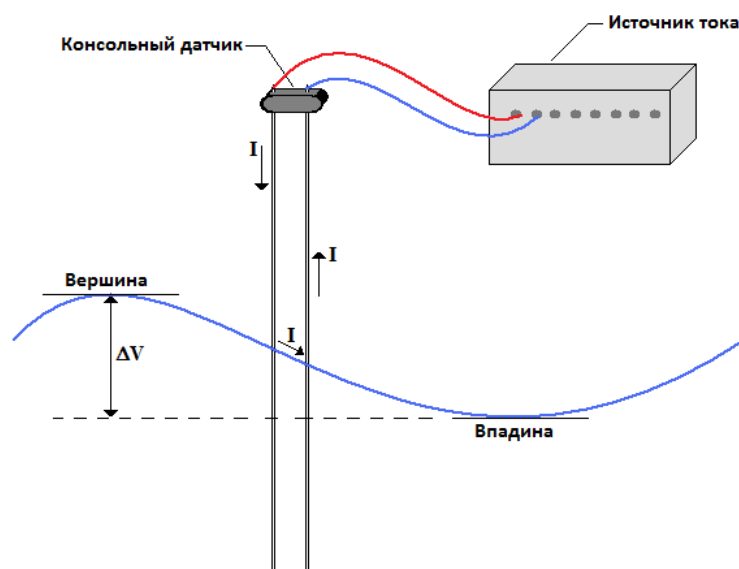


Рисунок 3.2 – Схема работы струнного волнографа [69]

В открытом доступе было найдено руководство по самостоятельному созданию струнного волнографа [55].

Такой тип волнографа широко применяется в опытовых бассейнах по всему миру не только для измерения параметров волнения, на котором проводятся модельные испытания, но и для регистрации, например, параметров ходовой волны судна [119, 128].

В рамках диссертационного исследования был разработан струнный волнограф с нитями из нихрома, передаваемый данные на компьютер с помощью аналого-цифрового преобразователя ADS 1115 посредством канала I²C [49].

3.3 Создание опытной модели

3.3.1 Выбор исследуемого корпуса

В качестве исследуемой модели следует принять хорошо изученную форму корпуса, такую как математически описываемый корпус Виглей [88], одновинтовое транспортное судно серии 60 [68] или контейнеровоз s175 [41]. Теоретические чертежи рассматриваемых корпусов представлены на рисунках 3.3 – 3.5 соответственно.

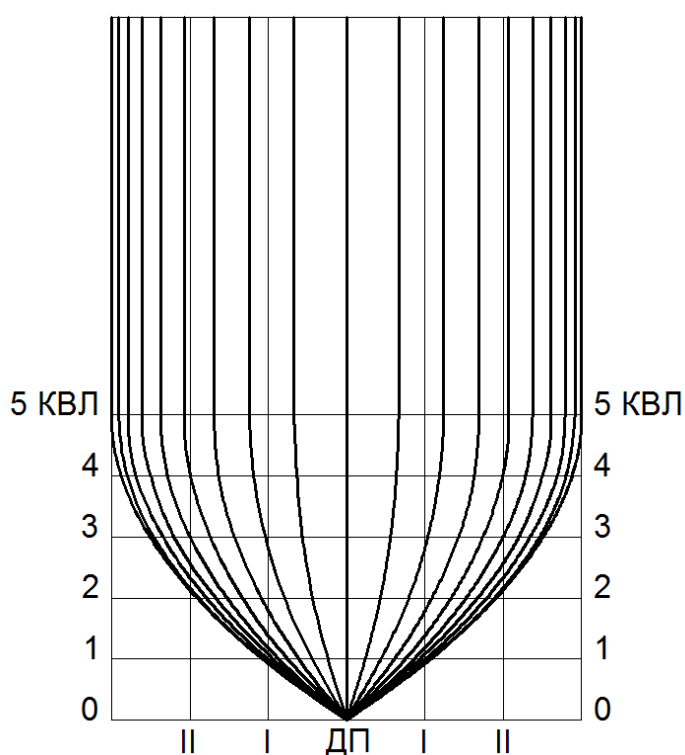


Рисунок 3.3 – Теоретический чертеж корпуса Виглей

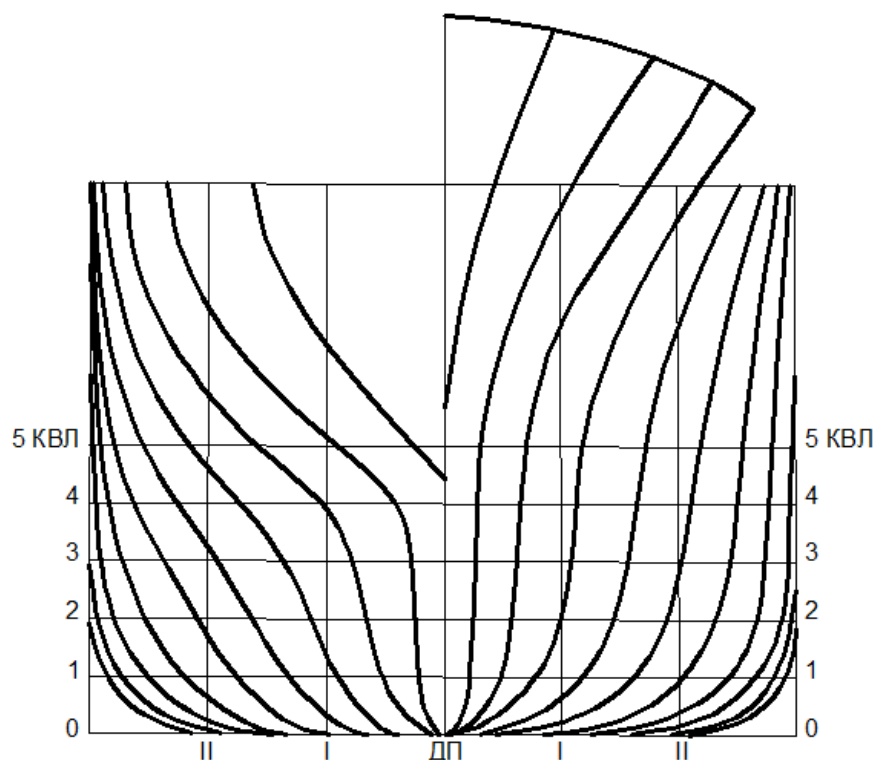


Рисунок 3.4 – Теоретический чертеж корпуса серии 60

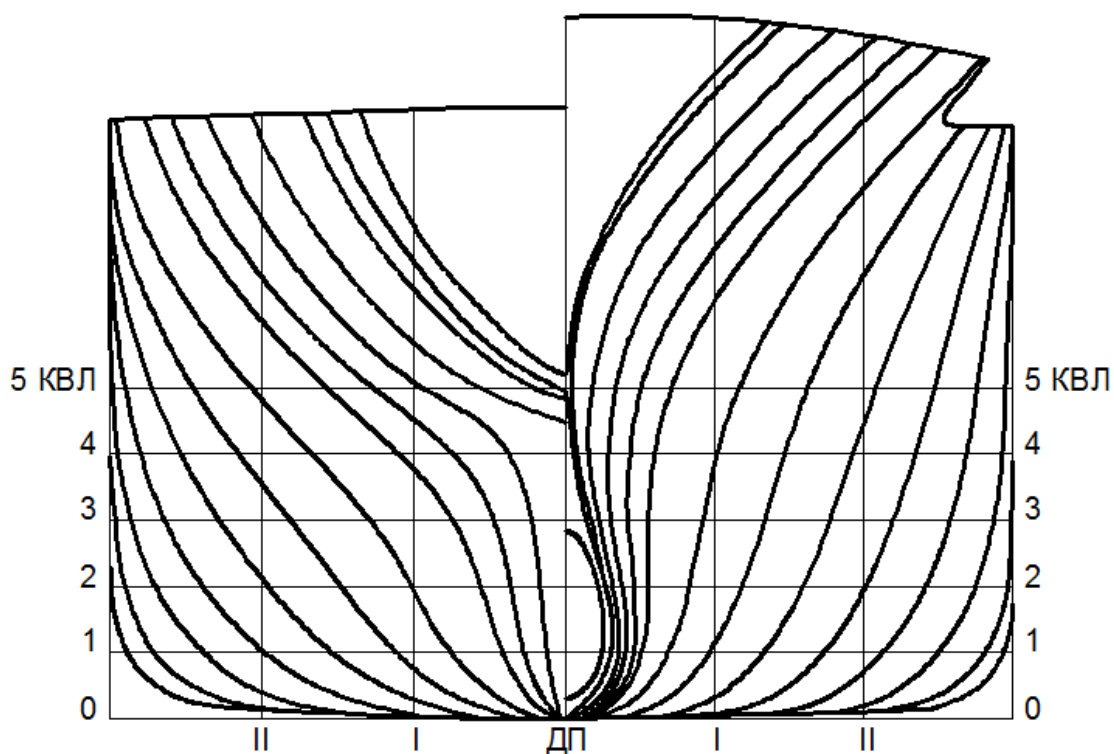


Рисунок 3.5 – Теоретический чертеж корпуса s175

Здесь следует отметить, что на конференции опытовых бассейнов 1978 года [113] было принято заменить эталонную модель судна серии 60 на модель контейнеровоза s175. Было две причины: корпус серии 60 не

соответствует современным обводам судна и не рассчитан на работу при высоких скоростях хода, которые больше всего интересуют исследователей качки. Несмотря на это, в качестве опытной модели был выбран корпус серии 60, потому что:

1 Модель корпуса серии 60 считалась эталонной долгое время и по ней имеется большое количество различной информации;

2 Испытания на регулярном волнении должны быть проведены без скорости хода;

3 Корпус Виглей является сильно упрощенной, аналитически построенной формой корпуса, которая не имеет реальных судовых обводов, а судно s175 имеет бульбовую носовую оконечность, которая усложняет процесс изготовления модели.

4 В опытовом бассейне кафедры теории корабля Санкт-Петербургского государственного морского технического университета была найдена модель корпуса серии 60 с коэффициентом общей полноты $\delta = 0,60$.

3.3.2 Изготовление модели

Опытная модель изготавливалась по основе прототипа, имеющегося в наличии в опытовом бассейне кафедры теории корабля Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. Основные геометрические характеристики изготавливаемой модели приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристики опытной модели

Характеристика	Значение
Длина между перпендикулярами, м	2,090
Ширина максимальная, м	0,289
Осадка расчетная, м	0,125
Высота борта, м	0,205
Водоизмещение, кг	45

Опытная модель изготавливалась из стеклопластика на основе полиэфирных смол путем копирования прототипа.

Для обеспечения испытаний модели с различными конфигурациями шахтного устройства на модели создан специальный блок – шахта особо больших размеров конусной формы для установки специально подготовленных модулей, о которых написано в следующем разделе.

Изготовленная модель без установленного модуля с шахтным устройством показана на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Модель без установленного модуля с шахтным устройством

3.3.3 Изготовление сменных модулей

Для установки сменных модулей на модели предусмотрено специальное место – шахта особо больших размеров конической формы. Использование шахты оправдано с точки зрения прочности и водонепроницаемости.

Модуль состоит из двух частей: основа, которая соединяется с корпусом модели, и шахта. Основа выполнена из фанеры, окрашенной и защищенной от воздействия влаги, шахта – из оргстекла. Причина использования оргстекла в качестве материала для шахты в возможности наблюдать за колебаниями жидкости в шахте с помощью видеокамеры.

Шахтные модули устанавливаются заподлицо с днищем корпуса и крепятся винтами к специально подготовленной герметичной площадке со стороны днища.

Было разработано три модуля:

- Модуль № 1 – без шахты;

- Модуль № 2 – шахта круглого сечения с внутренним диаметром $d_{ш} = 0,044$ м и относительным диаметром $d_{ш} / B = 15$ %; собственная частота колебаний жидкости в шахте при осадке $T = 0,125$ м равна $\omega_{ш} = 8,30$ рад/с [102];

- Модуль № 3 – шахта круглого сечения с внутренним диаметром $d_{ш} = 0,074$ м и относительным диаметром $d_{ш} / B = 25$ %; собственная частота колебаний жидкости в шахте при осадке $T = 0,125$ м равна $\omega_{ш} = 7,90$ рад/с [102];

Большого диаметра добиться не удалось из-за применения модульной системы. Для испытаний модели с шахтами большего диаметра требуется изготовление опытного образца сразу с шахтой.

Трехмерные модели исследуемого корпуса с тремя изготовленными модулями представлены на рисунке 3.7.

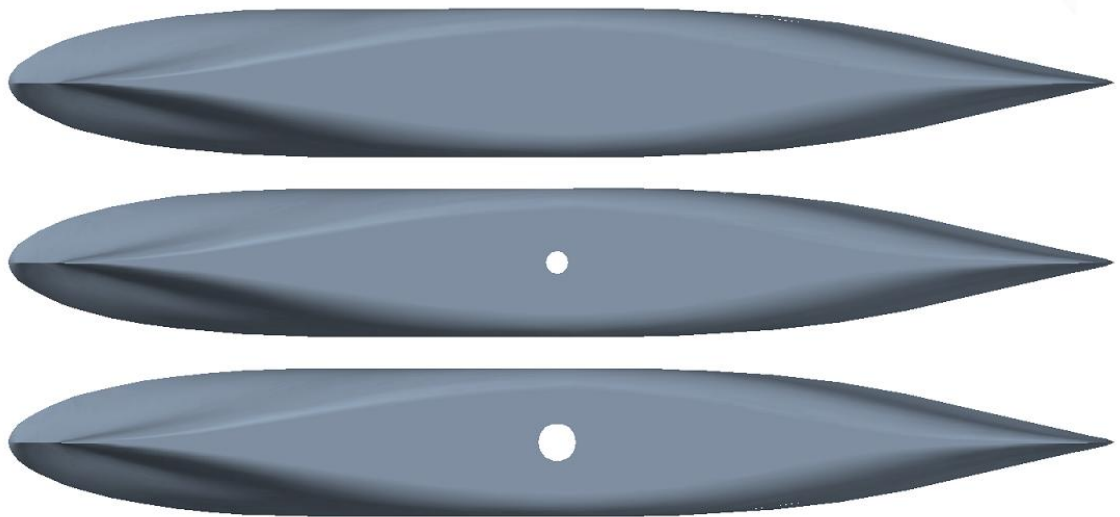


Рисунок 3.7 – Вид снизу на трехмерные модели исследуемого корпуса с различными модулями: сверху – с модулем № 1, посередине – с модулем № 2, снизу – с модулем № 3

3.3.4 Установка измерительного оборудования

На модели необходимо установить следующее измерительное оборудование:

- Датчик угловых и линейных перемещений модели – модуль MPU-6050, который должен быть установлен как можно ближе к центру тяжести исследуемого объекта.

- Датчик колебаний жидкости в шахте модели – струнный волнограф или волномерная рейка с видеозаписью. Ввиду сложностей с реализацией автоматизированной регистрации данных, в том числе по причине малых размеров исследуемых шахт, было принято решение об использовании волномерной рейки.

Так как проведение испытаний на ходу не предполагается, то нет необходимости использовать беспроводную связь для передачи данных с датчиков – достаточно вывести провода к считывающему устройству. В качестве считывающего устройства используется одноплатный компьютер малых размеров Raspberry Pi [146].

На модель устанавливаются специальные ножи для проведения динамической тарировки с целью определения момента инерции массы

объекта [4]. Ножи должны быть установлены таким образом, чтобы в процессе динамической тарировки выступающие части палубы модели не мешали процессу тарировки.

Для выравнивания модели после смены модулей и/или при установке дополнительных приспособлений на палубе модели предусматриваются перемещаемые грузы.

При испытаниях продольной качки на модель устанавливается планка, которая соединяет модель с зафиксированным буксировочным тросом. Это делается для того, чтобы заблокировать перемещения в продольном направлении и разворачивание модели лагом.

Модель с установленными датчиками и приспособлениями представлена на рисунке 3.8. Вид на волномерную рейку, установленную на шахте, со стороны видеокамеры представлен на рисунке 3.9.



Рисунок 3.8 – Модель на плаву с установленными датчиками и приборами

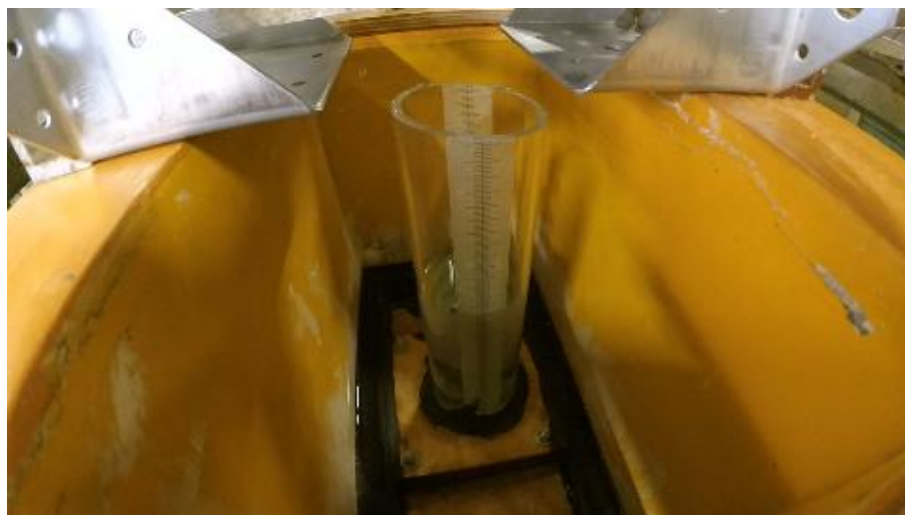


Рисунок 3.9 – Вид на волномерную рейку, установленную на шахте

3.4 Проведение экспериментального исследования

3.4.1 Тарировка модели

Тарировка – это определение таких параметров модели, как масса, положение центра тяжести, моменты инерции массы относительно продольной и поперечной оси и приведение их к значениям, обеспечивающим подобие модели и натуры [4].

Масса модели определяется взвешиванием. При недостаточной массе модель балластируют. Расположение балласта определяется требованиями к положению центра тяжести.

Координаты центра тяжести модели по длине и ширине могут быть найдены с помощью взвешивания на двух и более весах или безменах, а также с помощью подвеса модели на специальные ножи. Положение центра тяжести по высоте модели можно определить либо на плаву с помощью опыта кренования, либо с помощью подвеса на специальные ножи и проведении так называемой динамической тарировки.

Момент инерции массы может быть определен только с помощью динамической тарировки, когда модель в воздухе подвешивают на специальных ножах. Модель раскачивают и измеряют период свободных колебаний. Затем, используя формулы для маятника, находят момент инерции массы относительно интересующей оси [4].

По результатам тарировки были получены характеристики модели, представленные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Характеристики опытной модели по результатам тарировки

Характеристика	Значение
Абсцисса центра тяжести от мидельшпангоута, м	-0,03
Ордината центра тяжести от диаметральной плоскости, м	0,00
Апplikата центра тяжести от основной плоскости, м	0,10
Момент инерции относительно продольной оси, кг·м ²	0,8
Момент инерции относительно поперечной оси, кг·м ²	6,5

3.4.2 Выбор параметров волнения

Для построения амплитудно-частотной характеристики модель многократно испытывают на различном волнении.

Для исследования качки на регулярном волнении рекомендуется рассматривать диапазон длин волн от половины до двух длин модели [83]. Характеристики волнения, на которых проводятся испытания модели, представлены в таблице 3.3. Крутизна волнения при всех испытаниях принимается равной 1/50.

Таблица 3.3 – Характеристики волнения и системы для проведения испытаний модели

λ , м	T_B , с	h_B , м
1,50	0,980	0,030
1,75	1,058	0,035
2,00	1,131	0,040
2,25	1,200	0,045
2,50	1,265	0,050
3,00	1,386	0,060
3,50	1,487	0,070
4,00	1,600	0,080

3.4.3 Исследование параметров вертикальной и килевой качки

Для определения параметров вертикальной и килевой качки проводятся испытания на встречном волнении.

На рисунках 3.10 – 3.12 представлены некоторые снимки колебаний модели на встречном волнении при отсутствии скорости хода.

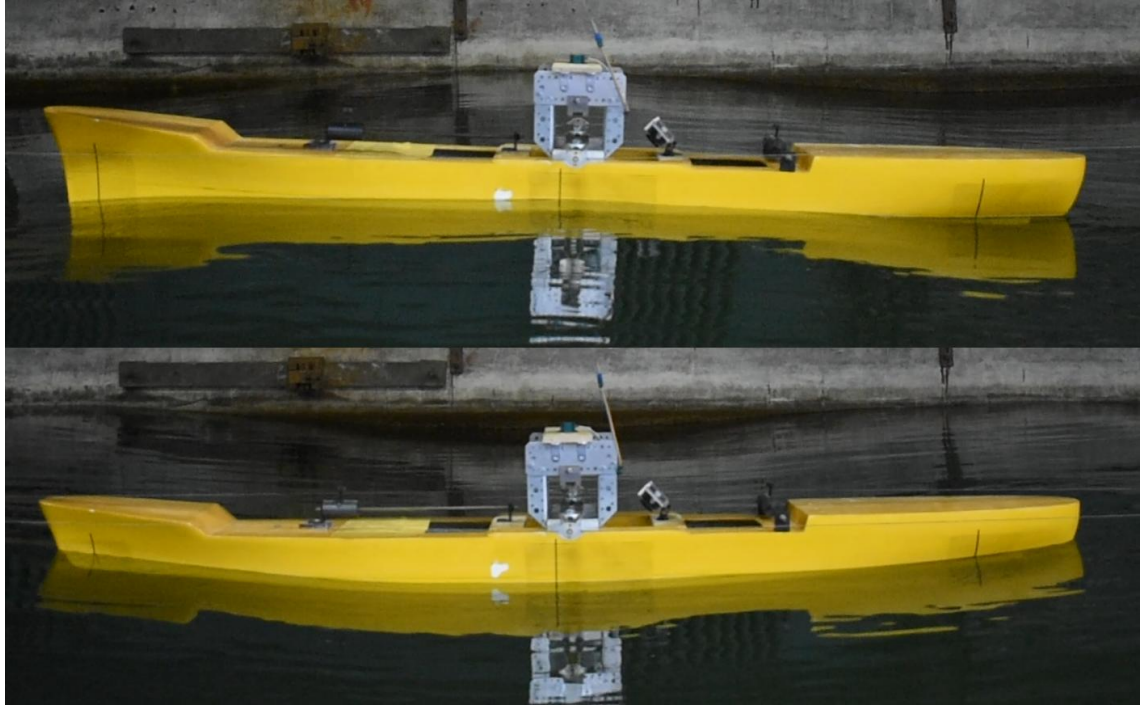


Рисунок 3.10 – Качка модели при встречном волнении длиной 4,0 м

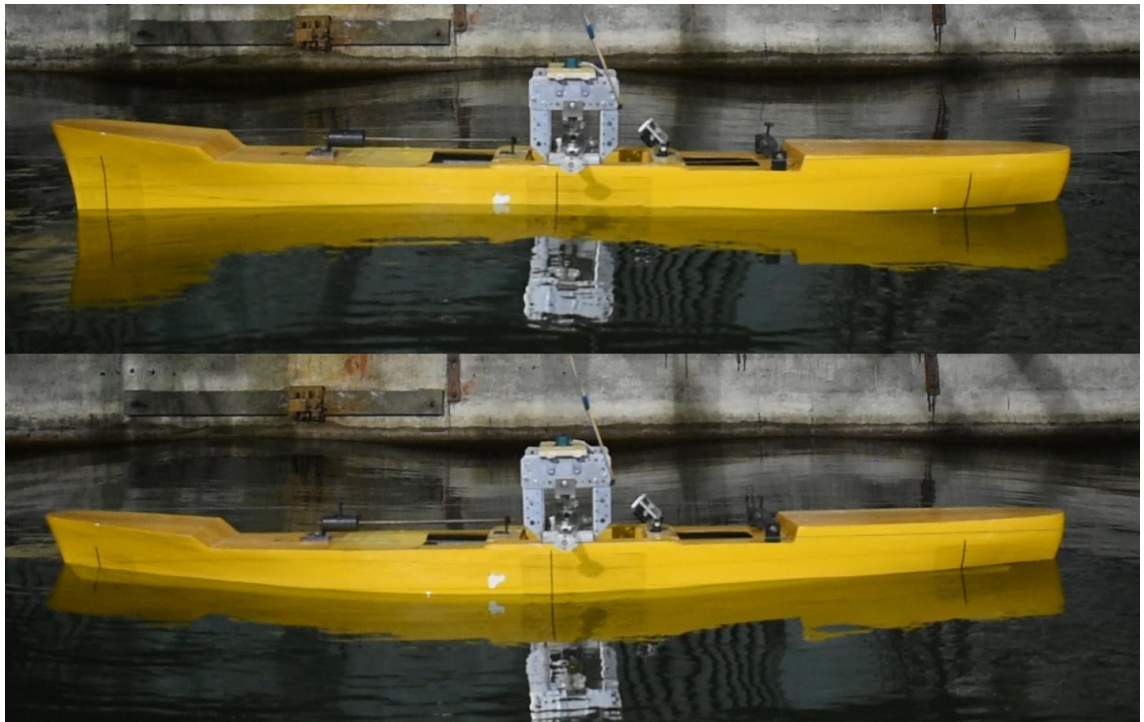


Рисунок 3.11 – Качка модели при встречном волнении длиной 2,3 м

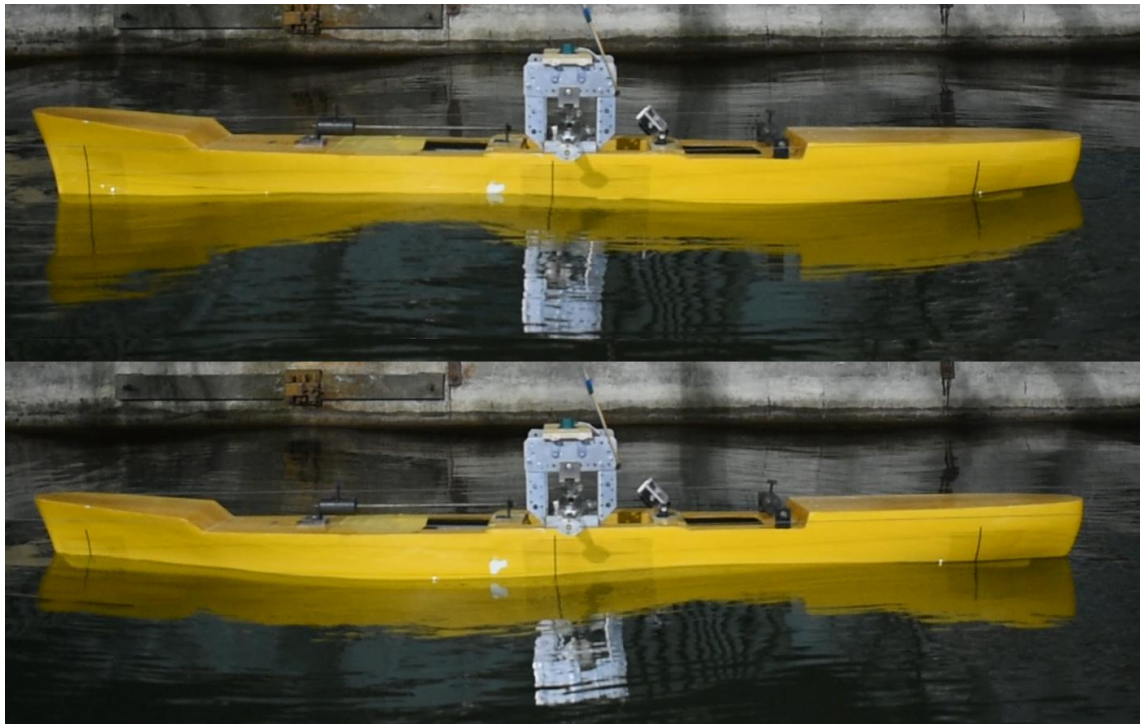


Рисунок 3.12 – Качка модели при встречном волнении длиной 1,5 м

В процессе испытаний регистрировались показания угловых скоростей и линейных ускорений модели. Пример записанной осциллограммы представлен на рисунке 3.13.

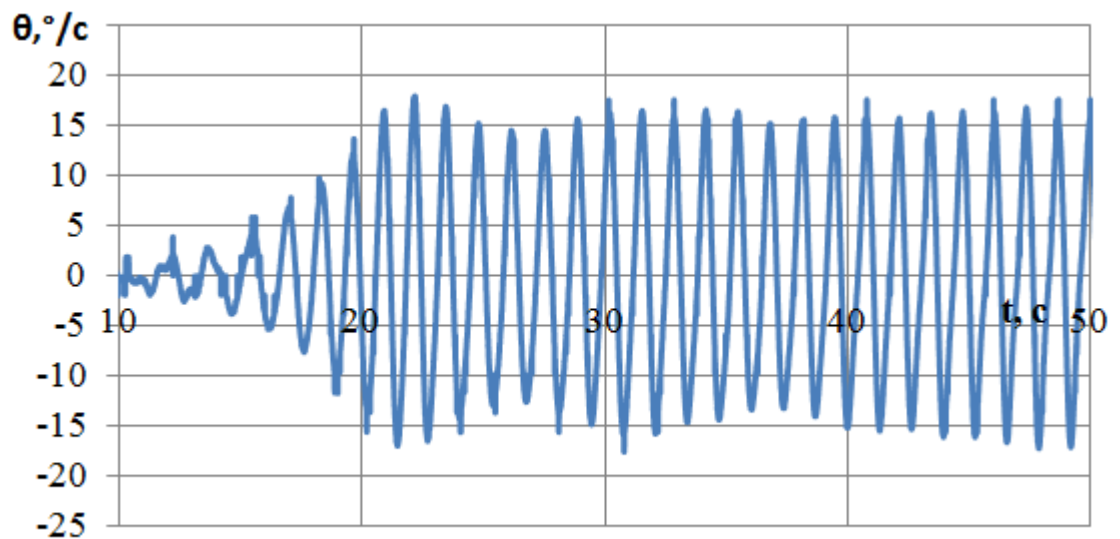


Рисунок 3.13 – Осциллограмма угловой скорости относительно поперечной оси при испытаниях модели на встречном волнении длиной 2,7 м

При испытаниях модели регистрировались показания колебаний воды в шахте модели. Изменения уровня воды в шахте при качке модели представлены на рисунке 3.14.



Рисунок 3.14 – Изменения уровня воды в шахте при качке модели на встречной волне длиной 4,0 м и высотой 0,079 м

3.4.4 Исследование параметров бортовой качки

Параметры бортовой качки исследуются в два этапа: на тихой воде и на волнении.

На тихой воде модель испытывается методом свободных колебаний для определения собственного периода качки, коэффициента демпфирования и присоединенного момента инерции. Для этого модель наклоняется экспериментатором на угол входа верхней палубы в воду и отпускается, начиная совершать свободные затухающие колебания. Анализ осциллограммы затухающих колебаний позволяет определить искомые величины.

Пример записанной осциллограммы затухающих угловых скоростей бортовой качки представлен на рисунке 3.15.

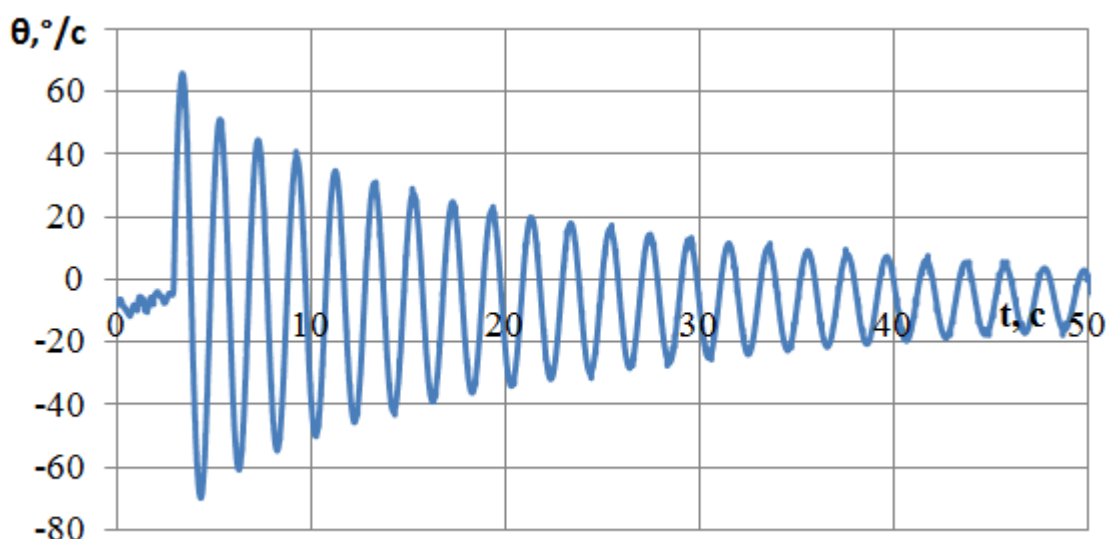


Рисунок 3.15 – Осциллограмма угловой скорости относительно продольной оси при испытаниях модели методом свободных колебаний

Испытания на волнении принципиально ничем не отличаются от испытаний на встречном волнении. Однако в этом случае модель устанавливается лагом к набегающим волнам и не крепится за буксировочную систему, поскольку в этом случае она (система) может повлиять на исследуемые параметры.

Поскольку модель при испытаниях на лаговом волнении находится в свободном плавании, ее необходимо удерживать от дрейфа и разворота. Для этого к модели крепятся два легких тросика, которые позволяют корректировать положение модели в процессе испытаний.

На рисунках 3.16 – 3.18 представлены некоторые снимки колебаний модели на лаговом волнении при отсутствии скорости хода.

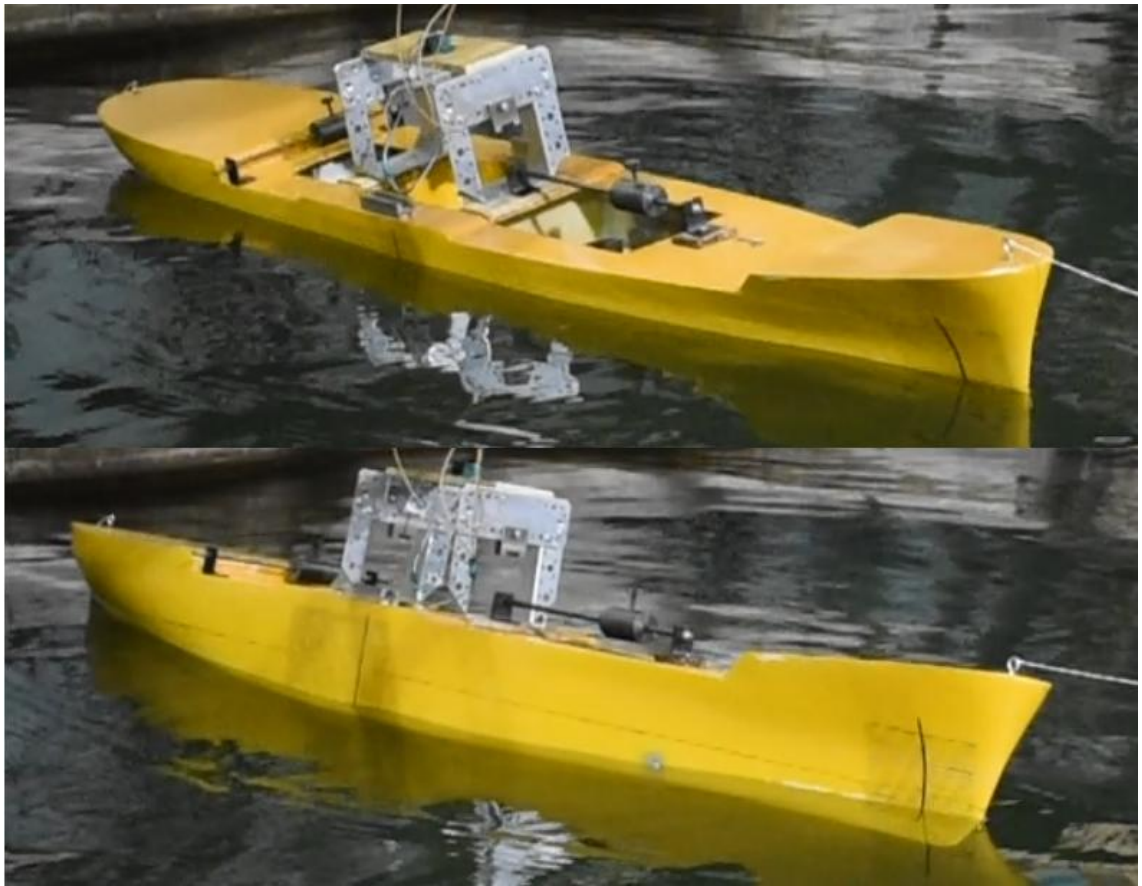


Рисунок 3.16 – Качка модели при лаговом волнении длиной 1,6 м

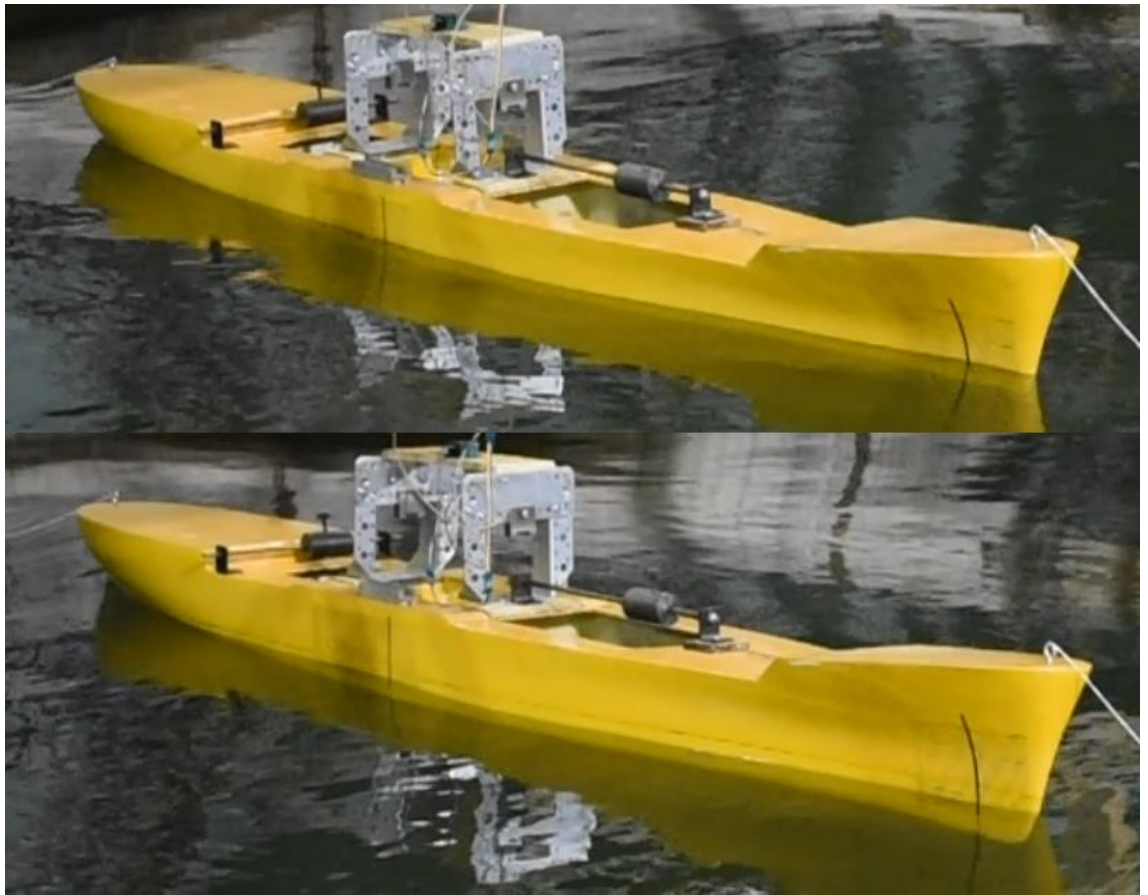


Рисунок 3.17 – Качка модели при лаговом волнении длиной 2,4 м



Рисунок 3.18 – Качка модели при лаговом волнении длиной 5,1 м

3.5 Результаты экспериментального исследования

По результатам экспериментального исследования был получен ряд осциллограмм угловых скоростей и линейных ускорений при качке модели на встречном и лаговом волнении, а также при испытаниях методом свободных колебаний. Для построения амплитудно-частотных характеристик килевой, вертикальной и бортовой качки осциллограммы необходимо обработать.

Для обработки осциллограмм был разработан алгоритм анализа, реализованный на языке программирования Python [145]. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3.19.

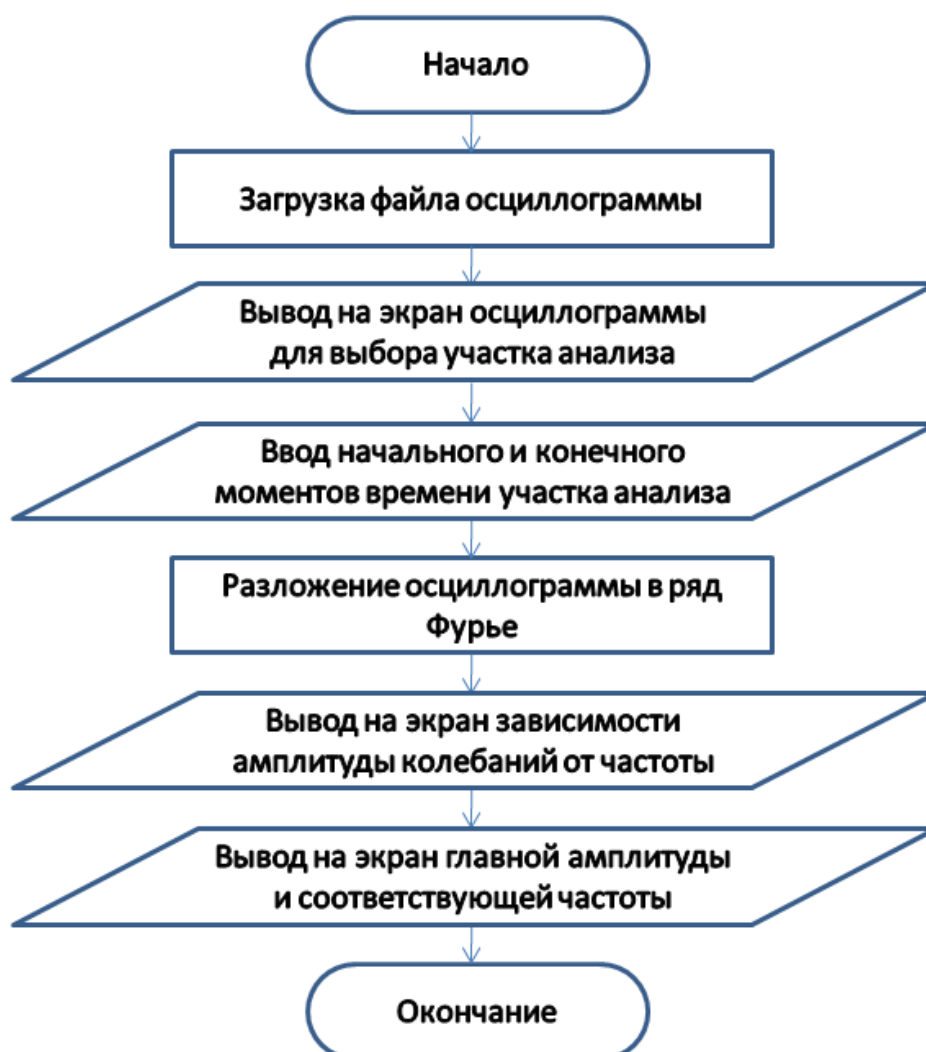


Рисунок 3.19 – Блок-схема алгоритма для анализа осциллограмм

По результатам работы программы были получены амплитуды и частоты колебаний скоростей вертикальной, килевой и бортовой качки.

3.5.1 Результаты испытаний вертикальной и килевой качки на встречном волнении

Результаты экспериментального исследования вертикальной и килевой качки и колебаний жидкости в шахте судна на встречном волнении при отсутствии скорости хода представлены в Приложении А.

Анализируя данные, представленные в Приложении А, можно получить амплитудно-частотные характеристики вертикальной и килевой качки и колебаний жидкости в шахте модели в зависимости от установленного модуля, которые представлены на рисунках 3.20 – 3.22. Сплошные линии на рисунках 3.20 – 3.22 соответствуют аппроксимации каждой амплитудно-частотной характеристики.

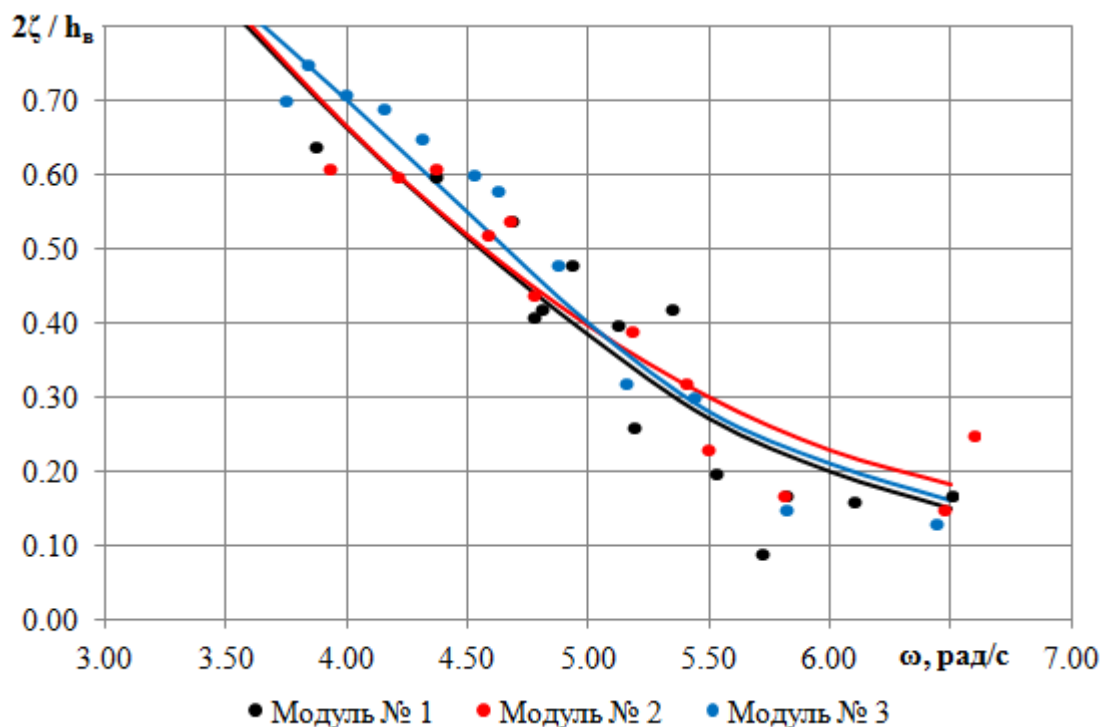


Рисунок 3.20 – Амплитудно-частотные характеристики вертикальной качки модели с различными шахтными модулями на встречном волнении

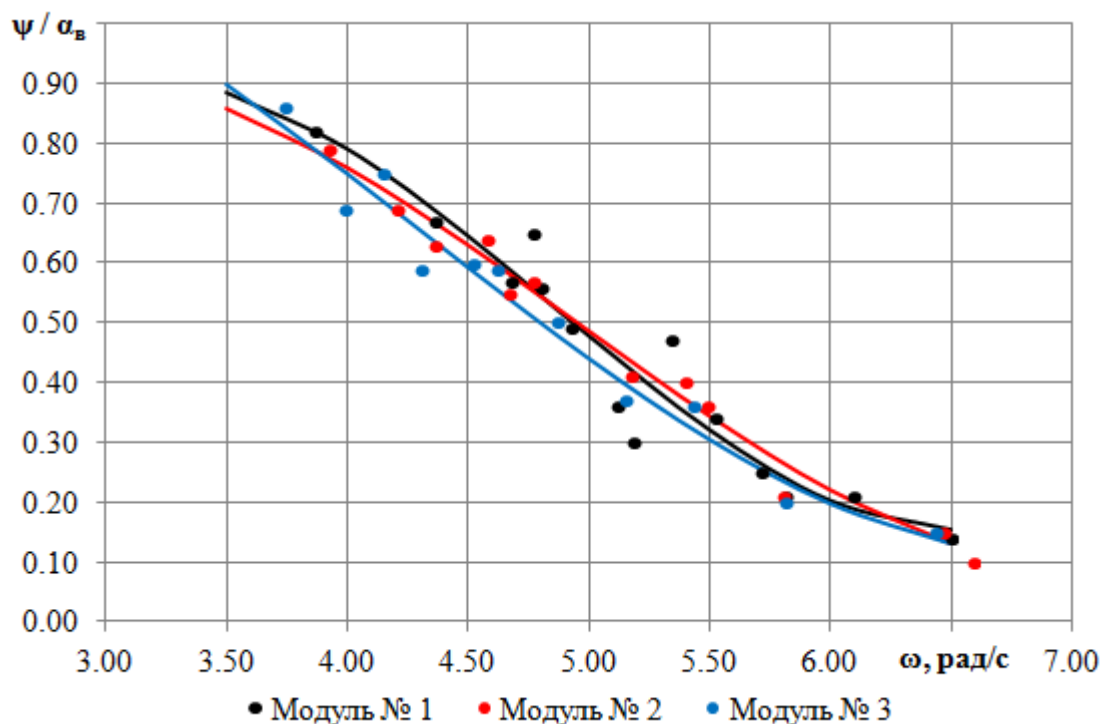


Рисунок 3.21 – Амплитудно-частотные характеристики килевой качки моделей с различными шахтными модулями на встречном волнении

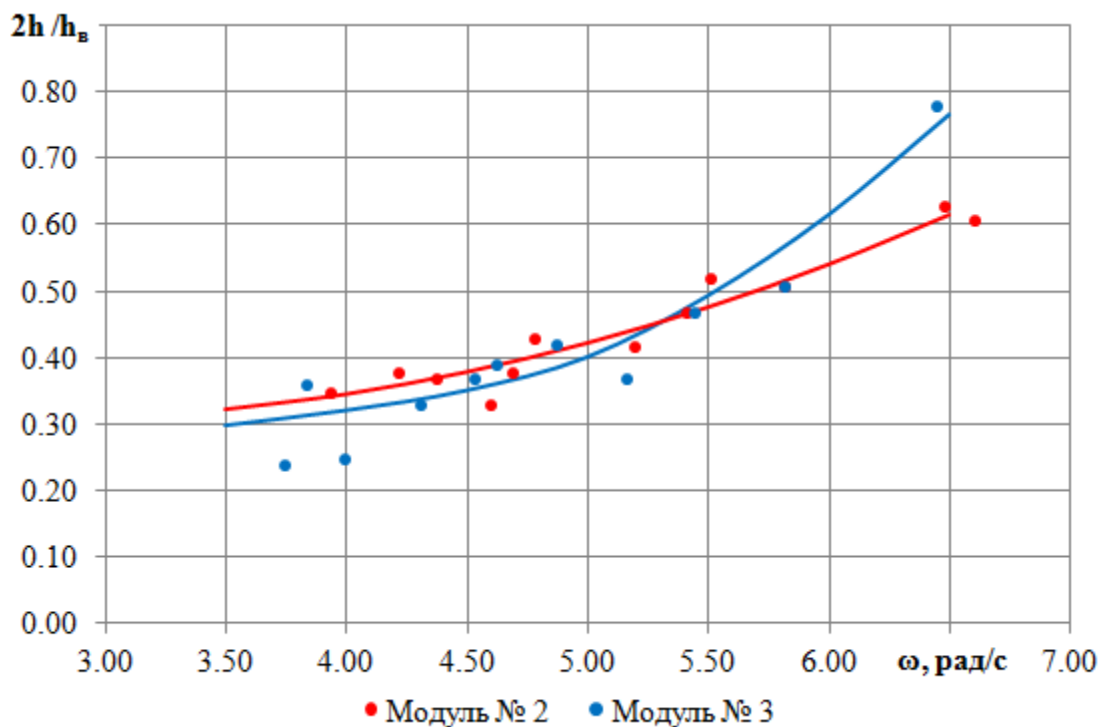


Рисунок 3.22 – Амплитудно-частотные характеристики колебаний жидкости в шахте модели с различными шахтными модулями на встречном волнении

Анализируя амплитудно-частотные характеристики, представленные на рисунках 3.20 и 3.21, можно заключить, что наличие шахты круглого сечения диаметром до 25 % ширины модели не оказывает влияния на продольную качку судна.

3.5.2 Результаты испытаний бортовой качки на тихой воде

Испытания бортовой качки на тихой воде проводятся по методу свободных колебаний, который позволяет определить значения собственного периода качки, безразмерный коэффициент демпфирования и коэффициент присоединенного момента инерции массы модели.

По результатам испытаний получены осциллограммы затухающей угловой скорости бортовой качки, пример которой представлен на рисунке 3.15. Обычно для анализа результатов испытаний методом свободных колебаний используют осциллограмму затухающих угловых перемещений бортовой качки, поэтому здесь есть несколько вариантов обработки данных:

- 1 Проинтегрировать данные осциллограммы затухающей угловой скорости бортовой качки для получения осциллограммы затухающих угловых перемещений, которую впоследствии анализировать;

- 2 Анализировать поведение осциллограммы затухающей угловой скорости качки.

В первом случае получение осциллограммы затухающих угловых перемещений затруднено тем, что датчик угловой скорости имеет шум и дрейф, которые при интегрировании могут повлиять на значения осциллограммы. Осциллограммы затухающих колебаний без корректировки дрейфа и с корректировкой дрейфа представлены на рисунке 3.23.

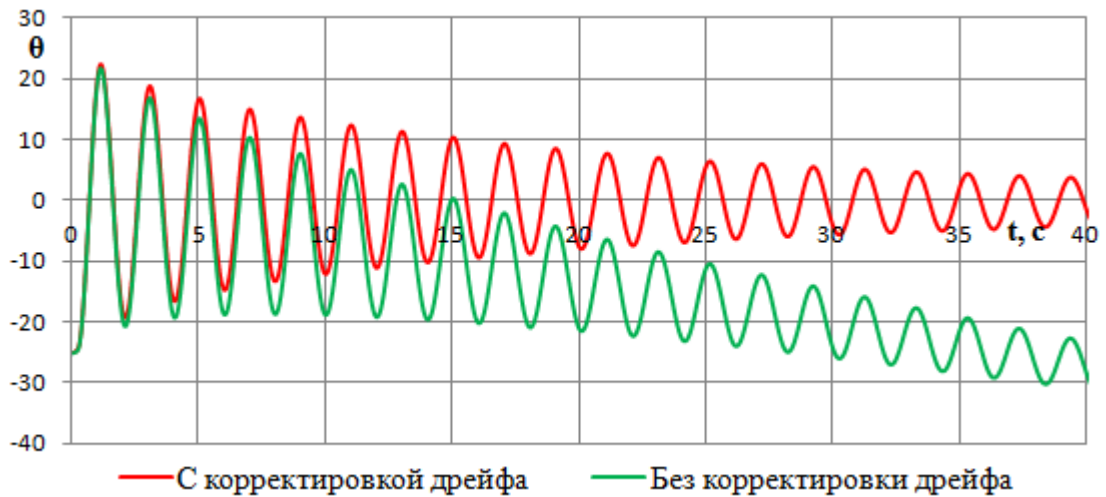


Рисунок 3.23 – Осциллограммы затухающих колебаний по результатам интегрирования осциллограммы угловых скоростей

По осциллограммам, представленным на рисунке 3.23, видно, что после интегрирования уровень шума заметно падает, однако это не означает, что он не влияет на амплитуды осциллограмм.

Во втором случае известно, что частота гармонических колебаний при дифференцировании не изменяется, поэтому период угловых скоростей и перемещений одинаковый, что позволяет оценивать собственный период качки и коэффициент присоединенного момента инерции массы по осциллограммам угловых скоростей.

Для оценки возможности расчета безразмерного коэффициента демпфирования по результатам анализа осциллограммы угловых скоростей автором проведены соответствующие преобразования уравнения затухающих колебаний [88]:

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\nu t} \left(\cos \omega_\theta t + \frac{\nu}{\omega_\theta} \sin \omega_\theta t \right), \quad (3.10)$$

где θ_0 – начальный угол крена; $\nu = k\omega_0$ – коэффициент демпфирования, где k – безразмерный коэффициент демпфирования, ω_0 – собственная частота качки модели ; $\omega_\theta = \sqrt{\omega_0^2 - \nu^2} \approx \omega_0$ – частота качки модели на тихой воде, равная собственной частоте качки, учитывая, что $\omega_0^2 \gg \nu^2$.

Уравнение угловой скорости будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
\dot{\theta}(t) &= \theta_0 e^{-\nu t} (\nu \cos \omega_0 t - \omega_0 \sin \omega_0 t) \\
&\quad - \theta_0 \nu e^{-\nu t} \left(\cos \omega_0 t + \frac{\nu}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \\
&= \theta_0 e^{-\nu t} \left(\nu \cos \omega_0 t - \omega_0 \sin \omega_0 t - \nu \cos \omega_0 t \right. \\
&\quad \left. - \frac{\nu^2}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) = -\theta_0 e^{-\nu t} \frac{\omega_0^2 + \nu^2}{\omega_0} \sin \omega_0 t \\
&\approx -\theta_0 e^{-\nu t} \omega_0 \sin \omega_0 t,
\end{aligned} \tag{3.11}$$

где принято, что $\omega_0^2 + \nu^2 \approx \omega_0^2$, так как $\omega_0^2 \gg \nu^2$.

Учитывая, что амплитуда угловой скорости пропорциональна амплитуде угловых перемещений

$$\dot{\theta}_0 = \theta_0 \omega_0, \tag{3.12}$$

можно записать логарифмический декремент затухания

$$\nu T_0 = \ln \left(\frac{\dot{\theta}(t)}{\dot{\theta}(t + T_0)} \right), \tag{3.13}$$

где $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$ – собственный период бортовых колебаний.

Учитывая, что $\nu = k\omega_0$

$$\nu T_0 = k\omega_0 T_0 = 2\pi k, \tag{3.14}$$

безразмерный коэффициент демпфирования может быть найден по формуле

$$k = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{\dot{\theta}(t)}{\dot{\theta}(t + T_0)} \right). \tag{3.15}$$

Если сравнить полученное выражение с формулой для расчета безразмерного коэффициента демпфирования по осциллограмме затухающих колебаний [88]

$$k = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{\theta(t)}{\theta(t + T_\theta)} \right), \tag{3.16}$$

можно заключить, что затухание угловых колебаний и угловых скоростей пропорционально безразмерному коэффициенту демпфирования, а последний может быть успешно определен как по осциллограмме

затухающих колебаний, так и по осциллограмме затухающих угловых скоростей.

Обычно по результатам расчета безразмерного коэффициента демпфирования строится зависимость последнего от угла крена. В случае с обработкой осциллограммы угловых скоростей есть возможность построить зависимость безразмерного коэффициента демпфирования либо от угловой скорости, либо от угла крена, определяемого по формуле

$$\theta = \frac{\dot{\theta}}{\omega_0}. \quad (3.17)$$

В ходе испытаний осциллограммы свободных затухающих колебаний записывались по пять раз для модели с каждой конфигурацией шахтного устройства. Результаты испытаний представлены в Приложении А.

По данным, представленным в Приложении А, составлена таблица 3.4 для определения собственного периода бортовой качки модели с различными модулями.

Таблица 3.4 – Определение собственных периодов бортовой качки модели с различными модулями

Конфигурация модели	Осциллограмма					Средний период T_0 , с
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	
Модель с модулем № 1	2,00	2,01	2,01	1,99	2,01	2,01
Модель с модулем № 2	1,96	1,98	1,99	1,97	1,97	1,98
Модель с модулем № 3	1,91	1,92	-	1,92	1,90	1,91

Анализируя значения, представленные в таблице 3.4, можно заключить, что при увеличении диаметра шахты круглого сечения собственный период бортовой качки судна уменьшается. Это можно объяснить изменениями посадки модели: в условиях постоянного водоизмещения при наличии шахты осадка увеличивается, следовательно, аппликата центра величины и момент инерции площади ватерлинии также увеличиваются, а так как аппликата

центра масс остается постоянной, то возрастает начальная поперечная метацентрическая высота, которая находится в знаменателе в формуле для определения периода качки. Наличие свободной поверхности в шахте влияет на начальную остойчивость пренебрежимо мало, в результате чего период бортовой качки снижается.

По данным, представленным в Приложении А, составлены рисунки 3.24 – 3.26 для модели с шахтным модулем № 1, № 2 и № 3 соответственно, показывающие зависимости безразмерного коэффициента демпфирования от угла крена. На рисунках 3.24 – 3.26 помимо основных расчетных точек проведены аппроксимирующие средние линии. Сравнение средних линий для каждой конфигурации модели представлено на рисунке 3.27.

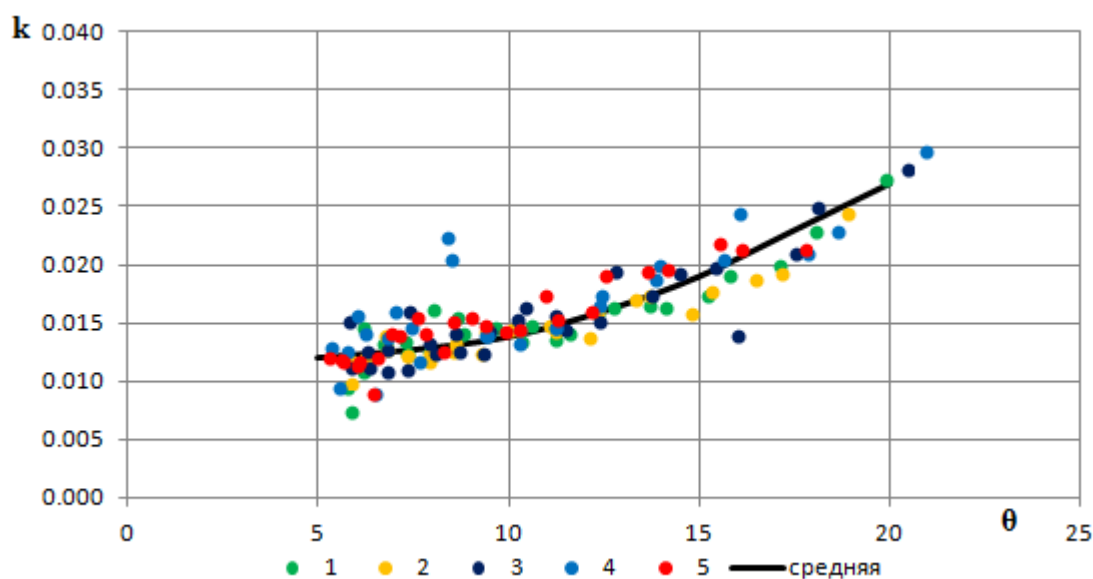


Рисунок 3.24 – Зависимость безразмерного коэффициента демпфирования от угла крена модели с модулем № 1

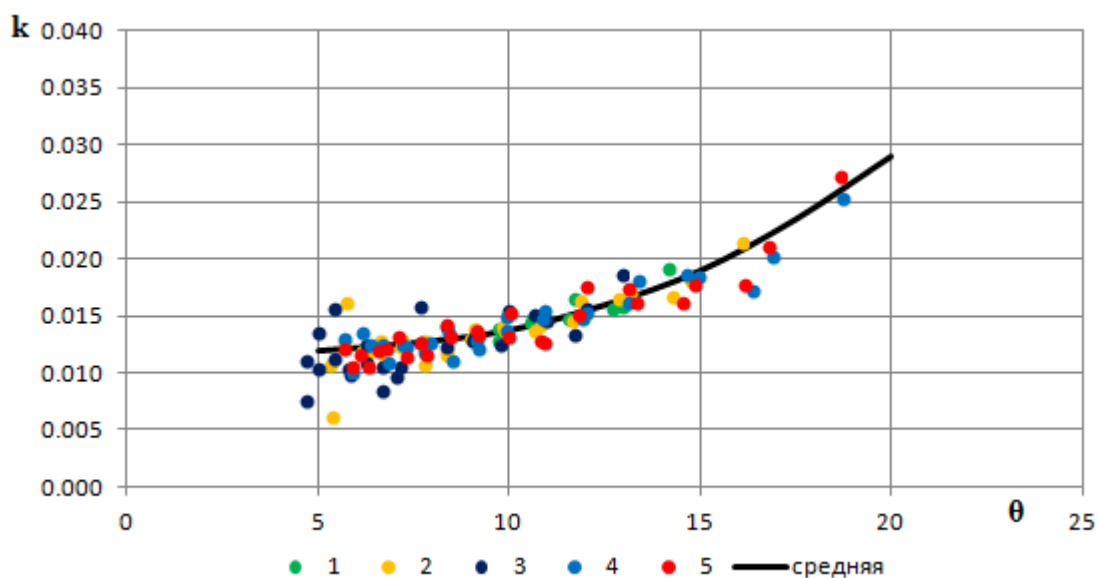


Рисунок 3.25 – Зависимость безразмерного коэффициента демпфирования от угла крена модели с модулем № 2

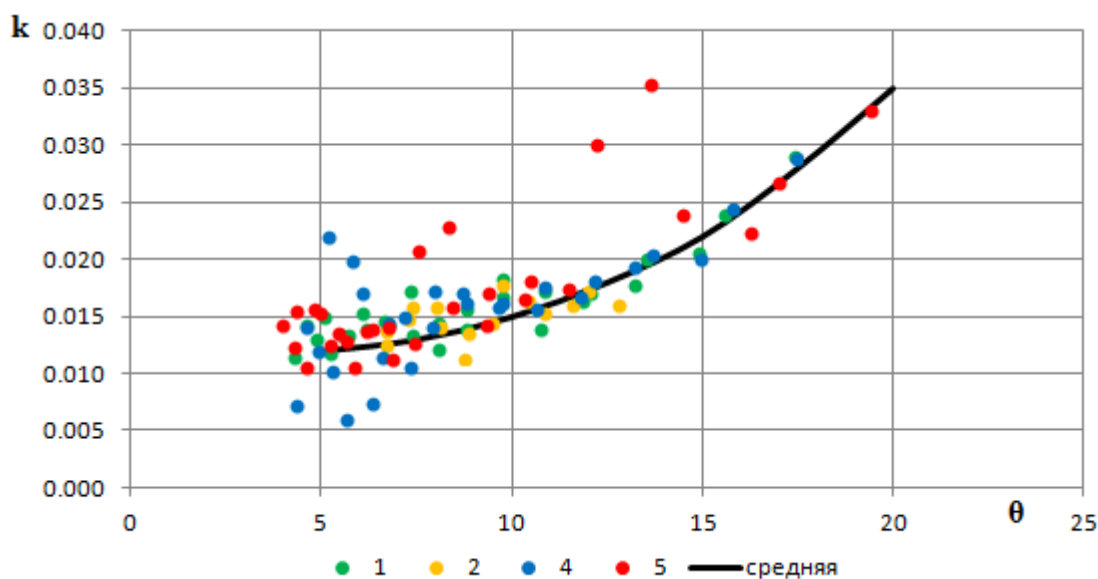


Рисунок 3.26 – Зависимость безразмерного коэффициента демпфирования от угла крена модели с модулем № 3

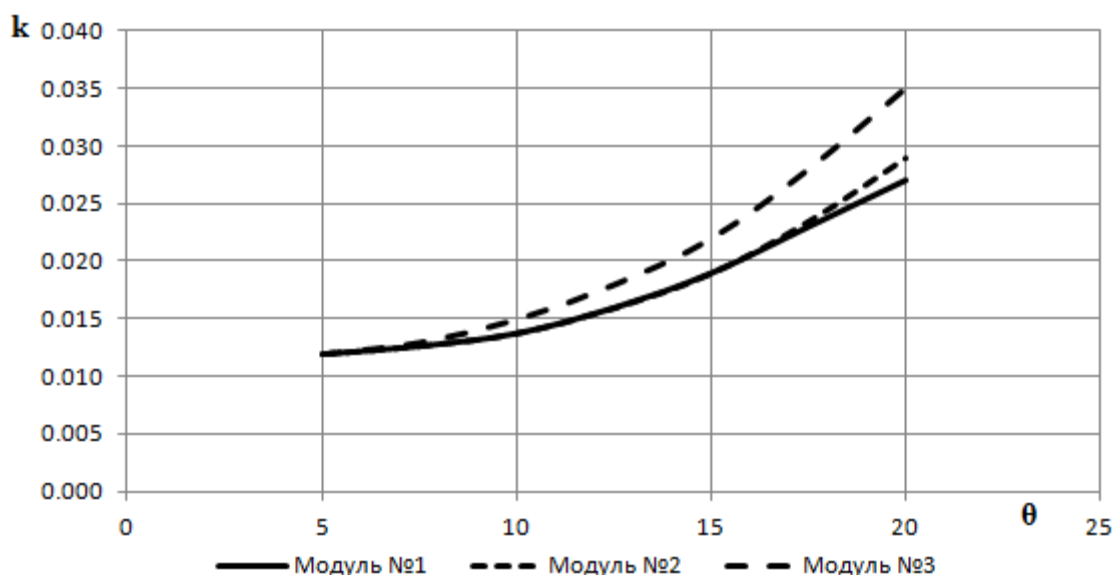


Рисунок 3.27 – Средние линии безразмерного коэффициента демпфирования для различных конфигураций модели

Анализируя данные, представленные на рисунке 3.27, можно заключить, что наличие шахты увеличивает значения безразмерного коэффициента демпфирования. При этом при увеличении диаметра шахты круглого сечения повышаются значения демпфирования.

3.5.3 Результаты испытаний бортовой качки на лаговом волнении

Результаты экспериментального исследования бортовой качки и колебаний жидкости в шахте судна на лаговом волнении при отсутствии скорости хода представлены в Приложении А.

Анализируя данные, представленные в Приложении А, можно получить амплитудно-частотные характеристики бортовой и вертикальной качки и колебаний жидкости в шахте модели в зависимости от установленного модуля, которые представлены на рисунках 3.28 – 3.30. Сплошные линии на рисунках 3.28 – 3.30 соответствуют аппроксимации каждой амплитудно-частотной характеристики.

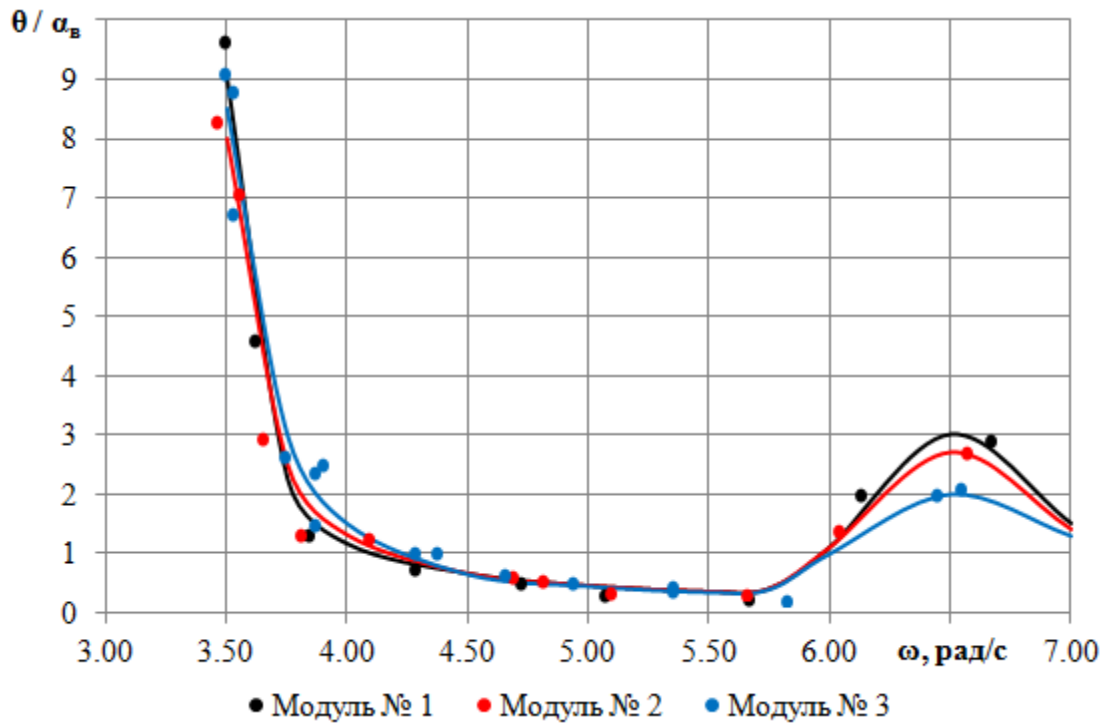


Рисунок 3.28 – Амплитудно-частотные характеристики бортовой качки модели с различными шахтными модулями на лаговом волнении

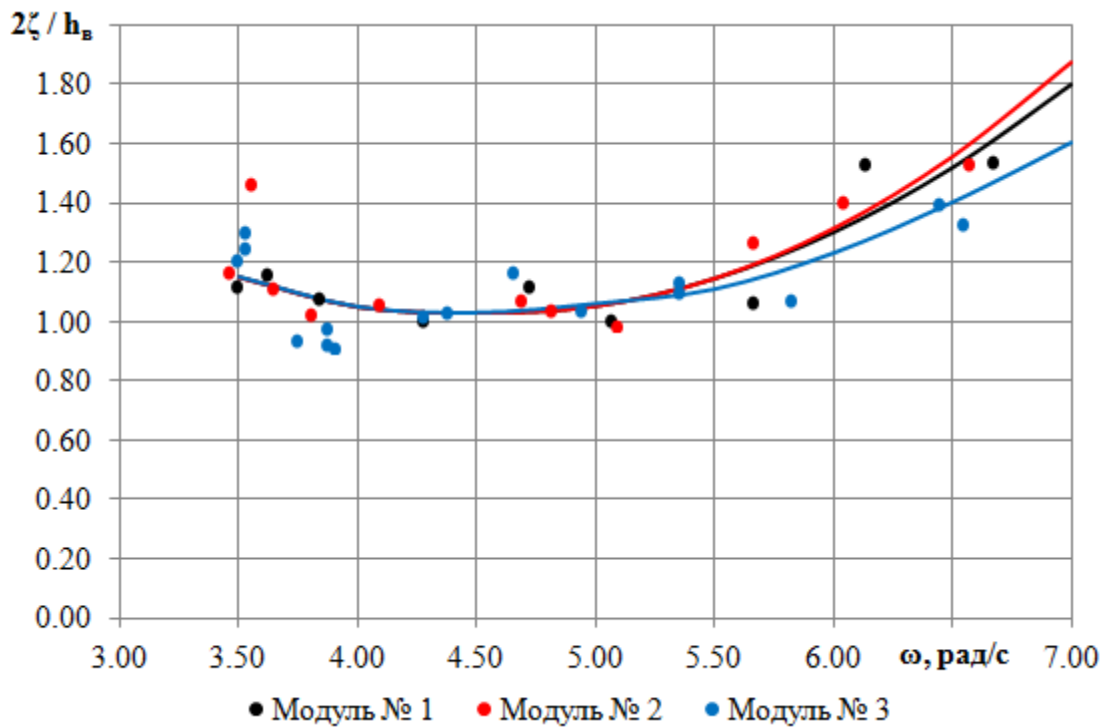


Рисунок 3.29 – Амплитудно-частотные характеристики вертикальной качки модели с различными шахтными модулями на лаговом волнении

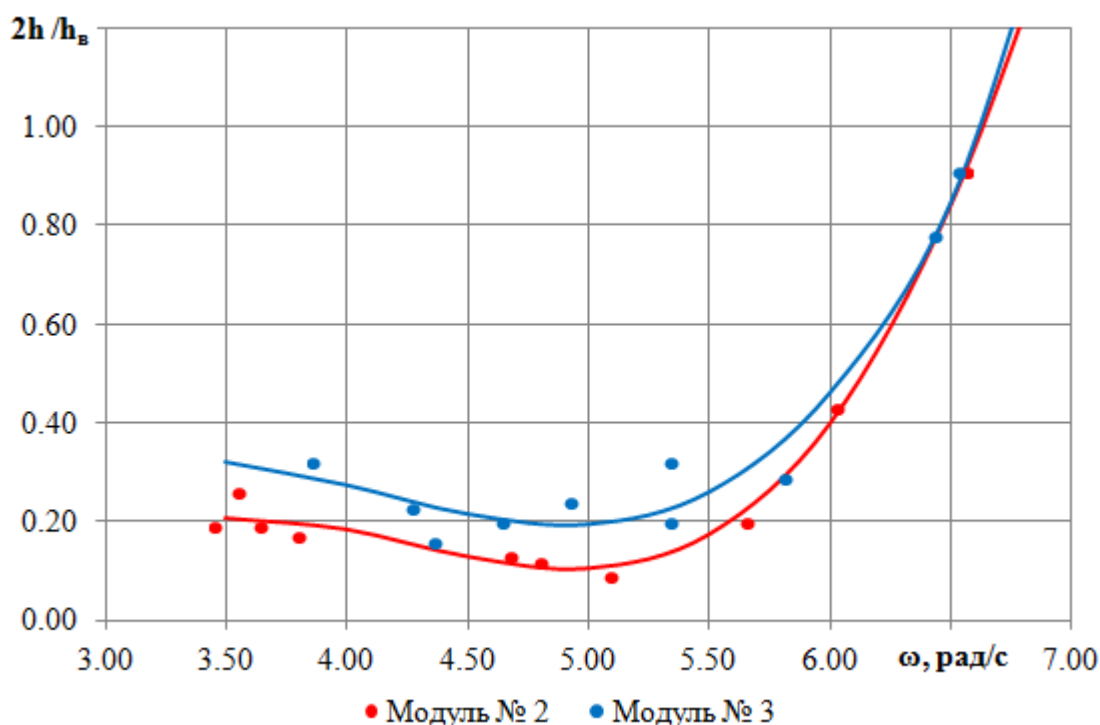


Рисунок 3.30 – Амплитудно-частотные характеристики колебаний жидкости в шахте модели с различными шахтными модулями на лаговом волнении

Анализируя амплитудно-частотные характеристики, представленные на рисунке 3.28, можно заключить, что наличие шахты круглого сечения диаметром до 25 % ширины модели практически не оказывает влияния на бортовую качку судна. Однако в данном случае полностью не рассмотрена резонансная зона, поэтому данный вывод может быть распространен на зону частот выше резонансных.

Здесь следует так же обратить внимание на наличие второго пика амплитудно-частотной характеристики бортовой качки, который так же называют параметрическим резонансом. Он присутствует на модели при всех установленных модулях и его максимум несколько падает при наличии и увеличении диаметра шахты, что связано с увеличением демпфирования бортовой качки в соответствии с рисунком 3.27.

Анализируя данные, представленные на рисунке 3.29, можно заключить, что наличие шахты круглого сечения диаметром до 25 % ширины модели практически не оказывает влияния на вертикальную качку судна. При этом

можно обратить внимание, на некоторые различия в значениях амплитудно-частотных характеристик в зоне высоких частот, про динамику которых, однако, говорить тяжело в виду ограниченного количества данных.

Анализируя амплитудно-частотные характеристики, представленные на рисунке 3.30, можно заметить их заметное увеличение в зоне высоких частот, что связано с приближением к зоне собственных частот вертикальных колебаний жидкости в шахте.

3.6 Пересчет результатов модельных испытаний на натуральный объект

Для обеспечения возможности пересчета результатов испытаний с модели на натуру необходимо обеспечить три вида подобия:

- геометрическое, определяющее пропорциональность линейных размеров модели и натуре;
- кинематическое, определяющее пропорциональность значений скоростей в сходственных точках потока;
- динамическое, характеризующее пропорциональность сил различной физической природы [4].

Геометрическое подобие требует строгого масштабирования натуре при изготовлении модели:

$$\frac{L_H}{L_M} = \frac{B_H}{B_M} = \frac{T_H}{T_M} = k, \quad (3.18)$$

где k – масштаб,

индексы «Н» и «М» обозначают характерные размеры натуре и модели соответственно.

Для обеспечения полного динамического подобия необходимо одновременное выполнение следующих критериев подобия:

- числа Струхала, характеризующего отношение нестационарных сил инерции к конвективным;
- числа Фруда, характеризующее отношение гравитационных сил к инерциальным;
- числа Рейнольдса, характеризующее отношение вязкостных сил к инерциальным;
- числа Эйлера, характеризующее отношение сил давления к силам инерции;
- числа Вебера, характеризующее отношение сил поверхностного натяжения к силам инерции [1, 4].

Известно, что в случае моделирования безотрывных течений и процессов, не сопровождающихся кавитацией, число Эйлера не является определяющим [1].

Также известно, что выполнение подобия по числам Рейнольдса и Вебера при наличии необходимости подобия по числам Струхалья и Фруда невозможно. При этом для моделирования процессов, где нельзя пренебрегать силами вязкостной природы, предъявляются специальные условия, как, например, установка турбулизаторов или обеспечение автомодельности [4, 11].

При пересчете результатов испытаний колебаний жидкости в шахте судна определяющими критериями будут числа Струхалья и Фруда. В действительности эффекты вязкостной природы и силы поверхностного натяжения будут играть роль, однако, поскольку колебания жидкости в шахте имеют гравитационную природу, подобие по числу Фруда будет играть решающую роль. Такой подход используется при пересчете результатов модельных испытаний эффекта слошинга жидкости в грузовых танках танкеров для сжиженного природного газа [92, 98].

Подобие по критериям Струхалья и Фруда выполняется при модельных испытаниях качки судна в обязательном порядке, а значит полученные по результатам испытаний амплитудно-частотные характеристики колебаний жидкости в шахте судна на волнении должны быть пересчитаны только по частотам (числу Струхалья), и могут быть приняты таковыми при расчетах натурного судна. При этом следует обратить внимание на то, что подобие по критериям Рейнольдса и Вебера не выполняется, и для оценки влияния сил вязкостной природы и сил поверхностного натяжения на амплитуды колебаний жидкости в шахте при качке судна на волнении необходимо дальнейшее исследование.

3.7 Выводы к главе 3

В настоящей главе представлены результаты экспериментального исследования влияния наличия шахтного устройства на вертикальную, килевую и бортовую качку модели, а также результаты исследования колебаний жидкости в шахте судна.

Для проведения испытаний была изготовлена опытная модель судна серии 60 с коэффициентом общей полноты $\delta = 0,6$ со следующими главными размерениями: длина $L = 2,09$ м, ширина $B = 0,289$ м, расчетная осадка $T = 0,125$ м, высота борта $H = 0,205$ м и водоизмещение $D = 45$ кг.

Для исследования влияния наличия шахтного устройства различных размеров на модели была предусмотрена модульная система. Было разработано 3 модуля: 1 – без шахты, 2 – с шахтой круглого сечения диаметром 0,044 м, 3 – с шахтой круглого сечения диаметром 0,074 м.

Для проведения эксперимента были рассмотрены различные способы регистрации колебаний модели и жидкости, разработано программное обеспечение считывания и видеозаписи данных.

Эксперимент проводился в три этапа: исследование вертикальной и килевой качки на встречном регулярном волнении, исследование бортовой качки на тихой воде и исследование бортовой качки на лаговом регулярном волнении.

Эксперимент и анализ результатов исследования проводились в соответствии с рекомендациями Международной конференции опытовых бассейнов [83, 84].

По результатам экспериментального исследования вертикальной и килевой качки на встречном регулярном волнении были получены амплитудно-частотные характеристики вертикальной и килевой качки модели с различными модулями, а также амплитудно-частотные характеристики вертикальных колебаний жидкости в шахте модели. Анализируя полученные сведения было заключено, что наличие шахты

круглого сечения диаметром до 25 % ширины судна не оказывает влияния на характеристики вертикальной и килевой качки на встречном волнении.

По результатам экспериментального исследования бортовой качки на тихой воде были получены осциллограммы затухающей угловой скорости бортовых колебаний. В результате обработки данных было обнаружено уменьшение собственного периода бортовой качки, а также увеличение безразмерного коэффициента демпфирования при наличии и увеличении диаметра шахты круглого сечения.

По результатам экспериментального исследования бортовой качки на лаговом регулярном волнении были получены амплитудно-частотные характеристики бортовой качки модели с различными модулями, а также амплитудно-частотные характеристики вертикальной качки и вертикальных колебаний жидкости в шахте судна. Анализируя полученные сведения было заключено, что в рассматриваемом частотном диапазоне заметное влияние наличия шахты обнаружено только в районе второго резонансного пика, что связано с увеличением демпфирования при наличии и увеличении диаметра шахты круглого сечения.

Значения амплитудно-частотных характеристик вертикальных колебаний жидкости в шахте при испытаниях на встречном и лаговом регулярном волнении имели тенденцию к увеличению в зоне высоких частот, что связано с приближением к расчетному значению собственной частоты колебаний жидкости в шахте.

На основании результатов экспериментального исследования сформированы систематические данные влияния шахтного устройства на характеристики качки судна, представленные в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Систематические данные влияния шахтного устройства на характеристики качки судна, полученные по результатам экспериментального исследования

Относительный диаметр и расположение шахтного устройства	Вертикальная качка	Килевая качка	Бортовая качка
Встречное волнение			
15 %, район центра величины судна	Не оказывает существенного влияния	Не оказывает существенного влияния	-
25 %, район центра величины судна	Не оказывает существенного влияния	Не оказывает существенного влияния	-
Лаговое волнение			
15 %, район центра величины судна	Не оказывает существенного влияния	-	Снижение значения собственного периода бортовой качки, Уменьшение амплитуды резонансной качки
25 %, район центра величины судна	Не оказывает существенного влияния	-	Снижение значения собственного периода бортовой качки, Увеличение коэффициента демпфирования на больших углах крена, Уменьшение амплитуды резонансной качки

4 Анализ динамики судна с шахтным устройством

Во второй главе была показана хорошая эффективность современных средств вычислительной гидромеханики при определении динамических характеристик судна на тихой воде и на волнении.

Однако в открытом доступе отсутствовали данные, позволяющие верифицировать результаты численного моделирования судов с шахтным устройством, поэтому было проведено собственное экспериментальное исследование, представленное в третьей главе.

Первым этапом численного моделирования динамики судна с шахтным устройством является верификация расчетных методов оценки гидродинамических характеристик морских объектов при качке, то есть численное моделирование экспериментального исследования.

4.1 Оценка возможности численного моделирования динамики судна с шахтным устройством

4.1.1 Численное моделирование продольной качки на встречном волнении

Численное моделирование проводится в соответствии с алгоритмом, представленном на рисунке 2.11.

В соответствии с алгоритмом первым этапом численного моделирования является создание трехмерных моделей исследуемых корпусов. Трехмерные модели были созданы по теоретическому чертежу, представленному на рисунке 3.4, в двух вариантах: с низким надводным бортом для исследования продольной качки и с увеличенным надводным бортом и палубой бака для исследования бортовой качки. Второй вариант исполнения может быть также использован при изучении продольной качки при наличии скорости хода. Вид сбоку на трехмерные модели двух вариантов исполнения представлен на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Вид сбоку на трехмерные модели двух вариантов исполнения: сверху – с низким надводным бортом, снизу – с увеличенным надводным бортом и палубой бака

В соответствии с данными третьей главы было создано по три модели:

1. С модулем № 1 – без шахты.
2. С модулем № 2 – с шахтой круглого сечения с внутренним диаметром $d_{ш} = 0,044$ м и относительным диаметром $d_{ш} / B = 15$ %.
3. С модулем № 3 – с шахтой круглого сечения с внутренним диаметром $d_{ш} = 0,074$ м и относительным диаметром $d_{ш} / B = 25$ %.

Абсциссы центральных осей шахт совпадают с абсциссой центра величины модели.

Вид снизу на трехмерные модели с различными модулями представлены на рисунке 4.2.

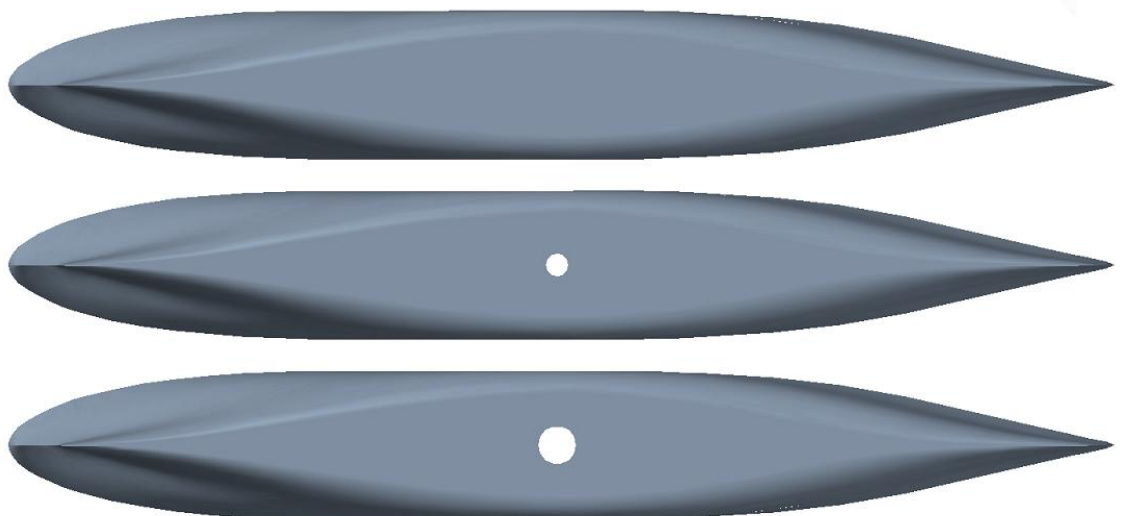


Рисунок 4.2 – Вид снизу на трехмерные модели с различными модулями: сверху – с модулем № 1, посередине – с модулем № 2, снизу – с модулем № 3

Следующим этапом алгоритма численного моделирования является создание расчетной области. При экспериментальном исследовании основное значение крутизны набегающего волнения было задано $1/50$, поэтому создавалась не одна расчетная область с постоянным значением отношения высоты волны к длине исследуемого объекта, а несколько, так, чтобы крутизна моделируемого волнения была около заданного при эксперименте.

Для исследования продольной качки создавались расчетные области с осью симметрии с количеством ячеек от 1 до 1,5 млн в зависимости от длины волнения. Пример созданной сетки для расчета модели с модулем № 3 представлен на рисунке 4.3.

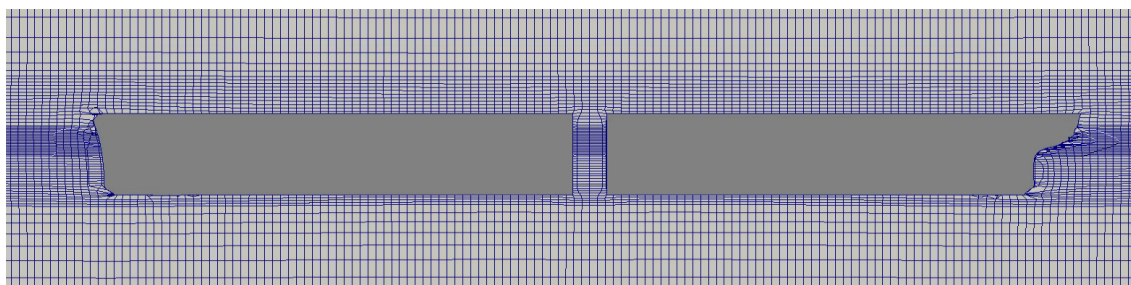


Рисунок 4.3 – Участок сетки для расчета модели с модулем № 3

Следующие подготовительные пункты алгоритма выполнения численного моделирования выполнялись в соответствии с рекомендациями, представленными в пункте 2.3.3. Массовые характеристики исследуемых моделей принимались в соответствии с результатами тарировки, представленными в подразделе 3.4.

Далее выполнялось численное моделирование. Все расчеты были произведены на вычислительном кластере кафедр гидроаэромеханики и морской акустики и прикладной математики и математического моделирования Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. Кластер включает в себя шесть узлов по 20 ядер и один узел с 10 ядрами. Для получения одной точки амплитудно-частотной характеристики при вычислении на одном двадцатиядерном узле требуется от 12 до 15 часов в зависимости от размеров расчетной области и динамики

объекта. В среднем, для получения полной амплитудно-частотной характеристики требуется примерно 24 часа при параллельных вычислениях на пяти двадцатиядерных узлах.

Критерием сходимости при решении поставленной задачи является достижение стационарности моделируемого волнения, перемещений исследуемого объекта и колебаний жидкости в шахте в течение не менее, чем десяти периодов качки. Данный критерий сходимости выведен на основании рекомендаций Международной конференции опытовых бассейнов [83].

После достижения указанного критерия сходимости численное моделирование останавливается и начинается обработка результатов. При обработке результатов необходимо выделить участок, на котором моделируемое волнение, перемещения исследуемого объекта и колебания жидкости в шахте стационарны. Чем больше участок, тем точнее результаты обработки. Далее путем применения преобразования Фурье определяются основная частота и амплитуды набегающего волнения, перемещений судна и колебаний жидкости в шахте.

Результаты численного моделирования продольной качки модели на встречном волнении при различных конфигурациях шахтного устройства представлены в таблицах 4.1 – 4.3 для модулей № 1, № 2 и № 3 соответственно.

Таблица 4.1 – Результаты численного моделирования продольной качки модели с модулем № 1 (без шахты)

NN	ω , рад/с	h_b , м	α	$2\zeta/hv$	ψ/α
1	3,52	0,071	2,6	0,84	0,98
2	3,96	0,075	3,4	0,64	0,76
3	4,21	0,062	3,2	0,59	0,71
4	4,55	0,049	3,0	0,48	0,61
5	4,96	0,034	2,4	0,40	0,56
6	5,59	0,028	2,6	0,21	0,33
7	6,47	0,019	2,3	0,17	0,13

Таблица 4.2 – Результаты численного моделирования продольной качки модели с модулем № 2 (шахта диаметром $d_{ш} = 0,044$ м)

NN	ω , рад/с	h_B , м	α	$2\zeta/h_B$	ψ/α	$2h/h_B$
1	3,52	0,071	2,6	0,81	0,89	0,17
2	3,96	0,069	3,1	0,66	0,84	0,23
3	4,21	0,071	3,7	0,55	0,69	0,25
4	4,52	0,036	2,1	0,53	0,64	0,34
5	4,99	0,033	2,4	0,38	0,51	0,39
6	5,56	0,033	2,9	0,23	0,34	0,49
7	6,41	0,041	5,0	0,18	0,17	0,73

Таблица 4.3 – Результаты численного моделирования продольной качки модели с модулем № 3 (шахта диаметром $d_{ш} = 0,074$ м)

NN	ω , рад/с	h_B , м	α	$2\zeta/h_B$	ψ/α	$2h/h_B$
1	3,52	0,072	2,6	0,81	0,91	0,19
2	3,93	0,071	3,2	0,68	0,78	0,23
3	4,21	0,070	3,6	0,61	0,70	0,29
4	4,55	0,031	1,9	0,49	0,64	0,35
5	4,99	0,029	2,1	0,35	0,48	0,41
6	5,56	0,030	2,7	0,21	0,32	0,46
7	6,00	0,028	3,0	0,18	0,27	0,71
8	6,41	0,040	4,8	0,18	0,17	0,84

На рисунке 4.4 представлены амплитудно-частотные характеристики вертикальной и килевой качки модели с модулем № 1, полученные по результатам численного моделирования и экспериментального исследования.

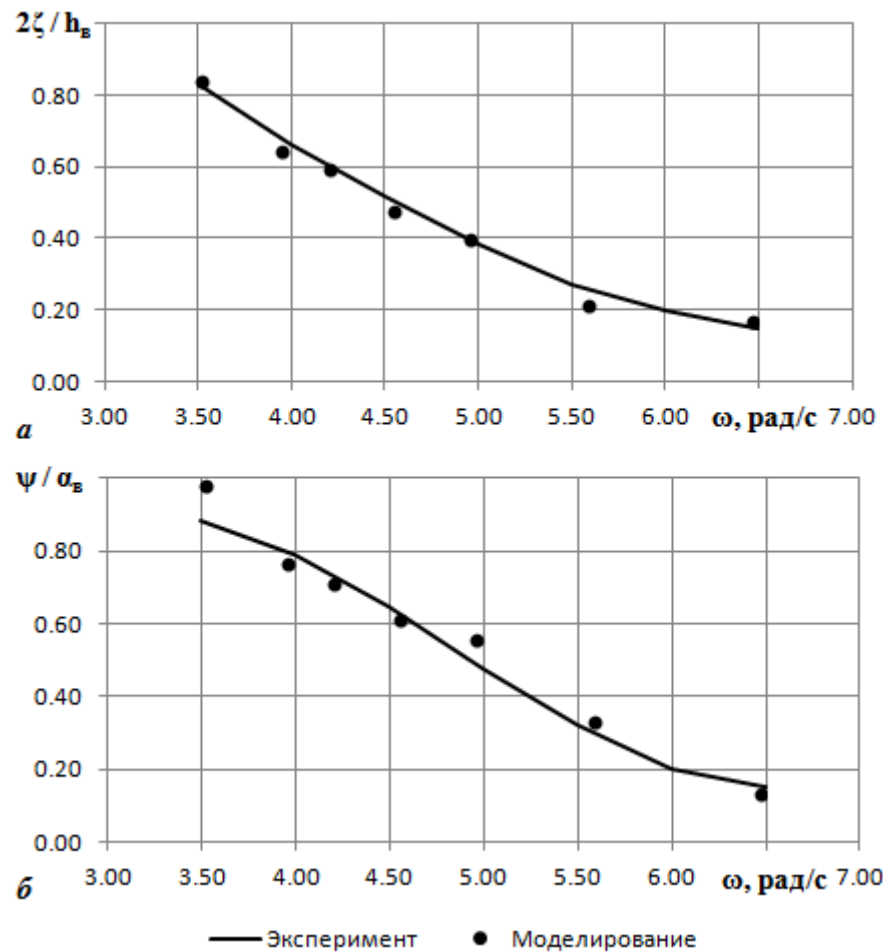


Рисунок 4.4 – Амплитудно-частотные характеристики вертикальной (а) и килевой (б) качки модели с модулем № 1

На рисунке 4.5 представлены амплитудно-частотные характеристики вертикальной и килевой качки и колебаний жидкости в шахте модели с модулем № 2, полученные по результатам численного моделирования и экспериментального исследования.

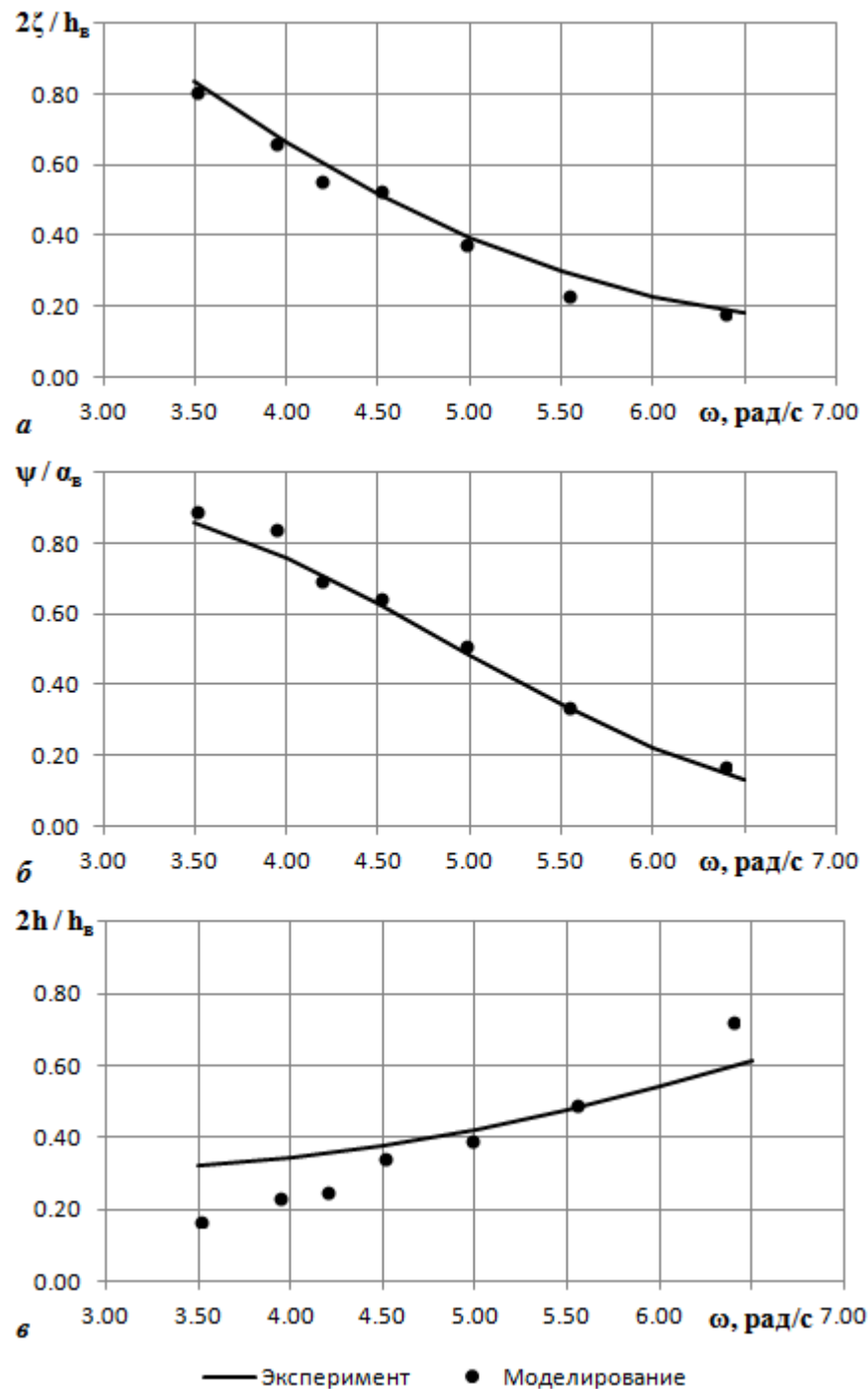


Рисунок 4.5 – Амплитудно-частотные характеристики вертикальной (а) и килевой (б) качки и колебаний жидкости в шахте (в) модели с модулем № 2

На рисунке 4.6 представлены амплитудно-частотные характеристики вертикальной и килевой качки и колебаний жидкости в шахте модели с модулем № 3, полученные по результатам численного моделирования и экспериментального исследования.

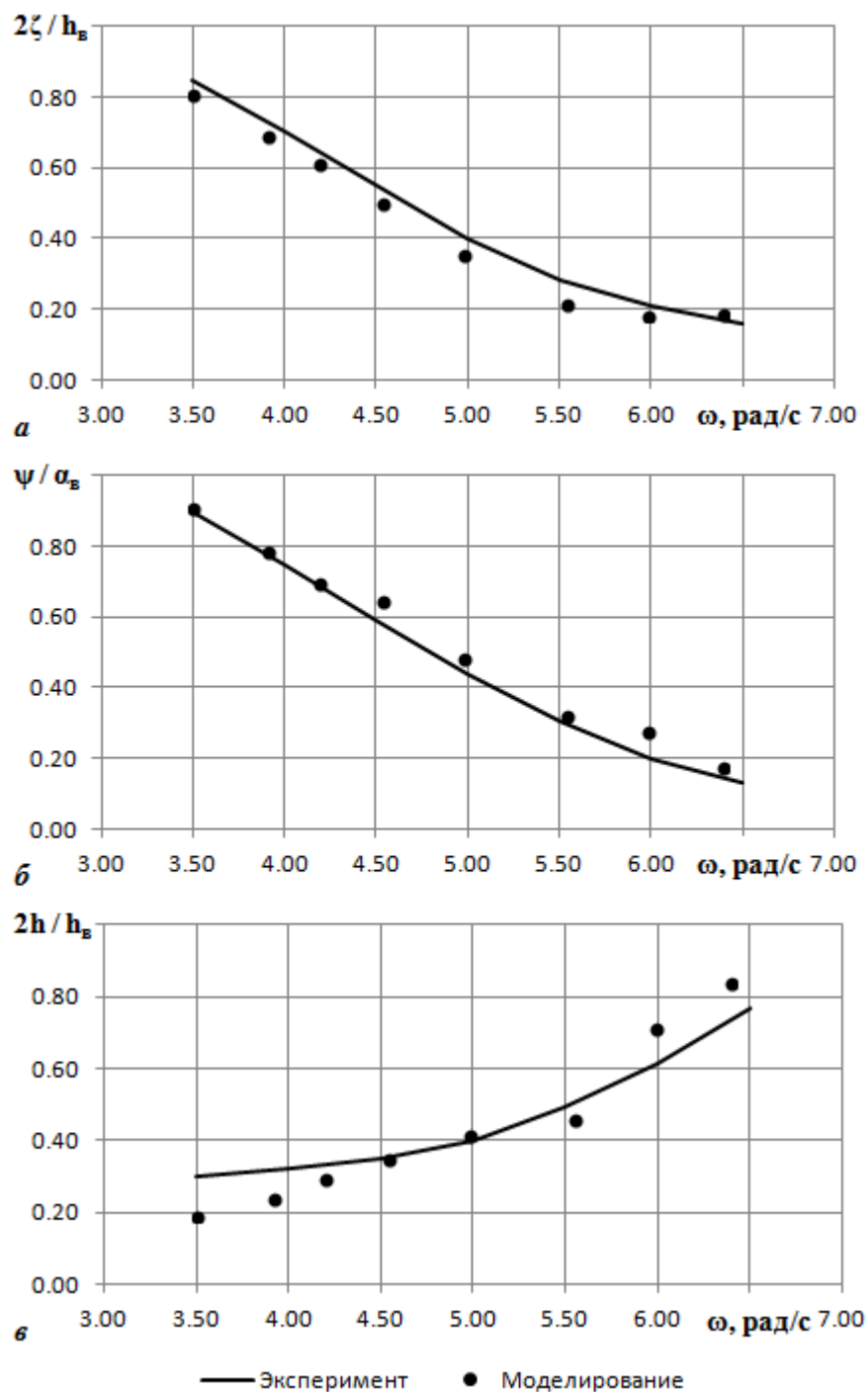


Рисунок 4.6 – Амплитудно-частотные характеристики вертикальной (а) и килевой (б) качки и колебаний жидкости в шахте (в) модели с модулем № 3

Анализируя данные, представленные на рисунке 4.4, можно заключить, что алгоритм и схема реализации численного моделирования, представленные в диссертационной работе, эффективны и позволяют с достаточной для практики точностью получать данные о динамике судна без шахты на встречном волнении.

Анализируя данные, представленные на рисунках 4.5 и 4.6, можно заключить, что численное моделирование позволяет с достаточной для практики точностью определять характеристики вертикальной и килевой качки судов с шахтами различного диаметра на встречном волнении.

При этом следует обратить внимание на рисунки 4.5в и 4.6в, на которых представлены амплитудно-частотные характеристики колебаний жидкости в шахте. Здесь можно отметить, что в рассматриваемом частотном диапазоне численное моделирование позволяет с достаточной для практики точностью определять характеристики колебаний жидкости в шахте. Однако на рисунке 4.5в наблюдаются различия в тенденции результатов численного моделирования и эксперимента, в частности при последующей экстраполяции в зону высоких частот. Данное замечание несправедливо для результатов моделирования модели с модулем № 3.

Таким образом, по результатам анализа можно заключить, что разработанный в рамках диссертационного исследования расчетный метод позволяет с достаточной для практики точностью определять характеристики динамики судна с шахтой и колебаний жидкости в шахте на встречном волнении.

4.1.2 Численное моделирование бортовой качки на лаговом волнении

Численное моделирование бортовой качки проводится аналогично расчетам продольной качки. Единственным существенным различием является невозможность использования расчетной области с осью симметрии. По этой причине сетки для определения параметров бортовой качки имеют большее количество расчетных ячеек – от 1,5 до 3 млн. В виду этого для получения одной точки амплитудно-частотной характеристики при вычислении на одном двадцатиядерном узле требуется от 12 до 24 часов в зависимости от размеров расчетной области и динамики объекта. В среднем,

для получения полной амплитудно-частотной характеристики требуется примерно 48 часов при параллельных вычислениях на пяти двадцатиядерных узлах.

Результаты численного моделирования бортовой качки модели на лаговом волнении при различных конфигурациях шахтного устройства представлены в таблицах 4.4 – 4.6 для модулей № 1, № 2 и № 3 соответственно.

Таблица 4.4 – Результаты численного моделирования бортовой качки модели с модулем № 1 (без шахты)

NN	ω , рад/с	h_b , м	α	$2\zeta/h_b$	θ/α
1	3,52	0,080	2,9	0,97	10,54
2	3,93	0,078	3,5	0,92	4,02
3	4,21	0,081	4,2	0,92	2,45
4	4,52	0,046	2,7	1,26	1,87
5	4,99	0,048	3,5	1,08	1,03
6	5,56	0,032	2,9	1,44	0,79
7	6,03	0,043	4,6	0,97	0,37
8	6,41	0,030	3,6	1,33	2,05
9	6,65	0,032	4,2	1,29	3,58

Таблица 4.5 – Результаты численного моделирования бортовой качки модели с модулем № 2 (шахта диаметром $d_{ш} = 0,044$ м)

NN	ω , рад/с	h_b , м	α	$2\zeta/h_b$	θ/α	$2h/h_b$
1	3,49	0,078	2,8	0,90	11,33	0,27
2	3,93	0,073	3,3	0,88	3,63	0,17
3	4,21	0,069	3,5	0,85	2,14	0,11
4	4,52	0,050	3,0	1,05	1,78	0,21
5	4,99	0,050	3,7	1,03	0,98	0,19
6	5,56	0,034	3,1	1,29	0,74	0,42
7	6,03	0,034	3,6	1,19	0,40	0,52
8	6,41	0,046	5,5	1,22	1,37	0,91
9	6,63	0,027	3,5	1,89	3,74	1,33

Таблица 4.6 – Результаты численного моделирования бортовой качки модели с модулем № 3 (шахта диаметром $d_{ш} = 0,074$ м)

NN	ω , рад/с	h_B , м	α	$2\zeta/h_B$	θ/α	$2h/h_B$
1	3,45	0,077	2,7	0,91	12,54	0,17
2	3,93	0,081	3,6	0,92	4,67	0,14
3	4,21	0,065	3,4	0,89	2,31	0,13
4	4,52	0,048	2,8	1,13	2,05	0,20
5	4,96	0,048	3,4	0,95	1,00	0,23
6	5,56	0,038	3,4	1,21	0,64	0,42
7	6,03	0,034	3,6	1,24	0,48	0,61
8	6,41	0,046	5,5	1,23	1,07	1,07
9	6,66	0,030	3,9	1,80	2,02	1,88

На рисунке 4.7 представлены амплитудно-частотные характеристики бортовой и вертикальной качки модели с модулем № 1, полученные по результатам численного моделирования и экспериментального исследования.

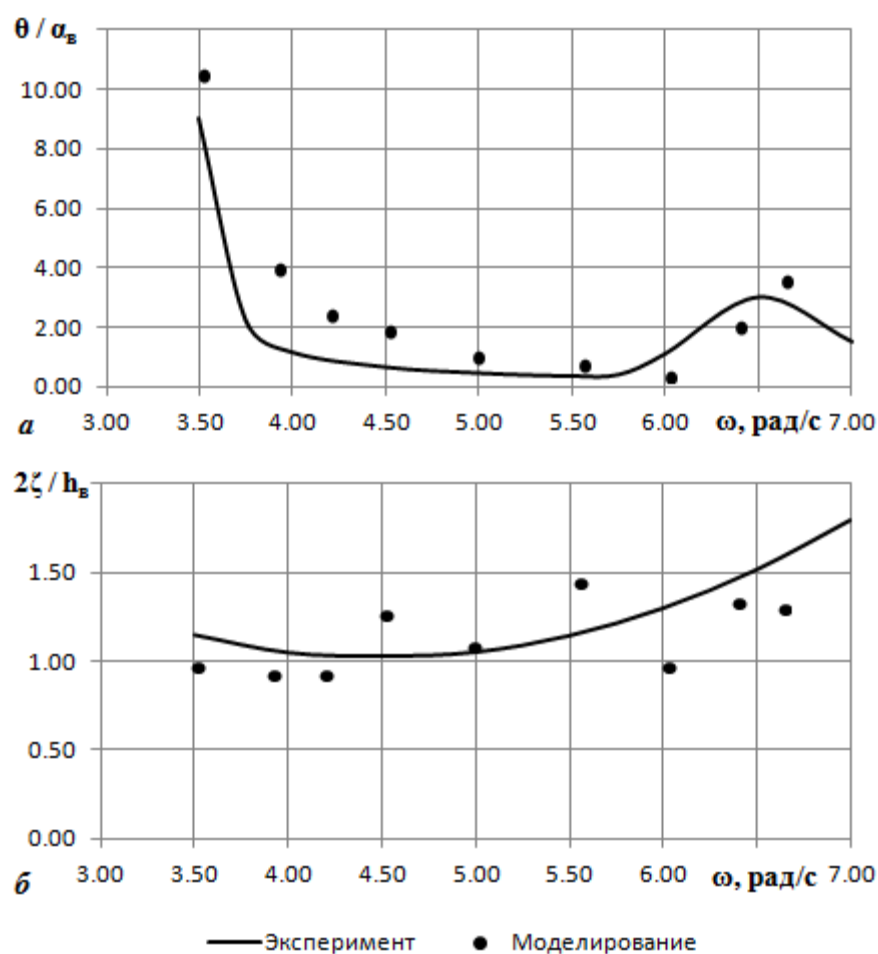


Рисунок 4.7 – Амплитудно-частотные характеристики бортовой (а) и вертикальной (б) качки модели с модулем № 1

На рисунке 4.8 представлены амплитудно-частотные характеристики бортовой и вертикальной качки и колебаний жидкости в шахте модели с модулем № 2, полученные по результатам численного моделирования и экспериментального исследования.

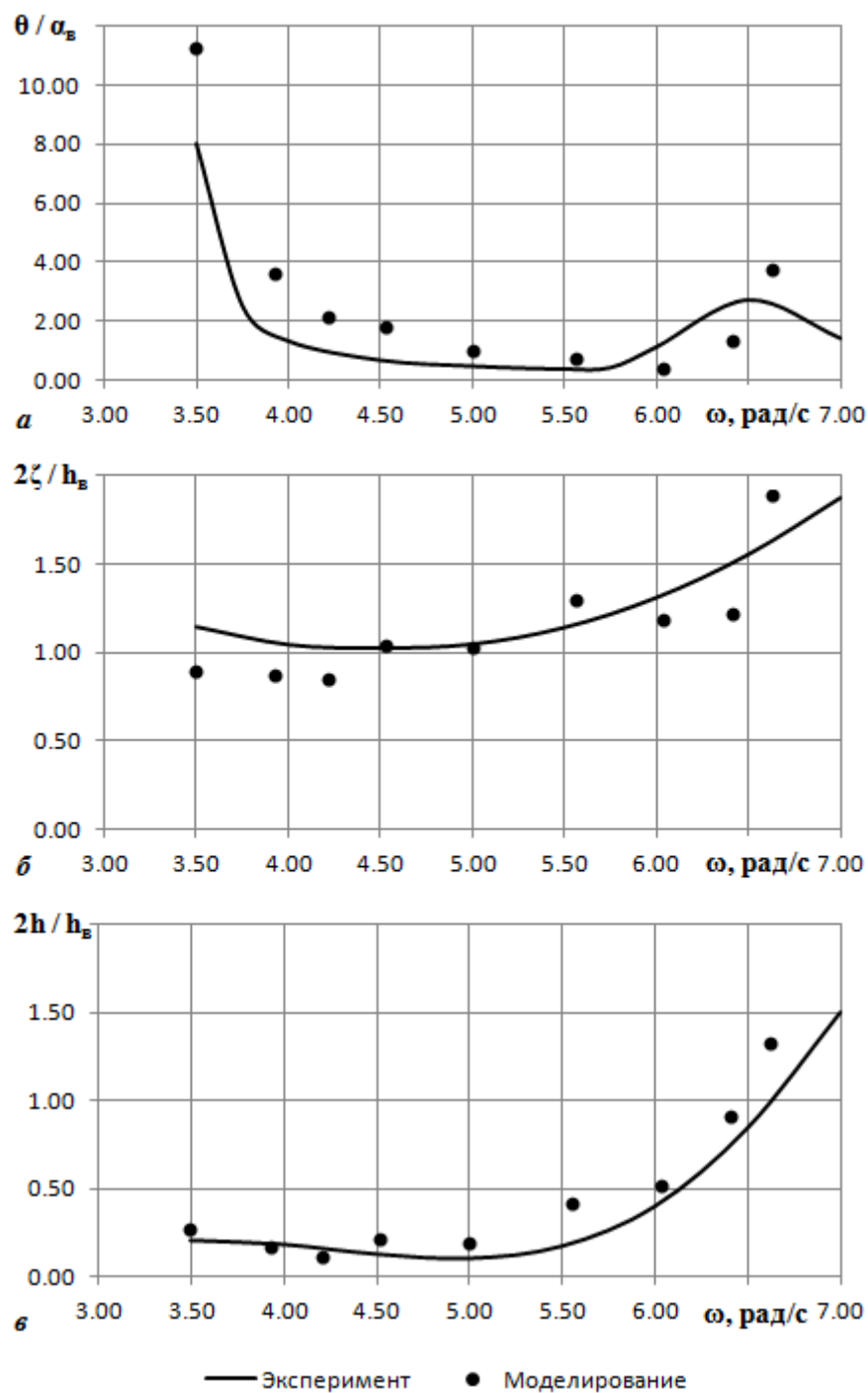


Рисунок 4.8 – Амплитудно-частотные характеристики бортовой (а) и вертикальной (б) качки и колебаний жидкости в шахте (в) модели с модулем № 2

На рисунке 4.9 представлены амплитудно-частотные характеристики бортовой и вертикальной качки и колебаний жидкости в шахте модели с модулем № 3, полученные по результатам численного моделирования и экспериментального исследования.

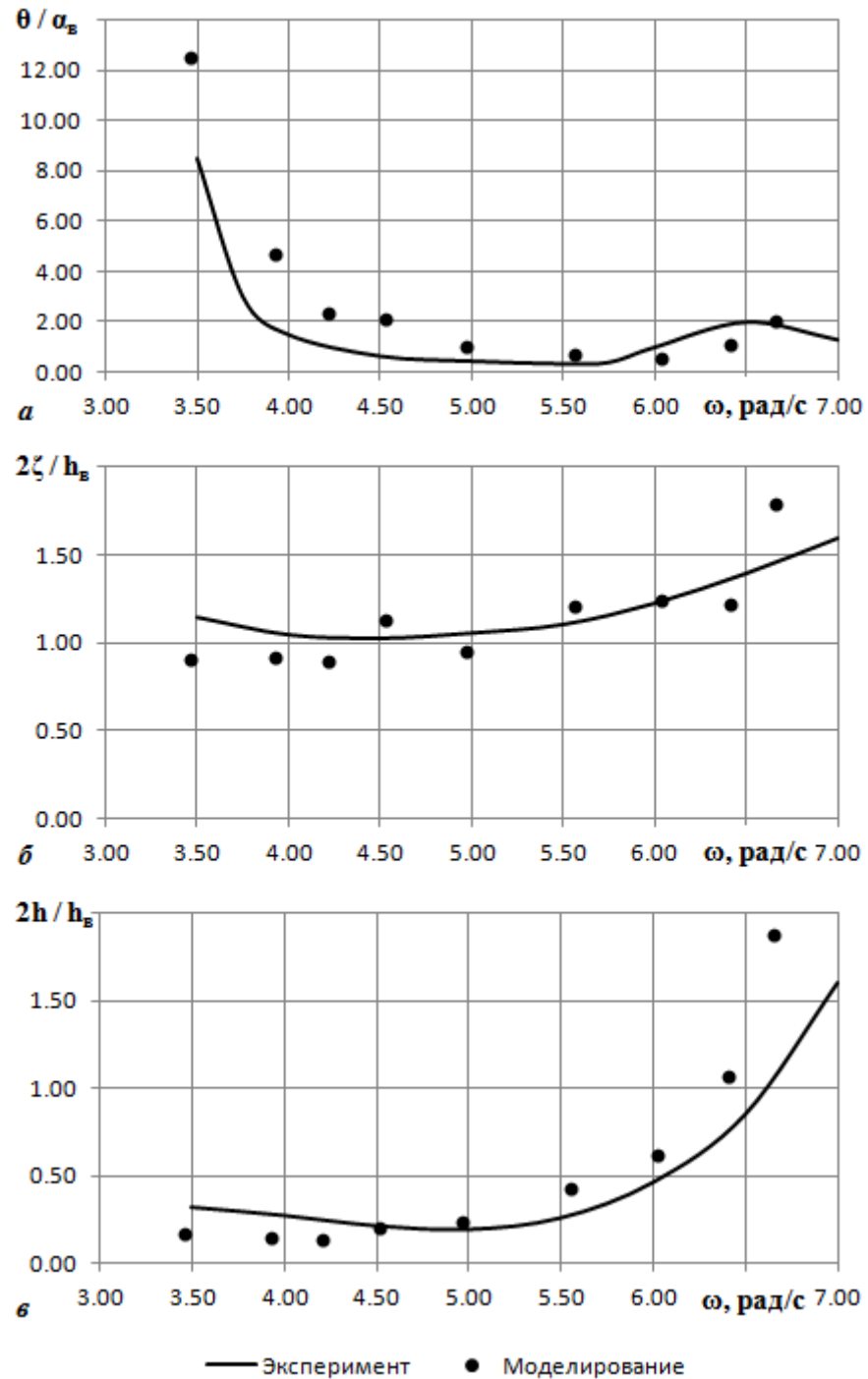


Рисунок 4.9 – Амплитудно-частотные характеристики бортовой (а) и вертикальной (б) качки и колебаний жидкости в шахте (в) модели с модулем № 3

Анализируя данные, представленные на рисунке 4.7, можно заключить, что разработанный алгоритм и предложенная схема реализации численного моделирования в рамках диссертационного исследования эффективны и позволяют с достаточной для практики точностью получать данные о динамике судна без шахты на лаговом волнении.

Анализируя данные, представленные на рисунках 4.8 и 4.9, можно заключить, что численное моделирование позволяет с достаточной для практики точностью определять характеристики бортовой и вертикальной качки судов с шахтами различного диаметра на лаговом волнении.

При этом следует обратить внимание на рисунки 4.8в и 4.9в, на которых представлены амплитудно-частотные характеристики колебаний жидкости в шахте. Здесь можно отметить, что в рассматриваемом частотном диапазоне численное моделирование позволяет с достаточной для практики точностью определять характеристики колебаний жидкости в шахте. Однако на рисунке 4.9 в наблюдаются различия в тенденции результатов численного моделирования и эксперимента, в частности при последующей экстраполяции в зону высоких частот. Данное замечание частично справедливо и для результатов моделирования модели с модулем № 2.

Таким образом, по результатам анализа можно заключить, что разработанный в рамках диссертационного исследования расчетный метод позволяет с достаточной для практики точностью определять характеристики динамики судна с шахтой и колебаний жидкости в шахте на лаговом волнении.

4.2 Анализ продольной качки судна с различными конфигурациями шахтного устройства на встречном волнении

В рамках экспериментального исследования было показано, что наличие шахты круглого сечения, находящейся в районе центра величины, диаметром до 25 % ширины судна не оказывает влияния на параметры вертикальной и килевой качки на встречном волнении.

Численное моделирование позволяет провести оценку влияния наличия шахты большего диаметра, а также оценку влияния наличия шахты на корпусе с совершенно иными обводами.

Используя разработанные расчетные методы оценки гидродинамических характеристик морских объектов при качке, реализованные в программном комплексе с открытым кодом OpenFOAM, проведем вычислительный эксперимент для оценки влияния шахты больших размеров с точки зрения выявления возможных физических эффектов.

4.2.1 Численное моделирование продольной качки модели серии 60 с различными конфигурациями шахтного устройства на встречном волнении

Для оценки влияния наличия шахты большего диаметра были разработаны две дополнительные трехмерные модели корпуса серии 60 с шахтами диаметрами $d_{ш} = 0,100$ м (относительный диаметр $d_{ш}/B = 35$ %) и $d_{ш} = 0,144$ м (относительный диаметр $d_{ш}/B = 50$ %). Центральные оси шахт совпадают с абсциссой центра величины модели.

Рассматривать наличие шахт диаметром более 50 % ширины корпуса не имеет смысла, так как реализация такого проекта в однокорпусном варианте с проектной и конструктивной точек зрения нецелесообразна. Вид снизу на трехмерные модели корпуса судна с шахтами представлен на рисунке 4.10.

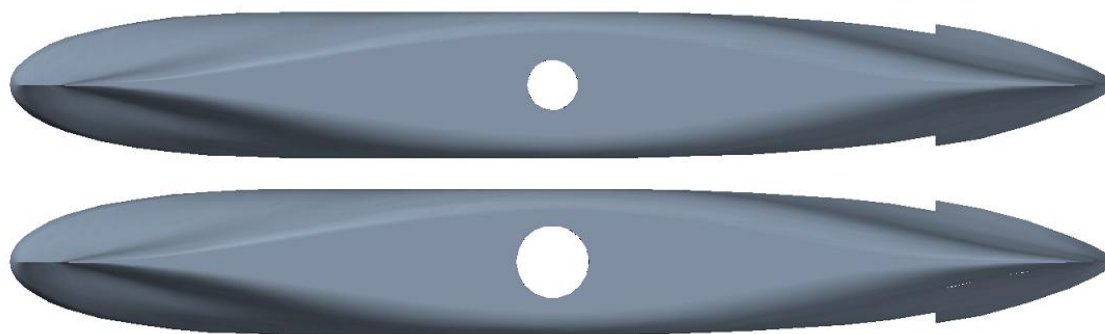


Рисунок 4.10 – Вид снизу на трехмерные модели корпуса серии 60 с шахтами большего диаметра: сверху – с шахтой диаметром $d_{\text{ш}} = 0,100$ м, снизу – с шахтой диаметром $d_{\text{ш}} = 0,144$ м

Для лучшего анализа как динамики модели, так и динамики колебаний жидкости в шахте, частотный диапазон при численном моделировании был увеличен в зоне высоких частот с 6,50 рад/с до 8,00 рад/с. Зона высоких частот интересна тем, что в ней находятся собственные частоты колебаний жидкости в шахте.

Используемый процесс выполнения численного моделирования аналогичен описанному в разделе 4.1.1. Созданные расчетные области, необходимые для моделирования, аналогичны описанным в разделе 4.1.1.

Результаты численного моделирования продольной качки модели на встречном волнении при различных конфигурациях шахтного устройства представлены на рисунке 4.11.

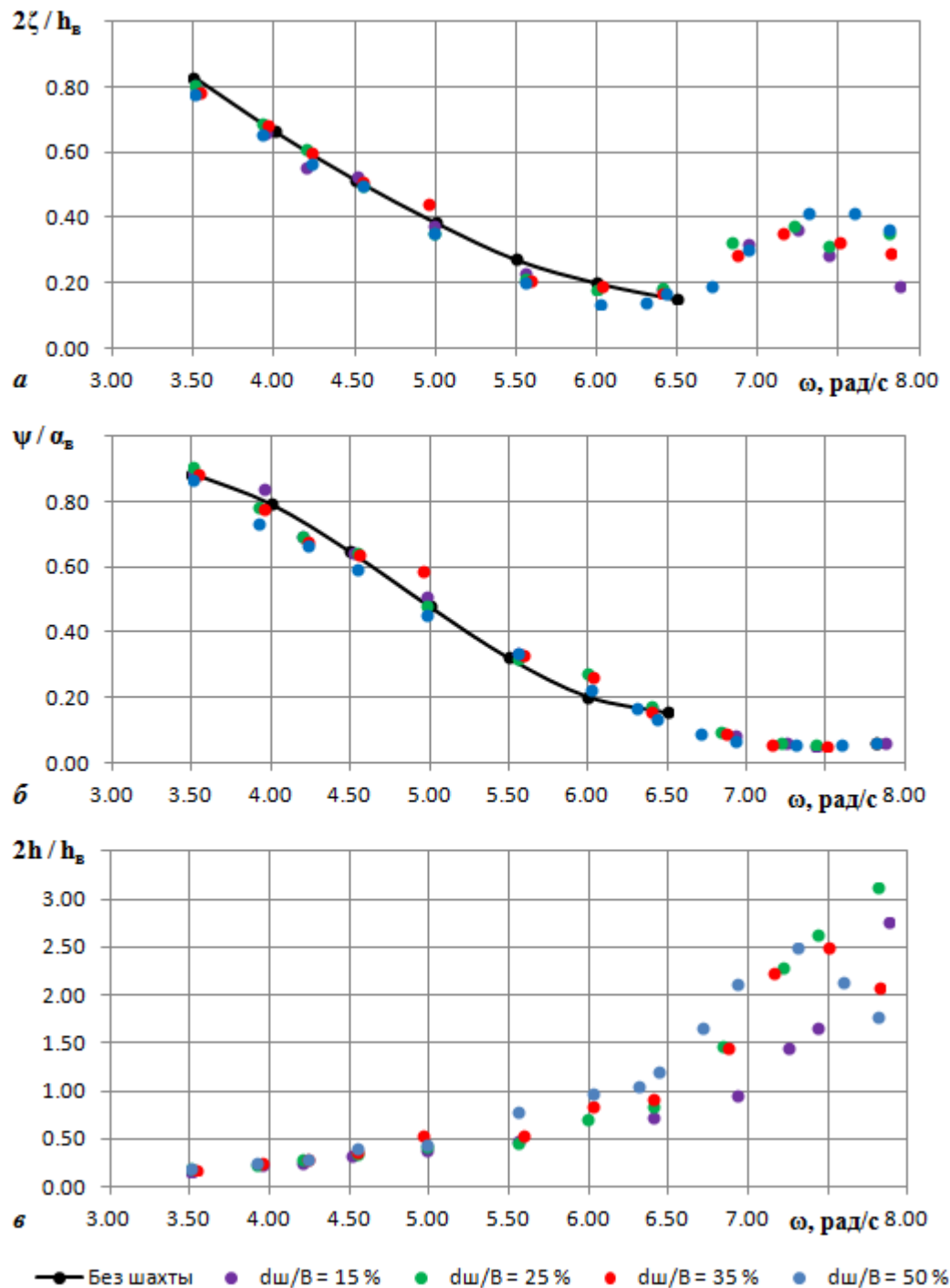


Рисунок 4.11 – Амплитудно-частотные характеристики вертикальной (а) и килевой (б) качки и колебаний жидкости в шахте (в) модели серии 60 с различными конфигурациями шахтного устройства

Анализируя данные, представленные на рисунке 4.11, можно заключить, что наличие шахты круглого сечения диаметром до 50 % ширины судна не оказывает существенного влияния на характеристики вертикальной и

килевой качки на встречном волнении в диапазоне частот, соответствующем длинам волн от половины до двух длин модели.

При этом следует обратить внимание на то, что амплитудно-частотные характеристики колебаний жидкости в шахте при моделировании корпуса с различными конфигурациями шахтного устройства имеют различный вид. Частоты пиков амплитудно-частотных характеристик снижаются с увеличением диаметра шахты, тогда как значения пиков имеют нестационарный характер.

4.2.2 Численное моделирование продольной качки модели DTMB 5415 с различными конфигурациями шахтного устройства на встречном волнении

Для оценки влияния наличия шахтного устройства на качку корпуса с иными, по сравнению с используемыми в проведенном эксперименте (серии 60), обводами было проведено численное моделирование продольной качки корпуса DTMB 5415 (корабль класса Арлей Бёрк, ВМС США) в варианте исполнения без скуловых килей на встречном регулярном волнении.

Данный корпус исследовался при верификации методов вычислительной гидродинамики при решении задачи по определению параметров продольной качки судна на встречном регулярном волнении в разделе 2.7.

Для выполнения численного моделирования были разработаны трехмерные модели с тремя вариантами шахтного устройства:

1 С шахтой диаметром $d_{\text{ш}} = 0,11$ м и относительным диаметром $d_{\text{ш}}/B = 25$ %.

2 С шахтой диаметром $d_{\text{ш}} = 0,165$ м и относительным диаметром $d_{\text{ш}}/B = 37,5$ %.

3 С шахтой диаметром $d_{\text{ш}} = 0,22$ м и относительным диаметром $d_{\text{ш}}/B = 50$ %.

Вид снизу на трехмерные модели корпусов с различными конфигурациями шахтного устройства представлен на рисунке 4.12.

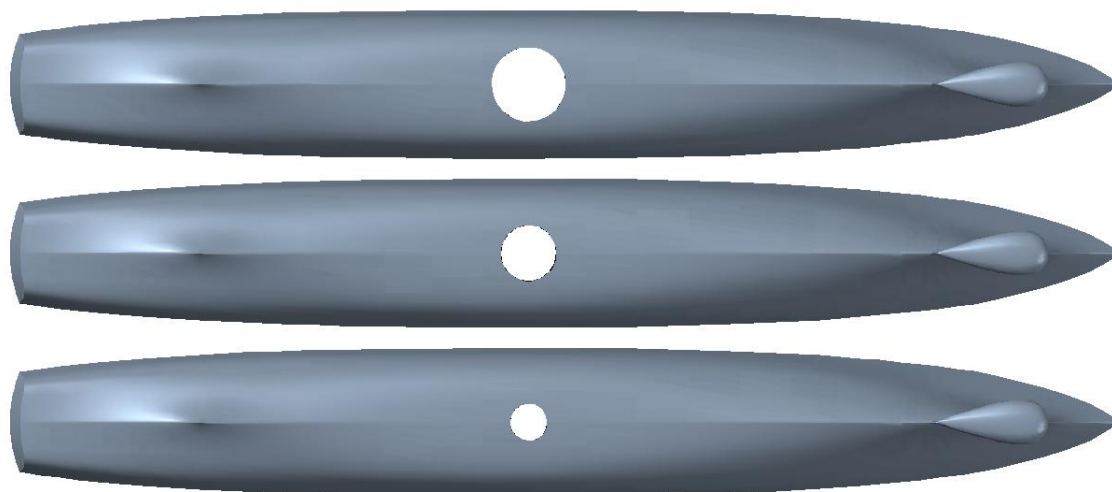


Рисунок 4.12 – Вид снизу на трехмерные модели корпуса DTMB 5415 с различными конфигурациями шахтного устройства: сверху – с шахтой диаметром $d_{ш} = 0,22$ м, посередине – с шахтой диаметром $d_{ш} = 0,165$ м, снизу – с шахтой диаметром $d_{ш} = 0,11$ м

Разработанные расчетные области, необходимые для выполнения моделирования, аналогичны описанной в разделе 2.7.

Массовые характеристики корпусов принимаются в соответствии с данными таблицы 2.4. Как и в предыдущих расчетах постоянным считается водоизмещение, а осадка изменялась в зависимости от параметров шахты.

Результаты численного моделирования продольной качки модели на встречном волнении при различных конфигурациях шахтного устройства представлены на рисунке 4.13.

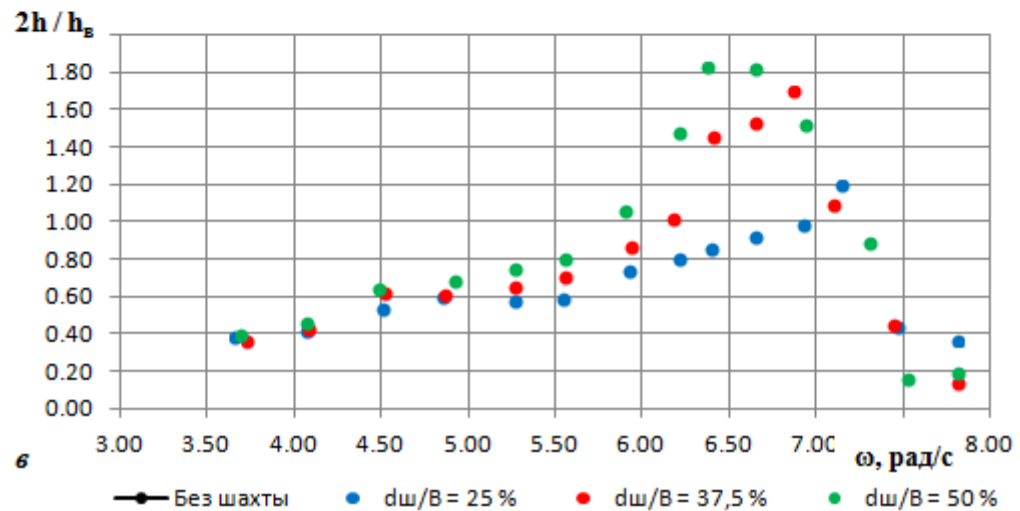
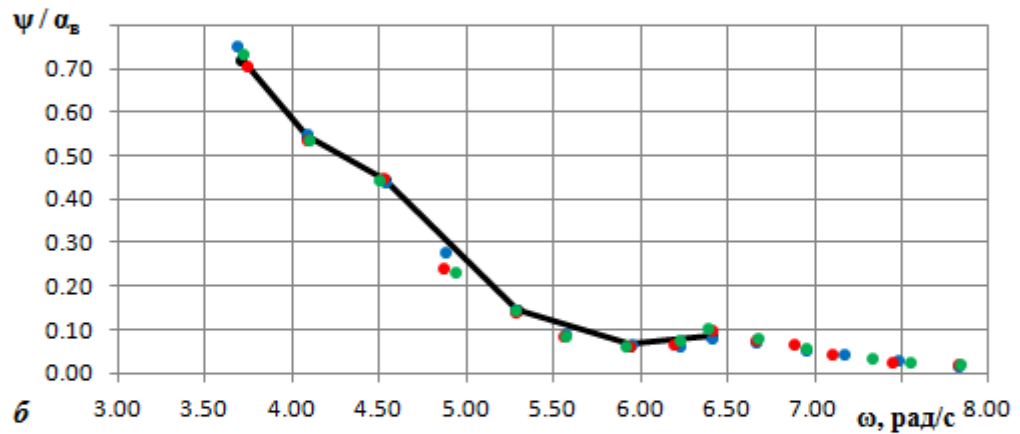
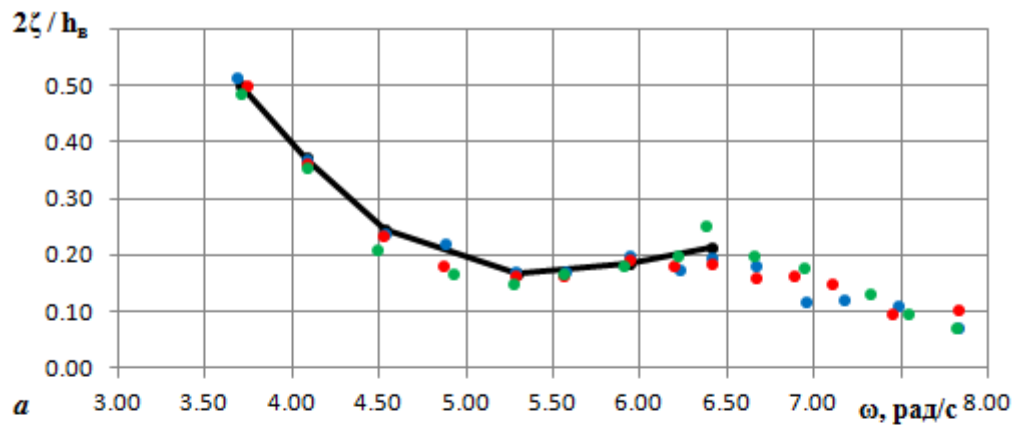


Рисунок 4.13 – Амплитудно-частотные характеристики вертикальной (а) и килевой (б) качки и колебаний жидкости в шахте (в) модели DTMB 5415 с различными конфигурациями шахтного устройства

Анализируя данные, представленные на рисунке 4.11, можно заключить, что наличие шахты круглого сечения диаметром до 50 % ширины судна не оказывает существенного влияния на характеристики вертикальной и килевой качки на встречном волнении.

При этом следует обратить внимание на то, что амплитудно-частотные характеристики колебаний жидкости в шахте при моделировании корпуса с различными конфигурациями шахтного устройства имеют различный вид. Частоты пиков амплитудно-частотных характеристик снижаются с увеличением диаметра шахты, тогда как значения пиков возрастает.

Таким образом, по результатам анализа можно заключить, что наличие шахты диаметром до половины от ширины судна, расположенной в районе центра величины корпуса, влияет пренебрежимо мало на характеристики продольной качки на встречном регулярном волнении при отсутствии скорости хода. *Данное заключение очень важно, поскольку позволяет при расчетах качки судов с шахтными устройствами круглого сечения различных размеров, расположенных в районе центра величины корпуса, на встречном волнении при отсутствии скорости использовать данные о вертикальной и килевой качки судна без шахты.*

4.3 Анализ влияния месторасположения шахты на динамические характеристики судна

Все предыдущие расчеты, а также экспериментальное исследование проводились при условии расположения шахты в районе центра величины судна. Однако в реальных проектах это условие выполняется не всегда, поэтому проведем вычислительный эксперимент для анализа влияния месторасположения шахты на характеристики качки и колебаний жидкости в шахте судна.

Для выполнения расчетов используется модель серии 60 с шахтой диаметром $d_{ш} = 0,074$ м (относительный диаметр $d_{ш}/B = 25$ %). Шахты располагаются на различном расстоянии в корму от центра величины модели, не имеющей шахтного устройства. При этом фактическое значение абсциссы центра величины смещается. Рассматриваются четыре расположения шахты:

1 Ось шахты относительным диаметром $d_{ш}/B = 25$ % располагается на расстоянии $x = 1,071$ м от носового перпендикуляра, абсцисса центра величины при этом располагается также на расстоянии $x_c = 1,071$ м от носового перпендикуляра. Относительное смещение месторасположения шахты равно $x/L = 0$.

2 Ось шахты относительным диаметром $d_{ш}/B = 25$ % располагается на расстоянии $x = 1,28$ м от носового перпендикуляра, абсцисса центра величины при этом располагается также на расстоянии $x_c = 1,069$ м от носового перпендикуляра. Относительное смещение месторасположения шахты равно $x/L = 0,10$.

3 Ось шахты относительным диаметром $d_{ш}/B = 25$ % располагается на расстоянии $x = 1,49$ м от носового перпендикуляра, абсцисса центра величины при этом располагается также на расстоянии $x_c = 1,066$ м от носового перпендикуляра. Относительное смещение месторасположения шахты равно $x/L = 0,20$.

4 Ось шахты относительным диаметром $d_{ш}/B = 25\%$ располагается на расстоянии $x = 1,67$ м от носового перпендикуляра, абсцисса центра величины при этом располагается также на расстоянии $x_c = 1,064$ м от носового перпендикуляра. Относительное смещение месторасположения шахты равно $x/L = 0,30$.

Все варианты шахт располагаются по диаметральной плоскости модели.

Для выполнения численного моделирования были разработаны трехмерные модели корпусов серии 60 с различным месторасположением шахтного устройства, представленные на рисунке 4.21. На рисунке 4.21 не показана трехмерная модель корпуса без смещения расположения шахты, поскольку она была разработана ранее и представлена на рисунке 4.2.

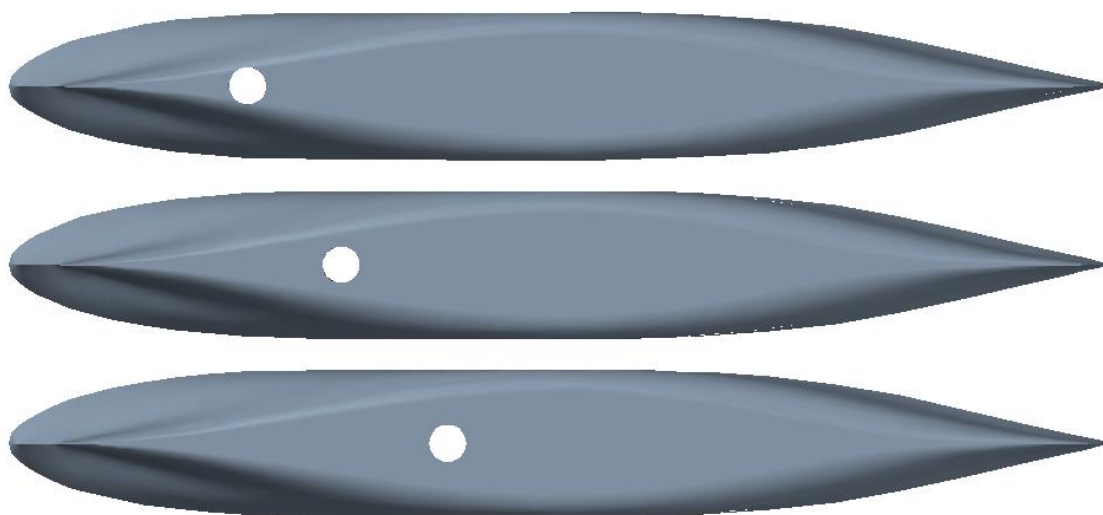


Рисунок 4.21 – Трехмерные модели корпусов серии 60 с различным расположением шахт: сверху – относительное смещение $x/L = 0,30$; посередине – относительное смещение $x/L = 0,20$; снизу – относительное смещение $x/L = 0,10$

Расчетные области, разработанные для численного моделирования аналогичны представленным в разделе 4.1.

Численное моделирование производилось в условиях встречного регулярного волнения без скорости хода. Из массовых характеристик, принятых в разделе 4.1, меняется только расположение абсциссы центра

тяжести – смещается к абсциссе центра величины с целью отсутствия дифферента у модели.

По результатам численного моделирования получены амплитудно-частотные характеристики вертикальной и килевой качки и колебаний жидкости в шахте судна, представленные на рисунке 4.22.

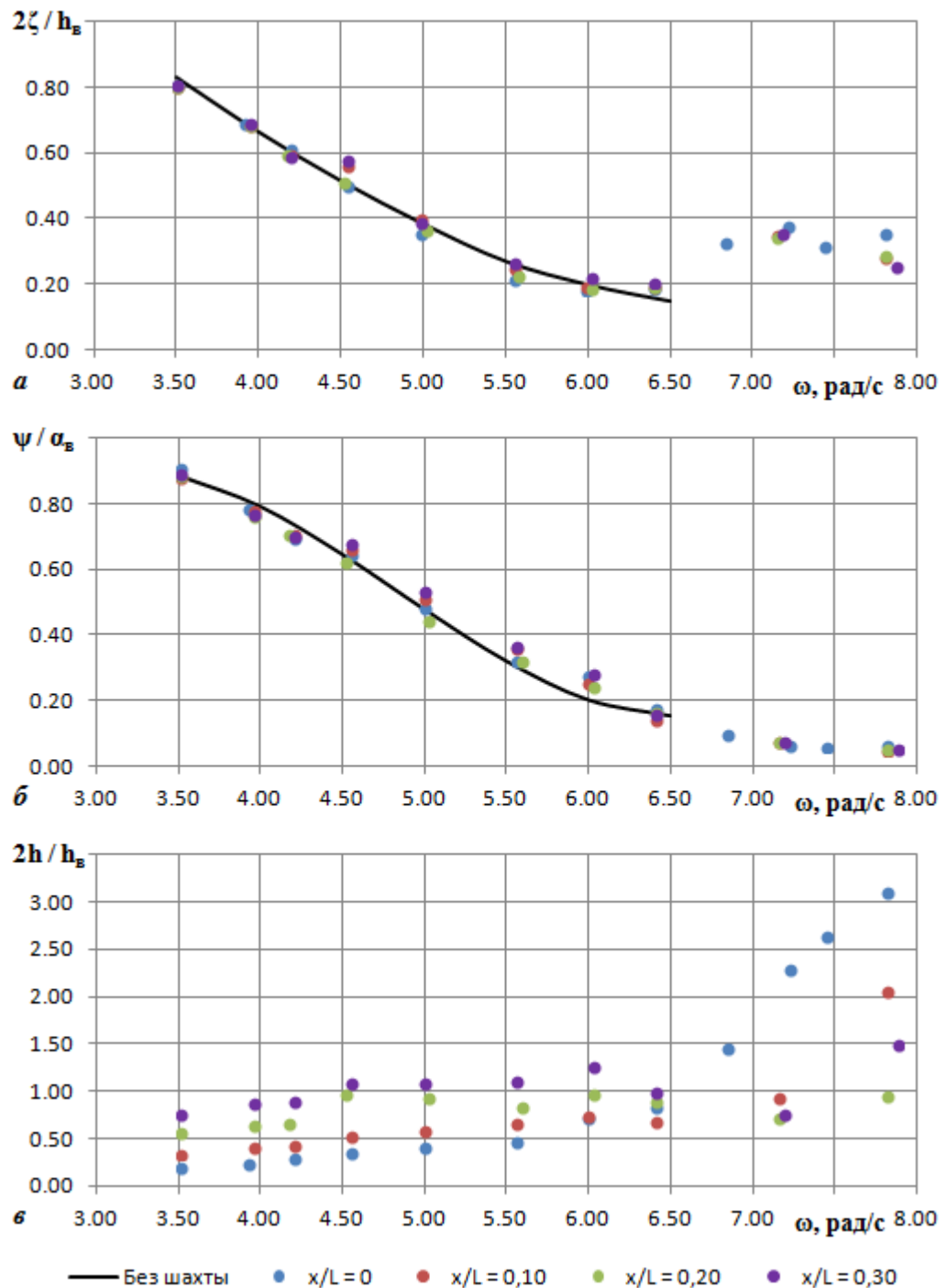


Рисунок 4.22 – Амплитудно-частотные характеристики вертикальной (а) и килевой (б) качки и колебаний жидкости в шахте (в) модели серии 60 с различным расположением шахтного устройства

Анализируя данные, представленные на рисунке 4.22, можно сделать вывод, что шахтное устройство круглого сечения относительным диаметром $d_{ш}/B = 25 \%$, расположенное в различных местах по длине корпуса судна, не оказывает влияния на параметры вертикальной и килевой качки. Данное

заключение очень важно, поскольку позволяет при расчетах качки судов с шахтными устройствами круглого сечения различных размеров, расположенных в различных местах по длине корпуса, на встречном волнении использовать данные о вертикальной и килевой качки судна без шахты.

При этом следует обратить внимание на рисунок 4.22в, на котором показаны амплитудно-частотные характеристики колебаний жидкости в шахте. Здесь можно выделить два диапазона: зону низких частот с частотами ниже $\omega < 6,50$ рад/с и зону высоких частот с частотами $\omega > 6,50$ рад/с. Зону высоких частот можно также назвать резонансной зоной.

В зоне низких частот на рисунке 4.22в следует обратить внимание, что при смещении шахты в корму судна значения амплитудно-частотной характеристики повышаются. При этом, они лишь изредка превышают значение единицы. В зоне высоких частот, значения амплитудно-частотной характеристики наоборот уменьшаются при смещении шахты в корму судна. *Здесь можно сделать вывод, что смещение шахты в корму от центра величины судна благоприятно влияет на параметры колебаний жидкости в шахте, значительно уменьшая их амплитуды.*

4.4 Анализ колебаний жидкости в шахте судна на волнении

4.4.1 Расчет колебаний жидкости в различных конфигурациях шахтного устройства

В разделе 4.1 показана хорошая эффективность применения численного моделирования для оценки амплитудно-частотной характеристики колебаний жидкости в шахте судна на волнении. Благодаря численному моделированию можно рассмотреть динамику жидкости в шахте в широком диапазоне частот, в том числе в резонансном.

Амплитудно-частотные характеристики колебаний жидкости в шахтах представлены на рисунках 4.11в и 4.13в, на которых видно, что динамика жидкости сильно зависит от параметров шахты. Также можно отметить, что значения пиков амплитудно-частотных характеристик достаточно сильно отличаются, что может свидетельствовать о влиянии качки и/или параметров судна.

Проведем оценку возможности использования линейного уравнения расчета амплитудно-частотной характеристики колебаний жидкости в шахте, представленного в первой главе (1.24), и сравним его результаты с результатами численного моделирования. Для лучшего анализа проведем расчеты не только относительных колебаний жидкости в шахте, но и абсолютных, так как амплитуды абсолютных колебаний гораздо меньше зависят от параметров качки судна.

На рисунках 4.14 и 4.15 представлены результаты расчетов по линейному уравнению (1.24) и численного моделирования относительных и абсолютных колебаний жидкости в различных шахтах модели серии 60. При расчетах по линейной формуле использовались амплитуды вертикальной качки, представленные на рисунке 4.11. Фазовый сдвиг вертикальной качки был рассчитан и аппроксимирован дополнительно. Фазово-частотная характеристика, используемая при расчетах по линейной формуле, представлена на рисунке 4.16.

При расчетах по линейной формуле значение безразмерного коэффициента демпфирования принято равным $\eta = 0,09$ в соответствии с рекомендациями [102].

Дополнительно, на рисунках 4.14 и 4.15 представлены результаты расчета амплитудно-частотных характеристик относительных и абсолютных колебаний жидкости по линейной формуле (1.30). При использовании допущения о том, что качка судна не учитывается, значения колебаний жидкости в шахте судна зависят только от размеров шахты и осадки судна, что весьма удобно для использования на ранних стадиях проектирования.

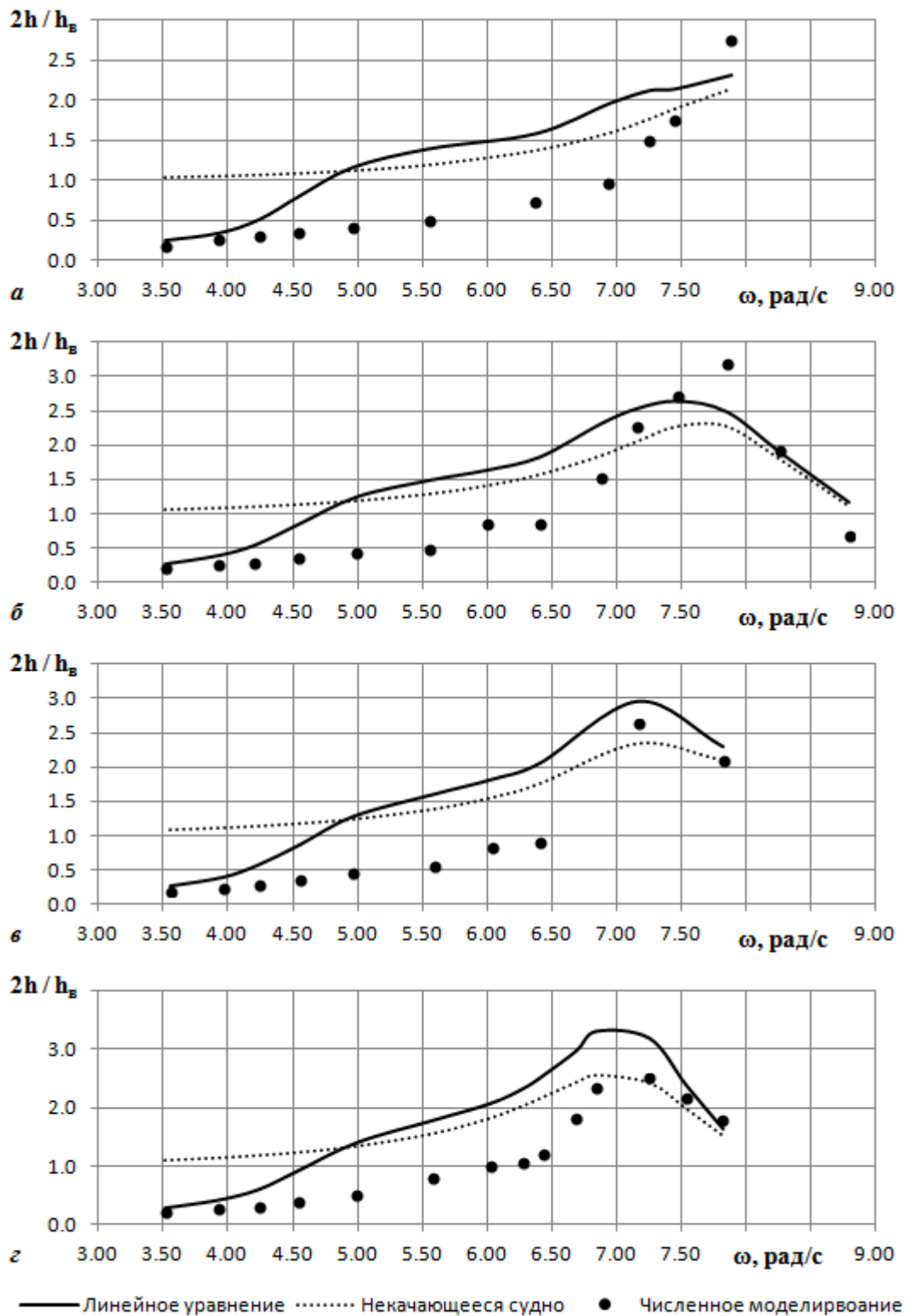


Рисунок 4.14 – Амплитудно-частотные характеристики относительных колебаний жидкости в шахте модели серии 60: а – шахта относительным диаметром $d_{ш}/B = 15\%$, б – шахта относительным диаметром $d_{ш}/B = 25\%$, в – шахта относительным диаметром $d_{ш}/B = 35\%$, г – шахта относительным диаметром $d_{ш}/B = 50\%$

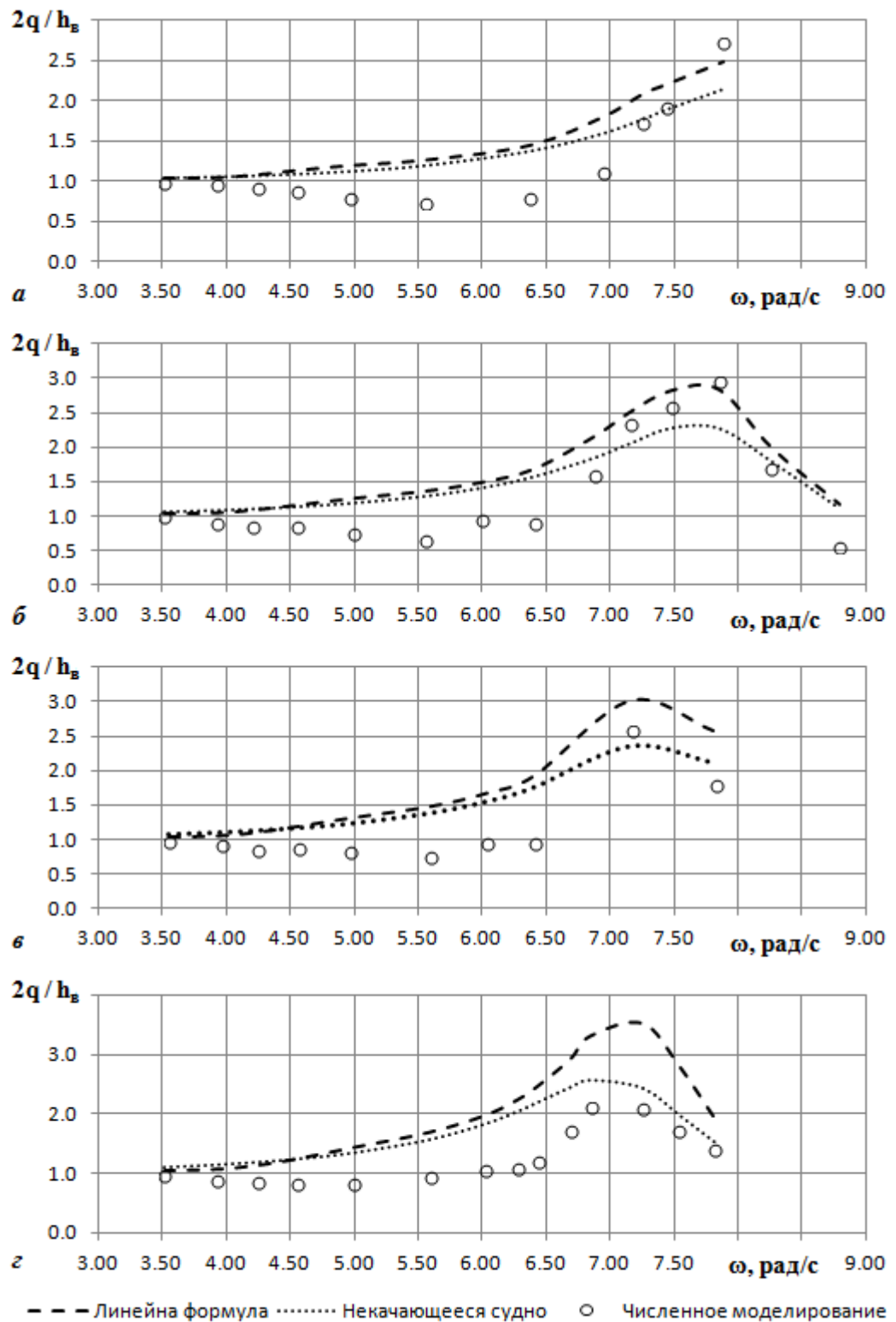


Рисунок 4.15 – Амплитудно-частотные характеристики абсолютных колебаний жидкости в шахте модели серии 60: а – шахта относительным диаметром $d_{ш}/B = 15\%$, б – шахта относительным диаметром $d_{ш}/B = 25\%$, в – шахта относительным диаметром $d_{ш}/B = 35\%$, г – шахта относительным диаметром $d_{ш}/B = 50\%$

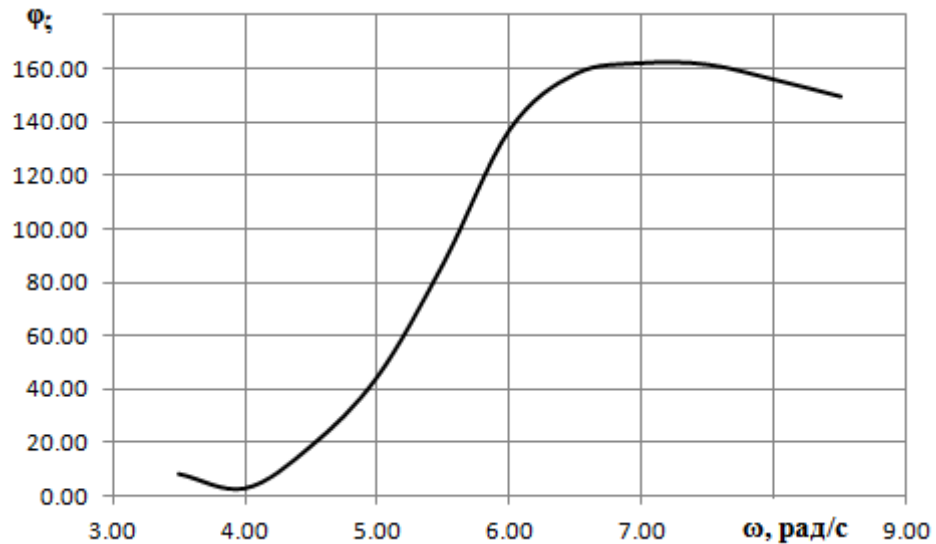


Рисунок 4.16 – Фазово-частотная характеристика вертикальной качки модели серии 60

Анализируя данные, представленные на рисунках 4.15 и 4.16, нельзя сделать однозначный вывод об эффективном применении линейной формулы. Однако можно отметить следующее:

1 Результаты расчетов по линейному уравнению обычно завышают параметры колебаний жидкости в шахте судна. Это дает возможность рекомендовать данное уравнение к использованию на начальных стадиях проектирования с учетом ошибки в безопасную сторону.

2 Частоты пиков амплитудно-частотных характеристик колебаний жидкости в шахте, полученные при решении по линейной формуле и при численном моделировании, близки.

3 Значения пиков амплитудно-частотных характеристик колебаний жидкости в шахте, полученные при решении по линейной формуле и при численном моделировании, неоднозначны. При этом при решении линейного уравнения для абсолютных колебаний и вид и значения амплитудно-частотной характеристики лучше согласуются с результатами численного моделирования, чем при решении уравнения для относительных колебаний.

4 При решении линейного уравнения без учета качки судна амплитудно-частотные характеристики имеют схожие значения с решением линейного

уравнения с учетом качки судна. Это позволяет на ранних стадиях проектирования делать оценку колебаний жидкости в шахте судна с помощью линейного уравнения (1.30).

5 При увеличении диаметра шахты частота пика амплитудно-частотной характеристики колебаний жидкости снижается, тогда как значение пика возрастает. Максимальное значение пика амплитудно-частотной характеристики находится в районе трех.

Проведем аналогичный анализ для модели DTMB 5415. Результаты вычислений амплитудно-частотных характеристик относительных и абсолютных колебаний жидкости в шахтных устройствах различной конфигурации представлены на рисунках 4.17 и 4.18.

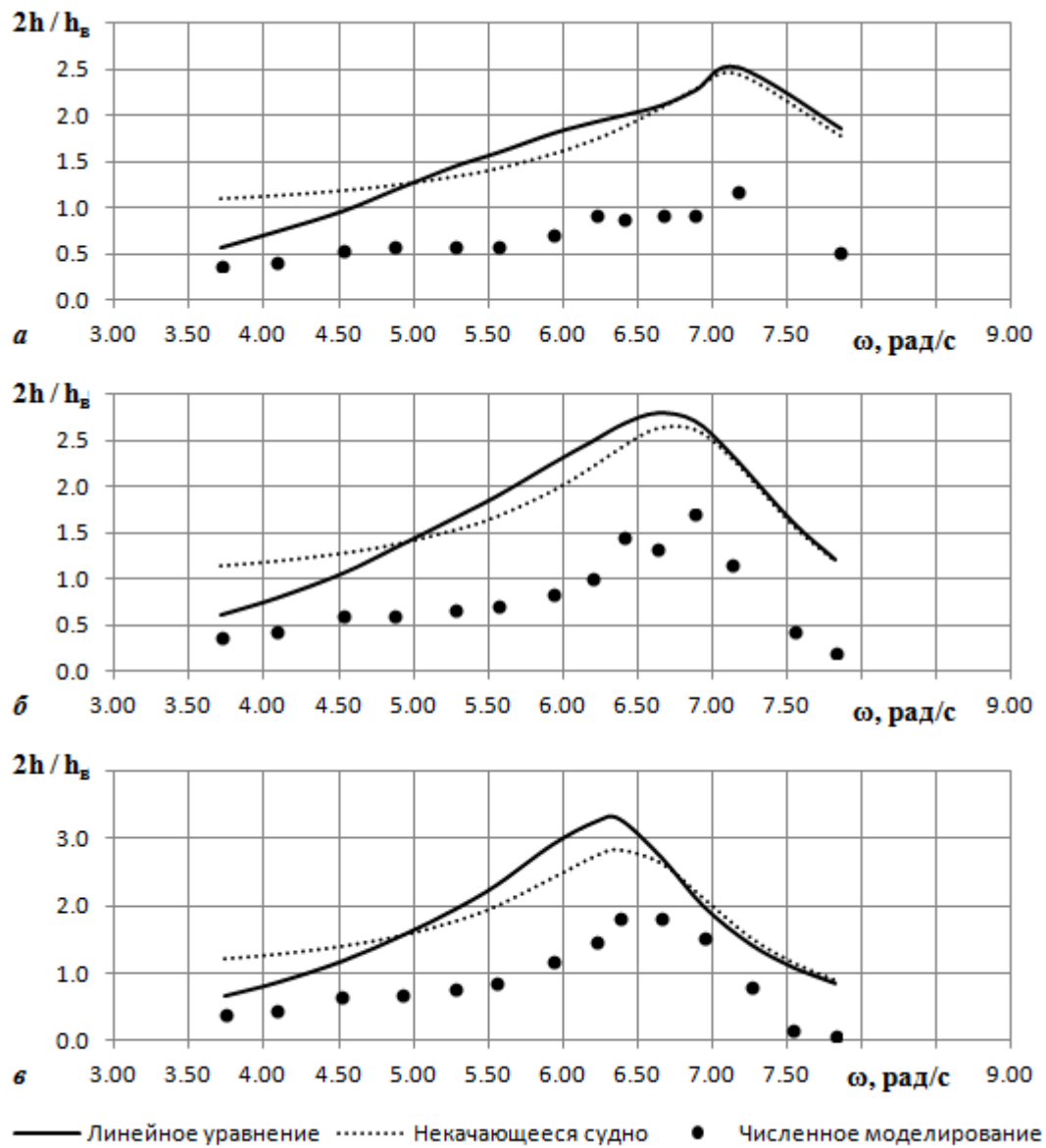


Рисунок 4.17 – Амплитудно-частотные характеристики относительных колебаний жидкости в шахте модели DTMB 5415: а – шахта относительным диаметром $d_{ш}/B = 25\%$, б – шахта относительным диаметром $d_{ш}/B = 33\%$, в – шахта относительным диаметром $d_{ш}/B = 50\%$

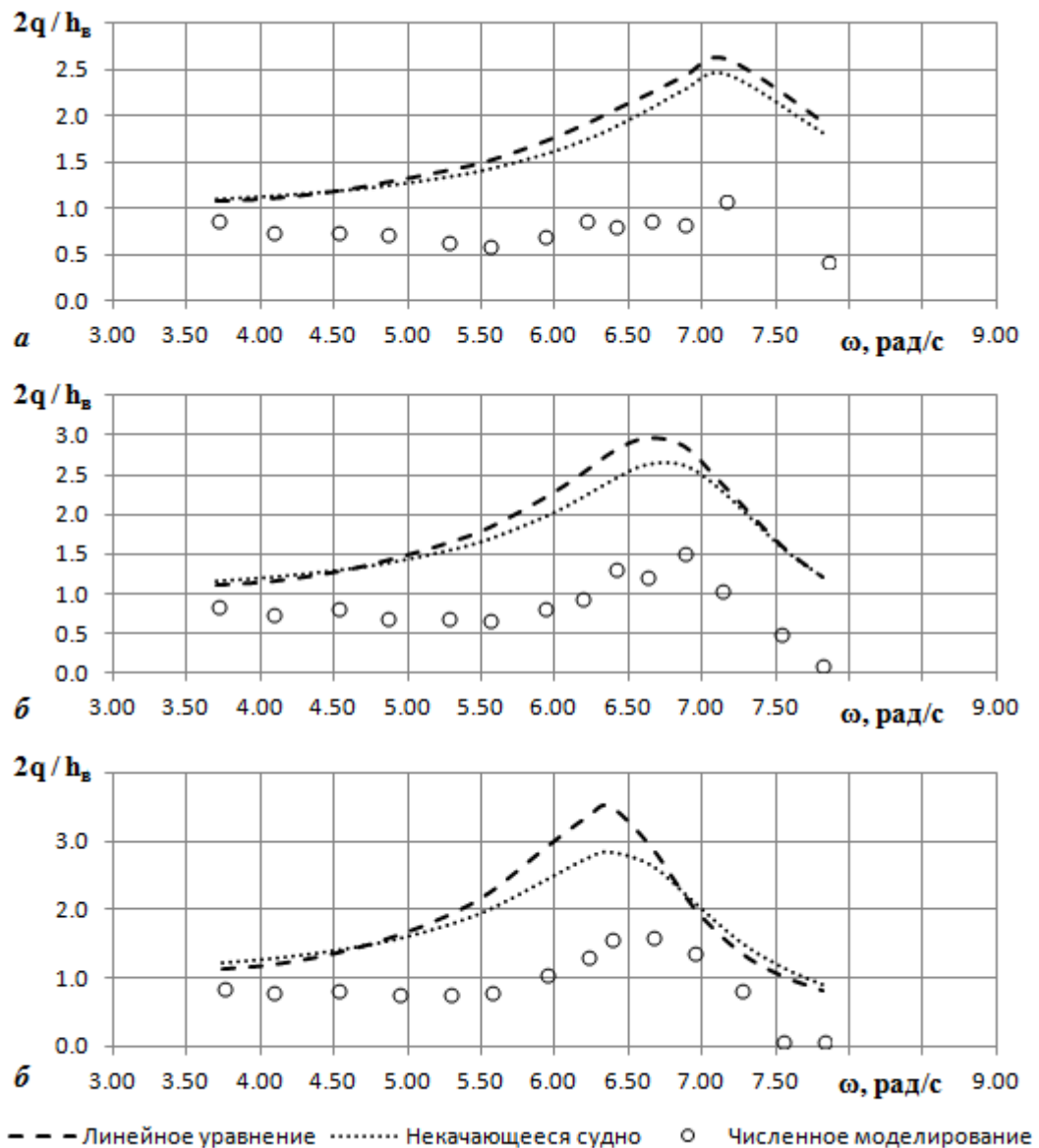


Рисунок 4.18 – Амплитудно-частотные характеристики абсолютных колебаний жидкости в шахте модели DTMB 5415: а – шахта относительным диаметром $d_{ш}/B = 25\%$, б – шахта относительным диаметром $d_{ш}/B = 33\%$, в – шахта относительным диаметром $d_{ш}/B = 50\%$

Анализируя данные, представленные на рисунках 4.17 и 4.18, можно подтвердить выводы по поводу использования линейных формул, сделанные ранее. При этом следует обратить внимание на то, что в отличие от результатов расчетов модели серии 60 результаты расчетов модели DTMB 5415 имеют достаточно серьезное расхождение по значениям пиков амплитудно-частотных характеристик, что может быть связано с заметно

меньшими значениями амплитудно-частотной характеристики вертикальной качки корпуса DTMB 5415.

Тем не менее, линейное уравнение колебаний жидкости в шахте без учета качки судна (1.30) и формула для расчета собственного периода (1.20) могут быть рекомендованы для использования на ранних стадиях проектирования.

4.4.2 Расчет колебаний жидкости в шахте судов различных размерений

Проведем вычислительный эксперимент с целью анализа влияния размерений судна на характеристики колебаний жидкости в шахте, не изменяя при этом параметры шахты (диаметр и осадка).

Для выполнения численного моделирования разработаны трехмерные модели корпусов серии 60 с коэффициентом общей полноты $\delta = 0,60$ различных размерений при постоянном значении осадки $T = 0,3$ м с шахтой диаметром $d_{ш} = 0,22$ м. Параметры разработанных корпусов представлены в таблице 4.7. Данные параметры шахты выбраны с целью возможности дополнительного сравнения с экспериментальными данными, представленными в работе [100]. В указанной работе проводились испытания неизвестной модели с шахтой указанных размеров. Модель при этом не имела степеней свободы.

Таблица 4.7 – Параметры корпусов, разработанных для изучения влияния параметров обводов на характеристики колебаний жидкости в шахте

NN	$d_{ш}/B$	$B, м$	$B_{утв}, м$	$d_{ш}/B_{утв}$	$L, м$	$D, кг$
1	60	0,367	0,35	63	2,61	147,2
2	50	0,440	0,45	49	3,36	250,6
3	40	0,550	0,55	40	4,10	380,2
4	30	0,733	0,75	29	5,59	716,9
5	20	1,100	1,10	20	8,20	1555

Вид снизу на разработанные трехмерные корпуса представлен на рисунке 4.19.

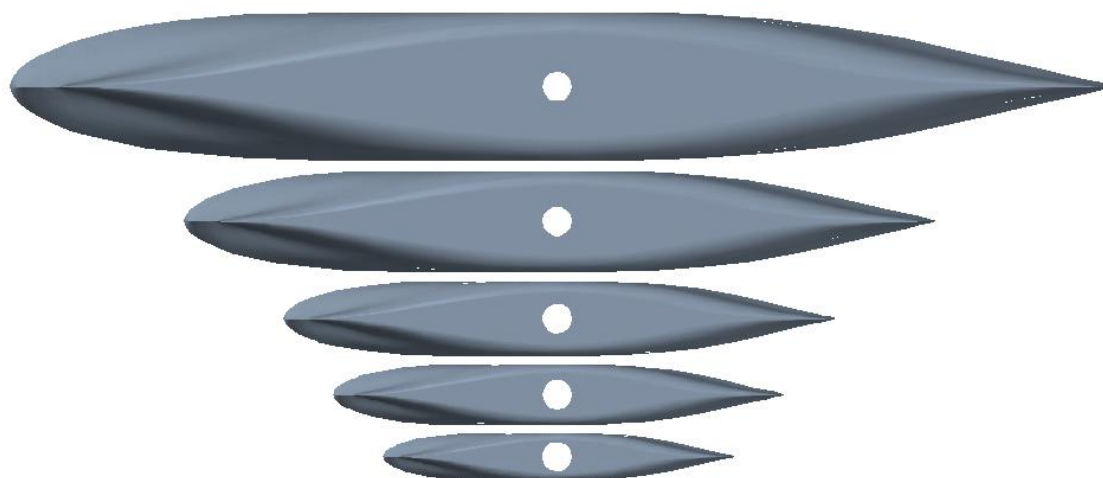


Рисунок 4.19 – Трехмерные модели корпусов различных размеров с шахтой, сверху вниз: $d_{\text{ш}}/B \approx 60\%$; $d_{\text{ш}}/B \approx 50\%$; $d_{\text{ш}}/B \approx 40\%$; $d_{\text{ш}}/B \approx 30\%$; $d_{\text{ш}}/B \approx 20\%$;

Так как параметры качки каждой модели будут различными, необходимо произвести сравнение как относительных колебаний жидкости в шахте, так и абсолютных. Последние гораздо меньше зависят от характеристик вертикальной качки модели.

По результатам численного моделирования получены амплитудно-частотные характеристики вертикальной качки судна, а также абсолютных и относительных колебаний жидкости в шахте, представленные на рисунке 4.20. На рисунке 4.20 дополнительно представлены амплитудно-частотная характеристика абсолютных колебаний жидкости в шахте некачающегося судна, полученная по результатам эксперимента, представленного в работе [100], и амплитудно-частотная характеристика, полученная по результатам расчета по линейной формуле (1.30) с относительным коэффициентом демпфирования $\eta = 0,09$.

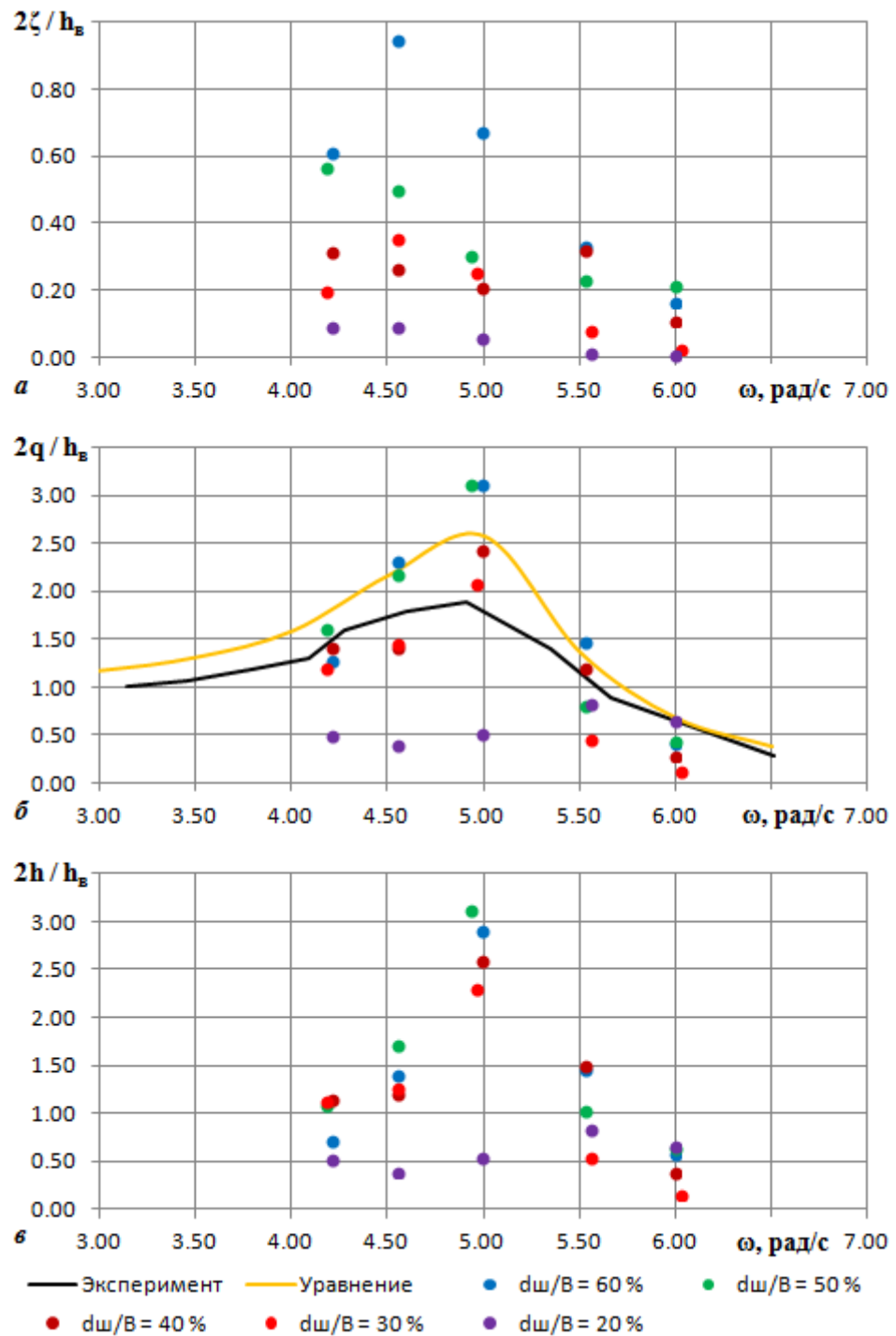


Рисунок 4.20 – Амплитудно-частотные характеристики вертикальной качки (а), абсолютных (б) и относительных (в) колебаний жидкости в шахте судов различных размеров

Анализируя данные, представленные на рисунке 4.20, можно сделать вывод, что характеристики колебаний жидкости в шахте судна имеют сильную зависимость от параметров вертикальной качки.

При этом, как и в предыдущем разделе, можно говорить о возможности использования линейного уравнения колебаний жидкости в шахте без учета качки судна (1.30) на ранних стадиях проектирования.

4.5 Практические рекомендации по определению характеристик качки судна, оборудованного шахтным устройством, и характера колебаний жидкости в шахте

По результатам модельных испытаний и выполненных расчетов были сформулированы следующие практические рекомендации по определению характеристик качки судна, оборудованного шахтным устройством, и по предсказанию характера колебаний жидкости в шахте. Эти рекомендации могут быть использованы на ранних стадиях проектирования проектно-конструкторскими организациями и при разработке правил и рекомендаций Регистра:

1 Шахтное устройство следует рассматривать как сложную систему, так как характеристики колебаний жидкости в ней зависят от абсолютных и относительных (по отношению к размерениям судна) размеров и формы шахтного устройства, месторасположения шахты и параметров вертикальных перемещений судна в районе расположения шахты.

2 Шахтное устройство рекомендуется располагать в кормовой части судна. Данное проектное решение ведет к уменьшению резонансных амплитуд колебаний жидкости в шахте, не оказывая влияния на параметры продольной качки судна.

3 При эксплуатации шахтного устройства судно должно располагаться на встречном или попутном волнении, так как данное условие благоприятно воздействует не только на параметры качки, но и на характеристики колебаний жидкости в шахте судна.

4 Расчет параметров продольной качки судов, оборудованных шахтным устройством, на встречном волнении можно проводить как для судна, не имеющего шахты, так как наличие шахтного устройства (различных размеров и месторасположения) оказывает пренебрежимо малое влияние на характеристики вертикальной и килевой качки судна.

5 Расчет параметров бортовой качки судов, оборудованных шахтным устройством, на лаговом волнении можно проводить как для судна, не имеющего шахты. Данный подход дает погрешность в безопасную сторону, так как наличие шахтного устройства ведет к некоторому увеличению демпфирования бортовой качки. При этом при расчетах параметры судна необходимо принимать с учетом наличия шахтного устройства. Наличие шахты ведет к изменению статических характеристик судна, например, значению начальной поперечной метацентрической высоты, которое оказывает непосредственное влияние на значение собственного периода бортовой качки.

6 Значения амплитуд колебаний жидкости в шахте судна на волнении можно определять с помощью линейного уравнения (1.30) вертикальных колебаний жидкости в шахте без учета качки судна, результаты которого обычно дают погрешность в безопасную сторону:

$$\left(\frac{h}{a_w}\right)_f = \frac{\omega_0^2 e^{-k_w T}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4b_{s2}^2 \omega^2}}$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{T+k\sqrt{S}}}$ – собственная частота колебаний жидкости в шахте судна (здесь T – осадка судна, k – параметр формы шахты в горизонтальном сечении, принимаемый $k = 0,46$ для шахт прямоугольной формы, $k = 0,47$ – квадратной формы и $k = 0,48$ – круглой формы; S – площадь горизонтального сечения шахты);

$k_w = \omega^2/g$ – волновое число;

$2b_{s2} = \frac{b_{s1}}{\rho S(T+a_h)}$ – удвоенный относительный линеаризованный коэффициент демпфирования (здесь $b_{s1} = 2\eta\sqrt{c_h M}$ – линеаризованный коэффициент демпфирования, где $\eta = 0,09$ – безразмерный коэффициент демпфирования, $c_h = \rho g S$ – коэффициент восстанавливающей силы, $M = M_h + a_h$ – полная масса столба жидкости в шахте, где $M_h = \rho S T$ – физическая масса столба в шахте и $a_h = \rho k\sqrt{S}$ – присоединенная масса).

Недостаточная точность результатов предложенного подхода нивелируется простотой использования, в том числе отсутствием связи с параметрами качки судна.

7 Для уточнения динамических характеристик судна и колебаний жидкости в шахте рекомендуется использование расчетного метода, разработанного в рамках диссертационной работы, основанного на применении современных средств вычислительной гидродинамики.

4.5 Выводы к главе 4

В настоящей главе представлены результаты исследования влияния наличия шахтного устройства на динамические характеристики судна, а также динамики жидкости в шахте с помощью комплекса вычислительной гидромеханики OpenFOAM.

Автором проведена верификация разработанных в рамках диссертационного исследования расчетных методов оценки гидродинамических характеристик при качке морских объектов, оборудованных шахтным устройством. Для этого было выполнено численное моделирование экспериментального исследования, представленного в третьей главе. Расчеты выполнялись для модели серии 60 с различными конфигурациями шахтного устройства: без шахты, с шахтой круглого сечения относительным диаметром $d_{ш}/B = 15 \%$ и с шахтой круглого сечения относительным диаметром $d_{ш}/B = 25$, на встречном и лаговом регулярном волнении без скорости хода.

По результатам численного моделирования были получены амплитудно-частотные характеристики вертикальной и килевой качки, а также колебаний жидкости в шахте судна при расчетах на встречном регулярном волнении. При расчетах на лаговом регулярном волнении были получены амплитудно-частотные характеристики бортовой и вертикальной качки, а также колебаний жидкости в шахте.

В результате сравнения данных, полученных по результатам экспериментального исследования и численного моделирования, была показана хорошая эффективность разработанных расчетных методов для оценки качки судна, оборудованного шахтным устройством, и колебаний жидкости в шахте судна.

На основании проведенной верификации выполнен численный эксперимент, в рамках которого изучено влияние различных параметров на

характеристики качки судна с шахтным устройством и параметры колебаний жидкости в шахте.

Для оценки влияния наличия шахт круглого сечения различных размеров, достигающих половины ширины корпуса судна, были проведены расчеты двух моделей: серии 60 и DTMB 5415, на встречном регулярном волнении. Центральные оси шахт при этом совпадали с абсциссой центра величины судна. В результате расчетов были получены амплитудно-частотные характеристики вертикальной и килевой качки, а также колебаний жидкости в шахте судна. По результатам исследования было показано, что наличие шахты круглого сечения диаметром, достигающим половины ширины корпуса, не оказывает существенного влияния на параметры вертикальной и килевой качки. Данное заключение позволяет при расчетах качки судов с шахтными устройствами круглого сечения различных размеров, расположенных в районе центра величины корпуса, на встречном волнении при отсутствии скорости хода использовать данные о вертикальной и килевой качки судна без шахты.

Для оценки влияния месторасположения шахт круглого сечения были проведены расчеты модели серии 60 на встречном регулярном волнении. При этом изменялось расположение шахты круглого сечения диаметром, равным четверти ширины судна. Было рассмотрено четыре расположения шахты: от 0 до 30 % от длины судна в корму от центра величины судна без шахты. Шахты располагались по диаметральной плоскости модели. В результате расчетов были получены амплитудно-частотные характеристики вертикальной и килевой качки, а также колебаний жидкости в шахте судна. По результатам исследования было показано, что наличие шахты круглого сечения диаметром, равным четверти ширины судна, расположенной по длине корпуса, не оказывает существенного влияния на параметры вертикальной и килевой качки. При этом было отмечено, что при смещении шахты в корму колебания жидкости в ней сильно видоизменяются: в районе низких частот колебания возрастают, а в районе резонансных частот –

заметно снижаются что позволяет сделать вывод, что смещение шахты в корму от центра величины судна благоприятно влияет на параметры колебаний жидкости в шахте, значительно уменьшая их амплитуды.

При анализе колебаний жидкости в шахте судна по результатам численного моделирования были рассмотрены амплитуды относительных и абсолютных колебаний воды в шахтах различных диаметров модели серии 60, расположенных в районе центра величины судна. Был выполнен анализ возможности использования линейных уравнений, приведенных в первой главе. По результатам сравнения амплитудно-частотных характеристик относительных и абсолютных колебаний жидкости в шахтах различного диаметра на моделях серии 60 и DTMB 5415 нельзя говорить об эффективном использовании линейного уравнения. Однако было отмечено, что значения амплитудно-частотных характеристик, рассчитанных по линейной формуле (1.30) без учета качки судна обычно завышены, а частоты пиков при этом совпадают хорошо. На основании этого был сделан вывод, что линейное уравнение колебаний жидкости в шахте без учета качки судна (1.30) и формула для расчета собственной частоты (1.20) могут быть рекомендованы для использования на ранних стадиях проектирования.

По результатам проведенного численного эксперимента были получены систематические данные влияния шахтного устройства на характеристики качки судна, представленные в таблице 4.8, и параметров колебаний жидкости в шахте при качке судна на волнении, представленные в таблице 4.9.

Таблица 4.8 – Систематические данные влияния наличия шахтного устройства на характеристики качки судна, полученные по результатам численного эксперимента

Относительный диаметр и расположение шахтного устройства	Вертикальная качка	Килевая качка
Встречное волнение		
15 %, район центра величины судна	Не оказывает существенного влияния	Не оказывает существенного влияния
25 %, район центра величины судна	Не оказывает существенного влияния	Не оказывает существенного влияния
35 %, район центра величины судна	Не оказывает существенного влияния	Не оказывает существенного влияния
50 %, район центра величины судна	Не оказывает существенного влияния	Не оказывает существенного влияния
25 %, смещение в корму от центра величины на 10 % от длины судна	Не оказывает существенного влияния	Не оказывает существенного влияния
25 %, смещение в корму от центра величины на 20 % от длины судна	Не оказывает существенного влияния	Не оказывает существенного влияния
25 %, смещение в корму от центра величины на 30 % от длины судна	Не оказывает существенного влияния	Не оказывает существенного влияния

Таблица 4.9 – Систематические данные параметров вертикальных колебаний жидкости в шахте при качке судна на волнении, полученные по результатам численного эксперимента

Относительный диаметр и расположение шахтного устройства	Значение резонанса амплитудно-частотной характеристики	Значение резонансной частоты
Встречное волнение		
15 %, район центра величины судна	Неоднозначно, зависит от характеристик качки (от обводов)	Максимальное
25 %, район центра величины судна	Неоднозначно, зависит от характеристик качки (от обводов)	Снижается
35 %, район центра величины судна	Неоднозначно, зависит от характеристик качки (от обводов)	Снижается
50 %, район центра величины судна	Неоднозначно, зависит от характеристик качки (от обводов)	Снижается
25 %, смещение в корму от центра величины на 10 % от длины судна	Существенно снижается по сравнению с характеристиками шахтного устройства, расположенного без смещения	Соответствует характеристикам шахтного устройства, расположенного без смещения
25 %, смещение в корму от центра величины на 20 % от длины судна	Снижается по сравнению с характеристиками шахтного устройства, расположенного со смещением в корму от центра величины на 10 % от длины судна	Соответствует характеристикам шахтного устройства, расположенного без смещения
25 %, смещение в корму от центра величины на 30 % от длины судна	Снижается по сравнению с характеристиками шахтного устройства, расположенного со смещением в корму от центра величины на 20 % от длины судна	Соответствует характеристикам шахтного устройства, расположенного без смещения

По результатам модельных испытаний и численного моделирования были сформулированы практические рекомендации по определению характеристик качки судна, оборудованного шахтным устройством, и характера колебаний жидкости в шахте.

Заключение

В диссертационной работе на основании выполненных исследований получены следующие результаты:

1 Выполнен обширный обзор и анализ зарубежной и отечественной литературы, посвященной методам исследования колебаний жидкости в шахте судна на волнении. Сформулированы задачи исследования.

2 Разработана методика численного моделирования динамики морских объектов при качке в полностью вязкостной постановке задачи, позволяющая реализовать расчетные методы оценки гидродинамических характеристик морских объектов на волнении с использованием программного комплекса с открытым кодом OpenFOAM.

3 Проведена успешная верификация разработанных расчетных методов оценки гидродинамических характеристик морских объектов при качке по результатам которой показана эффективность данного подхода при определении инерционно-демпфирующих свойств, а также амплитудно-частотных и фазово-частотных характеристик различных морских объектов, в том числе оборудованных шахтным устройством. Таким образом показана возможность и достоверность использования предложенных инструментов численного моделирования в качестве альтернативы потенциальным, эмпирическим, полуэмпирическим и экспериментальным методам исследования качки судов.

4 Выполнено экспериментальное исследование, которое показало:

- отсутствие влияния шахты круглого сечения диаметром до четверти ширины судна на параметры продольной качки на встречном волнении;

- наличие влияние шахты на собственную частоту и коэффициент демпфирования бортовой качки, а также некоторое влияние на характеристики бортовой качки на лаговом волнении.

5 Проведена успешная верификация расчетного метода оценки характеристик колебаний жидкости в шахте при качке судна на волнении.

6 По результатам численного эксперимента показано отсутствие влияния шахтного устройства размерами до половины ширины судна и его месторасположения на характеристики продольной качки судна на встречном волнении, что согласуется с результатами, полученными в проведенных экспериментальных исследованиях.

7 Результатам численного моделирования показали наличие зависимости характеристик колебаний жидкости в шахте судна от параметров и месторасположения шахтного устройства, а также от размерений судна. Эти результаты согласуются с полученными экспериментальными данными.

8 Получены систематические данные влияния шахтного устройства на характеристики качки судна и параметров (значения резонанса амплитудно-частотной характеристики и резонансной частоты) вертикальных колебаний жидкости в шахте при качке судна на волнении.

9 Разработаны практические рекомендации по определению характеристик качки судна, оборудованного шахтным устройством, и предсказанию характера колебаний жидкости в шахте, которые могут быть использованы на ранних стадиях проектирования проектно-конструкторскими организациями и при разработке правил и рекомендаций Регистра.

Список использованной литературы

- 1 Ачкинадзе А.Ш., Бесядовский А.Р., Васильева В.В., Корнев Н.В., Фаддеев Ю.И. Гидромеханика: Учебник для вузов / Под общей редакцией проф. Н.В. Корнева и проф. Ю.И. Фаддеева. - СПб.: Мор Вест, 2007. - 552 с., ил.
- 2 Бесядовский А.Р. Численные методы в гидроаэромеханике: Учеб. пособие / СПбГМТУ; СПб., 2018.
- 3 Благовещенский С.Н., Холодилин А.Н. Справочник по статике и динамике корабля. В двух томах. Изд. 2-е, перераб. и доп. Том 2. Динамика (качка) корабля. Л., Судостроение, 1976.
- 4 Борисов Р.В., Семенова В.Ю. Качка корабля: учеб.пособие/Под ред. д-ра техн. наук, проф. Р.В. Борисова. - СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2015. 93 с.
- 5 Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Качка судов на морском волнении. – Л.: Судостроение, 1969.
- 6 Бородай И.К., Нецветаев Ю.А. Мореходность судов. – Л.: Судостроение, 1982. – 288 с.
- 7 Григоров М.Ю., Овчинников К.Д. Тюшкевич В.В. База данных нестационарных и стационарных гидродинамических характеристик обтекателей. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2016620385, дата поступления 03.02.2016 г., дата государственной регистрации в Реестре баз данных 28.03.2016 г.
- 8 Гуртов В.А., Беляев М.А., Бакшеева А.Г. Микроэлектромеханические системы: Учеб. пособие. – Петрозаводск: Из-во ПетрГУ, 2016. – 171 с.
- 9 Денисихина Д.М., Лобачёв М.П., Пустошный А.В., Чичерин И.А. Влияние выбора модели турбулентности на точность расчёта вязкостного сопротивления транспортных судов. Морской вестник. 2008. № 3. С. 95-100.
- 10 Ефимов В.В., Назаров А.Ю., Незаметдинов Р.Ш. Настройка пакета прикладных программ OpenFOAM для численного моделирования обтекания

грузов на внешней тросовой подвеске вертолета. Научный вестник МГТУ ГА № 188, 2013, стр. 28 – 33.

11 Жинкин В.Б. Теория и устройство корабля: Учебник. – 3-е изд., стереотип. – СПб.: Судостроение, 2002. – 336 с, ил.

12 Зверков В.Н., Никущенко Д.В. Численное моделирование качки движущегося судна на встречном регулярном волнении. Морские интеллектуальные технологии. 2014. № 26. С. 116-121.

13 Зубова А.А. Моделирование гидродинамического взаимодействия судов на основе методов вычислительной гидродинамики. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2015.

14 Иванов Н.Г., Смирнов П.Е., Лобачёв М.П., Овчинников Н.А., Панов Д.О., Рис В.В., Смирнов Е.М. Тестирование двухпараметрических низкорейнольдсовых моделей турбулентности применительно к задачам обтекания судов полных обводов. Труды Крыловского государственного научного центра. 2010. № 53. С. 45-50.

15 Корнев Н.В., Бесядовский А.Р. Введение в метод крупных вихрей: Учеб. пособие / СПбГМТУ; СПб., 2005, 103 с.

16 Коровин В.П. Океанологические наблюдения в прибрежной зоне моря. Учебное пособие. – СПб., ищд. РГГМУ, 2007. – 434 с.

17 Лавриненко А.В., Ермолаева Е.В., Франк М.О., Овчинников К.Д., Тряскин Н.В. Выбор формы корпуса автономного необитаемого надводного аппарата с помощью современных средств вычислительной гидродинамики. Морские интеллектуальные технологии. № 4 (42) т. 1 2018.

18 Лобачёв М.П. Исследование особенностей течения вязкой жидкости в кормовой оконечности судов с полными обводами. Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. № 78 (362). С. 5-28.

19 Луговский В.В. Качка корабля. СПб. : СПбМТУ, 1999.

20 Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2009. – 280 с.

21 Никущенко Д.В. Исследование течений вязкой несжимаемой жидкости на основе расчетного комплекса FLUENT: Учеб. пособие. СПб.: Изд. СПбГМТУ, 2006, 92 с.

22 Никущенко Д.В. Математическое моделирование движения подводного объекта на основе методов вычислительной гидродинамики. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург, 2011.

23 Овчинников К.Д. Определение гидродинамических характеристик судна при качке с помощью современных средств вычислительной гидромеханики. Морские интеллектуальные технологии, № 1 (39) т. 1 2018.

24 Овчинников К.Д. Оценка влияния наличия шахты на характеристики продольной качки судна с помощью современных средств вычислительной гидромеханики. Морские интеллектуальные технологии, № 2 (40) т. 1 2018.

25 Овчинников К.Д. Численное моделирование качки судна с шахтным устройством на встречном волнении. Труды ИСП РАН, том 30, вып. 5, 2018 г., стр. 235-248 (на английском языке).

26 Овчинников К.Д., Ткаченко И.В., Тряскин Н.В., Чепурко С.И. High-performance computations in ship hydromechanics. International Conference on Naval Architecture and Ocean Engineering. Collection of Papers. Труды Международной конференции по судостроению и океанотехнике: Сборник статей / СПбГМТУ, НТОС им. акад. Крылова. – СПб: СПбГМТУ, 2016 – 730 с.

27 Овчинников К.Д., Ткаченко И.В., Тряскин Н.В. Численное моделирование качки полупогружной платформы на регулярном волнении. Морские интеллектуальные технологии, № 2 (28) т.1 2015.

28 Овчинников К.Д., Ткаченко И.В., Тряскин Н.В. Численное моделирование качки полупогружной платформы на регулярном волнении.

Труды 12-й Международной конференции и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ, 15-18 сентября 2015 года, Санкт-Петербург.

29 Овчинников К.Д., Тряскин Н.В., Чепурко С.И. Исследование формы корпуса подводных аппаратов. Вооружение, военная техника и боеприпасы. Сборник научных статей. Форум лучших студентов технических вузов России, X Международная выставка «Вооружение, военная техника и боеприпасы» (Russia Arms Expo 2015), 10 сентября 2015 года, г. Нижний Тагил: в 2-х частях / Под ред. А.А.Александрова и В.К. Балтяна — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. - 252 с. - Часть I.

30 Рахманин Н.Н. Влияние колебаний воды в шахте судна на его динамические характеристики. Научно-технический сборник Судостроительная промышленность. Серия: Проектирование судов. ЦНИИ Румб. Выпуск 9, 1988.

31 Реброва И.А. Планирование эксперимента: учебное пособие. – Омск: СибАДИ, 2010. – 105 с.

32 Ремез Ю.В. Качка корабля. Л.: Судостроение, 1983 - 328 с.

33 Семенов Тянь-Шанский В.В., Благовещенский С.Н., Холодилин А.Н. Качка корабля. Л., Судостроение, 1969.

34 Семенова В.Ю. Разработка метода расчета нелинейной качки судов. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург, 2005.

35 Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 2. Статика судов. Качка судов/Под ред. Я. И. Войткунского. - Л.: Судостроение, 1985. - 440 с., ил.

36 Таранов А.Е. Моделирование заливаемости и брызгообразования в носовой оконечности турельного судна. Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. № 78 (362). С. 75-78.

37 Титченко Ю.А. Диагностика поверхностного волнения с использованием ультразвуковых и микроволновых локаторов с диаграммами

направленности специальной формы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Нижний Новгород, 2016.

38 Ткаченко И.В. Моделирование взаимодействия тел и гидрофизических полей морской среды методом крупных вихрей. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург, 2012.

39 Ткаченко И.В. Современные методы решения задач гидродинамики: учеб. пособие / И.В. Ткаченко. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2014. – 59 с.

40 Ткаченко И.В. Современные теории турбулентности: учеб. пособие / И.В. Ткаченко; под. ред. д-ра техн. наук, проф. А.Ш. Ачкинадзе. – СПбГМТУ. – СПб., 2010. – 87 с.

41 Тряскин Н.В. Численное моделирование динамики морских объектов на волнении. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2017.

42 Федоров Д.С., Ивойлов А.Ю., Жмудь В.А., Трубин В.Г. Разработка системы стабилизации угла отклонения балансирующего робота. Автоматика и программная инженерия. 2015, №2(12).

43 Харламов С.Н. Алгоритмы при моделировании гидродинамических процессов. - Томск. Изд-во ТПУ, 2008. - 80 с.

44 Хаскинд М. Д. Гидродинамическая теория качки корабля. М.: Наука, 1973.

45 Шевчук И.В., Корнев Н.В., Рыжов В.А. Численное моделирование корабельного следа на мелководье с использованием гибридного URANS-LES метода. Морской вестник. 2013. № 1S (10). С. 83-85.

46 Шмырев А.Н., Мореншильдт В.А., Ильина С.Г. Успокоители качки судов. – Л., Судпромгиз, 1961.

47 Aalbers, A.B. The water motions in a moonpool, Ocean Engineering, Vol. 11, No. 6, pp. 557-579, 1984.

48 Abbas N., Kornev N. Validation of hybrid URANS/LES methods for determination of forces and wake parameters of KVLCC2 tanker at manoeuvring conditions. *Ship Technology Research*. 2016. T. 63. № 2. C. 96-109.

49 ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I2C-Compatible, 860-SPS, 16-Bit ADCs With Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator

50 Afshar, Mostafa Amini Numerical Wave Generation In OpenFOAM. Master of Science Thesis. Department of Shipping and Marine Technology. Chalmers University Of Technology. Goteborg, Sweden, 2010. Report No. X-10/252

51 Bandyk, Piotr Józef A Body-Exact Strip Theory Approach To Ship Motion Computations. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Naval Architecture and Marine Engineering) in The University of Michigan, 2009.

52 Bassler, Christopher C., Reed, Arthur M., Brown, Alan J. Characterization of Physical Phenomena for Large Amplitude Ship Roll Motion. The 29th American Towing Tank Conference Annapolis, Maryland, August 2010.

53 Bergdahl, Lars Wave-Induced Loads and Ship Motions. Department of Civil and Environmental Engineering. Division of Water Environment Technology. Chalmers University Of Technology. Goteborg, Sweden, 2009. Report No. 2009:1.

54 Bonfiglio L., Brizzolara S., Chryssostomidis C. Added Mass and Damping of Oscillating Bodies: a fully viscous numerical approach. *Recent Advances In Fluid Mechanics, Heat & Mass Transfer And Biology*, Harvard, Cambridge, USA, January 25-27, 2012.

55 Building a Resistive Wave Probe. Massachusetts Institute of Technology 12.097.

56 Bustos, Diana S. Hurtado, Alvarado, Rubén J. Paredes Numerical hull resistance calculation of a catamaran using OpenFOAM. *Ship Science & Technology - Vol. 11 – n. 21 - (29-39) July 2017 - Cartagena (Colombia)*.

57 Chen, L.F., Sun, Liang, Zang, J., and Hillis, A. Numerical Simulation of Wave-induced Roll of a 2-D Rectangular Barge Using OpenFOAM. Abstract for the 29th Intl Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Osaka (Japan), March 30 – April 02, 2014.

58 Cueva, M., Malta, E.B., Nishimoto, K., Costa, A.P., 2005, Estimation of Damping Coefficients of Moonpools for Monocolumn type units, OMAE2005-67332.

59 el Moctar, O., Shigunov, V., and Zorn, T., 2012. “Duisburg test case: Postpanamax container ship for benchmarking”. *Ship Technology Research*(Vol. 50, No. 3).

60 Eslamdoost, Arash Roll Motion of a Box and Interaction with Free-Surface. Project work for the PhD course in CFD with open source software. Chalmers University Of Technology. January 2010.

61 Faltinsen O.M. Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles. Cambridge university press, 2005.

62 Faltinsen, O. M. Sea loads on ships and offshore structures. Cambridge University Press 328 p., 1990.

63 Faltinsen, O. M., Rognebakke, O. F., and Timokha, A. N. Two-dimensional resonant piston-like sloshing in a moonpool. *J. Fluid Mech.* (2007), vol. 575, pp. 359–397, 2007.

64 Falzarano, Jeffrey, Somayajula, Abhilash and Seah, Robert An Overview of the Prediction Methods for Roll Damping of Ships. *Ocean Systems Engineering*, Vol. 5, No. 2 (2015) 55-76.

65 Ferziger, J.H., Peric, M., 2002. *Computational Methods for Fluid Dynamics*, (Third Edit.) Springer, Berlin, Germany.

66 Frank, W. Oscillation Of Cylinders In Or Below The Free Surface Of Deep Fluids. Hydromechanics Laboratory. Research And Development Report. Report 2375, October 1967.

67 Fukuda, K. Behaviour of water in vertical well with bottom opening of ship, and its effect on ship motions, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 141, pp. 107-122, 1977.

68 Gerritsma, J, Beukelman, W, Glansdorp, C C, Effects Of Beam On The Hydrodynamic Characteristics Of Ship Hulls. Symposium on Naval Hydrodynamics, 10th, Proceedings, Pap and Discuss, Cambridge, Mass, June 24-28, 1974.

69 Gowdy, Savannah B. Full characterization of the influence of conductivity changes to resistance wave gauge measurements. Georgia Institute of Technology. O.H. Hinsdale Wave Research Lab. The George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation Consortium. August 19, 2008.

70 Gu M., Lu J., Bu S., Wu C., Qiu G. Numerical Simulation of the Ship Roll Damping. Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, 14-19 June 2015, Glasgow, UK.

71 Gui, L., Longo, J., and Stern, F., (2001), "Towing Tank PIV Measurement System, Data and Uncertainty Assessment for DTMB Model 5512," Experiments in Fluids, Vol. 31, pp. 336-346.

72 Guidelines for Moonpool Assessment. Guidance Note NI 621 DT R00 E. Bureau Veritas, 2016.

73 Guilhem Gaillarde and Anke Cotteleer, Water motion in moonpools empirical and theoretical approach, Maritime Research Institute Netherlands MARIN, 2001.

74 Hajjarab, Mohammad Roll Damping Prediction of a Free Floating Barge. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. School of Marine Science and Technology April 2013.

75 Hammargren, Erik, Törnblom, John Effect of the Moonpool on the Total Resistance of a Drillship. Master of Science Thesis. Department of Shipping and Marine Technology, Chalmers University Of Technology, Gothenburg, Sweden 2012.

76 Handschel, Sven, Feder, Dag-Frederik, Abdel-Maksoud, Moustafa Estimation of Ship Roll Damping - a Comparison of the Decay and the Harmonic Excited Roll Motion Technique for a Post Panamax Container Ship. Proceedings of the 12th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, 14-19 June 2015, Glasgow, UK.

77 Heo, Jae-Kyung, Park, Jong-Chun, Koo, Weon-Cheol, and Kim, Moo-Hyun Influences of Vorticity to Vertical Motion of Two-Dimensional Moonpool under Forced Heave Motion. Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering, Volume 2014, Article ID 424927, 13 pages.

78 Himeno, Yoji Prediction of Ship Roll Damping – State of the Art. Department of Naval Architecture and Marine Engineering. College of Engineering. The University of Michigan. No. 239. September 1981.

79 Ikeda, Yoshito, Himeno, Yoji, and Tanaka, Norio Components of Roll Damping of Ship at Forward Speed. Report of Department of Naval Architecture. University of Osaka Prefecture. No. 00404. August, 1978.

80 Ircal Mohsin A.R, S. Nallayarasu, S.K. Bhattacharyya Experimental And CFD Simulation Of Roll Motion Of Ship With Bilge Keel. International Conference on Computational and Experimental Marine Hydrodynamics. MARHY 2014. 3-4 December 2014, Chennai, India.

81 Irvine, M., Longo, J. and Stern, F., “Pitch and Heave Tests and Uncertainty Assessment for a Surface Combatant in Regular Head Waves,” Journal Ship Research, Vol. 52, No. 2, June 2008, pp. 146-163.

82 Irvine, M., Longo, J., Stern, F., “Towing Tank Tests for Surface Combatant for Free Roll Decay and Coupled Pitch and Heave Motions,” Proc. 25th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, St Johns, Canada, 2004.

83 ITTC – Recommended Procedures and Guidelines. Seakeeping Experiments. 7.5-02 07-02.1. 2014.

84 ITTC – Recommended Procedures and Guidelines. Seakeeping Experiments. 7.5-02 07-03.2. 2017.

85 Jacobsen, Niels G. WAVES2FOAM manual 2017

86 Jasak H., Vukcevic V. and Christ D. Rapid Free Surface Simulation for Steady-State Hull Resistance with FVM using OpenFOAM. 30th Symposium on Naval Hydrodynamics Hobart, Tasmania, Australia, 2-7 November 2014.

87 Jasak H., Vukcevic V. OpenFOAM In Marine Hydrodynamics. 21st symposium Sorta 2014.

88 Journée, J.M.J. Experiments and Calculations on 4 Wigley Hull Forms in Head Waves. Delft University of Technology. Reprinted: 26-11-2003. Website: www.shipmotions.nl.

89 Journée, J.M.J. Theoretical Manual of SEAWAY. Report1216a February 2001.

90 Journée, J.M.J., and Massie, W.W. Offshore hydromechanics. First edition. Delft University of Technology. 2001

91 Kalman, R.E. New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. TRANS. ASME, Series D, Journal Of Basic Engineering, vol. 82, 1960, pp. 35-45.

92 Kim SY, Lee J, Kim Y Study on Scale Effects on 3D Sloshing Flows. Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece, June 26-July 1, 2016.

93 Kawahara, Yuki, Maekawa, Kazuya, Ikeda, Yoshiho A Simple Prediction Formula of Roll Damping of Conventional Cargo Ships on the Basis of Ikeda's Method and Its Limitation. Proceedings of the 10th International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles.

94 Klaka, Kim Response of a vessel to waves at zero ship speed: preliminary full scale experiments. Centre For Marine Science & Technology, Internal Report. Report C2000-21, 3 August 2000.

95 Kleinsorge, Lutz, Lindner, Hannes, and Bronsart, Robert A Computational Environment for Rapid CFD Ship Resistance Analyses. Proceedings of PRADS2016. 4th-8th September, 2016. Copenhagen, Denmark.

96 Madgwick, S. O. H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays, Technical report, University of Bristol University, UK, 2010.

97 Maisondieu, C., Le Boulluec, M. Flow dynamics in a moon-pool. Experimental and numerical assessment. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 2001.

98 Malenica Š., Mravak Z., Besse P., Kaminsky M.L., Bogaert H. Full Scale Experiments And New Methodology To Assess The Structural Behaviour Of A Membrane Lngc Containment System Under Breaking Waves Project “Sloshel”.

99 Malta, E.B., Cueva, M., Nishimoto, K., Gonçalves, R., Masetti, I., 2006, Numerical Moonpool Modeling, OMAE2006-92456.

100 Matusiak, J. Water column motion in a moonpool of a ship. Journal for Structural Mechanics. Vol. 30 1997, No 2.

101 Menter, F. R., 1994. “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications”. AIAA Journal (Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605).

102 Modelling and Analysis of Marine Operations. DNV-RP-H103. Det Norske Veritas as, 2014.

103 Mohan, Mahish Couple waves2Foam with Self-Propulsion. CFD with OpenSource software. A course at Chalmers University of Technology. Taught by Hakan Nilsson. February 14, 2017.

104 Molin, B. On sloshing modes in square or nearly square moonpools. 33rd International Workshop on Water Waves and Floating Bodies, April 4 to April 7, 2018 in Guidel-Plages, FRANCE.

105 Molin, B. On the piston and sloshing modes in moonpools, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 430, pp. 27-50, Cambridge University Press, 2001.

106 Molin, B. On the piston mode in moonpools, Proceedings of the 14 th Int. Workshop on water waves & floating bodies, 1999.

107 MPU-6000/MPU-6050 Product Specification. Document Number: PS-MPU-6000A-00. Revision: 3.4. Release Date: 08/19/2013.

108 Nesjø, Eirik Nubdal Resistance due to open moonpools on offshore ships. Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology. June 2015.

109 Newman, J. N. Low-frequency resonance of moonpools, 18th Workshop on Water Waves and Floating Bodies – Le Croisic, France – 6-9 April 2003.

110 Piehl, Henry Peter Ship Roll Damping Analysis. Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik, der Universität Duisburg-Essen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften Dr.-Ing. April 2016.

111 Reiersen, Lars Mikkel U. Investigation of Moonpool Resonance as Vessel Damping Device. M.Sc. thesis. NTNU Trondheim, 2016.

112 Report of seakeeping committee. 11th International Towing Tank Conference. Tokyo, Japan. October 1966.

113 Report of seakeeping committee. 15th International Towing Tank Conference. The Hague, Netherlands. September 1978.

114 Sajjan, Sharanabasappa C., and Surendran, S. Model tests on the moored vessel with different moonpool shapes, Ocean Systems Engineering Volume 3, Number 2, June 2013, pages 137-147.

115 Shahabadi, Mohammad, Shadlaghani, Arash , Mansoorzadeh, Shahriar Evaluation of Moonpool Effects on Hydrodynamic Resistance of a Supply Vessel, Using Experimental and Numerical Methods. International Journal Of Maritime Technology, Vol.7/ Winter 2017 (1-9).

116 Shen Z., Carrica P. M., Wan D. Ship Motions Of KCS In Head Waves With Rotating Propeller Using Overset Grid Method. Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. OMAE2014. June 8-13, 2014, San Francisco, California, USA.

117 Simonsen, C.D., Otzen, J.F., Joncquez, S., Stern, F., 2013. EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head waves. J. Mar. Sci. Technol. 18 (4), 435–459.

118 Sivabalan.P, Surendran.S CFD Simulation of the Moonpool on the Total Resistance of a Drillship at Low Forward Speed. 10th International Conference on Marine Technology, MARTEC 2016.

119 Steen, Sverre TMR7 Experimental Methods in Marine Hydrodynamics. Lecture Notes. Department of marine technology. Marine technology centre department of marine technology. Trondheim, Norway. Revised August 2014.

120 Tanaka, Norio, Himeno, Yoji and Ikeda, Yoshito Comparison of Roll Damping between Prediction and Measurement. Written contribution to ITTC seakeeping committee. March, 1980.

121 Todd, F.H. Series 60. Methodical experiments with models of single-screw merchant ships. Research and development report. David Taylor Model Basin. Report 1712. July 1963.

122 Torres, F.G.S., Cueva, M., Malta, E.B., Nishimoto, K., Ferreira, M.D., 2004, Study of Numerical Modeling of Moonpool as Minimization Device of Monocolumn Hull, OMAE2004-51540.

123 Tu, Jiyuan Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach / Jiyuan Tu, Guan Heng Yeoh, Chaoqun Liu. First Edition, 2008.

124 Tuck, E.O., Newman, J.N. Longitudinal waves in slender moonpool, 17th Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies, Cambridge (London), RINA, 2002.

125 Tutorial: Heave and Pitch Simulation of Ship hull moving through head sea waves.

126 Ursell, F. On The Heaving Motion Of A Circular Cylinder On The Surface Of A Fluid. 20 April 1948.

127 Van Der Heiden, Henri J.L. , Van Der Plas, Peter, Veldman, Arthur E.P., Luppens, R., And Verstappen, Roel W.C.P. Simulation Of Moonpool Water Motion. V International Conference on Computational Methods in Marine Engineering. MARINE 2013.

128 Wave Instrumentation Database. Work Package 2: Standards and Best Practice. Marinet. Revision: 05. Date: 31-Oct-2012.

129 Wei, Y., Yang, J., Chen G., Hu, Z., 2011, The Research of Moonpool Size Effect on the Hydrodynamic Performance of FDPSO, OMAE2011-49586.

130 Weymouth, Gabriel David, Wilson, Robert Vance, and Stern, Frederick RANS Computational Fluid Dynamics Predictions of Pitch and Heave Ship Motions in Head Seas. Journal of Ship Research, Vol. 49, No. 2, June 2005, pp. 80–97.

131 Winden, Bjorn, Turnock, Stephen R. and Hudson, Dominic Validating Force Calculations using OpenFOAM on a Fixed Wigley Hull in Waves.

132 Zwart, W.E. Analysis of Ship Motions in Shallow Water. Development of a numerical tool for fluid-structure interaction in shallow water. Master of Science Thesis For the degree of Master of Science in Offshore and Dredging Engineering at Delft University of Technology. February 21, 2017.

133 <http://en.wikipedia.org/wiki/OpenFOAM> (01.09.2018 г.).

134 <http://openfoamwiki.net/index.php/Contrib/groovyBC> (01.09.2018 г.).

135 <http://openfoamwiki.net/index.php/Contrib/waves2Foam> (01.09.2018 г.).

136 <https://cae-club.ru/content/rekomendatsii-po-kachestvu-setki-dlya-cfx> (01.09.2018 г.).

137 <https://cfd.direct/openfoam/free-software/waves/> (01.09.2018 г.).

138 https://en.wikipedia.org/wiki/PISO_algorithm (01.09.2018 г.).

139 <https://openfoam.org/> (01.09.2018 г.).

140 [https://ru.wikipedia.org/wiki/SIMPLE_\(алгоритм\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/SIMPLE_(алгоритм)) (01.09.2018 г.).

141 <https://ru.wikipedia.org/wiki/Акселерометр> (01.09.2018 г.).

142 https://ru.wikipedia.org/wiki/Вычислительная_гидродинамика (01.09.2018 г.).

143 https://ru.wikipedia.org/wiki/Критерий_Куранта_—_Фридрихса_—_Леви (01.09.2018 г.).

144 <https://www.cfd-online.com/Tools/turbulence.php> (01.09.2018 г.).

145 <https://www.python.org/> (01.09.2018 г.).

146 <https://www.raspberrypi.org> (01.09.2018 г.).

Приложение А (обязательное) – Результаты экспериментального исследования

А.1 Результаты испытаний вертикальной и килевой качки на встречном волнении

А.1.1 Модель с модулем № 1

Модуль № 1 представляет из себя плоское днище без шахты.

По результатам анализа данных были получены характеристики волнения, на котором проводились испытания, представленные в таблице А.1, характеристики вертикальной качки, представленные в таблице А.2, и характеристики килевой качки, представленные в таблице А.3.

Таблица А.1 – Характеристики волнения при испытаниях модели с модулем № 1 на встречном волнении

NN	Период T_B , м	Длина λ , м	Высота h_B , м	Угол волнового склона α_B
1	1,63	4,1	0,094	4,10
2	1,34	2,8	0,104	6,70
3	1,44	3,2	0,094	5,30
4	1,31	2,7	0,081	5,40
5	1,32	2,7	0,081	5,40
6	1,23	2,4	0,057	4,30
7	1,27	2,5	0,063	4,50
8	1,21	2,3	0,047	3,70
9	1,18	2,2	0,041	3,40
10	1,14	2,0	0,032	2,90
11	1,10	1,9	0,033	3,10
12	1,08	1,8	0,034	3,40
13	1,03	1,7	0,029	3,10
14	0,97	1,5	0,032	3,80

Таблица А.2 – Характеристики вертикальной качки при испытаниях модели с модулем № 1 на встречном волнении

NN	Период колебаний Т, с	Амплитуда вертикальных			Круговая частота волнения ω , рад/с	$2\zeta / h_b$
		ускорений		колебаний ζ , м		
		ζ'' , g	ζ'' , м/с ²			
1	1,63	0,045	0,45	0,030	3,86	0,64
2	1,34	0,063	0,62	0,028	4,68	0,54
3	1,44	0,054	0,53	0,028	4,37	0,60
4	1,31	0,040	0,40	0,017	4,81	0,42
5	1,32	0,039	0,38	0,017	4,78	0,41
6	1,23	0,030	0,30	0,011	5,12	0,40
7	1,27	0,037	0,37	0,015	4,93	0,48
8	1,21	0,017	0,16	0,006	5,18	0,26
9	1,18	0,025	0,25	0,009	5,34	0,42
10	1,14	0,010	0,10	0,003	5,53	0,20
11	1,10	0,005	0,05	0,001	5,72	0,09
12	1,08	0,010	0,10	0,003	5,81	0,17
13	1,03	0,009	0,09	0,002	6,09	0,16
14	0,97	0,012	0,12	0,003	6,50	0,17

Таблица А.3 – Характеристики килевой качки при испытаниях модели с модулем № 1 на встречном волнении

NN	Период колебаний Т, с	Амплитуда килевых		Круговая частота волнения ω , рад/с	ψ / α_b
		скоростей ψ' , °/с	колебаний ψ		
1	1,63	13,00	3,36	3,86	0,82
2	1,34	18,03	3,85	4,68	0,57
3	1,44	15,55	3,56	4,37	0,67
4	1,31	14,50	3,02	4,81	0,56
5	1,32	16,75	3,51	4,78	0,65
6	1,23	8,02	1,57	5,12	0,36
7	1,27	10,78	2,18	4,93	0,49
8	1,21	5,68	1,10	5,18	0,30
9	1,18	8,60	1,61	5,34	0,47
10	1,14	5,50	1,00	5,53	0,34
11	1,10	4,37	0,76	5,72	0,25
12	1,08	4,21	0,73	5,81	0,21
13	1,03	3,97	0,65	6,09	0,21
14	0,97	3,38	0,52	6,50	0,14

А.1.2 Модель с модулем № 2

Модуль № 2 представляет из себя шахту круглого сечения с внутренним диаметром $d_{ш} = 0,044$ м и относительным диаметром $d_{ш} / B = 15$ %.

По результатам анализа данных были получены характеристики волнения, на котором проводились испытания, представленные в таблице А.4, характеристики вертикальной качки, представленные в таблице А.5, и характеристики килевой качки, представленные в таблице А.6, а также характеристики колебаний воды в шахте, представленные в таблице А.7.

Таблица А.4 – Характеристики волнения при испытаниях модели с модулем № 2 на встречном волнении

NN	Период T_B , м	Длина λ , м	Высота h_B , м	Угол волнового склона α_B
1	1,60	4,0	0,099	4,40
2	1,44	3,2	0,094	5,30
3	1,49	3,5	0,086	4,40
4	1,34	2,8	0,079	5,10
5	1,37	2,9	0,076	4,70
6	1,32	2,7	0,058	3,80
7	1,21	2,3	0,048	3,70
8	1,16	2,1	0,042	3,60
9	1,14	2,0	0,043	3,90
10	1,08	1,8	0,034	3,40
11	0,95	1,4	0,033	4,20
12	0,97	1,5	0,032	3,80

Таблица А.5 – Характеристики вертикальной качки при испытаниях модели с модулем № 2 на встречном волнении

NN	Период колебаний Т, с	Амплитуда вертикальных			Круговая частота волнения ω , рад/с	$2\zeta / h_b$
		ускорений		колебаний ζ , м		
		ζ'' , g	ζ'' , м/с ²			
1	1,60	0,047	0,46	0,030	3,93	0,61
2	1,44	0,055	0,54	0,029	4,37	0,61
3	1,49	0,047	0,46	0,026	4,21	0,60
4	1,34	0,048	0,47	0,021	4,68	0,54
5	1,37	0,042	0,42	0,020	4,59	0,52
6	1,32	0,029	0,29	0,013	4,78	0,44
7	1,21	0,026	0,25	0,009	5,18	0,39
8	1,16	0,020	0,20	0,007	5,40	0,32
9	1,14	0,015	0,15	0,005	5,50	0,23
10	1,08	0,010	0,10	0,003	5,81	0,17
11	0,95	0,018	0,18	0,004	6,60	0,25
12	0,97	0,011	0,10	0,002	6,47	0,15

Таблица А.6 – Характеристики килевой качки при испытаниях модели с модулем № 2 на встречном волнении

NN	Период колебаний Т, с	Амплитуда килевых		Круговая частота волнения ω , рад/с	ψ / α_b
		скоростей ψ' , °/с	колебаний ψ		
1	1,60	13,74	3,50	3,93	0,79
2	1,44	14,59	3,34	4,37	0,63
3	1,49	12,70	3,02	4,21	0,69
4	1,34	13,03	2,78	4,68	0,55
5	1,37	13,86	3,02	4,59	0,64
6	1,32	10,40	2,18	4,78	0,57
7	1,21	7,91	1,53	5,18	0,41
8	1,16	7,84	1,45	5,40	0,40
9	1,14	7,71	1,40	5,50	0,36
10	1,08	4,06	0,70	5,81	0,21
11	0,95	2,90	0,44	6,60	0,10
12	0,97	3,66	0,57	6,47	0,15

Таблица А.7 – Характеристики колебаний воды в шахте при испытаниях модели с модулем № 2 на встречном волнении

NN	Круговая частота волнения ω , рад/с	Амплитуда колебаний воды в шахте h , м	$2h / h_B$
1	3,93	0,018	0,35
2	4,37	0,018	0,37
3	4,21	0,016	0,38
4	4,68	0,015	0,38
5	4,59	0,013	0,33
6	4,78	0,013	0,43
7	5,18	0,010	0,42
8	5,40	0,010	0,47
9	5,50	0,011	0,52
10	5,81	0,009	0,51
11	6,60	0,010	0,61
12	6,47	0,010	0,63

А.1.3 Модель с модулем № 3

Модуль № 3 представляет из себя шахту круглого сечения с внутренним диаметром $d_{ш} = 0,074$ м и относительным диаметром $d_{ш} / B = 25$ %.

По результатам анализа данных были получены характеристики волнения, на котором проводились испытания, представленные в таблице А.8, характеристики вертикальной качки, представленные в таблице А.9, и характеристики килевой качки, представленные в таблице А.10, а также характеристики колебаний воды в шахте, представленные в таблице А.11.

Таблица А.8 – Характеристики волнения при испытаниях модели с модулем № 3 на встречном волнении

NN	Период T_B , м	Длина λ , м	Высота h_B , м	Угол волнового склона α_B
1	1,57	3,9	0,100	4,60
2	1,68	4,4	0,085	3,50
3	1,64	4,2	0,091	3,90
4	1,46	3,3	0,090	4,90
5	1,52	3,6	0,083	4,10
6	1,36	2,9	0,076	4,70
7	1,39	3,0	0,074	4,40
8	1,29	2,6	0,060	4,20
9	1,22	2,3	0,048	3,70
10	1,16	2,1	0,042	3,60
11	1,08	1,8	0,034	3,40
12	0,98	1,5	0,032	3,80

Таблица А.9 – Характеристики вертикальной качки при испытаниях модели с модулем № 3 на встречном волнении

NN	Период колебаний T , с	Амплитуда вертикальных ускорений			Круговая частота волнения ω , рад/с	$2\zeta / h_B$
		ζ'' , g	ζ'' , м/с ²	колебаний ζ , м		
1	1,57	0,057	0,56	0,035	3,99	0,71
2	1,68	0,042	0,42	0,030	3,74	0,7
3	1,64	0,051	0,50	0,034	3,83	0,75
4	1,46	0,056	0,55	0,029	4,30	0,65
5	1,52	0,050	0,49	0,028	4,15	0,69
6	1,36	0,048	0,47	0,022	4,62	0,58
7	1,39	0,046	0,45	0,022	4,52	0,6
8	1,29	0,035	0,34	0,015	4,87	0,48
9	1,22	0,021	0,20	0,008	5,15	0,32
10	1,16	0,019	0,18	0,006	5,43	0,3
11	1,08	0,009	0,09	0,003	5,81	0,15
12	0,98	0,009	0,09	0,002	6,44	0,13

Таблица А.10 – Характеристики килевой качки при испытаниях модели с модулем № 3 на встречном волнении

NN	Период колебаний T, с	Амплитуда килевых		Круговая частота волнения ω , рад/с	ψ / α_B
		скоростей ψ' , %/с	колебаний ψ		
1	1,57	12,73	3,19	3,99	0,69
2	1,68	11,29	3,02	3,74	0,86
3	1,64	9,51	2,48	3,83	0,64
4	1,46	12,44	2,89	4,30	0,59
5	1,52	12,83	3,09	4,15	0,75
6	1,36	12,91	2,80	4,62	0,59
7	1,39	11,87	2,62	4,52	0,60
8	1,29	10,21	2,10	4,87	0,50
9	1,22	6,97	1,35	5,15	0,37
10	1,16	7,10	1,31	5,43	0,36
11	1,09	4,00	0,69	5,81	0,20
12	0,98	3,62	0,56	6,44	0,15

Таблица А.11 – Характеристики колебаний воды в шахте при испытаниях модели с модулем № 3 на встречном волнении

NN	Круговая частота волнения ω , рад/с	Амплитуда колебаний воды в шахте h, м	$2h / h_B$
1	3,99	0,013	0,25
2	3,74	0,010	0,24
3	3,83	0,017	0,36
4	4,30	0,015	0,33
5	4,15	-	-
6	4,62	0,015	0,39
7	4,52	0,014	0,37
8	4,87	0,013	0,42
9	5,15	0,009	0,37
10	5,43	0,010	0,47
11	5,81	0,009	0,51
12	6,44	0,013	0,78

A.2 Результаты испытаний бортовой качки на тихой воде

По результатам записей составлены таблицы для определения среднего периода собственных колебаний и безразмерного коэффициента демпфирования.

В таблицах А.12 – А.16 представлены результаты анализа осциллограмм затухающих колебаний модели с модулем № 1.

В таблицах А.17 – А.21 представлены результаты анализа осциллограмм затухающих колебаний модели с модулем № 2.

В таблицах А.21 – А.24 представлены результаты анализа осциллограмм затухающих колебаний модели с модулем № 3.

Таблица А.12 – Анализ первой осциллограммы затухающих угловых скоростей бортовых колебаний модели с модулем № 1

Время t, c	Амплитуда экстремума угловой скорости $\dot{\theta},$ $^{\circ}/c$	Период между двумя экстремумами, T_0, c	Среднее значение амплитуды угловой скорости $\dot{\theta}_{cp}, ^{\circ}/c$	Среднее значение амплитуды угловых колебаний θ_{cp}	Безразмерный коэффициент демпфирования k
0,20	78,07				
1,14	-67,68				
2,14	60,59	1,94	69,33	22,13	0,040
3,07	-56,95	1,93	62,32	19,89	0,027
4,07	52,49	1,93	56,54	18,05	0,023
5,04	-50,23	1,97	53,59	17,11	0,020
6,04	46,53	1,97	49,51	15,81	0,019
7,03	-45,04	1,99	47,63	15,21	0,017
8,03	41,97	1,99	44,25	14,13	0,016
9,01	-40,59	1,98	42,81	13,67	0,017
10,03	37,88	2,00	39,92	12,74	0,016
11,02	-36,73	2,01	38,66	12,34	0,016
12,04	34,66	2,01	36,27	11,58	0,014
13,04	-33,70	2,02	35,22	11,24	0,014
14,06	31,59	2,02	33,12	10,57	0,015
15,05	-30,98	2,01	32,34	10,32	0,013
16,08	28,82	2,02	30,20	9,64	0,015
17,07	-28,33	2,02	29,65	9,47	0,014
18,10	26,37	2,02	27,60	8,81	0,014
19,10	-25,70	2,03	27,01	8,62	0,015
20,11	23,83	2,01	25,10	8,01	0,016
21,13	-23,74	2,03	24,72	7,89	0,013
22,16	22,05	2,05	22,94	7,32	0,012
23,14	-21,82	2,01	22,78	7,27	0,013
24,18	20,29	2,02	21,17	6,76	0,013
25,20	-20,07	2,05	20,95	6,69	0,013
26,21	18,49	2,03	19,39	6,19	0,015
27,21	-18,74	2,02	19,41	6,20	0,011
28,25	17,42	2,04	17,96	5,73	0,010
29,22	-17,89	2,01	18,32	5,85	0,007
Средний период T_0		2,00			

Таблица А.13 – Анализ второй осциллограммы затухающих угловых скоростей бортовых колебаний модели с модулем № 1

Время t, c	Амплитуда экстремума угловой скорости $\dot{\theta},$ °/с	Период между двумя экстремумами, T_0, c	Среднее значение амплитуды угловой скорости $\dot{\theta}_{cp}, °/с$	Среднее значение амплитуды угловых колебаний θ_{cp}	Безразмерный коэффициент демпфирования k
0,34	71,58				
1,28	-63,59				
2,28	56,92	1,93	64,25	20,57	0,037
3,25	-54,52	1,96	59,05	18,90	0,025
4,23	50,44	1,96	53,68	17,18	0,019
5,22	-48,47	1,97	51,49	16,48	0,019
6,20	45,15	1,97	47,79	15,30	0,018
7,21	-43,88	1,99	46,17	14,78	0,016
8,20	40,50	2,00	42,83	13,71	0,017
9,19	-39,43	1,98	41,66	13,33	0,017
10,20	36,62	2,00	38,56	12,34	0,016
11,21	-36,15	2,02	37,79	12,10	0,014
12,21	33,49	2,00	35,06	11,22	0,014
13,22	-32,94	2,02	34,55	11,06	0,015
14,23	30,60	2,02	32,05	10,26	0,014
15,25	-30,08	2,02	31,51	10,09	0,014
16,26	27,98	2,03	29,29	9,38	0,014
17,27	-27,82	2,02	28,95	9,27	0,012
18,29	25,75	2,03	26,86	8,60	0,013
19,29	-25,70	2,02	26,76	8,57	0,013
20,32	23,83	2,03	24,79	7,93	0,012
21,36	-23,89	2,07	24,80	7,94	0,012
22,33	22,07	2,02	22,95	7,35	0,012
23,35	-22,12	1,99	23,00	7,36	0,012
24,40	20,23	2,06	21,15	6,77	0,014
25,38	-20,43	2,03	21,28	6,81	0,013
26,41	18,76	2,01	19,49	6,24	0,012
27,41	-18,96	2,03	19,70	6,31	0,012
28,45	17,40	2,04	18,08	5,79	0,012
29,46	-17,83	2,05	18,40	5,89	0,010
Средний период T_0		2,01			

Таблица А.14 – Анализ третьей осциллограммы затухающих угловых скоростей бортовых колебаний модели с модулем № 1

Время t, c	Амплитуда экстремума угловой скорости $\dot{\theta}$, °/с	Период между двумя экстремумами, T_0, c	Среднее значение амплитуды угловой скорости $\dot{\theta}_{cp}$, °/с	Среднее значение амплитуды угловых колебаний θ_{cp}	Безразмерный коэффициент демпфирования k
0,18	79,01				
1,16	-69,66				
2,21	61,10	2,02	70,06	22,43	0,041
3,14	-58,35	1,98	64,00	20,50	0,028
4,14	52,30	1,93	56,70	18,16	0,025
5,11	-51,20	1,97	54,77	17,54	0,021
6,07	47,95	1,93	50,12	16,05	0,014
7,10	-45,26	1,99	48,23	15,44	0,020
8,07	42,52	1,99	45,23	14,48	0,019
9,10	-40,60	2,00	42,93	13,75	0,017
10,05	37,66	1,98	40,09	12,84	0,019
11,10	-36,93	2,00	38,76	12,41	0,015
12,08	34,40	2,03	36,03	11,54	0,014
13,11	-33,50	2,01	35,21	11,28	0,016
14,12	31,06	2,04	32,73	10,48	0,016
15,12	-30,43	2,01	31,97	10,24	0,015
16,11	28,42	1,99	29,74	9,52	0,014
17,16	-28,16	2,03	29,30	9,38	0,012
18,10	26,27	2,00	27,34	8,75	0,013
19,09	-25,80	1,93	26,98	8,64	0,014
20,13	24,33	2,02	25,30	8,10	0,012
21,20	-23,76	2,11	24,78	7,93	0,013
22,22	22,00	2,09	23,17	7,42	0,016
23,23	-22,18	2,03	22,97	7,35	0,011
24,25	20,57	2,03	21,29	6,82	0,011
25,27	-20,49	2,04	21,34	6,83	0,013
26,28	19,02	2,03	19,79	6,34	0,013
27,29	-19,11	2,02	19,80	6,34	0,011
28,32	17,30	2,04	18,16	5,81	0,015
29,32	-17,82	2,03	18,47	5,91	0,011
Средний период T_0		2,01			

Таблица А.15 – Анализ четвертой осциллограммы затухающих угловых скоростей бортовых колебаний модели с модулем № 1

Время t, c	Амплитуда экстремума угловой скорости $\dot{\theta}$, °/с	Период между двумя экстремумами, T_0, c	Среднее значение амплитуды угловой скорости $\dot{\theta}_{cp}$, °/с	Среднее значение амплитуды угловых колебаний θ_{cp}	Безразмерный коэффициент демпфирования k
0,46	85,64				
1,36	-72,35				
2,35	63,02	1,89	74,33	23,57	0,049
3,27	-60,00	1,91	66,17	20,98	0,030
4,31	54,62	1,96	58,82	18,65	0,023
5,24	-52,58	1,97	56,29	17,85	0,021
6,29	46,89	1,98	50,75	16,09	0,024
7,19	-46,25	1,95	49,41	15,67	0,020
8,23	41,37	1,94	44,13	13,99	0,020
9,18	-41,11	1,99	43,68	13,85	0,019
10,22	37,12	1,99	39,25	12,44	0,017
11,20	-37,08	2,02	39,09	12,39	0,016
12,23	33,89	2,00	35,51	11,26	0,014
13,19	-33,83	1,99	35,45	11,24	0,015
14,21	30,98	1,99	32,43	10,28	0,014
15,19	-31,15	2,00	32,49	10,30	0,013
16,26	28,38	2,05	29,68	9,41	0,014
17,21	-28,56	2,02	29,85	9,46	0,014
18,14	24,66	1,88	26,52	8,41	0,022
19,13	-25,13	1,92	26,84	8,51	0,020
20,17	22,51	2,03	23,58	7,48	0,014
21,19	-23,36	2,06	24,25	7,69	0,012
22,18	20,66	2,01	21,59	6,84	0,014
23,20	-21,14	2,01	22,25	7,05	0,016
24,24	18,92	2,06	19,79	6,27	0,014
25,22	-20,00	2,02	20,57	6,52	0,009
26,26	17,49	2,03	18,21	5,77	0,012
27,24	-18,13	2,02	19,07	6,04	0,016
28,29	16,14	2,02	16,82	5,33	0,013
29,28	-17,10	2,04	17,61	5,58	0,009
Средний период T_0		1,99			

Таблица А.16 – Анализ пятой осциллограммы затухающих угловых скоростей бортовых колебаний модели с модулем № 1

Время t, c	Амплитуда экстремума угловой скорости $\dot{\theta},$ $^{\circ}/c$	Период между двумя экстремумами, T_0, c	Среднее значение амплитуды угловой скорости $\dot{\theta}_{cp}, ^{\circ}/c$	Среднее значение амплитуды угловых колебаний θ_{cp}	Безразмерный коэффициент демпфирования k
0,83	-64,86				
1,81	59,11				
2,78	-53,68	1,95	59,27	19,01	0,030
3,79	51,74	1,98	55,43	17,77	0,021
4,73	-46,94	1,95	50,31	16,13	0,021
5,78	45,09	1,99	48,42	15,53	0,022
6,74	-41,53	2,01	44,24	14,19	0,019
7,77	39,92	1,99	42,51	13,63	0,019
8,75	-36,86	2,02	39,20	12,57	0,019
9,80	36,10	2,02	38,01	12,19	0,016
10,76	-33,47	2,00	35,17	11,28	0,015
11,79	32,36	1,99	34,23	10,98	0,017
12,73	-30,58	1,98	32,03	10,27	0,014
13,80	29,58	2,01	30,97	9,93	0,014
14,75	-27,88	2,02	29,23	9,37	0,015
15,81	26,85	2,02	28,22	9,05	0,015
16,83	-25,38	2,08	26,63	8,54	0,015
17,83	24,83	2,01	25,84	8,29	0,012
18,86	-23,23	2,04	24,30	7,79	0,014
19,85	22,55	2,02	23,69	7,60	0,015
20,87	-21,29	2,00	22,26	7,14	0,014
21,93	20,65	2,08	21,60	6,93	0,014
22,86	-19,75	1,99	20,52	6,58	0,012
23,91	19,53	1,98	20,09	6,44	0,009
24,89	-18,35	2,03	19,05	6,11	0,012
25,94	18,20	2,03	18,86	6,05	0,011
26,93	-17,06	2,04	17,71	5,68	0,012
28,02	16,89	2,08	17,54	5,63	0,012
28,99	-15,82	2,06	16,44	5,27	0,012
Средний период T_0		2,01			

Таблица А.17 – Анализ первой осциллограммы затухающих угловых скоростей бортовых колебаний модели с модулем № 2

Время t, c	Амплитуда экстремума угловой скорости $\dot{\theta}$, °/с	Период между двумя экстремумами, T_0, c	Среднее значение амплитуды угловой скорости $\dot{\theta}_{cp}$, °/с	Среднее значение амплитуды угловых колебаний θ_{cp}	Безразмерный коэффициент демпфирования k
0,48	52,34				
1,42	-48,09				
2,40	43,53	1,93	47,94	14,98	0,029
3,38	-42,63	1,95	45,36	14,18	0,019
4,39	39,40	1,99	41,47	12,96	0,016
5,35	-38,67	1,97	40,65	12,70	0,016
6,33	35,52	1,94	37,46	11,71	0,017
7,31	-35,27	1,96	36,97	11,55	0,015
8,30	32,38	1,98	33,95	10,61	0,015
9,29	-32,23	1,98	33,75	10,55	0,014
10,29	29,68	1,98	31,03	9,70	0,014
11,24	-29,75	1,95	30,99	9,68	0,013
Средний период T_0		1,96			

Таблица А.18 – Анализ второй осциллограммы затухающих угловых скоростей бортовых колебаний модели с модулем № 2

Время t, c	Амплитуда экстремума угловой скорости $\dot{\theta},$ $^{\circ}/c$	Период между двумя экстремумами, T_0, c	Среднее значение амплитуды угловой скорости $\dot{\theta}_{cp}, ^{\circ}/c$	Среднее значение амплитуды угловых колебаний θ_{cp}	Безразмерный коэффициент демпфирования k
0,43	60,88				
1,38	-54,39				
2,36	49,25	1,93	55,07	17,36	0,034
3,33	-47,53	1,95	50,96	16,07	0,021
4,32	43,99	1,95	46,62	14,70	0,018
5,29	-42,81	1,96	45,17	14,24	0,017
6,29	39,54	1,97	41,76	13,17	0,017
7,26	-38,61	1,97	40,71	12,84	0,016
8,25	35,68	1,96	37,61	11,86	0,016
9,22	-35,25	1,96	36,93	11,64	0,014
10,23	32,65	1,98	34,16	10,77	0,014
11,22	-32,36	2,00	33,80	10,66	0,014
12,21	29,98	1,98	31,31	9,87	0,014
13,20	-29,65	1,98	31,00	9,78	0,014
14,19	27,49	1,98	28,73	9,06	0,014
15,20	-27,33	1,99	28,49	8,98	0,013
16,18	25,51	1,99	26,50	8,36	0,012
17,18	-25,41	1,98	26,37	8,32	0,012
18,16	23,55	1,98	24,53	7,73	0,013
19,19	-23,75	2,02	24,58	7,75	0,011
20,20	21,81	2,04	22,68	7,15	0,012
21,16	-21,93	1,97	22,84	7,20	0,013
22,16	20,13	1,96	20,97	6,61	0,013
23,13	-20,49	1,97	21,21	6,69	0,011
24,14	18,69	1,99	19,41	6,12	0,012
25,14	-19,08	2,01	19,79	6,24	0,011
26,15	17,27	2,00	17,98	5,67	0,013
27,06	-17,25	1,92	18,16	5,73	0,016
28,14	16,15	1,99	16,71	5,27	0,011
29,12	-16,61	2,05	16,93	5,34	0,006
Средний период T_0		1,98			

Таблица А.19 – Анализ третьей осциллограммы затухающих угловых скоростей бортовых колебаний модели с модулем № 2

Время t, c	Амплитуда экстремума угловой скорости $\dot{\theta},$ $^{\circ}/c$	Период между двумя экстремумами, T_0, c	Среднее значение амплитуды угловой скорости $\dot{\theta}_{cp}, ^{\circ}/c$	Среднее значение амплитуды угловых колебаний θ_{cp}	Безразмерный коэффициент демпфирования k
0,39	46,87				
1,36	-43,38				
2,34	40,01	1,95	43,44	13,75	0,025
3,35	-38,57	1,99	40,97	12,97	0,019
4,32	36,28	1,98	38,15	12,07	0,016
5,31	-35,46	1,96	37,02	11,71	0,013
6,30	33,12	1,98	34,70	10,98	0,015
7,28	-32,24	1,97	33,85	10,71	0,015
8,28	30,07	1,98	31,59	10,00	0,015
9,30	-29,81	2,02	31,03	9,82	0,012
10,30	27,68	2,02	28,87	9,14	0,013
11,24	-27,51	1,93	28,66	9,07	0,013
12,27	25,35	1,97	26,52	8,39	0,014
13,26	-25,46	2,02	26,49	8,38	0,012
14,24	23,42	1,97	24,39	7,72	0,013
15,27	-23,06	2,01	24,26	7,68	0,016
16,27	21,94	2,04	22,68	7,18	0,010
17,23	-21,71	1,96	22,38	7,08	0,010
18,23	20,55	1,95	21,24	6,72	0,010
19,21	-20,59	1,98	21,15	6,69	0,008
20,22	19,19	2,00	19,87	6,29	0,011
21,21	-19,05	2,00	19,82	6,27	0,012
22,21	18,05	1,99	18,62	5,89	0,010
23,21	-17,86	2,00	18,46	5,84	0,010
24,22	16,36	2,01	17,21	5,44	0,016
25,20	-16,65	1,99	17,25	5,46	0,011
26,19	15,33	1,98	15,85	5,01	0,010
27,24	-15,29	2,04	15,97	5,05	0,014
28,20	14,31	2,01	14,82	4,69	0,011
29,19	-14,58	1,95	14,94	4,73	0,008
Средний период T_0		1,99			

Таблица А.20 – Анализ четвертой осциллограммы затухающих угловых скоростей бортовых колебаний модели с модулем № 2

Время t, c	Амплитуда экстремума угловой скорости $\dot{\theta}$, °/с	Период между двумя экстремумами, T_0, c	Среднее значение амплитуды угловой скорости $\dot{\theta}_{cp}$, °/с	Среднее значение амплитуды угловых колебаний θ_{cp}	Безразмерный коэффициент демпфирования k
0,47	72,72				
1,39	-64,24				
2,37	57,09	1,90	64,91	20,41	0,039
3,33	-54,80	1,94	59,52	18,71	0,025
4,30	50,33	1,94	53,71	16,89	0,020
5,27	-49,22	1,94	52,01	16,35	0,017
6,25	44,86	1,95	47,60	14,97	0,018
7,22	-43,82	1,95	46,52	14,63	0,019
8,21	40,08	1,96	42,47	13,35	0,018
9,19	-39,61	1,97	41,71	13,12	0,016
10,19	36,45	1,97	38,27	12,03	0,015
11,16	-36,10	1,98	37,85	11,90	0,015
12,14	33,08	1,96	34,77	10,93	0,015
13,14	-32,91	1,98	34,51	10,85	0,015
14,14	30,12	2,00	31,60	9,94	0,015
15,13	-30,22	1,98	31,57	9,93	0,014
16,11	27,80	1,97	28,96	9,11	0,013
17,11	-28,01	1,98	29,11	9,15	0,012
18,11	25,55	2,00	26,68	8,39	0,013
19,11	-26,13	2,00	27,07	8,51	0,011
20,11	23,74	2,00	24,65	7,75	0,012
21,11	-24,16	2,00	25,15	7,91	0,012
22,11	21,97	1,99	22,86	7,19	0,012
23,10	-22,37	1,99	23,27	7,32	0,012
24,09	20,32	1,99	21,15	6,65	0,012
25,08	-20,90	1,98	21,64	6,80	0,011
26,07	18,67	1,98	19,49	6,13	0,013
27,08	-19,34	2,00	20,12	6,33	0,012
28,07	17,22	2,00	17,95	5,64	0,013
29,08	-18,17	2,00	18,75	5,90	0,010
Средний период T_0		1,97			

Таблица А.21 – Анализ пятой осциллограммы затухающих угловых скоростей бортовых колебаний модели с модулем № 2

Время t, c	Амплитуда экстремума угловой скорости $\dot{\theta}$, °/с	Период между двумя экстремумами, T_0, c	Среднее значение амплитуды угловой скорости $\dot{\theta}_{cp}, °/c$	Среднее значение амплитуды угловых колебаний θ_{cp}	Безразмерный коэффициент демпфирования k
0,46	72,88				
1,38	-64,45				
2,34	56,87	1,88	64,87	20,38	0,040
3,31	-54,31	1,93	59,38	18,66	0,027
4,29	49,84	1,94	53,36	16,76	0,021
5,26	-48,62	1,94	51,47	16,17	0,018
6,25	44,60	1,97	47,22	14,83	0,018
7,21	-43,95	1,95	46,29	14,54	0,016
8,20	40,29	1,95	42,44	13,33	0,016
9,18	-39,44	1,97	41,70	13,10	0,017
10,17	36,11	1,97	38,20	12,00	0,017
11,15	-35,88	1,97	37,66	11,83	0,015
12,13	33,37	1,97	34,74	10,91	0,013
13,13	-33,11	1,98	34,50	10,84	0,013
14,12	30,31	1,99	31,84	10,00	0,015
15,10	-30,50	1,97	31,81	9,99	0,013
16,10	27,81	1,98	29,06	9,13	0,014
17,08	-28,05	1,99	29,28	9,20	0,013
18,09	25,45	1,99	26,63	8,37	0,014
19,08	-25,83	1,99	26,94	8,46	0,013
20,09	23,51	2,00	24,48	7,69	0,013
21,12	-24,02	2,04	24,92	7,83	0,012
22,06	21,65	1,98	22,58	7,09	0,013
23,06	-22,37	1,94	23,20	7,29	0,011
24,06	20,08	2,00	20,86	6,55	0,012
25,05	-20,73	1,98	21,55	6,77	0,012
26,06	18,68	2,00	19,38	6,09	0,011
27,05	-19,40	2,01	20,07	6,30	0,011
28,03	17,32	1,97	18,00	5,66	0,012
29,05	-18,17	1,99	18,78	5,90	0,010
Средний период T_0		1,97			

Таблица А.22 – Анализ первой осциллограммы затухающих угловых скоростей бортовых колебаний модели с модулем № 3

Время t, c	Амплитуда экстремума угловой скорости $\dot{\theta}$, °/с	Период между двумя экстремумами, T_0, c	Среднее значение амплитуды угловой скорости $\dot{\theta}_{cp}$, °/с	Среднее значение амплитуды угловых колебаний θ_{cp}	Безразмерный коэффициент демпфирования k
0,46	70,50				
1,36	-62,55				
2,29	55,04	1,83	62,77	19,11	0,039
3,23	-52,13	1,87	57,34	17,46	0,029
4,19	47,39	1,90	51,22	15,60	0,024
5,13	-45,82	1,90	48,97	14,91	0,021
6,08	41,79	1,89	44,59	13,58	0,020
7,04	-41,01	1,91	43,41	13,22	0,018
7,99	37,58	1,91	39,68	12,08	0,017
8,95	-37,01	1,91	39,01	11,88	0,016
9,91	33,73	1,91	35,65	10,86	0,017
10,85	-33,93	1,91	35,47	10,80	0,014
11,83	30,37	1,92	32,05	9,76	0,017
12,77	-30,25	1,92	32,09	9,77	0,018
13,74	27,55	1,92	28,96	8,82	0,015
14,73	-27,75	1,96	29,00	8,83	0,014
15,68	25,55	1,93	26,55	8,08	0,012
16,62	-25,35	1,89	26,55	8,08	0,014
17,59	22,93	1,92	24,24	7,38	0,017
18,54	-23,33	1,92	24,34	7,41	0,013
19,50	20,93	1,91	21,93	6,68	0,015
20,47	-21,34	1,93	22,33	6,80	0,014
21,44	19,03	1,94	19,98	6,08	0,015
22,39	-19,56	1,92	20,45	6,23	0,014
23,39	17,50	1,95	18,26	5,56	0,013
24,31	-18,00	1,92	18,78	5,72	0,013
25,28	15,95	1,89	16,72	5,09	0,015
26,24	-16,72	1,93	17,36	5,29	0,012
27,21	14,60	1,94	15,27	4,65	0,014
28,15	-15,41	1,91	16,06	4,89	0,013
29,12	13,60	1,91	14,10	4,29	0,011
Средний период T_0		1,91			

Таблица А.23 – Анализ второй осциллограммы затухающих угловых скоростей бортовых колебаний модели с модулем № 3

Время t, c	Амплитуда экстремума угловой скорости $\dot{\theta}$, °/с	Период между двумя экстремумами, T_0, c	Среднее значение амплитуды угловой скорости $\dot{\theta}_{cp}, °/c$	Среднее значение амплитуды угловых колебаний θ_{cp}	Безразмерный коэффициент демпфирования k
0,48	45,66				
1,42	-44,15				
2,39	41,61	1,90	43,64	13,34	0,015
3,33	-39,90	1,91	42,03	12,85	0,016
4,29	37,35	1,90	39,48	12,07	0,017
5,23	-36,07	1,90	37,99	11,61	0,016
6,23	33,90	1,94	35,62	10,89	0,015
7,16	-32,54	1,93	34,31	10,49	0,016
8,13	30,30	1,90	32,10	9,82	0,018
9,08	-29,73	1,91	31,13	9,52	0,014
10,05	27,83	1,92	29,06	8,89	0,014
10,98	-27,68	1,90	28,70	8,78	0,011
11,98	25,47	1,93	26,65	8,15	0,014
12,94	-25,06	1,96	26,37	8,06	0,016
13,90	23,06	1,92	24,26	7,42	0,016
14,86	-22,84	1,92	23,95	7,32	0,015
15,84	21,14	1,94	22,10	6,76	0,014
16,79	-21,12	1,93	21,98	6,72	0,012
Средний период T_0		1,92			

Таблица А.23 – Анализ четвертой осциллограммы затухающих угловых скоростей бортовых колебаний модели с модулем № 3

Время t, c	Амплитуда экстремума угловой скорости $\dot{\theta},$ $^{\circ}/c$	Период между двумя экстремумами, T_0, c	Среднее значение амплитуды угловой скорости $\dot{\theta}_{cp}, ^{\circ}/c$	Среднее значение амплитуды угловых колебаний θ_{cp}	Безразмерный коэффициент демпфирования k
0,38	72,53				
1,29	-62,34				
2,24	55,59	1,86	64,06	19,58	0,042
3,17	-52,02	1,88	57,18	17,47	0,029
4,12	47,73	1,88	51,66	15,79	0,024
5,06	-45,87	1,89	48,94	14,95	0,020
6,03	42,03	1,90	44,88	13,71	0,020
6,96	-40,64	1,91	43,25	13,22	0,019
7,93	37,51	1,90	39,77	12,15	0,018
8,89	-36,61	1,92	38,62	11,80	0,017
9,85	33,61	1,92	35,56	10,87	0,017
10,80	-33,19	1,92	34,90	10,66	0,016
11,76	30,37	1,91	31,99	9,78	0,016
12,72	-30,08	1,92	31,63	9,67	0,016
13,71	27,45	1,95	28,91	8,83	0,016
14,66	-27,03	1,94	28,55	8,73	0,017
15,62	24,65	1,91	26,05	7,96	0,017
16,60	-24,76	1,94	25,90	7,91	0,014
17,56	22,45	1,94	23,55	7,20	0,015
18,52	-23,18	1,92	23,97	7,32	0,010
19,48	20,91	1,92	21,68	6,63	0,011
20,45	-21,20	1,92	22,19	6,78	0,014
21,43	18,81	1,95	19,86	6,07	0,017
22,39	-20,24	1,95	20,72	6,33	0,007
23,35	18,13	1,92	18,47	5,64	0,006
24,31	-17,87	1,92	19,05	5,82	0,020
25,24	15,80	1,89	16,97	5,18	0,022
26,25	-16,77	1,93	17,32	5,29	0,010
27,20	14,47	1,96	15,13	4,62	0,014
28,17	-15,56	1,92	16,16	4,94	0,012
29,16	13,84	1,95	14,15	4,32	0,007
Средний период T_0		1,92			

Таблица А.24 – Анализ пятой осциллограммы затухающих угловых скоростей бортовых колебаний модели с модулем № 3

Время t, c	Амплитуда экстремума угловой скорости $\dot{\theta},$ $^{\circ}/c$	Период между двумя экстремумами, T_0, c	Среднее значение амплитуды угловой скорости $\dot{\theta}_{cp}, ^{\circ}/c$	Среднее значение амплитуды угловых колебаний θ_{cp}	Безразмерный коэффициент демпфирования k
0,46	81,03				
1,34	-70,82				
2,27	60,80	1,82	70,92	21,49	0,046
3,21	-57,54	1,87	64,18	19,45	0,033
4,16	51,39	1,89	56,10	17,00	0,027
5,09	-50,00	1,88	53,77	16,29	0,022
6,01	44,21	1,85	47,80	14,49	0,024
6,93	-40,02	1,84	45,01	13,64	0,035
7,89	36,59	1,88	40,40	12,24	0,030
8,85	-35,87	1,93	37,94	11,50	0,017
9,80	32,65	1,91	34,62	10,49	0,018
10,76	-32,32	1,91	34,10	10,33	0,017
11,72	29,32	1,92	30,99	9,39	0,017
12,70	-29,55	1,94	30,93	9,38	0,014
13,63	26,55	1,92	27,94	8,47	0,016
14,57	-25,59	1,87	27,57	8,35	0,023
15,52	23,29	1,88	24,92	7,55	0,021
16,48	-23,62	1,91	24,60	7,46	0,013
17,44	21,32	1,92	22,30	6,76	0,014
18,41	-22,00	1,94	22,81	6,91	0,011
19,38	19,56	1,95	20,44	6,19	0,014
20,33	-20,15	1,91	21,07	6,39	0,014
21,30	18,04	1,91	18,80	5,70	0,013
22,25	-18,86	1,92	19,50	5,91	0,011
23,22	16,68	1,92	17,36	5,26	0,012
24,19	-17,31	1,94	18,09	5,48	0,014
25,13	15,11	1,92	15,89	4,82	0,016
26,10	-15,71	1,91	16,51	5,00	0,015
27,06	13,70	1,93	14,40	4,37	0,016
28,03	-14,70	1,93	15,21	4,61	0,011
29,00	12,52	1,94	13,11	3,97	0,014
29,90	-13,60	1,86	14,15	4,29	0,012
Средний период T_0		1,90			

А.3 Результаты испытаний бортовой качки на лаговом волнении

А.3.1 Модель с модулем № 1

Модуль № 1 представляет из себя плоское днище без шахты.

По результатам анализа данных были получены характеристики волнения, на котором проводились испытания, представленные в таблице А.25, характеристики бортовой качки, представленные в таблице А.26, и характеристики вертикальной качки, представленные в таблице А.27.

Таблица А.25 – Характеристики волнения при испытаниях модели с модулем № 1 на лаговом волнении

NN	Период T_B , м	Длина λ , м	Высота h_B , м	Угол волнового склона α_B
1	0,94	1,4	0,033	4,20
2	1,03	1,6	0,037	4,20
3	1,11	1,9	0,041	3,90
4	1,24	2,4	0,058	4,30
5	1,33	2,8	0,079	5,10
6	1,47	3,4	0,089	4,70
7	1,64	4,2	0,091	3,90
8	1,80	5,1	0,091	3,20
9	1,74	4,7	0,104	4,00

Таблица А.26 – Характеристики бортовой качки при испытаниях модели с модулем № 1 на лаговом волнении

NN	Период колебаний Т, с	Амплитуда бортовых		Круговая частота волнения ω , рад/с	θ / α_B
		скоростей θ' , °/с	колебаний θ		
1	1,89	82,06	24,64	6,66	2,93
2	2,06	51,59	16,93	6,13	2,00
3	1,11	5,19	0,92	5,65	0,24
4	1,24	7,01	1,39	5,06	0,32
5	1,33	12,53	2,66	4,71	0,52
6	1,46	15,56	3,61	4,27	0,77
7	1,64	20,07	5,24	3,83	1,34
8	1,80	107,90	30,94	3,49	9,67
9	1,74	66,70	18,46	3,61	4,62

Таблица А.27 – Характеристики вертикальной качки при испытаниях модели с модулем № 1 на лаговом волнении

NN	Период колебаний Т, с	Амплитуда вертикальных			Круговая частота волнения ω , рад/с	$2\zeta / h_B$
		ускорений		колебаний ζ , м		
		ζ'' , g	ζ'' , м/с ²			
1	0,94	0,115	1,13	0,025	6,66	1,54
2	1,03	0,108	1,06	0,028	6,13	1,53
3	1,11	0,071	0,69	0,022	5,65	1,06
4	1,24	0,075	0,74	0,029	5,06	1,00
5	1,33	0,100	0,98	0,044	4,71	1,12
6	1,47	0,083	0,81	0,045	4,27	1,00
7	1,64	0,073	0,72	0,049	3,83	1,08
8	1,80	0,063	0,62	0,051	3,49	1,12
9	1,74	0,080	0,79	0,060	3,61	1,16

А.3.2 Модель с модулем № 2

Модуль № 2 представляет из себя шахту круглого сечения с внутренним диаметром $d_{ш} = 0,044$ м и относительным диаметром $d_{ш} / B = 15$ %.

По результатам анализа данных были получены характеристики волнения, на котором проводились испытания, представленные в таблице А.28, характеристики бортовой качки, представленные в таблице А.29,

характеристики вертикальной качки, представленные в таблице А.30, и характеристики колебаний воды в шахте, представленные в таблице А.31.

Таблица А.28 – Характеристики волнения при испытаниях модели с модулем № 2 на лаговом волнении

NN	Период T_B , м	Длина λ , м	Высота h_B , м	Угол волнового склона α_B
1	0,96	1,4	0,033	4,20
2	1,04	1,7	0,035	3,70
3	1,11	1,9	0,041	3,90
4	1,23	2,4	0,057	4,30
5	1,31	2,7	0,081	5,40
6	1,34	2,8	0,079	5,10
7	1,54	3,7	0,080	3,90
8	1,72	4,6	0,079	3,10
9	1,65	4,3	0,089	3,70
10	1,82	5,2	0,088	3,00
11	1,77	4,9	0,098	3,60

Таблица А.29 – Характеристики бортовой качки при испытаниях модели с модулем № 2 на лаговом волнении

NN	Период колебаний T , с	Амплитуда бортовых		Круговая частота волнения ω , рад/с	θ / α_B
		скоростей θ' , °/с	колебаний θ		
1	1,92	73,99	22,65	6,57	2,68
2	2,08	30,50	10,11	6,03	1,37
3	1,11	6,62	1,17	5,65	0,30
4	1,23	7,05	1,38	5,09	0,32
5	1,31	14,08	2,93	4,81	0,54
6	1,34	14,14	3,02	4,68	0,59
7	1,53	19,85	4,82	4,08	1,25
8	1,72	33,24	9,12	3,64	2,94
9	1,65	18,29	4,81	3,80	1,30
10	1,82	85,95	24,87	3,46	8,29
11	1,77	90,15	25,40	3,55	7,05

Таблица А.30 – Характеристики вертикальной качки при испытаниях модели с модулем № 2 на лаговом волнении

NN	Период колебаний T, с	Амплитуда вертикальных			Круговая частота волнения ω , рад/с	$2\zeta / h_b$
		ускорений		колебаний ζ , м		
		ζ'' , g	ζ'' , м/с ²			
1	0,96	0,111	1,09	0,025	6,57	1,53
2	1,04	0,091	0,89	0,025	6,03	1,40
3	1,11	0,084	0,83	0,026	5,65	1,26
4	1,23	0,073	0,72	0,028	5,09	0,98
5	1,31	0,099	0,97	0,042	4,81	1,03
6	1,34	0,094	0,92	0,042	4,68	1,07
7	1,54	0,072	0,70	0,042	4,08	1,05
8	1,72	0,059	0,58	0,044	3,64	1,11
9	1,65	0,067	0,65	0,045	3,80	1,02
10	1,82	0,062	0,61	0,051	3,46	1,16
11	1,77	0,091	0,89	0,071	3,55	1,46

Таблица А.31 – Характеристики колебаний воды в шахте при испытаниях модели с модулем № 2 на лаговом волнении

NN	Круговая частота волнения ω , рад/с	Амплитуда колебаний воды в шахте $h_{ш}$, м	$2h / h_b$
1	6,57	0,015	0,91
2	6,03	0,008	0,43
3	5,65	0,004	0,20
4	5,09	0,003	0,09
5	4,81	0,005	0,12
6	4,68	0,005	0,13
7	4,08	-	-
8	3,64	0,008	0,19
9	3,80	0,008	0,17
10	3,46	0,009	0,19
11	3,55	0,013	0,26

А.3.3 Модель с модулем № 3

Модуль № 3 представляет из себя шахту круглого сечения с внутренним диаметром $d_{ш} = 0,074$ м и относительным диаметром $d_{ш} / B = 25$ %.

По результатам анализа данных были получены характеристики волнения, на котором проводились испытания, представленные в

таблице А.32, характеристики бортовой качки, представленные в таблице А.33, характеристики вертикальной качки, представленные в таблице А.34, и характеристики колебаний воды в шахте, представленные в таблице А.35.

Таблица А.32 – Характеристики волнения при испытаниях модели с модулем № 3 на лаговом волнении

NN	Период T_B , м	Длина λ , м	Высота h_B , м	Угол волнового склона α_B
3	1,68	4,4	0,085	3,50
4	1,63	4,1	0,094	4,10
5	1,27	2,5	0,063	4,50
6	1,18	2,2	0,041	3,40
7	0,98	1,5	0,032	3,80
8	0,96	1,4	0,033	4,20
9	1,08	1,8	0,034	3,40
10	1,18	2,2	0,050	4,10
11	1,35	2,9	0,076	4,70
12	1,44	3,2	0,094	5,30
13	1,47	3,4	0,089	4,70
14	1,63	4,1	0,094	4,10
15	1,61	4,1	0,094	4,10
16	1,79	5,0	0,094	3,40
17	1,79	5,0	0,094	3,40
18	1,80	5,1	0,091	3,20

Таблица А.33 – Характеристики бортовой качки при испытаниях модели с модулем № 3 на лаговом волнении

NN	Период колебаний T, с	Амплитуда бортовых		Круговая частота волнения ω , рад/с	θ / α_B
		скоростей θ' , °/с	колебаний θ		
3	1,68	34,97	9,35	3,74	2,67
4	1,63	38,02	9,84	3,86	2,40
5	1,27	11,36	2,30	4,93	0,51
6	1,18	8,15	1,53	5,34	0,45
7	1,94	49,16	15,19	6,44	2,01
8	1,92	58,07	17,77	6,53	2,12
9	1,08	4,52	0,78	5,81	0,23
10	1,18	8,65	1,62	5,34	0,40
11	1,35	14,37	3,09	4,65	0,66
12	1,44	23,65	5,42	4,37	1,02
13	1,47	20,63	4,83	4,27	1,03
14	1,64	23,55	6,14	3,86	1,49
15	1,61	40,16	10,31	3,90	2,51
16	1,75	80,63	22,51	3,52	6,74
17	1,79	105,55	30,00	3,52	8,82
18	1,80	101,87	29,21	3,49	9,13

Таблица А.34 – Характеристики вертикальной качки при испытаниях модели с модулем № 3 на лаговом волнении

NN	Период колебаний T, с	Амплитуда вертикальных			Круговая частота волнения ω , рад/с	$2\zeta / h_b$
		ускорений		колебаний ζ , м		
		ζ'' , g	ζ'' , м/с ²			
1	1,68	0,057	0,56	0,040	3,74	0,94
2	1,63	0,070	0,68	0,046	3,86	0,98
3	1,27	0,081	0,79	0,033	4,93	1,04
4	1,18	0,066	0,65	0,023	5,34	1,10
5	0,98	0,095	0,93	0,022	6,44	1,40
6	0,96	0,096	0,94	0,022	6,53	1,33
7	1,08	0,063	0,61	0,018	5,81	1,07
8	1,18	0,082	0,81	0,028	5,34	1,13
9	1,35	0,099	0,97	0,045	4,65	1,17
10	1,44	0,094	0,92	0,048	4,37	1,03
11	1,47	0,084	0,83	0,045	4,27	1,02
12	1,63	0,065	0,64	0,043	3,86	0,92
13	1,61	0,066	0,65	0,043	3,90	0,91
14	1,79	0,074	0,73	0,059	3,52	1,25
15	1,79	0,077	0,76	0,061	3,52	1,30
16	1,80	0,069	0,67	0,055	3,49	1,21
17	1,68	0,057	0,56	0,040	3,74	0,94
18	1,63	0,070	0,68	0,046	3,86	0,98

Таблица А.35 – Характеристики колебаний воды в шахте при испытаниях модели с модулем № 3 на лаговом волнении

NN	Круговая частота волнения ω , рад/с	Амплитуда колебаний воды в шахте $h_{ш}$, м	$2h / h_B$
3	3,74	-	-
4	3,86	-	-
5	4,93	0,008	0,24
6	5,34	0,007	0,32
7	6,44	0,013	0,78
8	6,53	0,015	0,91
9	5,81	0,005	0,29
10	5,34	0,005	0,20
11	4,65	0,008	0,20
12	4,37	0,008	0,16
13	4,27	0,010	0,23
14	3,86	0,015	0,32
15	3,90	-	-
16	3,52	-	-
17	3,52	-	-
18	3,49	-	-