

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «КГТУ»)

На правах рукописи



Ражев Алексей Олегович

МЕХАНИКА СЕТНЫХ ОРУДИЙ ВНУТРЕННЕГО И ПРИБРЕЖНОГО
РЫБОЛОВСТВА

05.18.17 Промышленное рыболовство

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук,
доцент Недоступ А.А.

Калининград - 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ОБЗОР ИЗВЕСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОБЛЕМЕ РАСЧЕТА МЕХАНИКИ СЕТНЫХ ОРУДИЙ РЫБОЛОВСТВА.....	12
1.1 Рассматриваемые сетные орудия внутреннего и прибрежного рыболовства.....	13
1.1.1 Объячеивающие орудия лова.....	14
1.1.2 Стационарные орудия лова.....	15
1.2 Континуальная расчетная схема сетного орудия рыболовства.....	16
1.3 Дискретная расчетная схема сетного орудия рыболовства	20
1.4 Сравнительный анализ континуальных и дискретных расчетных схем.....	27
1.5 Выводы по главе 1.....	29
ГЛАВА 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДИСКРЕТНОГО РАСЧЕТА СЕТНЫХ ОРУДИЙ РЫБОЛОВСТВА И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ.....	31
2.1 Требования, накладываемые на методы расчета орудий рыболовства.	31
2.1.1 Окружающая среда и ее влияние на типы, конструкции и особенности рыболовных систем и орудий лова.....	31
2.1.2 Влияние характеристик естественного поведения объектов лова на типы орудий лова.....	32
2.2 Постановка задачи расчета сетных орудий рыболовства в статике.....	33
2.3 Расчетные схемы сетных орудий рыболовства при статической постановке задачи.....	35
2.3.1 Расчет сетных конструкций цилиндрической формы под действием гидростатических сил и сил тяжести.....	35
2.3.2 Дискретная расчетная схема ставной сети с использованием интерполяции.....	42
2.3.3 Расчет в установившемся состоянии с использованием метода точечных масс на примере ставной сети.....	47

2.3.4	Расчет крыла ставного невода с жестким каркасом.....	57
2.3.5	Расчет крыла ставного подвешного невода.....	59
2.4	Постановка задачи расчета сетных орудий рыболовства в динамике...	60
2.5	Расчетные схемы сетных орудий рыболовства при динамической постановке задачи.....	61
2.5.1	Дискретные расчетные схемы сетных орудий рыболовства методом точечных масс при динамической постановке задачи.....	61
2.5.2	Расчетная схема плавной сети при изменяющемся течении.....	70
2.5.3	Расчетная схема крыла ставного подвешного невода при изменяющемся течении.....	75
2.5.4	Расчетная схема волнения.....	78
2.5.5	Расчетная схема ставной сети на волнении.....	80
2.5.6	Расчетная схема плавной сети на волнении.....	82
2.5.7	Расчетная схема крыла ставного подвешного невода на волнении.....	83
2.5.8	Применение неявных конечно-разностных схем в задачах расчета динамики орудий рыболовства.....	84
2.6	Выводы по главе 2.....	89
ГЛАВА 3 АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА СЕТНЫХ ОРУДИЙ РЫБОЛОВСТВА		90
3.1	Вычислительная база.....	90
3.2	Инструментальные средства разработки программного обеспечения..	92
3.3	Алгоритмы решения задачи на ЭВМ при статической ее постановке..	96
3.3.1	Алгоритм расчета канатно-веревочного изделия методом точечных масс.....	97
3.3.2	Алгоритм начального размещения.....	103
3.3.3	Оптимизация алгоритма расчета методом точечных масс.....	105
3.3.4	Применение графического процессора в задачах расчета сетных орудий рыболовства.....	106
3.3.5	Оптимизация расчета сил гидродинамического сопротивления.....	107
3.3.6	Пример реализации.....	110

3.4	Алгоритмы решения задачи на ЭВМ при динамической ее постановке.....	111
3.4.1	Алгоритм расчета канатно-веревочного изделия методом точечных масс.....	112
3.4.2	Пример реализации.....	116
3.5	Выводы по главе 3.....	120
ГЛАВА 4. ВЕРИФИКАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ		122
4.1	Вычислительные эксперименты при статической постановке задачи..	122
4.1.1	Цилиндрическая сетная конструкция	122
4.1.2	Ставная сеть	126
4.2	Вычислительные эксперименты при динамической постановке задачи	130
4.2.1	Ставная сеть	130
4.2.2	Плавная сеть	132
4.2.3	Крыло ставного подвесного невода	136
4.3	Оценка сходимости теоретических положений	144
4.3.1	Цилиндрическая сетная конструкция.....	144
4.3.2	Ставная сеть	148
4.4	Выводы по главе 4	156
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		158
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		162
Приложение А. Программы для ЭВМ		171
Приложение Б. Публикации		191
Приложение В. Монографии и учебные пособия		198
Приложение Г. Поддержка исследования		199
Приложение Д. Внедрение результатов		201

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемое на рассмотрение научное исследование направлено на совершенствование имеющихся методов и методик расчета сетных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства, и их элементов при заданных условиях процесса рыболовства с использованием современных информационных и вычислительных технологий.

Механика сетных орудий рыболовства - направление в науке о промышленном рыболовстве, основоположником которой является выдающийся российский учёный, доктор технических наук, профессор Федр Ильич Баранов. За основу исследования были взяты уже имеющиеся достижения в области механики промышленного рыболовства таких ученых, как д.т.н., профессора А. Л. Фридмана, д.т.н., профессора В.Д. Кулагина, д.т.н., профессора М.М. Розенштейна и других российских и зарубежных ученых.

В процессе исследования была поставлена задача разработки методов, оптимальных и высокоэффективных вычислительных алгоритмов расчета сетных орудий рыболовства на современных персональных компьютерах с использованием многопоточных и гетерогенных вычислений на ядрах центрального и графического процессоров.

В результате проведенной работы были разработаны методы и алгоритмы расчета различных сетных орудий промышленного рыболовства и их элементов (ставных и плавных сетей, крыла ставного невода), на основе которых созданы компьютерные программы, призванные помочь предприятиям рыбной промышленности в проектировании и обслуживании орудий рыболовства и рыболовства. В процессе выполнения исследования был разработан универсальный метод точечных масс, на основе которого можно проводить расчет и моделирование любых сетных орудий рыболовства, моделирования различных процессов рыболовства.

Актуальность работы обусловлена недостаточностью исследований в задачах автоматизации расчета сетных орудий внутреннего и прибрежного

рыболовства, позволяющих увеличить эффективность их работы на этапах проектирования и эксплуатации.

Данное исследование в первую очередь ориентировано на:

- 1) увеличение эффективности лова;
- 2) улучшение качества сетных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства;
- 3) ускорение процесса их проектирования;
- 4) уменьшение трудозатрат при проектировании и в процессе эксплуатации;
- 5) уменьшение стоимости разработки и себестоимости конечного продукта;
- 6) импортозамещение в части программного обеспечения.

Степень разработанности темы исследования. Работы Баранова Ф.И., Фридмана А.Л. посвящены экспериментальному исследованию сетей и нахождения их коэффициентов сопротивления, как цельных конструкций. Научной проблемой расчета на ЭВМ орудий и процессов рыболовства и рыбоводства занимаются ученые разных стран: России, Германии, Норвегии, Испании, Италии, Японии, Южной Кореи, Китая, Филиппин, США, Дании, Великобритании. Данной проблеме посвящены работы таких российских и советских ученых, как Изнанкин, Иванов, Зинченко, Габрюк, Розенштейн, Осипов, Кулагин, Альтшуль, Ермакова, Наумов, Великанов, Недоступ, Павленко и др.

В работах Розенштейна М.М. и Осипова Е.В. впервые был предложен метод расчета с применением дискретной расчетной схемы сетной оболочки, основными элементами которой являются нити, образующие ромбическую ячейку, и узел их соединения. В своей диссертационной работе Осипов Е.В. исследовал объектно-ориентированные методы расчета элементов рыболовных систем. Разработке методов расчета и оптимизации параметров ставных неводов посвящены работы Ф.И. Баранова, Н.Н. Андреева, А.И. Трещева, А.Ф. Лексуткина, В.С. Калиновского, В.Н. Войниканис-Мирского, Е.Е. Шапунова, В.Ф. Канина, Ю.С. Сергеева, Е.Д. Каракоцкого, А.И. Зонова, В.В. Гулина, В.А.

Ионаса, В.А. Маркина, В.М. Халилова, М.Н. Коваленко, О.М. Лапшина и других авторов. Из зарубежных ученых стоит отметить Enerhaug, Karlsen, Gjosund (Норвегия), Paschen и Winkel (Германия), Hansen (Дания), O'Neill (Великобритания), Mnassri, Touze, Vincent и Alessandrini, Bouhoubeiny, Druault и Germain (Франция), Myeong-ChulPark, Ok-KyoonHa, Seok-WunHa, Yong-KeeJun, Tauti and Nomura.

Универсальных методов и алгоритмов расчета сетных орудий рыболовства с учетом неравномерности ячей, растяжения нитей при их натяжении, провисания нитей, изменяемых условиях места лова, включая наличие волнения и шторма, способных с высокой степенью детализации результатов расчета эффективно задействовать ресурсы современных вычислительных систем широкого применения, в настоящее время не предложено.

Цель и задачи работы. Цель - разработать универсальные методы, вычислительные алгоритмы и комплекс компьютерных программ для расчета сетных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства, состоящих из большого количества элементов с различными характеристиками, при статической и динамической постановке задачи, в условиях неравномерного течения, волнения и шторма.

Задачи:

- 1) Определить требования, накладываемые на расчет сетных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства.
- 2) Определить условия, при которых необходимо применение дискретных расчетных схем.
- 3) Определить условия, при которых возможно проведение расчета в статике.
- 4) Разработать методы расчета сетных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства при статической и динамической постановке задачи, а также в условиях волнения.
- 5) Разработать методы повышения точности и стойкости вычислительных алгоритмов.

6) Разработать алгоритмы расчета при статической и динамической постановке задачи.

7) Разработать методы оптимизации процесса расчета на многоядерных, гетерогенных и распределенных вычислительных системах.

8) Разработать компьютерные программы и провести вычислительные эксперименты.

9) Провести анализ результатов численных экспериментов на предмет оценки сходимости теоретических положений.

Научная новизна работы. По результатам исследования впервые:

1) представлена универсальная для канатно-веревочных изделий методология решения задач механики сетных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства;

2) разработан универсальный метод их расчета на основании дискретных расчетных схем при статической и динамической (в условиях изменяющегося во времени течения, волнения и шторма) постановке задачи;

3) на основе универсального метода разработаны вычислительные алгоритмы, оптимизированные под работу в многопроцессорных, распределенных и гетерогенных системах в режиме реального времени.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные расчетные схемы, вычислительные алгоритмы и программы для ЭВМ позволят на стадии проектирования и в процессе эксплуатации орудий внутреннего и прибрежного рыболовства определять их характеристики для выбора оптимальных режимов работы.

Методы диссертационного исследования. Для достижения поставленной цели применялись методы математической формализации орудия лова, математического моделирования, информационные технологии, численные и натурные эксперименты, анализ результатов экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

1) Методы расчета ставных сетей, крыла ставного невода и цилиндрических сетных конструкций при статической постановке задачи;

2) Методы расчета ставных и плавных сетей, крыла ставного невода при динамической постановке задачи, в условиях изменяющейся во времени и по глубине скорости течения, волнения и шторма;

3) Вычислительные алгоритмы расчета сетных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства и их элементов;

4) Результаты вычислительных экспериментов. Сравнительный анализ результатов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследований обеспечивается применением основополагающих принципов и методов механики, гидродинамики, математического анализа и информационных технологий. Результаты, полученные автором, экспериментальные и теоретические в основном согласуются с опубликованными данными других исследователей.

Основные положения диссертации были представлены и обсуждены в 22 докладах на российских и международных конференциях различного уровня: Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана» (Владивосток, 2012, 2016, 2018); Международной научно-практической конференции «Инженерные системы» (Москва, 2012); Международной научно-технической конференции «Наука и образование» (Мурманск, 2012); Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии» (Орел, 2012); Всероссийской заочной научно-технической конференции аспирантов, молодых ученых и специалистов «Комплексные исследования водных биоресурсов: рыболовство, аквакультура, экология, переработка, экономика и управление рыбохозяйственной отраслью» (Владивосток, 2012); Всероссийской научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование» (П. Камчатский, 2014, 2015, 2016); Международной конференции «Разностные схемы и их приложения» (Москва, 2013); Международной научной конференции «Инновации в науке, образовании и бизнесе» (Калининград, 2013, 2014);

Международной конференции «DEMaT» (Германия, Росток, 2013); Всероссийской конференции «Наука, образование, инновации: пути развития» (П. Камчатский, 2015); Международного Балтийского морского форума (Калининград, 2015, 2016, 2018); Международной научной конференции «Инновации в науке, образовании и предпринимательстве» (Калининград, 2015, 2016); Национальной заочной научно-технической конференции «Инновационное развитие рыбной отрасли в контексте обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации» (Владивосток, 2018); Международной конференции «Механика» (Литва, Каунас, 2018).

Диссертационное исследование выполнялось при поддержке РФФИ (2011-2013, 2015-2017, 2019-2022 гг.; проекты №11-08-00096-а, №15-08-00464-а, №19-48-390004-р_а) и госбюджетных НИОКР (2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 гг.; №№ 01201264354, 012012643543, 012012643544, 215052040003, АААА-А16-116072810020-4, 012012643547, АААА-А18-118050490059-0) (Приложение Г).

Результаты работы в виде 17 программ для ЭВМ и трех учебных пособий (Приложения А, Д) внедрены в учебный процесс на кафедре промышленного рыболовства ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» в курс лекций по дисциплине «Моделирование орудий и процессов рыболовства» для магистров направления подготовки 35.04.08 «Промышленное рыболовство». Результаты работы планируется использовать на предприятиях рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации при проектировании новых орудий промышленного рыболовства.

Личное участие автора. Соискатель ученой степени лично осуществлял: обоснование структуры диссертации и автореферата и написание их текста; планирование и проведение экспериментов; осуществление обработки и интерпретации полученных экспериментальных данных; подготовку к публикации научных результатов диссертационного исследования в статьях, тезисах, материалах конференций и др. печатных изданиях; представление научных

результатов диссертационного исследования на конференциях различного уровня; разработку компьютерных программ.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 19 работ (Приложение Б), из них 15 в изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России, из них 2 в изданиях, включенных в международную базу Web of Science, изданы 3 монографии (Приложение В).

Автор считает своим долгом выразить признательность коллективу кафедры промышленного рыболовства, ведущей организации ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Российскому фонду фундаментальных исследований, оппонентам и членам диссертационного совета за предоставленное время, поддержку и помощь в ходе выполнения научного исследования.

Особую благодарность автор выражает своему научному руководителю, кандидату технических наук, доценту, заведующему кафедрой промышленного рыболовства Недоступу Александру Алексеевичу.

1 ОБЗОР ИЗВЕСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРОБЛЕМЕ РАСЧЕТА МЕХАНИКИ СЕТНЫХ ОРУДИЙ РЫБОЛОВСТВА

Основоположником науки о промышленном рыболовстве является Федр Ильич Баранов [3; 4; 5]. С 1912 года Баранов Ф.И. начал разрабатывать теорию расчета орудий рыболовства как инженерных сооружений. Научной проблемой расчета и компьютерного моделирования сетных орудий и процессов рыболовства, и рыбоводства занимались и занимаются ученые разных стран: России (Фридман А.Л., 1967, 1968 [14; 61]; Розенштейн М.М., 2000, 2011, [53; 54]; Изнанкин Ю.А., 1975, 1977 [18; 19; 20]; Иванов Э.П., [17]; Габрюк В.И., 2011, [9], Кулагин В.Д., 1995 [26]; Наумов В.А., Великанов Н.Л., 2014-2017 [8; 28; 29; 83]; Недоступ А.А., 2010-2018 [31; 32; 33; 37; 38; 39; 40; 41; 42; 45; 46; 54]; Осипов Е.В., 2002, 2007 [48; 49]; Павленко А.А., 2012 [38]; Попов С.В., 2011 [51]), Германии (Paschen и Winkel, 1999, 2001, 2007, 2009, 2011, 2015 [74 - 76; 78; 80; 84]), Норвегии (Enerhaug, 1999, 2001 [67; 69]; Karlsen, 1999 [69]; Gjøsund, 2001 [67]), Испании, Италии, Японии (К. Suzuki, Т. Tagaki [81; 82]), Южной Кореи (Myeong-ChulPark, Ok-KyoonHa, Seok-WunHa, and Yong-KeeJun, 2014 [71]), Китая, Филиппин, США, Дании (Hansen, 2001 [67]), Великобритании (O'Neill, 2005 [72]), Франции (Mnassri, Touze, Vincent и Alessandrini, 2011 [70]; Bouhoubeiny, Druault и Germain, 2011 [66]).

В работах Розенштейна М.М. [53; 54] и Осипова Е.В. [48] впервые была предложена дискретная расчетная схема сетной оболочки, основными элементами которой являются нити, образующие ромбическую ячейку, и узел их соединения. В своей диссертационной работе [49] Осипов Е.В. исследовал объектно-ориентированные методы расчета элементов рыболовных систем, в частности ловушек для лова сайры и медузы.

В своем диссертационном исследовании Поповым С.В. [51] были исследованы ставные неводы, разноглубинные и донные сети, предложена схематизация сил, действующих на полоску сети, позволившая использовать дифференциальные уравнения равновесия полоски разноглубинной и донной сети

для расчета силовых и геометрических характеристик сети, деформированной от воздействия набегающего потока воды; разработаны метод определения силовых и геометрических характеристик деформированной сети на основе эмпирических формул нахождения коэффициентов сопротивления сети с применением принципа решения задачи Коши улучшенным методом Эйлера; метод расчета глубины погружения верхней подборы невода при увеличении скорости набегающего потока воды на основе математической модели, связывающей глубину погружения верхней подборы сети с высотой и сплошностью сети, длина оттяжек, силой плавучести оснастки верхней подборы и скоростью набегающего потока воды; метод определения силы плавучести, создаваемой оснасткой верхней подборы невода.

В работе К. Suzuki, Т. Tagaki и др. авторов (Япония) [81; 82] приводится численный метод расчета динамики садка, основанный на дискретной шарнирно-стержневой расчетной схеме, на основе которой компьютерной системой моделирования и анализа силовых и пространственно-временных характеристик NaLA проводится численный эксперимент. Недостатком метода является то, что при расчетах применяются постоянные гидродинамические коэффициенты.

Разработке методов расчета и оптимизации параметров ставных неводов посвящены работы Ф.И. Баранова, Н.Н. Андреева, А.И. Трещева, А.Ф. Лексуткина, В.С. Калиновского, В.Н. Войниканис-Мирского, Е.Е. Шапунова, В.Ф. Канина, Ю.С. Сергеева, Е.Д. Каракоцкого, А.И. Зонова, В.В. Гулина, В.А. Ионаса, В.А. Маркина, В.М. Халилова, М.Н. Коваленко, О.М. Лапшина, А.А. Недоступа, М. Tauti, М. Nomura и др. [3 - 5; 31 - 33; 37; 39; 40; 43; 46].

1.1 Рассматриваемые сетные орудия внутреннего и прибрежного рыболовства

К орудиям внутреннего и прибрежного рыболовства относятся ставные и плавные сети, ставные, донные (снюрреводы) и закидные неводы. По прин-

ципу действия [4; 5; 15; 23; 54] ставные и плавные сети относятся к объячеивающим, донные и закидные неводы – к отцеживающим, а ставные неводы – к стационарным орудиям рыболовства.

В данной работе будут рассмотрены только объячеивающие (ставная и плавная сеть) и стационарные (ставной невод) орудия внутреннего и прибрежного рыболовства.

1.1.1 Объячеивающие орудия лова

Сети [54] делятся на ставные - сети, закрепленные тем или иным способом, стоят в процессе лова неподвижно на одном месте; речные плавные - сети в процессе лова сплывают по течению реки и улавливают рыбу, идущую навстречу.

Важными характеристиками сетного полотна являются длина, высота, шаг ячеи, диаметр нити, посадочный коэффициент. Характеристики подбирают исходя из объекта лова, размера и глубины водоема, глубины постановки, рельефа дна.

Между толщиной нити и шагом ячей сети существует зависимость, которая выражается отношением d/a (d – диаметр нитки; a – размер ячеи). Чем меньше это отношение, тем выше уловистость сети.

Посадочный коэффициент является важнейшей характеристикой и влияет на заметность сетного полотна, его жесткость (натяжение нитей), захватывающую способность, форму ячеи, расход сетематериалов. Его выбирают исходя из формы поперечного сечения рыбы.

Чем меньше натяжение сетевого полотна между верхним и нижним шнуром, тем эффективнее работает сеть. Натяжение в свою очередь зависит от веса и загрузки нижнего шнура.

Лов ставными рыболовными сетями в местах с сильным течением, особенно там, где вода несет много посторонних предметов, бывает мало эффективен. Поэтому в таких местах эффективнее использовать плавные рыболов-

ные сети. В отличие от ставных сетей речные плавные сети не устанавливаются стационарно, а сплывают по течению и обьачеивают или запутывают встречную рыбу. Если сеть сплывает в толще воды, то ее снабжают дополнительными буями (связки пенопласта, кухтыли и т. д.), которые соединены с верхней подборой буйковыми поводцами. Длина поводцов определяет глубину хода сети. Иногда буями на буйковых поводцах снабжают сети, сплывающие у дна. В этом случае они служат в основном для определения формы сети во время ее сплывания.

1.1.2 Стационарные орудия лова

Стационарные орудия лова (ловушки) [54] - самая разнообразная группа орудий прибрежного рыболовства. К ловушкам относятся ставные неводы самых разнообразных конструкций, широко распространенные в рыболовстве Японии, США, Канады. В России ставные неводы применяют на Дальнем Востоке, Азовском, Балтийском и других морях, а также во внутренних водоемах.

Одной из значимых проблем при эксплуатации ставных подвесных неводов является его штормоустойчивость. При проектировании ставных неводов необходимо учитывать то, чтобы в условиях критической гидрометеорологической обстановки обеспечить максимально возможный вылов в сравнительно короткие сроки.

В данной работе будут рассмотрены ставные подвесные неводы и ставные неводы с жестким каркасом, которые считаются пассивными прибрежными орудия лова. Большие ставные неводы достаточно дороги, высока трудоемкость их установки и вероятность разрушения во время штормов, что требует повышенного внимания к обеспечению штормоустойчивости этих орудий лова в процессе проектирования, установки и эксплуатации. Поскольку установка больших ставных неводов занимает достаточно много времени, то в случае ошибки с выбором места постановки или с положением орудия его не всегда удастся быстро переставить.

Выбор конструкции крепления ставных неводов зависит не только от характеристик района лова, но и от глубины и характера грунта. На глубоких местах нерационально применять дорогостоящие неводы с жестким каркасом. В этом случае применяют мягкий каркас с подвесным крылом, камерой и подъемной дорогой.

В зависимости от глубины места лова, каркас ставного невода может быть жестким, с использованием свай, забиваемых в дно или гундеров (кольев, свободно установленных с загрузкой комля и раскрепленных по верху якорными оттяжками), если грунт каменистый.

Проектирование ставных неводов требует проведения колоссальных объемов вычислений, так как дель состоит из огромного количества ячей. Зачастую требуется изучить поведение натурального орудия рыболовства, что практически невозможно путем натурального эксперимента. Поэтому возникает необходимость в способах, позволяющих достаточно просто рассчитывать сложные системы, такие как ставные подвесные неводы, состоящие из тысячи и более элементов.

1.2 Континуальная расчетная схема сетного орудия рыболовства

Проведем анализ имеющихся исследований в области расчета орудий промышленного рыболовства. Рассмотрим различные методы и расчетные схемы, их плюсы и минусы.

Континуальным расчетным схемам посвящены работы Иванова Э.П. [17], Изнанкина Ю.А. [18; 19; 20], Кулагина В.Д. [26], Габрюка В.И. [9] и др. При континуальном методе расчета сетная часть орудия рыболовства заменяется некоторой расчетной схемой, где шаг ячеей считается величиной бесконечно малой.

В работе Кулагина В.Д. [26] приводится расчет плоских сетей, имеющих «жесткий» контур по линии закрепления (подборы, прожилыны и т.д.). Геометрия такой плоской сети не зависит от натяжений в ее нитках. При таком

условии сначала производится расчет геометрии, а уже по ней с учетом внешних сил расчет сил натяжений в нитках. В работе сетное полотно в заданной точке описывается дифференциальным уравнением поверхности

$$ds^2 = \mathbf{r}_u^2 du^2 + 2\mathbf{r}_u \mathbf{r}_v dudv + \mathbf{r}_v^2 dv^2, \quad (1.1)$$

где s – длина дуги на поверхности; векторы $\mathbf{r}_u, \mathbf{r}_v$ – касательные к координатным линиям; u, v – криволинейные координаты точки на поверхности.

Выражение в правой части (1.1) называется первой основной квадратичной формой на поверхности. Если координатные линии образуют на поверхности ортогональную сетку, то (1.1) принимает вид, называемый первой квадратичной формой:

$$ds^2 = A^2 du^2 + B^2 dv^2, \quad A = \sqrt{\mathbf{r}_u^2}, \quad B = \sqrt{\mathbf{r}_v^2}, \quad (1.2)$$

где A и B – параметры Ляме. Для сети, равномерно посаженной на вертикальные и горизонтальные подборы,

$$A = 2au_y, \quad B = 2au_x, \quad (1.3)$$

где a – шаг ячеей; u_x, u_y – посадочные коэффициенты. Используя первую квадратичную форму можно найти элементы на поверхности.

Для получения пространственного строения окрестности заданной точки поверхности применяется вторая квадратичная форма:

$$2h = L(u,v)du^2 + 2M(u,v)dudv + N(u,v)dv^2, \quad (1.4)$$

где h – расстояние от точки $(u+du, v+dv)$ до касательной к плоскости, проведенной к поверхности в точке (u,v) ; L, M, N – коэффициенты второй квадратичной формы.

В работе Иванова Э.П. [17] была поставлена задача о форме тяжелой сети и получено уравнение Эйлера для тяжелой гибкой нерастяжимой сети, изготовленной из прямоугольного куска сетного полотна заданной длины и ширины в жгуте, равномерно посаженной на два соосных круглых обруча, расположенных в двух параллельных горизонту плоскостях в статике. Ось Ox направлена вверх, $y=y(x)$ – уравнение меридионального сечения оболочки.

В расчетной схеме был использован принцип минимума потенциальной энергии, на основе которого была выведена зависимость

$$\frac{1}{R_1} + \frac{u_x^2}{1-u_x^2} \frac{1}{R_2} = \frac{\sin \alpha}{x + \lambda}, \quad (1.5)$$

где R_1, R_2 – главные радиусы кривизны поверхности вращения; u_x – посадочный коэффициент по ширине сетного полотна; α – угол наклона касательной меридиана к оси, проходящей через центры обручей; x, y – безразмерные координаты.

Габрюк В.И. в своей монографии [9] рассмотрел континуальную расчетную схему сетных оболочек вращения, выбрав в качестве криволинейных координат на поверхности сетной оболочки дину меридиана, отсчитываемую от начальной параллели, и угол, отсчитываемый от начального меридиана. Габрюк В.И. получил дифференциальные уравнения равновесия сетной оболочки вращения:

$$\begin{aligned} d(r\sigma_1 \cos \alpha_N) dl &= r q_x \\ d(r\sigma_1 \sin \alpha_N) dl &= \sigma_1 \tan^2 \varepsilon - r q_r \end{aligned} \quad (1.6)$$

где l – длина меридиана; q_x, q_r – осевая и радиальная составляющие внешней силы, приходящейся на единицу площади поверхности оболочки, соответственно; α_N – угол атаки сетной оболочки; r – радиус параллели; σ_1 – усилие, приходящееся на единицу длины криволинейного элемента вдоль параллели; 2ε – угол раскрытия ячеи.

Рассмотрим континуальную расчетную схему, предложенную Изнанкиным Ю.А. [19] на примере сетного мешка в виде конуса. При бесконечно малом шаге ячеи сетной мешок будет представлять собой поверхность вращения (смотрите рисунок 1.1а). Связав геометрические характеристики запишем

$$u_x = \sin \gamma = \frac{2\pi r}{L} = \frac{2\pi s \sin \alpha}{L}, \quad (1.7)$$

где u_x – посадочный коэффициент;

r – радиус параллели конуса;

L – ширина сети в жгуте;

s – расстояние от параллели до вершины конуса;

α – угол между образующей и осью вращения.

На развертке конуса (смотрите рисунок 1.1б) отдельная сетная нить является окружностью радиуса R :

$$R = \frac{s}{2 \sin \gamma}. \quad (1.8)$$

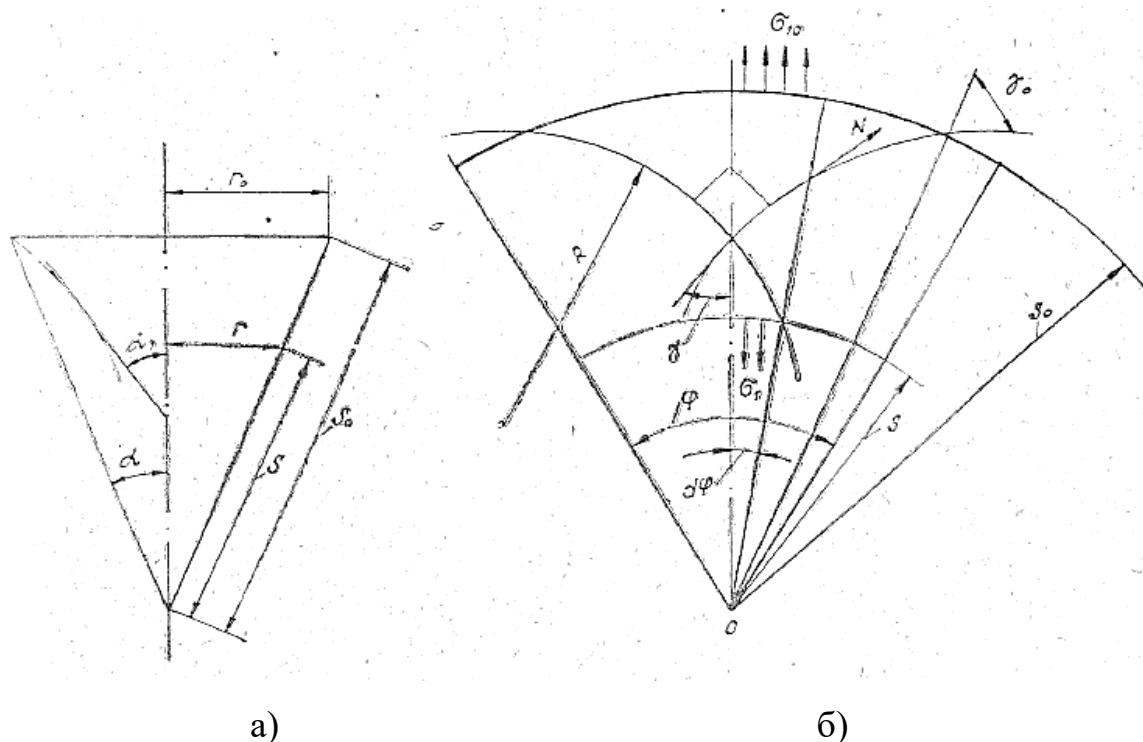


Рисунок 1.1 – Континуальная расчетная схема конусного сетного мешка

Используя общее определение посадочного коэффициента [13] запишем

$$u_x = \sin \gamma = \frac{sd\varphi}{dL}, \quad (1.9)$$

где φ – центральный угол развертки конуса;

dL – длина нити в пределах угла $d\varphi$.

Обозначив $d\varphi/dL=C$ при $L=\text{const}$ получаем

$$\frac{\varphi}{L} = C = \text{const}, \quad (1.10)$$

$$\sin \gamma = sC. \quad (1.11)$$

С учетом того, что посадочный коэффициент вдоль образующей конуса изменяется по линейному закону, продифференцировав (1.11) получим:

$$d\gamma = \frac{Cds}{\cos\gamma} = \frac{Cds}{\sqrt{1-C^2s^2}}. \quad (1.12)$$

Свяжем силовые и геометрические характеристики. В континуальной расчетной схеме вместо натяжений нитей рассматриваются удельные натяжения σ_1 и σ_2 , направленные по касательным к меридианам, отнесенные к длине параллели, и параллелям, отнесенные к длине меридиана соответственно. Тогда натяжение нити N при шаге ячеи a и при условии, что развертка сети плоская [18]:

$$N = a\sigma_1 \operatorname{tg}\gamma, \quad \sigma_1 = \sigma_{10} \frac{\sin\alpha_0 \cos\alpha_0}{\sin\alpha \cos\alpha}, \quad (1.13)$$

где α_0 – угол между образующей и осью вращения по наружной кромке сети;

σ_{10} - удельное натяжение нитей по наружной кромке, направленное по касательной к меридиану.

С учетом (1.13) получим зависимость натяжения сетной нити N от ее координаты s :

$$\frac{N_0}{N} = \frac{\cos^2\gamma}{\cos^2\gamma_0} = \frac{1-C^2s^2}{1-C^2s_0^2}, \quad (1.14)$$

где N_0 – натяжение сетной нити у наружной кромки с координатой s_0 .

Выразив из (1.7) и (1.11) C получаем

$$C = \frac{2\pi r_0}{s_0 L}. \quad (1.15)$$

1.3 Дискретная расчетная схема сетного орудия рыболовства

Рассмотрим дискретную расчетную схему на примере того же сетного мешка в виде конуса, но с конечным шагом ячеи. В дискретной расчетной схеме шаг ячеи может огрубляться и быть сопоставим с размером сетного полотна. В пределах одного шага сетная нить заменяется отрезком прямой.

В процессе выполнения диссертационного исследования была разработана дискретная расчетная схема для сетных конструкций в виде тел вращения, частным случаем которой является сетной мешок в виде конуса. Детальное рассмотрение данной схемы приводится в главе 2.

На основе разработанной расчетной схемы была создана компьютерная программа, результаты которой будут использованы при сравнительном анализе дискретных и континуальных расчетных схем на примере сетного мешка в виде конуса, приведенном в следующем разделе.

С целью сопоставления результатов с расчетными значениями, полученными при помощи континуальной расчетной схемы, описанной в предыдущем разделе, в дискретную расчетную схему были введены следующие упрощения:

- вес сетного полотна не учитывался и считался равным 0;
- сетные нити считались нерастяжимыми, что задавалось большим значением модуля упругости.

Рассмотрим другую дискретную расчетную схему на примере рыболовной сети при статической постановке задачи, основанную на энергетических состояниях элементов орудия рыболовства [79].

Принцип минимума потенциальной энергии системы гласит, что любая замкнутая система стремится перейти в состояние с минимальной потенциальной энергией. Исходя из этого принципа состояние равновесия линейно-упругого тела отличается от всех других его состояний тем, что в нем потенциальная энергия имеет глобальный минимум.

Таким образом для решения задачи при ее статической постановке необходимо найти такое состояния сети, при котором суммарное значение ее потенциальной энергии минимально. Этим состоянием и будет искомое установившееся состояние равновесия.

Представим сеть как набор соединенных между собой в узлах ниток. Каждая ячейка состоит из четырех ниток (элементов расчетной схемы). Каждую нитку представим в виде прямого стержня, лишенного сил трения (смотрите

рисунок 1.2). Данное представление приемлемо в случае, когда все нитки сети натянуты, то есть в рабочем ее состоянии.

На рисунке 1.2 ось X – направлена по течению, ось Z направлена вверх. u, w, v – смещения узлов под действием сил.

При переходе к математической расчетной схеме примем следующие упрощения:

- сила натяжения действует только в направлении оси элемента и постоянна в любом его сечении;
- элементы абсолютно гибки;
- элементы абсолютно эластичны и изотропны, отношение между силой и деформацией подчиняется закону Гука;
- при деформации площадь поперечного сечения элемента остается постоянной;
- относительные смещения одинаковы для всех точек любого поперечного сечения элемента.

При помещении сети в воду с однородным течением установившейся скорости, сеть подвергается существенной деформации. Необходимо определить перемещение всех узлов сети и натяжение во всех ее нитях.

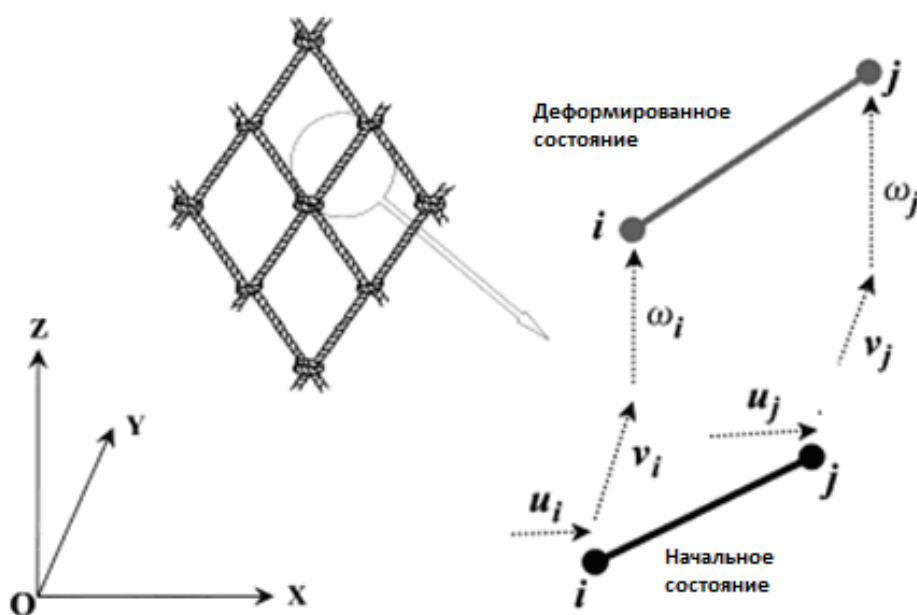


Рисунок 1.2 – Перемещение элемента

Согласно указанным выше упрощениям суммарная потенциальная энергия всей дискретной системы:

$$\Pi = -\sum_{i=1}^f F_i D_i + \sum_{g=1}^m T_g (L_g(D_i) - L_{0g}) - \sum_{g=1}^m \frac{L_g(D_i)}{2EA_g} T_g^2, \quad (1.16)$$

где $\sum_{i=1}^f F_i D_i$ - работа внешних сил по перемещению узлов;

$\sum_{g=1}^m T_g (L_g(D_i) - L_{0g})$ - работа растяжения элемента;

$\sum_{g=1}^m \frac{L_g(D_i)}{2E_g A_g} T_g^2$ - потенциальная энергия упругой деформации элемента;

F_i - внешняя сила;

D_i - смещение узла;

L_g - длина g -го стержня после деформации;

L_{0g} - длина g -го стержня до деформации;

T_g - сила натяжения g -го стержня;

E_g - модуль упругости g -го стержня;

A_g - площадь поперечного сечения g -го стержня;

f - количество степеней свободы дискретной системы;

m - количество элементов (нитей).

В точке глобального минимума производные функции (1.16) по всем неизвестным равны нулю. Продифференцировав эту функцию по всем T_g получим m уравнений вида:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial T_g} = 0 \text{ при } \frac{\partial \Pi}{\partial T_g} = L_g(D_i) - L_{0g} - \frac{L_g(D_i)}{EA_g} T_g. \quad (1.17)$$

Продифференцировав (1.17) по всем D_i , получим систему из f уравнений вида:

$$\sum_{g=1}^m \frac{\partial L_g(D_i)}{\partial D_i} T_g - F_i = 0. \quad (1.18)$$

Уравнения (1.16) определяют геометрические, а уравнения (1.18) – силовые зависимости дискретной системы.

Длина элемента после деформации определяется исходя из координат его концов (см. рисунок 1.2):

$$L_g = \sqrt{X(u)^2 + Y(v)^2 + Z(w)^2}, \quad (1.19)$$

$$\left. \begin{aligned} X(u) &= (X_j - X_i) - (u_j - u_i) \\ Y(v) &= (Y_j - Y_i) - (v_j - v_i) \\ Z(w) &= (Z_j - Z_i) - (w_j - w_i) \end{aligned} \right\}, \quad (1.20)$$

где X, Y, Z – координаты концов g -го элемента до деформации; u, v, w – смещения концов g -го элемента под действием сил; i, j – номера узлов на концах g -го элемента.

Пусть в дискретной системе n узлов. Каждый узел имеет три степени свободы. Тогда общее количество степеней свободы всей системы $f=3*n$. Для каждого узла имеем три переменные $D_x = u, D_y = v, D_z = w$.

Если элемент g не связан с узлом i , то $\frac{\partial L_g(D_i)}{\partial D_i} = 0$.

Подставив в уравнения (1.18), формулы (1.19) и (1.20), и вычислив дифференциалы $\partial L_g / \partial D_i$, для каждого узла запишем три уравнения:

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{g=1}^{m(i)} \frac{T_g(D_{xi} - a_x)}{\sqrt{D_{xi}^2 - 2aD_{xi} + b_x + a_x^2}} &= F_{xi} \\ \sum_{g=1}^{m(i)} \frac{T_g(D_{yi} - a_y)}{\sqrt{D_{yi}^2 - 2aD_{yi} + b_y + a_y^2}} &= F_{yi}, \\ \sum_{g=1}^{m(i)} \frac{T_g(D_{zi} - a_z)}{\sqrt{D_{zi}^2 - 2aD_{zi} + b_z + a_z^2}} &= F_{zi} \end{aligned} \right. \quad (1.21)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_x &= X_{x_i} - X_{x_{j(i)}} + D_{x_{j(i)}} \\ a_y &= X_{y_i} - X_{y_{j(i)}} + D_{y_{j(i)}} \\ a_z &= X_{z_i} - X_{z_{j(i)}} + D_{z_{j(i)}} \end{aligned} \right\}; \quad (1.22)$$

$$\left. \begin{aligned} b_x &= (X_{yi} + D_{yi})^2 + (X_{zi} + D_{zi})^2 \\ b_y &= (X_{xi} + D_{xi})^2 + (X_{zi} + D_{zi})^2 \\ b_z &= (X_{xi} + D_{xi})^2 + (X_{zi} + D_{zi})^2 \end{aligned} \right\}; \quad (1.23)$$

$m(i)$ – количество элементов, соединенных в i -м узле;

$j(i)$ – номера узлов на втором конце стержня, первый конец которого соединен с i -м узлом;

$F_{\{x,y,z\}_i}$ - проекции на оси внешних сил, действующих на i -й узел;

$X_{\{x,y,z\}_i}$ - проекции на оси координат i -го узла.

Так как в реальной рыболовной сети могут действовать только силы натяжения, необходимо ввести m ограничений $T_g \geq 0$.

Определим внешние силы, действующие на сеть со стороны внешней среды. Вектор внешней силы \mathbf{F}_i есть сумма гидростатических и гидродинамических сил:

$$\mathbf{F}_i = -\mathbf{G}_i + \mathbf{R}_i, \quad \mathbf{G}_i = \left(0; 0; \frac{1}{2} \sum_{g=1}^{m(i)} G_g \right), \quad \mathbf{R}_i = \frac{1}{2} \sum_{g=1}^{m(i)} (R_{X_g}, R_{Y_g}, R_{Z_g}), \quad (1.24)$$

где G_g - вес g -ой нити;

R_{Z_g} - подъемная гидродинамическая сила, действующая на g -ую нить;

R_{X_g} - сила гидродинамического сопротивления, действующая на g -ую нить;

R_{Y_g} - боковая гидродинамическая сила, действующая на g -ую нить.

Вычислим гидродинамические силы, действующие на каждый элемент [31]:

$$\left. \begin{aligned}
R_{X_g} &= \frac{1}{2} \rho \left(c_{90} \frac{1 - \frac{X_g^2}{L_g^2} + \left(1 - \frac{X_g^2}{L_g^2}\right)^2}{2} + c_0 \frac{X_g^2}{L_g^2} \right) d_g L_g v^2 \\
R_{Y_g} &= \frac{1}{2} \rho c_{90} \frac{X_g Z_g^2}{L_g^3 \sqrt{1 - \frac{Y_g^2}{L_g^2}}} d_g L_g v^2 \\
R_{Z_g} &= \frac{1}{2} \rho c_{90} \frac{X_g Y_g^2}{L_g^3 \sqrt{1 - \frac{Z_g^2}{L_g^2}}} d_g L_g v^2
\end{aligned} \right\}, \quad (1.25)$$

$$c_{0_g} = 0.1 \text{Re}_g^{-0.15} \left(1 + \left(\frac{d_g}{L_g} \right)^{\frac{1}{3}} \right), \quad c_{90_g} = \frac{4.2 \text{Re}_g^{-0.15}}{1 + \left(\frac{d_g}{L_g} \right)^{\frac{1}{3}}}, \quad \text{Re}_g = \frac{d_g v}{\nu}, \quad (1.26)$$

где ρ - плотность воды;

d_g - диаметр g -ой нитки;

v - скорость течения;

X_g, Y_g, Z_g - проекции длины нити L_g на оси координат;

c_{0_g}, c_{90_g} - гидродинамические коэффициенты;

$\nu = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$ - коэффициент кинематической вязкости воды.

Решив систему из $m+3f$ уравнений (1.17), (1.21) одним из численных методов найдем искомые u, v, w для каждого узла и T_g для каждой нити, тем самым решив поставленную задачу.

Рассмотренная дискретная расчетная схема может применяться только при статической постановке задачи. Схема не учитывает возможного провисания ниток, веревок, канатов сетного орудия рыболовства.

1.4 Сравнительный анализ непрерывных и дискретных расчетных схем

В непрерывном методе расчета сетная часть (сетное полотно) орудия рыболовства заменяется некоторой расчетной схемой, где шаг ячейки считается величиной бесконечно малой [19]. В дискретной расчетной схеме, наоборот, шаг ячейки огрубляется и может быть сопоставим с размером сетного полотна.

При обосновании упрощенных методов расчета сетных конструкций на основе непрерывной расчетной схемы вводятся следующие допущения:

- диагональные линии ячеек совпадают с параллелями и меридианами поверхности;
- неравномерность размера ячеек отсутствует;
- размер ячеек весьма мал по сравнению с размерами сетного полотна;
- сетные нити нерастяжимы.

Дискретный метод расчета орудий рыболовства позволяет решать следующие задачи, которые нельзя решить при непрерывной расчетной схеме:

- определять геометрию орудия;
- определять селективные свойства сетей при заданном размере и форме ячейки;
- выбор диаметра и материала ниток исходя из их натяжений на разных участках орудия лова;
- визуализация с точностью до нитки.

Дискретная расчетная схема позволяет учесть большее количество параметров, а значит и позволяет достичь большей точности результата.

Проведем численные эксперименты по расчету натяжения в нитках сетного полотна для дискретной и непрерывной расчетных схем сетной конструкции конусной формы. Зададим следующие входные параметры:

- шаг ячейки $a=0,05$ м;
- радиус обруча $r_0=0,5$ м;
- вес обруча $G=50$ Н;

- количество равномерно посаженных по обручу ячей $n=40$;
- количество ячей по высоте сети $m=20$.

Проведем расчеты без учета веса сетной части и растяжения ниток сетного полотна. Дискретную расчетную схему проверим с использованием компьютерной программы, разработанной в процессе выполнения диссертационного исследования. Для непрерывной расчетной схемы (1.7) - (1.15) рассчитаем длину сетного полотна в жгуте $L = 2an = 4$ м. Для дискретной расчетной схемы возьмем расчетное значение $s_0=1,869$ м и рассчитаем:

1. натяжение верхнего ряда $N_{20} = \frac{G}{2n} = 0,625$ Н;
2. по формуле (1.15) $C \approx 0,42$ м⁻¹;
3. по формуле (1.14) $N_0 = \frac{N_{20}}{1 - C^2 s_0^2} \approx 1,63$ Н;
4. подставив s из дискретной в (1.14) натяжения в нитках N для остальных рядов.

Для каждого ряда в таблице вычислим среднее квадратичное отклонение сил натяжения по данным дискретной и непрерывной расчетных схем:

$$N_C = (N_D + N_K) / 2$$

$$S = \frac{1}{N_C} \sqrt{\left((N_D - N_C)^2 + (N_K - N_C)^2 \right) / 2}, \quad (1.27)$$

где N_C – среднее арифметическое значение сил натяжения по данным дискретной и непрерывной расчетных схем;

N_D – значение силы натяжения по данным дискретной расчетной схемы;

N_K – значение силы натяжения по данным непрерывной расчетной схемы;

S – средняя квадратичная погрешность сил натяжения по данным дискретной и непрерывной расчетных схем.

Результаты расчетов занесены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 - Результаты расчетов при $n=40$; $m=20$; $a=0,05$ м

Ряд	s , м	N_d , Н	N_k , Н	S , %
0	1,869	1,52	1,63	3,5
5	1,517	0,77	1,05	15,4
10	1,044	0,65	0,77	8,4
15	0,549	0,63	0,66	2,3
20	0,050	0,63	0,63	0,0

Увеличим количество ячеек в 16 раз ($n=160$; $m=80$), уменьшим шаг ячеек в 4 раза ($a=0,0125$ м) и проведем повторный расчет при прочих равных условиях. Результаты расчетов занесены в таблицу 1.2.

При $n=40$; $m=20$, $a=0,05$ м получим $S_C \approx 8,1$ %. При $n=160$; $m=80$; $a=0,0125$ м получим $S_C \approx 3,7$ %.

Таблица 1.2 - Результаты расчетов при $n=160$; $m=80$; $a=0,0125$ м

Ряд	s , м	N_d , Н	N_k , Н	S , %
0	1,868	0,40	0,41	1,2
20	1,483	0,23	0,26	6,1
40	1,007	0,17	0,19	5,5
60	0,512	0,16	0,16	0,0
80	0,013	0,16	0,16	0,0

Как видно из таблиц 1.1 и 1.2 отклонение увеличивается при удалении от кромок сетного полотна. При этом чем больше количество ячеек (меньше размер ячеек по сравнению с размером сетной конструкции), тем ближе результаты, полученные при помощи континуальной расчетной схемы, соответствуют результатам, полученным при помощи дискретной расчетной схемы.

1.5 Выводы по главе 1

Континуальные расчетные схемы в сравнении с дискретными имеют следующие недостатки:

- размер и неравномерность ячеек сетного орудия рыболовства не учитывается и для более точного расчета должен быть весьма мал по сравнению с

размерами орудия рыболовства; как следствие невозможность рассчитать селективность таких орудий рыболовства, как рыболовные сети (ставные и плавные);

- не учитывается растяжение нитей сетного полотна при их натяжении, что может привести к ошибочным результатам при использовании в одном орудии рыболовства нитей из различных материалов и различных диаметров;
- не учитывается провисание нитей и, как следствие, возможный перекося сетного полотна и изменение локальных напряжений в сетной конструкции, что немаловажно при расчете рыболовных сетей и влияет на их селективность;
- расчет возможен только при статической постановке задачи, что не дает учитывать такие процессы, как работу сетей и неводов при неравномерном течении, на волнении и в условиях шторма (изменение формы, скачкообразное изменение напряжений в элементах при срыве якоря и др.);
- сложность, а то и невозможность двумерной и трехмерной детальной схематизации (с отображением ниток и натяжений в них); невозможность распараллелить во времени вычислительные алгоритмы на многоядерных, гетерогенных и распределенных системах.

Результаты сопоставления численных экспериментов на дискретной и континуальной расчетных схемах показывают, что при уменьшении количества ячеек (увеличения степени дискретизации сетного полотна), погрешность вычислений с использованием континуальной расчетной схемы увеличивается. Континуальная расчетная схема не учитывает дискретность сетного полотна, а предполагает, что полотно состоит из бесконечного числа ячеек.

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДИСКРЕТНОГО РАСЧЕТА СЕТНЫХ ОРУДИЙ РЫБОЛОВСТВА И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

2.1 Требования, накладываемые на методы расчета орудий рыболовства

При разработке рыболовных систем и орудий лова всегда имеет место определенный список эксплуатационных требований, которым указанные объекты должны удовлетворять. Не учет тех или иных особенностей эксплуатации, как правило, приводит к существенным недостаткам в деятельности систем и орудий лова. Они, как следствие, могут быть неэффективны в работе. В общем случае список требований включает функциональные требования, характеристики места промысла, объекта лова, на который направлено действие орудия лова, показателей особых условий промысла и ограничений, при которых выполняется лов.

2.1.1 Окружающая среда и ее влияние на типы, конструкции и особенности рыболовных систем и орудий лова

Воздействия на орудие лова зависят от множества факторов окружающей водно-воздушной среды и дна водоема: глубина места лова и связанное с ней давление воды; течение; сила ветра; волнение; температура воздуха и воды; наличие льда; соленость; прозрачность; характер и рельеф грунта и др.

Рассматриваемые факторы природной среды не зависят от желания человека и относятся к вынужденным входным воздействиям на орудие лова. С одной стороны, может быть препятствием для применения одних и, наоборот, стимулом для эксплуатации других орудий лова. В общем виде эти факторы можно разделить на два вида: абиотические и биотические.

К абиотическим факторам относятся: течение; волнение; глубина водоема; характер и рельеф грунта; температура воздуха, воды; солнечная и лунная деятельность.

Скорость течения в верхних слоях океана, по мнению специалистов, находится в диапазоне 0,01-1,0 м/с, редко достигая 1,5 м/с. Влияние волнения так

или иначе связано с направлением и силой ветра в районе промысла. Волнение может стать причиной невозможности применения ловушечного лова на большой глубине. Выбор вида лова зависит также от глубины водоема. Вместе с тем, известно, что основные запасы промысловых гидробионтов сосредоточены в пределах шельфовой и отчасти зоны материкового склона с высокой биологической продуктивностью. На тяжелых, закоряженных грунтах возможно применение только стационарных (неподвижных) орудий лова - сетей, ярусов, ловушек. Взаимосвязанные температура воды и воздуха оказывают определенное влияние на применяемые способы лова определенными орудиями рыболовства, конструктивные их элементы и особенности эксплуатации.

К биотическим факторам водоема относится поведение скопления рыб, присутствие в районе промысла хищных рыб, морского зверя и птиц. Присутствие в больших количествах молоди ценных пород рыб в стаях анчоусовых или сардиновых. Наличие и распределение кормовых объектов.

2.1.2 Влияние характеристик естественного поведения объектов лова на типы орудий лова

Поведение рыб является комплексом условий, требующих от рыбы определенного действия, чтобы выжить и сохранить потомство: скорость движения (бросковая, плавания (движения)); плотность скопления; распределение; реакция на раздражители; дальность видимости; миграции.

Скорость плавания рыбы в воде пропорциональна частоте и амплитуде колебаний тела и хвоста и укладывается в рамки определенных математических уравнений.

Перемещение скоплений условно делится на два вида: непараллельное и параллельное. При параллельном перемещении центр массы скопления рыб движется беспорядочно и, как правило, с малой скоростью. Параллельное перемещение связано с периодами миграций. Рыб, участвующих в параллельном перемещении, называют ходовыми, а само явление - ходом рыбы. В ряде слу-

чаев массовое перемещение рыб происходит в вертикальной плоскости в течении суточного промежутка времени. Непараллельные перемещения наблюдаются, например, в периоды нагула и размножения. В это время отдельные рыбы в поисках корма и мест икрометания оказывают малое влияние на смещение центра массы скопления. Такая рыба называется неходовой. Для облова разреженных скоплений рыб приходится выбирать такие способы лова, которые при сравнительно малых энергетических затратах охватывают огромные водные пространства.

2.2 Постановка задачи расчета сетных орудий рыболовства в статике

С развитием вычислительной техники компьютер все больше приходит на помощь разработчикам орудий рыболовства и рыбакам. Применение персонального компьютера в качестве средств автоматизации проектирования и в процессе эксплуатации сетных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства позволяет сократить общее время его разработки и установки, уменьшить количество ошибок.

Для верификации при проектировании, а также в процессе эксплуатации орудий рыболовства необходимо учитывать максимальные нагрузки, возникающие в их элементах при максимально неблагоприятных условиях окружающей среды. К таким условиям относится сильное течение и волнение. Для таких орудий рыболовства, как ставные рыболовные сети и ставные неводы, работающие в стационарном режиме, можно проводить анализ по одному из условий, задав заведомо большее его значение. Для определения нагрузок необходимо знать форму орудия рыболовства. При анализе с учетом течения, приняв его скорость выше максимально возможной (с запасом на то же волнение) и постоянной во времени, а направление течения постоянными во времени и однородными по всей площади сети или дели, для указанных выше орудий рыболовства можно проводить расчет в статике.

Одним из современных методов расчета является применение дискретной расчетной схемы. В дискретной расчетной схеме система состоит из конечного

числа связанных друг с другом элементов. На все элементы системы действуют внешние силы, такие как сила тяжести, плавучести, гидродинамические силы. Так же связанные элементы воздействуют друг на друга посредством внутренних сил.

Необходимость рассчитать каждый элемент и учитывать все связи при большом их количестве приводит к решению систем из большого числа уравнений. Это увеличивает время расчета и требует большой объем ресурсов ЭВМ. Данная проблема ограничивает использование полностью дискретной расчетной схемы. Одним из ее решений является применение смешанного метода расчета, при котором элементы объединяются в группы, каждая из которых рассчитывается как один элемент. Расчетные параметры элементов в группе определяются одним из интерполяционных методов. Такой подход позволяет сократить количество уравнений, что в свою очередь сокращает время расчета и объем ресурсов ЭВМ.

В наше время мощность ЭВМ постоянно увеличивается. Увеличивается объем оперативной памяти, используемой для хранения входных, выходных и промежуточных параметров. Появляются новые вычислительные ресурсы, способные одновременно выполнять однотипные операции над большим объемом данных. К таким ресурсам относятся GPU (видеопроцессор, способный выполнять пользовательские вычислительные задачи) [1]. Существуют программные средства, предназначенные для выполнения различных математических задач в гетерогенной среде. К таким средствам относится DirectCompute [60], входящий в состав ОС Windows – набор функций и языковых средств для математических вычислений в гетерогенной среде. DirectCompute использует свой язык написания алгоритмов HLSL, основанный на языке C. Все сказанное делает дискретный метод расчета перспективным методом.

Задача исследования – разработать методы и вычислительные алгоритмы для расчета силовых и геометрических характеристик сетного орудия рыболовства с учетом провисания отдельных его элементов, включая случаи, когда

часть орудия находится на поверхности или на дне водоема, в условиях изменяющегося во времени течения, волнения и шторма, с учетом перераспределения нагрузок из-за провисания ниток, на основе использования дискретных расчетных схем с применением современных вычислительных средств, обладающих достаточной степенью точности и высокой скоростью вычислений.

Для повышения точности расчетного метода необходимо:

- оптимизировать методы расчета сетных орудий рыболовства;
- вывести математические расчетные схемы и имитационные алгоритмы для задач формирования сетных орудий рыболовства.

Дискретная расчетная схема с достаточной степенью точности и скоростью позволяет вычислять силовые и геометрические характеристики сетного орудия рыболовства с учетом провисания отдельных его элементов в случаях, когда часть орудия находится на поверхности или на дне водоема и перераспределение нагрузок с учетом провисания ниток.

2.3 Расчетные схемы сетных орудий рыболовства при статической постановке задачи

Для статической постановки задачи в работе рассматриваются такие орудия рыболовства, как ставная сеть, ставной невод с жестким каркасом, ставной подвесной невод. Также при проведении диссертационного исследования предложен метод расчета силовых и геометрических характеристик сетной конструкции цилиндрической формы под действием гидростатических сил.

Рассмотрим каждую из разработанных дискретных расчетных схем более подробно в хронологическом порядке исследования.

2.3.1 Расчет сетных конструкций цилиндрической формы под действием гидростатических сил и сил тяжести

Рассмотрим частный случай, когда сетная конструкция полностью погружена в воду при отсутствии волнения и течения. При этом на ее элементы дей-

ствуют только гидростатические и гравитационные силы, а гидродинамические силы отсутствуют. Условимся, что сечение горизонтальной плоскостью в любой точке конструкции представляет собой окружность. Примем, что ячей сетной части имеет ромбическую форму с переменным шагом ячей вдоль оси, перпендикулярной плоскости сечения (рисунок 2.1). Предложенная далее дискретная расчетная схема позволяет свести задачу к псевдо-двумерному случаю и тем самым уменьшить трудоемкость вычислений.

При обосновании расчетной схемы используем систему координат, в которой ось OR (радиальная) направлена от точки окружности к ее центру, ось OH (осевая) направлена вверх, а ось OT (касательная) параллельна по касательной, проходящей через точку окружности (рисунок 2.2). Сетное полотно имеет переменный шаг ячей a вдоль оси OH , а нити сетного полотна абсолютно упруги и обладают определенным модулем упругости E , значение которого известно. Зависимость удлинения нити от силы ее натяжения линейна и подчиняется закону Гука [12]. Нити жестко связаны в узлах без возможности проскальзывания внутри узла.

Разобьем сетное полотно на ряды по ячейкам вдоль оси OH так, чтобы плоскости сечения каждого ряда проходили через узлы сетного полотна и были параллельны плоскости ORT системы координат. Пронумеруем ряды снизу от 0 до $2m$, где m – количество ячеек по высоте как показано на рисунке 2.3. Ряды 0 и $2m$ находятся на нижней и верхней кромке соответственно.

Рассмотрим произвольный ряд $i=[0..2m]$. Свяжем геометрические параметры внутри ряда (рисунки 2.4, 2.5).

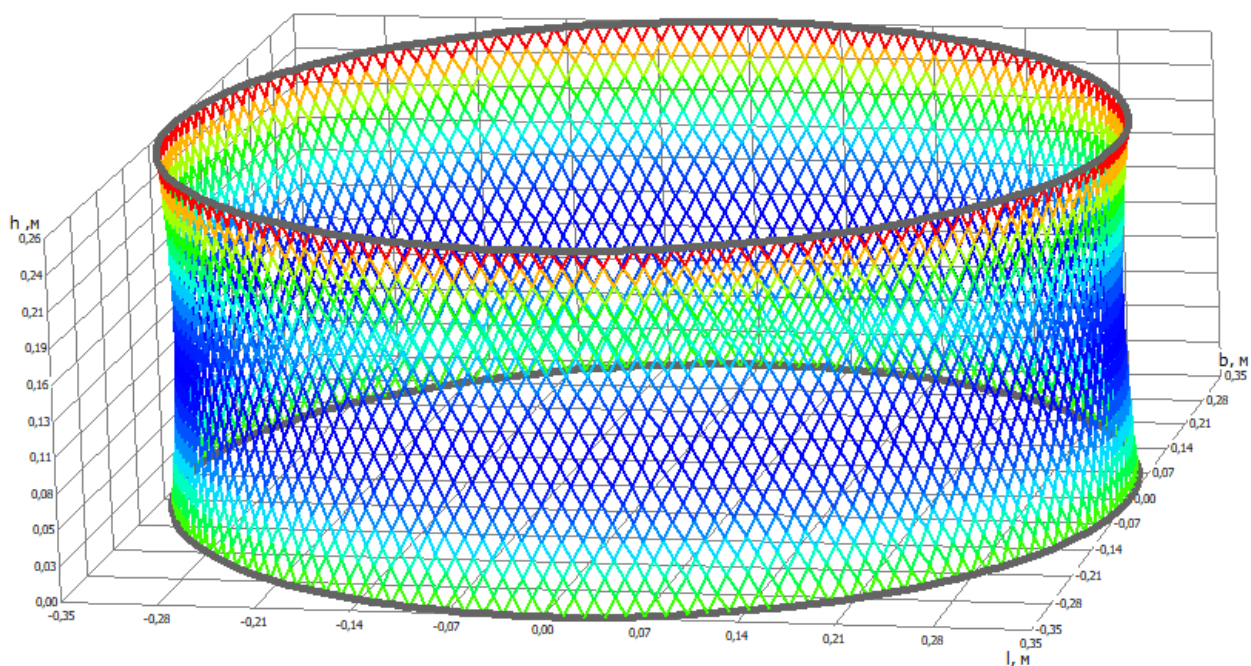


Рисунок 2.1 – Цилиндрическая сетная конструкция

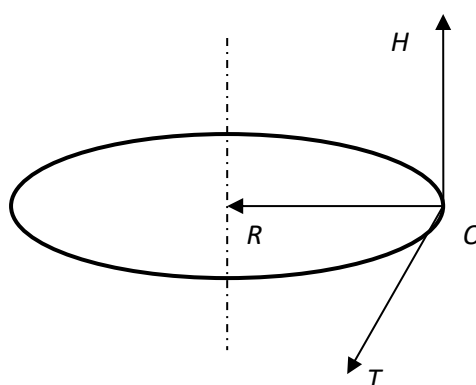


Рисунок 2.2 - Расчетная система координат

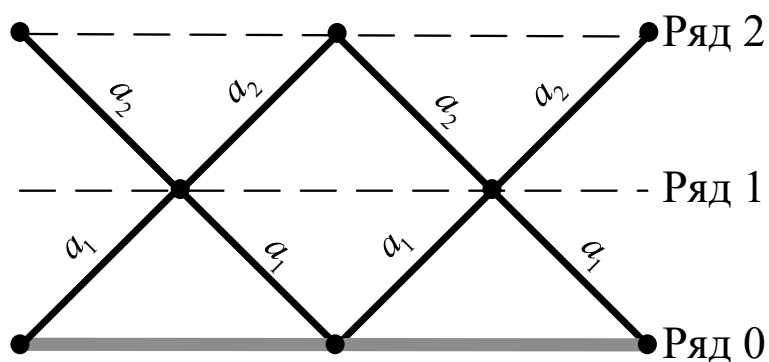


Рисунок 2.3 - Нумерация рядов сетного полотна

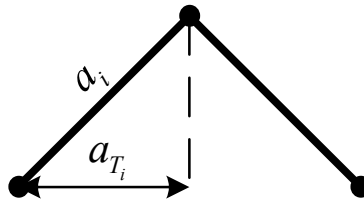


Рисунок 2.4 - Часть ячейки i -го ряда в плоскости ячейки

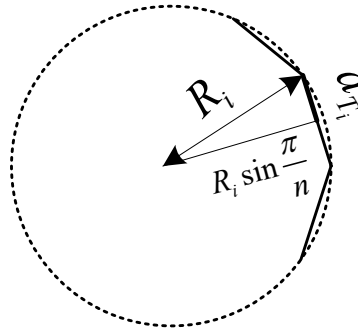


Рисунок 2.5 - Геометрические параметры i -го ряда в плоскости ORT

Рассмотрев сечение сетного полотна плоскостью, проходящей через ось вращения, свяжем геометрические параметры соседних рядов (рисунок 2.6):

$$a_{R_i} = R_i \cos \frac{\pi}{n} - R_{i+1}, \quad a_{T_i} = R_i \sin \frac{\pi}{n}, \quad (2.1)$$

$$a_i^2 = a_{T_i}^2 + a_{H_i}^2 + a_{R_i}^2 \quad (2.2)$$

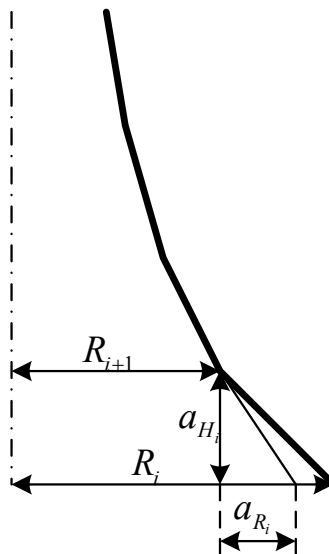


Рисунок 2.6 - Геометрические параметры соседних рядов

В (2.1), (2.2) и на рисунках 2.4 - 2.6 использованы следующие обозначения: a_i – длина нити i -того ряда после деформации, вызванной растяжением; $a_{R_i}, a_{H_i}, a_{T_i}$ – проекции нити на оси; R_i – радиус описывающей окружности i -го ряда (координата R); n – количество ячеей по окружности; i – номер ряда, $i = [0...2m]$, где m – количество ячеей по высоте сетного полотна.

Свяжем силовые и геометрические параметры для i -го ряда:

$$a_i = a_{0_i} \left(1 + \frac{4T_i}{\pi E d^2} \right) \quad (2.3)$$

где a_{0_i} – длина нити i -того ряда до деформации; E – модуль упругости; d – диаметр нити.

Запишем уравнения равновесия сил для узлов соседних рядов. В состоянии равновесия сумма внутренних и внешних сил, приложенных к узлу, равна нулю. В рассматриваемой постановке задачи внутренними силами будем считать силы натяжения в нитках сетного полотна, а внешними – гидростатические и гравитационные силы, сосредоточенные в его узлах (рисунки 2.7, 2.8).

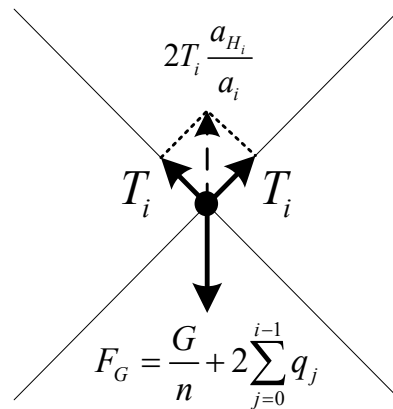


Рисунок 2.7 - Проекция сил, приложенных к узлу, на плоскость OTH

$$F_{H_i} = 0 \text{ при } F_{H_i} = 2T_i \frac{a_{H_i}}{a_i} - \left(\frac{G}{n} + 2 \sum_{j=0}^{i-1} q_j \right), \quad (2.4)$$

$$T_i \frac{a_{R_i}}{a_i} = T_{i+1} \frac{R_{i+1} - R_{i+2} \cos \frac{\pi}{n}}{a_{i+1}}, \quad (2.5)$$

где G – вес нижнего обруча с грузом (сила тяжести за вычетом гидростатической силы); q_j – вес нити j -го ряда; F_{H_i} – осевая проекция результирующей силы, приложенной к узлу i -го ряда; T_i – сила натяжения нити i -го ряда.

На каждый узел действует сила F_G , которой противодействуют силы натяжения двух верхних нитей. Сила F_G складывается из веса груза (нижнего обруча) и веса всех нижних нитей с узлами, приходящихся на одну ячею.

Составим из уравнений (2.1-2.4) систему и решим ее относительно неизвестных $R_1, \dots, R_{2m-1}, a_{H_0}, \dots, a_{H_{2m-1}}, T_0, \dots, T_{2m-1}$. Радиусы обручей R_0 и R_{2m} нам известны. В результате получаем систему из $6m-1$ уравнений с $6m-1$ неизвестными. И, наконец, по (2.1) и найденным при решении системы уравнений R_i для каждого ряда найдем a_T и a_R .

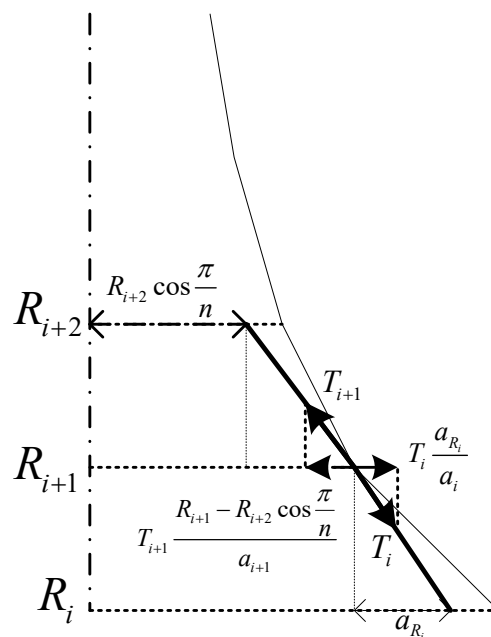


Рисунок 2.8 - Проекция сил натяжения, приложенных к узлу, на плоскость ORH

В результате мы свели задачу из трехмерной постановки к псевдо-двумерной, тем самым уменьшив трудоемкость ее решения.

Рассмотрим цилиндрическую сетную конструкцию с загрузкой (распределенным грузом) известного веса G и объема V , показанную на рисунке 2.9. На рисунке груз выделен серым цветом.

Добавим одно неизвестное H_c – высота груза и одно уравнение:

$$V = \frac{1}{3} \sum_{i=0}^{k-1} a_{H_i} \left(S_i + \sqrt{S_i S_{i+1}} + S_{i+1} \right) + \frac{1}{3} \left(S_k + \sqrt{S_k S_c} + S_c \right) (H_c - H_k), \quad (2.6)$$

где S_i – площадь сечения i -го ряда; S_{i+1} – площадь сечения $i+1$ -го ряда; k – номер ряда, на котором заканчивается груз; S_k – площадь сечения k -го ряда; S_c – площадь сечения на уровне H_c ; H_k – высота ряда k .

Здесь для определения объема груза используется формула нахождения объема правильной усеченной пирамиды. Площадь сечения S_i определяется по формуле расчета площади вписанного правильного многоугольника [22]:

$$S_i = \frac{n}{2} R_i^2 \sin \frac{2\pi}{n}. \quad (2.7)$$

Введем понятие распорной силы F_e , образованной давлением груза. Обозначим F_{e_H} и F_{e_R} проекции распорной силы на оси OH и OR .

Выразим из (2.5) F_{e_R}

$$T_i \frac{a_{R_i}}{a_i} - T_{i+1} \frac{R_{i+1} - R_{i+2} \cos \frac{\pi}{n}}{a_{i+1}} = F_{e_R} \quad (2.8)$$

и подставим для ряда $i=0$: $F_{e_{R_0}} = 0$, а для рядов $i=[1 \dots m-1]$:

$$F_{e_{R_i}} = \frac{P_i}{4} \left(S_{n_i} \frac{a_{H_i}}{a_i} + S_{n_{i-1}} \frac{a_{H_{i-1}}}{a_{i-1}} \right), \quad (2.9)$$

$$S_{n_i} = (R_i + R_{i+1}) \sqrt{a_i^2 - a_{T_i}^2} \sin \frac{\pi}{n}, \quad P_i = \frac{G}{V} e^{kP_{i-1}} g (H_c - H_i), \quad P_0 = 0, \quad (2.10)$$

где P_i – давление груза на уровне i -го ряда; S_{n_i} – площадь сечения i -го ряда.

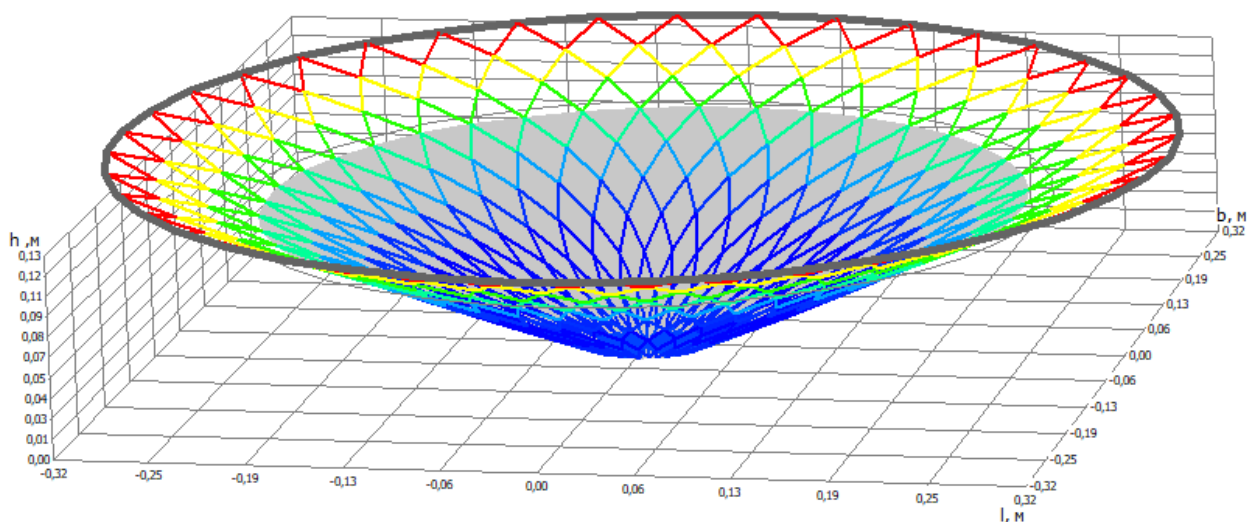


Рисунок 2.9 – Цилиндрическая сетная конструкция с грузом

Решив полученную систему уравнений, найдем искомые неизвестные.

2.3.2 Дискретная расчетная схема ставной сети с использованием интерполяции

Расчетная схема сети с использованием энергетических состояний, описанная в первой главе, обладает одним существенным недостатком, а именно трудоемкостью вычислений. Этот момент становится критичным при необходимости расчета сетей с большим количеством ячеек. Зависимость трудоемкости от количества элементов объекта определяется выбором метода решения системы нелинейных уравнений, который в свою очередь определяется исходя из выполнения условия сходимости. Ведь количество неизвестных в системе уравнений линейно зависит от количества элементов (нитей и узлов) сети. Хорошие результаты по сходимости дает метод Левенберга-Марквардта [11; 57].

Для ускорения процесса расчета можно использовать огрубление, например, с использованием метода подобия [33], применяемого при физическом моделировании. Но любой из методов огрубления неизбежно влечет за собой потерю точности расчета. Поэтому выбор того или иного метода должен осуществляться исходя из условий поставленной задачи.

После расчета уже огрубленной расчетной схемы сети встает вопрос об ее уточнении с целью вычисления искомых силовых и геометрических характеристик, а также для последующей визуализации. Процесс уточнения проводится одним из методов интерполяции [6].

Далее приводятся метод расчета геометрических и силовых характеристик на примере ставной сети, закрепленной двумя оттяжками за верхнюю подбору, в трехмерном пространстве, заключающийся в расчете по базовым точкам (узлам) с последующей интерполяцией для нахождения координат всех узлов. После определения геометрии вычисляются гидродинамические коэффициенты, определяются гидродинамические силы и силы натяжения в нитках сети. Данная расчетная схема обладает погрешностью, приемлемой для большинства задач, что подтверждается сравнительным анализом численных и натуральных экспериментов, описанных в следующих главах.

Предлагаемый метод расчета основан на определении координат узлов ставной сети по известным расчетным параметрам сети, таких как: L_m - расстояние между якорями; L_{ot} - длина наклонной оттяжки; L_{o1}, L_{o2} - горизонтальные проекции первой и второй оттяжек; H_1, H_2 - вертикальные проекции первой и второй оттяжек; l_1, l_2 - горизонтальные проекции первой и второй части сети; h_1, h_2 - вертикальные проекции первой и второй части сети; l_{z2}, h_{z2} - проекции хорд 2-ой части верхней подборы сети, β - угол поворота сети к плоскости Ohb ; θ_1, θ_2 - углы наклона оттяжек к плоскости Olh ; δ_1, δ_2 - углы наклона оттяжек к плоскости Olb . Для нахождения этих параметров можно применить метод расчета, описанный в [31].

Выберем шесть базовых расчетных точек и запишем их координаты в векторной форме (рисунок 2.10):

1. $\bar{X}_{y1} = (0, 0, L_m),$
2. $\bar{X}_{y2} = (0, 0, 0),$
3. $\bar{X}_{ul} = (L_{o1}, H_1, L_m - L_{ot} \cos \theta_1 \sin \delta_1),$

4. $\bar{X}_{u_2} = (L_{o_2}, H_2, L_{ot} \cos \theta_2 \sin \delta_2),$
5. $\bar{X}_{d_1} = (L_{o_1} + l_1 \cos \beta, H_1 - h_1, L_m - L_{ot} \cos \theta_1 \sin \delta_1 + l_1 \sin \beta),$
6. $\bar{X}_{d_2} = (L_{o_2} + l_2 \cos \beta, H_2 - h_2, L_{ot} \cos \theta_2 \sin \delta_2 + l_2 \sin \beta).$

Составим систему уравнений для плоскости в векторной форме [22]:

$$\begin{cases} \bar{K} \bullet \bar{X}_{y_1} = 1 \\ \bar{K} \bullet \bar{X}_{u_1} = 1, \\ \bar{K} \bullet \bar{X}_{u_2} = 1 \end{cases} \quad (2.11)$$

где $\bar{K} = (K_l, K_h, K_b)$ - коэффициенты плоскости, проходящей через три точки X_{y_1}, X_{u_1} и X_{u_2} . В системе уравнений (2.11) символом «•» обозначено скалярное произведение векторов.

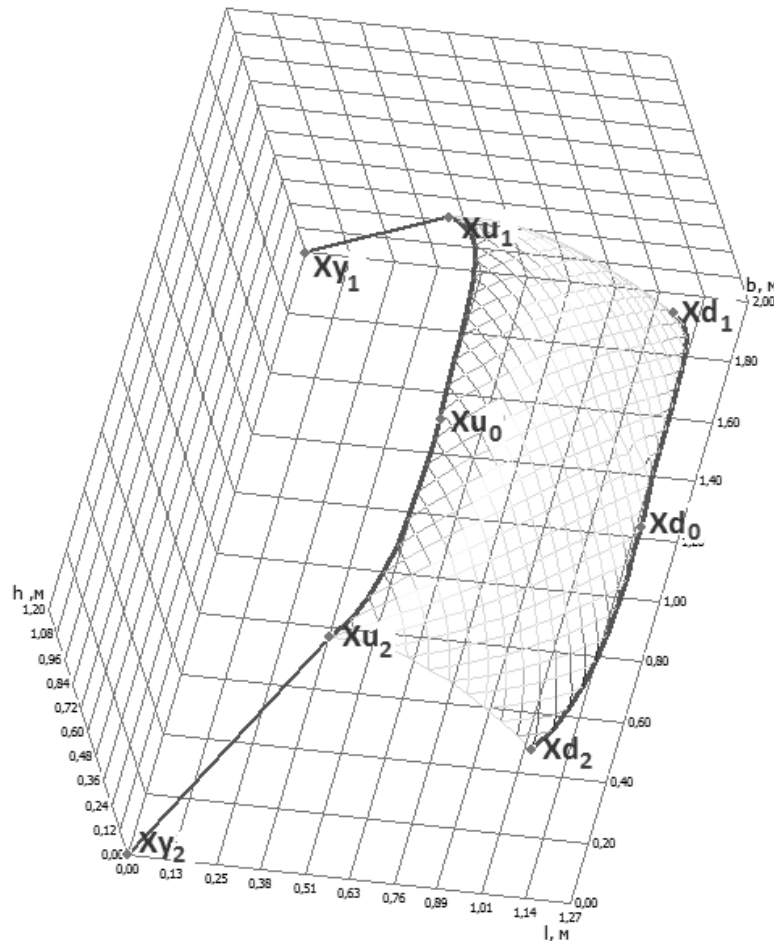


Рисунок 2.10 - Базовые расчетные точки ставной сети

Найдем h -координату точки $\bar{X}_{u_0} = (L_{o_2} + l_{z_2}, X_{u_0h}, L_{ot} \cos \theta_2 \sin \delta_2 + h_{z_2}),$ подставив в систему уравнений плоскости (2.11) две другие ее координаты.

Найдем:

$$\bar{X}_{d0} = (L_{o2} + l_2 \cos \beta + l_{z2}, X_{u0h} - (h_1 + h_2) / 2, L_{ot} \cos \theta_2 \sin \delta_2 + l_2 \sin \beta + h_{z2}). \quad (2.12)$$

Для нахождения координат всех узлов сети воспользуемся следующим интерполяционным методом:

1. Находим координаты всех узлов верхней и нижней подбор.
2. Соединяем каждый узел верхней подборы с соответствующим узлом нижней подборы параболической кривой.
3. Находим координаты всех $2m+1$ узлов на каждой кривой, располагая их через равные расстояния.
4. На получившейся сетке строим нити сети как показано на рисунке 2.11.

Параметры кривой, соединяющей узлы верхней и нижней подбор, определяется из системы параметрических уравнений с промежуточной величиной $t \in [0;1]$:

$$\begin{aligned} l &= l_0 + (l_{2m} - l_0)t \\ h &= h_0 - (h_0 - h_{2m})t^2, \\ b &= b_0 + (b_{2m} - b_0)t \end{aligned} \quad (2.13)$$

где (l_0, h_0, b_0) - точка на верхней подборе; (l_{2m}, h_{2m}, b_{2m}) - точка на нижней подборе.

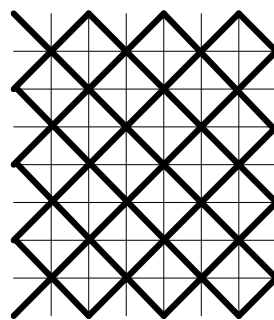


Рисунок 2.11 - Нити, построенные на сетке

Координаты узлов верхней и нижней подбор вычисляются по одному алгоритму. Для верхней подборы примем $(l_0, h_0, b_0) = \bar{X}_{u0}$, $(l_1, h_1, b_1) = \bar{X}_{u1}$, $(l_2, h_2, b_2) = \bar{X}_{u2}$, а для нижней - $(l_0, h_0, b_0) = \bar{X}_{d0}$, $(l_1, h_1, b_1) = \bar{X}_{d1}$, $(l_2, h_2, b_2) = \bar{X}_{d2}$.

Решая систему уравнений (2.14), находим коэффициенты k_1 , k_2 и k_3 .

$$\begin{cases} k_1 b_0^2 + k_2 b_0 + k_3 = h_0 \\ k_1 b_1^2 + k_2 b_1 + k_3 = h_1 \\ k_1 b_2^2 + k_2 b_2 + k_3 = h_2 \end{cases} \quad (2.14)$$

Кривая, проходящая через узлы подборы, определяется параметрическими уравнениями (2.26), (2.27) с промежуточной величиной $t \in [0; 2]$. По этим уравнениям можно найти координаты всех $2n+1$ узлов на кривой, располагая их через равные расстояния.

$$\begin{aligned} l &= (1-t)^2 l_2 + 2t(1-t)l_0 + t^2 l_0 \\ b &= (1-t)^2 b_2 + 2t(1-t)(b_2 + \tan \delta_2 (l_0 - l_2)) + t^2 b_0 \quad | \quad t \leq 1, \\ h &= k_1 b^2 + k_2 b + k_3 \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} l &= (2-t)^2 l_0 + 2(t-1)(2-t)l_0 + (t-1)^2 l_1 \\ b &= (2-t)^2 b_0 + 2(t-1)(2-t)(b_1 - \tan \delta_1 (l_0 - l_1)) + (t-1)^2 b_1 \quad | \quad t > 1. \\ h &= k_1 b^2 + k_2 b + k_3 \end{aligned} \quad (2.16)$$

После того, как геометрия сети определена, можно приступить к расчету сил натяжения в нитках сети. Для каждой нитки найдем ее длину, равную шагу ячеей сети:

$$a = \sqrt{\Delta l^2 + \Delta h^2 + \Delta b^2}, \quad (2.17)$$

где $\Delta l, \Delta h, \Delta b$ - проекции нитки на оси координатной системы.

Нормализуем проекции по длине нитки (2.18), найдем гидродинамические коэффициенты ниток сети [31] и силы гидродинамического сопротивления (2.19).

$$\begin{cases} l_N = \cos\left(\beta + \arccos \frac{\Delta l}{a}\right) \\ b_N = \cos\left(\beta + \arccos \frac{\Delta b}{a}\right), \\ h_N = \frac{\Delta h}{a} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_l = \frac{c_{90}}{2}(1-l_N^2 + (1-l_N^2)^2) + c_0 l_N^2 \\ c_h = c_{90} \frac{l_N h_N^2}{\sqrt{1-b_N^2}} \\ c_b = c_{90} \frac{l_N b_N^2}{\sqrt{1-h_N^2}} \end{array} \right. , \left\{ \begin{array}{l} R_l = c_l \frac{\rho V^2 da}{2} \\ R_h = c_h \frac{\rho V^2 da}{2} \\ R_b = c_b \frac{\rho V^2 da}{2} \end{array} \right. . \quad (2.19)$$

Сила натяжения в нитке сети определяется исходя из значений гидростатических и гидродинамических сил:

$$T = \sqrt{R_l^2 + \left(R_h + \frac{G}{2n} + \frac{q_s}{4n(m+1)} i \right)^2} + R_b^2 , \quad (2.20)$$

где G - вес нижней подборы; q_s - вес ниток сети; n - количество ячеек по ширине сети; m - количество ячеек по высоте сети; i - номер ряда; V - скорость течения; d - диаметр нитки; ρ - плотность воды; c_{90} - коэффициент сопротивления нитки, расположенной перпендикулярно потоку воды; c_0 - коэффициент сопротивления нитки, расположенной параллельно потоку воды.

Разработанный метод расчета позволяет определить силовые и геометрические характеристики ставной сети и крыла ставного невода по известным параметрам, полученным по результатам расчета основных параметров.

2.3.3 Расчет в установившемся состоянии с использованием метода точечных масс на примере ставной сети

Описанная выше расчетная схема сети предполагает, что сеть конструктивно абсолютно регулярна и не имеет разброса в параметрах ячеек. Возможны ситуации, при которых данная расчетная схема обладает погрешностью, неприемлемой по условию некоторых задач. Например, при необходимости учесть разброс в длине ее нитей между узлами, провисания нитей, возможный при длительной эксплуатации.

Расчетная схема, основанная на принципе минимума потенциальной энергии системы, рассмотренная в главе 1, ограничена в применении в случае,

когда при большом количестве элементов орудия рыболовства необходимо получить минимальный отклик решателя расчетного алгоритма. В тех задачах, где необходимо учесть провисание ненатянутых ниток, данная схема неприменима. В качестве примера можно привести сеть на мелководье, когда нижняя ее подбора касается дна или верхняя подбора находится на поверхности водоема. При этом часть ниток сети и одна или обе подборы будут находиться в ненагруженном (нерабочем) состоянии, и расчет даст неверный результат по геометрии орудия рыболовства и распределению нагрузок на его элементы.

Расчетная схема, основанная на огрублении перед и уточнении после расчета, также не позволяет корректно рассчитать описанный выше пример.

К задачам, в которых применение интерполяции неприемлемо, относятся задачи определения селективности сетей и выбора диаметра ниток и канатов исходя из локальных напряжений.

Описываемая ниже дискретная расчетная схема методом точечных масс свободна от указанных недостатков. В методе точечных масс широко используются метод взаимодействующих частиц [63] и метод конечных элементов [10].

Сетные орудия рыболовства состоят из ниток, канатов, веревок, соединенных друг с другом в узлах (канатно-веревочных изделий) и с другими элементами орудия: якорями, буями, вешками и др. В методе точечных масс каждому узлу, якорю, бую, вешке сопоставляется частица (точечная масса), а нитке, веревке, канату (или их части) – связь, описывающая взаимодействие между частицами (силы натяжения и силы противодействия изгибам в веревках и в узлах).

При определенных условиях нитка, веревка, канат могут находиться в ненатянутом состоянии (провисать). Для определения прогиба необходимо знать не только положение в пространстве концов веревки, но и положение точек на самой веревке. Для этого вводятся дополнительные частицы, характеризующие не физическую точку соединения, а некую точку на веревке. Чем больше частиц на веревке, тем точнее будет результат расчета.

Рассмотрим реализацию расчетной схемы на основе метода точечных масс на примере ставной сети с закрепленными оттяжками (рисунок 2.12), находящейся в однородном потоке воды, при трехмерной постановке задачи. Определим основные взаимодействия между элементами сети в виде зависимостей силовых и геометрических характеристик, опишем метод решения уравнений равновесия при неизвестных координатах узлов. Определим внутренние силы взаимодействий методом коррекции координат узлов.

В методе точечных масс применительно к статической постановке задачи состояние физической системы определяется параметрами конечного множества частиц (точечных масс), а эволюция системы - законами их взаимодействия. Каждая частица имеет определенное положение в пространстве. Со стороны внешней среды на каждую частицу действуют внешние силы, зависящие от параметров частицы и внешней среды.

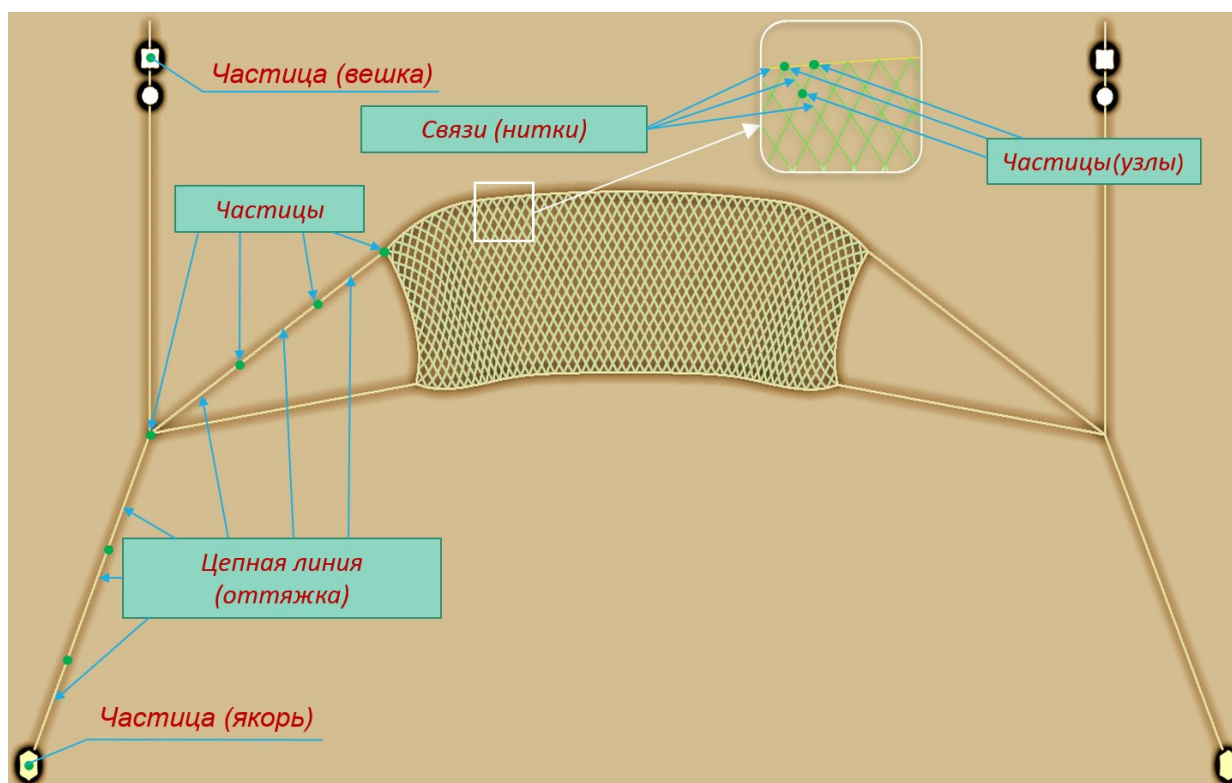


Рисунок 2.12 - Ставная сеть

К внешним силам относятся:

- сила тяжести;

- гидростатическая (архимедова) сила;
- гидродинамическая сила, вызванная движением воды относительно элемента сети.

Кроме внешних сил на каждую частицу от других частиц могут действовать внутренние силы:

- сила натяжения в нитке или веревке;
- сила противодействия изгибу нитки или веревки;
- сила противодействия изгибу в узлах сети.

Взаимодействиям, происходящим между частицами, сопоставляются силы натяжения и противодействия изгибам в веревках, а также силы противодействия изгибам в узлах КВИ. Введение противодействий изгибам необходимо для учета жесткости веревок, когда в КВИ присутствуют веревки различных диаметров или из различных материалов. Противодействие изгибам веревок в узлах вызвано изменением угла между касательными к веревкам в общей узловой точке, относительно угла между ними в свободном состоянии (без приложения внешних сил). Например, если попытаться деформировать ячею сети, то после прекращения действия условий деформации (сил, приведших к деформации) ячея будет стремиться вернуть свою первоначальную геометрию. Данное свойство нельзя учесть только противодействием изгибам веревок, так как при деформации ячеи все веревки могут быть натянуты. При этом сила противодействия изгибу действовать не будет.

Каждому узлу сети сопоставим частицу, а каждой нитке или веревке – связь. Для учета прогиба таких элементов орудия рыболовства, как оттяжки, тросы и канаты, им можно сопоставить цепочку частиц, связанных в цепную линию.

Сосредоточим массы элементов сети в узлах и определим внутренние силы (связи), с которыми узлы воздействуют друг на друга. Основными видами взаимодействий между узлами (рисунок 2.13) являются растяжение и изгиб. Взаимодействие растяжению представляет собой силу натяжения нити.

Взаимодействия изгиба обусловлено изгибом нитей или деформацией ячеей (изгибу в узлах).

На рисунке 2.13 обозначены внутренние силы взаимодействия узлов для одной ячейки. На этом рисунке приведены следующие обозначения: $T_{s,ij}$ - сила противодействия растяжению, с которой узел j воздействует на узел i ; $T_{b,ij}$, $T_{t,ij}$ - силы противодействия изгибу веревки (сила отталкивания) и деформации ячейки (изгиб в узлах) соответственно.

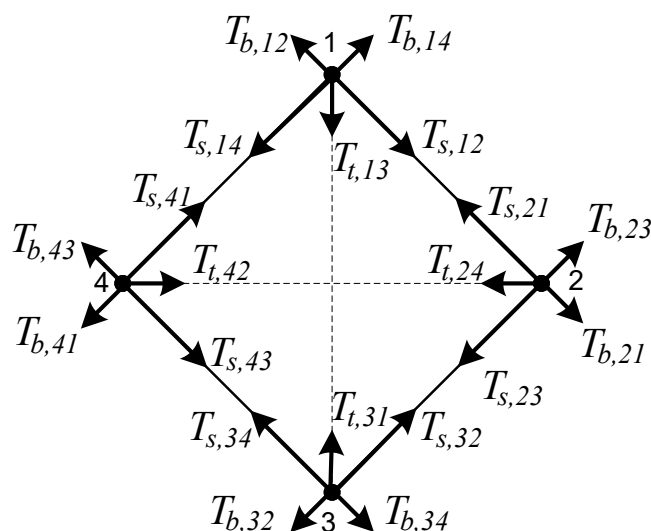


Рисунок 2.13 - Виды взаимодействий

Противодействие растяжению имеет место, когда расстояние между двумя узлами, соединенными нитью, больше длины нити в состоянии покоя. При небольших деформациях, когда напряжения в нитях далеки от предельной разрывной нагрузки, можно использовать линейную аппроксимацию зависимости силы растяжения от удлинения нити [12] (закон Гука) (2.21). Линейная аппроксимация силы значительно уменьшает вычислительные затраты.

$$T_{s,ij} = E_{ij} A_{ij} (D_{ij} - L_{0,ij}) / L_{0,ij}, \text{ при } D_{ij} \geq L_{0,ij}, \quad (2.21)$$

где $L_{0,ij}$ - длина нитки или ее участка в свободном состоянии; D_{ij} - расстояние между узлами i и j ; E_{ij} - модуль упругости нитки; A_{ij} - площадь сечения нитки; $D_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i$ - смещение узла j относительно узла i ; \mathbf{r}_j , \mathbf{r}_i - координаты узлов.

Противодействие изгибу веревки имеет место при расстоянии между двумя узлами, соединенными нитью, меньшим длины нити в состоянии покоя. В общем случае сила противодействия изгибу веревки имеет сложную зависимость от величины изгиба. Но, поскольку ее значение значительно меньше, чем значение силы растяжения, можно использовать линейную зависимость. Для расчета противодействия изгиба нитки введем взаимодействие отталкивания:

$$T_{b,ij} = \mu_{b,ij} (D_{ij} - L_{0,ij}) / L_{0,ij}, \text{ при } D_{ij} < L_{0,ij}, \quad (2.22)$$

где $\mu_{b,ij}$ – линейный коэффициент изгиба.

Для любого узла i в зависимости от типа взаимодействия со стороны узла j одновременно может действовать только одна из сил растяжения или отталкивания. Заменяем эти две силы одной асимметричной силой растяжения-сжатия T_{ij} , действующей при любом значении D_{ij} .

Сила противодействия изгибу в узле так же, как и сила противодействия изгибу самой веревки имеет нелинейную зависимость от угла между соединенными в нем натянутыми веревками, а значит и расстоянием между их концами. Но также, как и в случае (2.22), для определения зависимости силы противодействия изгибу в узле от расстояния между концами соседних веревок можно использовать линейную зависимость. Для расчета противодействия изгибу в узлах (деформации ячеи) добавим связи, образующие диагональ ячейки, между узлами 1-3 и 2-4 (рисунок 2.13):

$$T_{t,ij} = \mu_{t,ij} (D_{ij} - L_{t,ij}) / L_{t,ij}, \quad (2.23)$$

где $\mu_{t,ij}$ – линейный коэффициент сдвига; $L_{t,ij}$ – длина диагонали ячеи в свободном состоянии.

В регулярной сети для пары узлов 1-3 (рисунок 2.13) $L_{t,ij}$ вычисляется по формуле (2.24), а для пары узлов 2-4 – по формуле (2.25)

$$L_{t,ij} = 2au_y, \quad (2.24)$$

$$L_{t,ij} = 2au_x, \quad (2.25)$$

где a – шаг ячеек; u_x, u_y – посадочные коэффициенты по верхней и боковой подборе соответственно.

Для каждого узла составим уравнение равновесия. Для нефиксированных узлов сети (кроме точек крепления оттяжек к грунту) выполняется условие:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{0} \text{ при } \mathbf{F}_i = \sum_{j \in N_i} \left(T_{ij} \frac{\mathbf{D}_{ij}}{D_{ij}} + \frac{\mathbf{R}_{ij}}{2} \right) + \mathbf{G}_i + \mathbf{R}_i, \quad i \in N_f, \quad (2.26)$$

где N_f – множество нефиксированных узлов; N_i – множество узлов, смежных узлу i ; \mathbf{R}_{ij} – вектор силы гидродинамического сопротивления нитки, веревки, каната или их частей между узлами i и j ; \mathbf{G}_i – вес (плавучесть), сосредоточенный в узле i ; \mathbf{R}_i – сила гидродинамического сопротивления узла i .

В уравнении (2.26) для каждого узла i учитывается только половина силы гидродинамического сопротивления, действующей на нитку. Вторая половина силы от этой же нитки учитывается в смежном узле j .

Решением задачи является нахождение неизвестных координат всех нефиксированных узлов и всех внутренних сил T_{ij} . Решим (2.26) численным методом, каждая итерация которого разбита на два этапа:

1. предсказание перемещения узлов при $T_{ij} \mathbf{D}_{ij} / D_{ij} = \mathbf{const}$;
2. нахождение внутренних сил с коррекцией перемещения узлов.

Зададим начальные условия:

1. все внутренние силы равны нулю;
2. начальные координаты всех узлов, кроме фиксированных, равны нулю;
3. координаты фиксированных узлов заданы условием задачи.

Для этапа предсказания перемещения перепишем уравнение (2.26) в виде:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{0} \text{ при } \mathbf{F}_i = \sum_{j \in N_i} \mathbf{f}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) + \mathbf{const}_i, \quad (2.27)$$

где $\mathbf{f}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)$ - функция зависимости силы гидродинамического сопротивления от координат узлов. Второе слагаемое в уравнении является константным вектором, так как $T_{ij} \mathbf{D}_{ij} / D_{ij} = \mathbf{const}$ по условию первого этапа и $\mathbf{G}_i = \mathbf{const}$ из-за неизменности веса в процессе расчета.

Запишем (2.27) в скалярной форме для каждой оси координат:

$$F_{p,i} = 0 \text{ при } F_{p,i} = \sum_{j \in N_i} f_p(r_{x,i}, r_{y,i}, r_{z,i}, r_{x,j}, r_{y,j}, r_{z,j}) + \text{const}_{p,i}. \quad (2.28)$$

Для всех $i \in N_f$ и $p \in [x, y, z]$ решим систему уравнений (2.28) относительно неизвестных r_x, r_y, r_z модифицированным методом Ньютона (методом одной касательной) [57], применив следующую итеративную формулу:

$$\sum_{k \in N_i \cap N_f} \left(\sum_{q \in [x, y, z]} \frac{r_{q,k}^{[J+1]'} - r_{q,k}^{[J]}}{r_{q,k}^{[J]} - r_{q,k}^{[J-1]}} \right) = - \frac{F_{p,i}^{[J]}}{F_{p,i}^{[J]} - F_{p,i}^{[J-1]}}, \quad (2.29)$$

где $J = [2 \dots]$ – номер итерации. Положив

$$\frac{F_{p,i}^{[J]}}{F_{p,i}^{[J]} - F_{p,i}^{[J-1]}} = b_{p,i}, \quad \frac{r_{q,k}^{[J+1]'} - r_{q,k}^{[J]}}{r_{q,k}^{[J]} - r_{q,k}^{[J-1]}} = s_{q,k}, \quad (2.30)$$

для всех $i \in N_f$ и $p \in [x, y, z]$ получим систему линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{k \in N_i \cap N_f} \left(\sum_{q \in [x, y, z]} s_{q,k} \right) = -b_{p,i}. \quad (2.31)$$

Решаем систему (2.31) относительно переменных $s_{q,k}$ численным методом Якоби [22] по итеративной формуле:

$$s_{q,k}^{[I+1]} = s_{q,k}^{[I]} - b_{p,i} - \sum_{k \in N_i \cap N_f} \left(\sum_{q \in [x, y, z]} s_{q,k} \right), \quad (2.32)$$

при условии завершения:

$$\frac{1}{3|N_i \cap N_f|} \sum_{k \in N_i \cap N_f} \left(\sum_{q \in [x, y, z]} |s_{q,k}^{[I+1]} - s_{q,k}^{[I]}| \right) < \varepsilon_s, \quad (2.33)$$

где ε_s - заданная максимальная погрешность, $I = [1 \dots]$ – номер итерации.

Подставив $s_{q,k}$ в (2.30) находим $r_{q,k}^{[J+1]'}$. На этом первый этап итерации (2.29) завершается.

На втором этапе находится T_{ij} для следующей итерации и выполняется коррекция перемещения $r_{q,k}^{[J+1]'} \rightarrow r_{q,k}^{[J+1]}$ с использованием метода стягивания узлов к центру масс. Метод использует следующие итеративные формулы:

$$\bar{r}_i^{[I+1]} = \bar{r}_i^{[I]} + h_r \sum_{j \in N_i} \Delta T_{ij} \frac{\bar{D}_{ij}}{D_{ij}} (m_i^{-1} + m_j^{-1}), \quad (2.34)$$

$$T_{ij}^{[I+1]} = T_{ij}^{[I]} + \Delta T_{ij}, \quad (2.35)$$

где ΔT_{ij} - невязка внутренней силы для связи между узлами i и j ; $m_i^{-1} = 1/m_i$, $m_j^{-1} = 1/m_j$ - обратные массы узлов; h_r - масштабный коэффициент, зависящий от соотношения длины нити сети к максимальной силе в процессе расчета.

Формула (2.34) применяется ко всем узлам, а формула (2.35) ко всем связям. Невязка внутренней силы находится по формуле:

$$\Delta T_{ij} = \frac{L_{0,ij} + \Delta L_{ij} - D_{ij}}{h_r (m_i^{-1} + m_j^{-1}) \max(|N_i|, |N_j|)}, \quad (2.36)$$

где ΔL_{ij} - удлинение связи в результате взаимодействия инцидентных ей узлов.

Деление на $\max(|N_i|, |N_j|)$ (максимальную мощность двух множеств) в (2.47) необходимо для обеспечения сходимости алгоритма.

В зависимости от типа взаимодействия удлинение вычисляется по разным зависимостям:

$$\Delta L_{ij} = \frac{T_{ij}^{[I]}}{E_{ij} A_{ij}}, \quad \Delta L_{ij} = \frac{T_{ij}^{[I]}}{\mu_{t,ij}}, \quad \Delta L_{ij} = \frac{T_{ij}^{[I]}}{\mu_{b,ij}}. \quad (2.37)$$

Начальными условиями для алгоритма являются: $\bar{r}_i^{[1]} = \bar{r}_i^{[J+1]'}$ для всех узлов; $T_{ij}^{[1]} = 0$ для всех связей. Значения $\bar{r}_i^{[J+1]'}$ вычисляются на этапе предсказания перемещения узлов.

Условие завершения второго этапа: $|\Delta T_{ij}| < \varepsilon_f$, где ε_f - максимальная погрешность вычисления сил.

Результатами работы алгоритма являются координаты узлов и внутренние силы, полученные на последней итерации (2.34), (2.35). Координаты узлов $\bar{r}_i^{[J+1]}$ используются на следующей итерации предсказания перемещения.

Для фиксированных узлов обратная масса $m_i^{-1} = 0$. Если по условию задачи масса узлов не известна, узлам присваивается фиктивная обратная масса:

$$m_i^{-1} = \begin{cases} 0, & i - \text{фиксированный узел} \\ 1, & i - \text{нефиксированный узел} \end{cases} \quad (2.38)$$

Для начала работы алгоритма необходимо знать значения \bar{r}_i и T_{ij} на итерациях $J=1$ и $J=2$. При этом если T_{ij} на обеих итерациях могут быть нулевыми, то для координат должно выполняться условие $\bar{r}_i^{[1]} \neq \bar{r}_i^{[2]}$ (2.30). Для выполнения этого условия вычислим координаты всех нефиксированных узлов на второй итерации по формуле:

$$\bar{r}_i^{[2]} = \bar{r}_i^{[1]} + h_r \bar{F}_i^{[1]}. \quad (2.39)$$

где h_r - масштабный коэффициент, зависящий от соотношения длины нити сети к максимальной силе в процессе расчета.

В прямоугольной декартовой системе координат, в которой ось x направлена по направлению скорости течения, а ось z - вверх, проекции гидродинамических сил на узел от каждой нитки сетного полотна определяются по зависимостям:

$$\begin{aligned} R_{(x)} &= \frac{\pi}{4} \left(c_0 + (c_{90} - c_0) \frac{\sqrt{D_{ij(y)}^2 + D_{ij(z)}^2}}{a} \right) da \rho v^2, \\ R_{(y)} &= \frac{\pi}{4} c_{90} \frac{D_{ij(x)} D_{ij(y)}}{D_{ij(x)}^2 + D_{ij(y)}^2} da \rho v^2, \\ R_{(z)} &= \frac{\pi}{4} c_{90} \frac{D_{ij(x)} D_{ij(z)}}{D_{ij(x)}^2 + D_{ij(z)}^2} da \rho v^2, \end{aligned} \quad (2.40)$$

где d - диаметр нитки; v - скорость потока воды; ρ - плотность воды; c_0 и c_{90} - гидродинамические коэффициенты.

Гидродинамические коэффициенты находятся по формулам [31]:

$$c_0 = F_o \text{Re}^{-0.165}, \quad c_{90} = 16 \left(\frac{2F_o}{\text{Re}} \right)^{0.28}, \quad \text{Re} = \frac{d}{\nu} v, \quad (2.41)$$

где F_o - сплошность сети; Re - число Рейнольдса для сети; ν - кинематическая вязкость воды.

Аналогично определяются гидродинамические силы сопротивления участка подбор между узлами i и j . Для верхней подборы в (2.40) используем подстановки: $d=d_G$; $a=2au_x$. Для нижней подборы: $d=d_G$; $a=2au_x$.

Рассчитаем гидродинамическую силу сопротивления вешки, применив эмпирические зависимости для цилиндра. В векторной форме:

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_v = \frac{1}{2} b_v k_v \left(\frac{d_v v}{\nu} \right)^{-0.16} v v \rho d_v h_v, \quad (2.42)$$

где d_v - диаметр пенопласта вешки, h_v - высота пенопласта вешки, $b_v=3,0$ - коэффициент для гладкого цилиндра [31], k_v - поправочный коэффициент, определяющий удлинение цилиндра:

$$k_v = \frac{1}{1 + (d_v / h_v)^{1/3}}. \quad (2.43)$$

Алгоритм реализации на ЭВМ, а также результаты численного эксперимента, проведенного с использованием описанной математической модели, описаны в следующем разделе.

2.3.4 Расчет крыла ставного невода с жестким каркасом

Одной из основных задач для эффективного промысла является разработка методик расчета ставного невода как при отсутствии течений, так и при их наличии; определение экспериментальных коэффициентов держащей силы различных типов якорей.

Рассмотрим приложение описанной дискретной расчетной схемы применительно к крылу ставного невода с жестким каркасом. Верхняя и нижняя подбора крыла жестко закреплена на сваях. На верхней подборе крыла расположены оснастка и плав, нижняя подборка подгружена (рисунок 2.14).

Определим точки крепления подбор к сваям как фиксированные узлы с заранее известными пространственными координатами.

Определим внешние силы \mathbf{F}_i для нефиксированных узлов. В векторной форме для верхней подборки получим:

$$\mathbf{F}_i = 2au_x\mathbf{Q} + \mathbf{R}_{Qi}, \quad (2.44)$$

где u_x - посадочный коэффициент по верхней подборке; a - шаг ячеей; \mathbf{Q} - погонная плавучесть верхней подборки; \mathbf{R}_{Qi} - сила гидродинамического сопротивления, действующая на узел i верхней подборки.

Для нижней подборки получим:

$$\mathbf{F}_i = 2au_x\mathbf{G} + \mathbf{R}_{Gi}, \quad (2.45)$$

где \mathbf{G} - погонный вес в воде нижней подборки; \mathbf{R}_{Gi} - сила гидродинамического сопротивления, действующая на узел i нижней подборки.

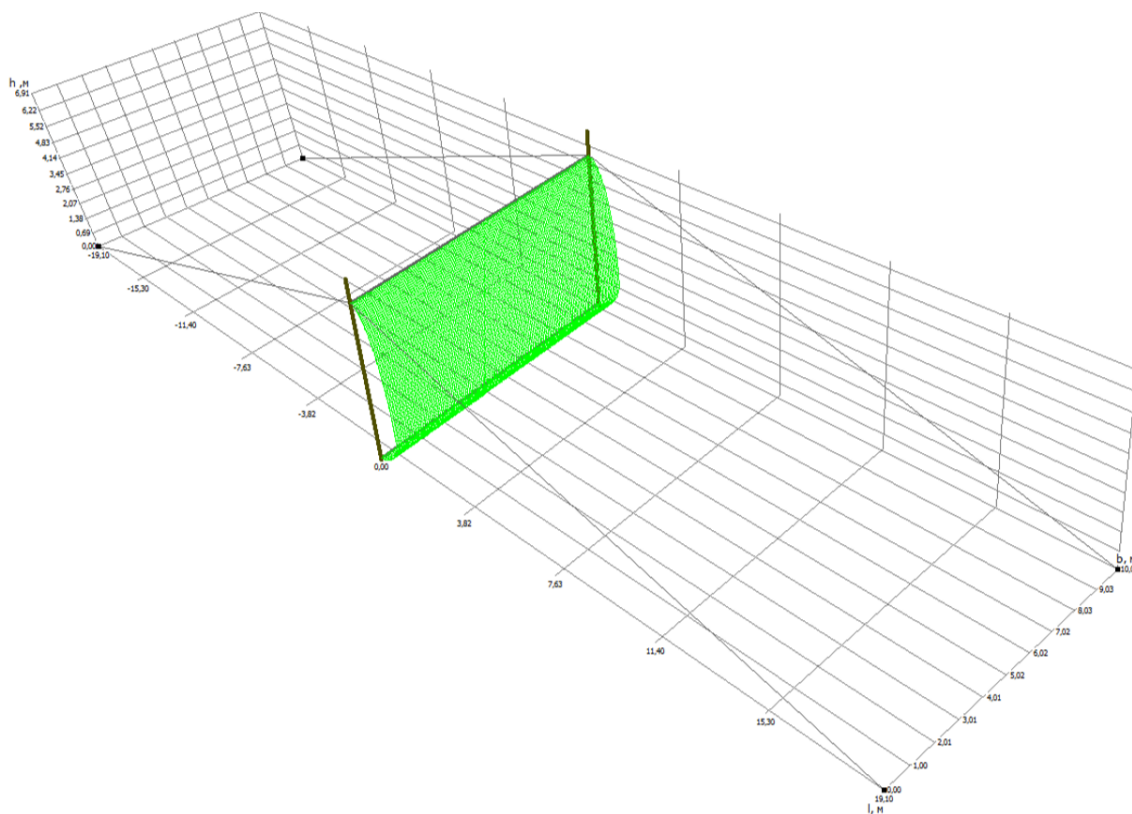


Рисунок 2.14 - Крыло ставного невода с жестким каркасом

Расчет силовых и геометрических характеристик проводится аналогично ставной сети.

2.3.5 Расчет крыла ставного подвешного невода

Рассмотрим приложение описанной расчетной схемы применительно к крылу ставного подвешного невода. На верхней подборе крыла расположены оснастка и плав, нижняя подборка подгружена (рисунок 2.15). Крыло ставного невода закреплено при помощи горизонтальных и наклонных оттяжек к якорю. На горизонтальных оттяжках расположен плав.

Определим внешние силы для узлов F_i . Для точек соединения нижней подборки и вертикальной оттяжки с якорем:

$$F_i = G_B, \quad (2.46)$$

где G_B – вес якоря вертикальной оттяжки.

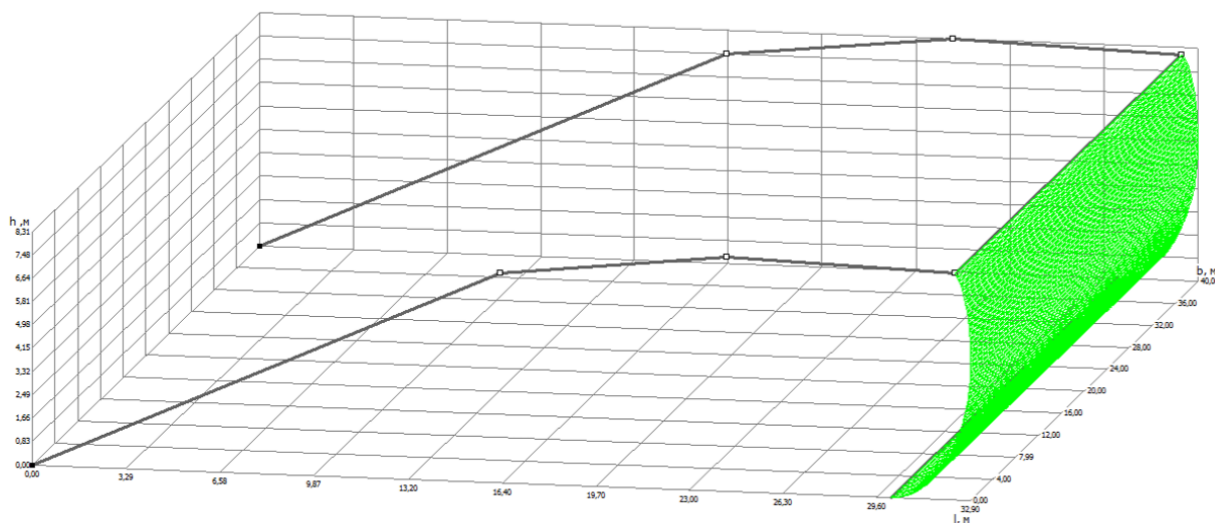


Рисунок 2.15 - Крыло ставного подвешного невода

Для плавов на горизонтальных оттяжках:

$$F_i = Q_v + R_v, \quad (2.47)$$

где Q_v - плавучесть плава; R_v - сила гидродинамического сопротивления плава.

Для якоря на наклонной оттяжке:

$$F_i = G_H, \quad (2.48)$$

где G_H – вес якоря наклонной оттяжки.

Внешние силы для верхней и нижней подбор определим аналогично крылу ставного невода с жестким каркасом. Гидродинамическую силу сопротивления плавов определим аналогично вешкам для сети.

2.4 Постановка задачи расчета сетных орудий рыболовства в динамике

Выше были рассмотрены различные дискретные расчетные схемы сетных орудий рыболовства в установившемся режиме (при статической постановке задачи). Не любой процесс и не при любых условиях можно рассмотреть в статике. Например, для задач анализа раскрытия плавной сети и определения пиковых нагрузок на ее элементы во время сплава в условиях волнения или изменяющегося течения необходимо производить расчет в динамике. Для задач, в которых необходимо определить процесс срыва якоря, которым орудие рыболовства удерживается от перемещения, из-за сильного течения, волнения или шторма, также необходим расчет в динамике. К таким задачам также относятся расчет перемещения орудия рыболовства при трении его частей о грунт.

Для определения силовых и пространственно-временных характеристик орудия при неравномерном в пространстве и изменяющемся во времени водном течении необходимо знать мгновенные силы, действующие на каждый его элемент.

При дискретном методе расчета [19; 37; 40; 46] с учетом строения орудия его математическая расчетная схема условно представляется множеством дискретных элементов, способных обрабатываться по одному алгоритму.

Для стационарных орудий рыболовства, таких как ставные неводы и сети, для корректного определения их пространственно-временных характеристик, а также пиковых напряжений в условиях волнения и шторма, необходимо выполнять расчет при динамической постановке задачи.

Отличиями при построении расчетной схемы при динамической постановке задачи от задач моделирования в статике являются:

- необходимость учета времени;
- учет скорости перемещения элементов орудия рыболовства;
- учет массы элементов орудия рыболовства.

2.5 Расчетные схемы сетных орудий рыболовства при динамической постановке задачи

Для решения задачи моделирования процессов, проходящих в орудии рыболовства, в динамике необходимо решить систему дифференциальных уравнений движения. Далее будет рассмотрена расчетная схема, основанная на методе точечных масс [63], описанном в разделе 2.3.4.

Данная расчетная схема хорошо подходит для реализации на ее основе имитационных алгоритмов различных сетных орудий рыболовства при динамической постановке задачи на современных ЭВМ широкого применения. Это прежде всего связано с возможностью ее оптимизации методом распараллеливания вычислений для современных многоядерных и гетерогенных систем [1; 73], к которым относится большинство персональных компьютеров.

2.5.1 Дискретные расчетные схемы сетных орудий рыболовства методом точечных масс при динамической постановке задачи

Начнем рассмотрение предложенной расчетной схемы с расчета обобщенного канатно-веревочного изделия (КВИ), состоящего из множества соединенных в узлах ниток и веревок, и находящегося под действием изменяемых во времени внешних сил. Далее, перейдем к приложениям для расчета конкретных орудий рыболовства и их элементов, таких как плавная сеть и крыло ставного подвешного невода.

Примем следующие упрощения:

1. Массы веревок и узлов сосредоточены в узлах;
2. Силы, действующие на узлы и веревки, приложены только к узлам;

3. Веревка считается абсолютно эластичной, при ее изгибе силы трения и поверхностного натяжения не учитываются;

4. Учитывается только скорость узлов;

5. Между двумя соседними шагами расчета скорость изменяется линейно.

Представим замкнутую систему как множество элементов (веревки), связанных между собой в узлах. Каждый элемент (веревка) имеет следующие параметры:

- сила натяжения T ;
- длина в свободном состоянии ($T=0$) L ;
- коэффициент упругости K_E ;
- диаметр веревки d ;
- вес в расчетной среде G ;
- номера узлов, присоединенных к элементу (концам веревки) n_1, n_2 .

Коэффициент упругости (согласно закона Гука) и вес G определим по формулам:

$$K_E = \frac{4}{Ed^2}, \quad (2.49)$$

$$G = \frac{\pi(\rho - \rho_w)gLd^2}{4}, \quad (2.50)$$

где E – модуль упругости (модуль Юнга); g – ускорение свободного падения; ρ - плотность материала элемента; ρ_w - плотность среды (воды).

Каждый узел имеет следующие параметры: координаты узла в пространстве $\bar{X} = (x, y, z)$; масса элементов, сосредоточенная в узле m ; вектор внешней силы, приложенной к узлу \bar{F}_e ; вектор скорости движения узла \bar{V} .

Масса m_i в воздухе определяется по формуле:

$$m_i = \frac{\pi g}{8n} \sum_{j=1}^n \rho_{ij} L_{ij} d_{ij}^2, \quad (2.51)$$

где n – количество элементов, присоединенных к узлу; ρ_i, L_i, d_i – плотность, длина и диаметр i -го элемента.

При расчете в водной среде необходимо вычислять m_i с учетом присоединенной массы [52].

Обратные массы $1/m_i$ фиксированных узлов равны нулю.

Пусть в системе находятся k элементов, связанных между собой в n узлах. Состоянием системы назовем вектор $\mathbf{Z} = (\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_n, \mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n, T_1, \dots, T_k)$ размерностью $6n+k$. Здесь \mathbf{X} – координаты узлов, \mathbf{v} – скорости узлов, а T – силы внутренних связей (натяжений). При этом из множества всех возможных состояний выделим подмножество разрешенных.

Является ли состояние \mathbf{Z} разрешенным, определяется функцией ограничений $R(\mathbf{Z})$ такой, что

$$\lim_{\mathbf{Z} \rightarrow \mathbf{Z}_R} R(\mathbf{Z}) = \mathbf{0}, \quad (2.52)$$

где \mathbf{Z}_R - одно из разрешенных состояний.

Пусть на систему действуют внешние силы \mathbf{F}_e , зависящие от ее состояния и параметров внешней среды:

$$\mathbf{F}_e = f(\mathbf{Z}, \mathbf{E}), \quad (2.53)$$

где \mathbf{E} - вектор параметров внешней среды, таких как скорость и направление течения, плотность среды, вязкость среды и т.д.

Расчет в динамике дискретен по времени. С течением времени система последовательно переходит из одного разрешенного состояния в другое:

$$\mathbf{Z}_0 \rightarrow \mathbf{Z}_1 \rightarrow \mathbf{Z}_2 \rightarrow \dots \rightarrow \mathbf{Z}_n, \text{ где } \mathbf{S}_0 - \text{ начальное состояние.}$$

Процесс расчета прекращается при выполнении одного из заданных условий $C_i(\mathbf{Z})$ или может протекать бесконечно ($n = \infty$).

Переход $\mathbf{Z}_i \rightarrow \mathbf{Z}_{i+1}$ назовем расчетным шагом. Зададим временной интервал всех шагов одинаковым $t = const$ и рассмотрим метод, находящий все \mathbf{Z}_i по зависимости внешних сил от состояния (2.53) при условиях

$$|R(\mathbf{Z}_i)| \leq \varepsilon_X, \quad (2.54)$$

где ε_X – заданная максимальная погрешность перемещений.

Сосредоточим массы и веса всех участков КВИ в узлах графа. Составим дифференциальные уравнения движения и определим начальные условия для каждого узла $i \in N$ [47]:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \frac{\mathbf{F}_i}{m_i}, & \mathbf{v}_i(0) = \mathbf{0} \\ \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{v}_i, & \mathbf{r}_i(0) = \mathbf{r}_{0,i} \end{cases}, \quad (2.55)$$

где \mathbf{F}_i – сила, действующая на узел; \mathbf{v}_i – скорость узла i ; \mathbf{r}_i – координаты узла i ; $\mathbf{r}_{0,i}$ – начальные координаты узла i ; t – время процесса.

Для каждого узла представим \mathbf{F} как сумму всех внутренних и внешних сил, действующих на узел через прикрепленные к нему элементы. При этом \mathbf{F}_i зависит только от T , а \mathbf{F}_e от \mathbf{r} , \mathbf{v} и параметров внешней среды \mathbf{E} .

$$\mathbf{F} = \sum (\mathbf{F}_i(T) + \mathbf{F}_e(\mathbf{r}, \mathbf{v}, \mathbf{E})) \quad (2.56)$$

Введем следующие зависимости:

$$\mathbf{S}(\mathbf{F}, \mathbf{v}) = \mathbf{v}\Delta t + \frac{\mathbf{F}\Delta t^2}{4m}, \quad (2.57)$$

$$\mathbf{v}(\mathbf{S}) = \mathbf{S} / \Delta t, \quad (2.58)$$

$$\mathbf{r}^{[k]} = \mathbf{r}^{[k-1]} + \mathbf{S}, \quad (2.59)$$

где m – масса элементов, сосредоточенная в узле (с учетом присоединенной массы) (2.51); Δt – время шага алгоритма; \mathbf{S} – перемещение узла за текущий шаг; \mathbf{v} – средняя скорость на текущем шаге; k – номер расчетного шага.

Зададим начальные условия (на состоянии \mathbf{Z}_0): $T_0 = 0$ для всех элементов; $\mathbf{v}_0 = \mathbf{0}$ для всех узлов; \mathbf{r}_0 для всех узлов, задаются алгоритмом начального размещения, например (0,0,0). В случае, если $\mathbf{r}_0 \neq \mathbf{0}$, необходимо задавать реальные значения координат. Иначе, из-за срабатывания ограничений по длине элементов появятся ошибочные начальные силы натяжений. Это приведет к возникновению неопределенных начальных скоростей и, как следствие, ошибки расчета.

Каждый расчетный шаг можно разбить на два этапа: предсказание перемещения и коррекция перемещения. На первом этапе вначале для каждого i -го

элемента (веревки) вычисляются внешние силы $\mathbf{F}\mathbf{e}_i = f(\mathbf{D}, \mathbf{v}, \mathbf{E})$. Далее, по формуле (2.57) определяются перемещение за текущий шаг для всех узлов без учета ограничений $R(\mathbf{Z}_i)$, а по формуле (2.59) вычисляются ожидаемые координаты узлов в конце шага.

Этап коррекции перемещения итерационно-сходящийся и аналогичен соответствующему этапу в статической постановке задачи, описанной ранее. При этом

$$|R(\mathbf{Z}_{i-1})| > |R(\mathbf{Z}_i)|. \quad (2.60)$$

На каждой итерации осуществляется коррекция перемещения путем пересчета внутренних сил. Для каждого элемента (нитки, веревки или ее части в случае цепной связи) применяется только одно ограничение на длину элемента. Введем понятие невязки ограничения для элемента:

$$\Delta L = \frac{L(\mathbf{r}) - L_0(T)}{\max(n_1, n_2)}, \quad (2.61)$$

где $L(\mathbf{r})$ – вычисленная по координатам узлов длина элемента, $L_0(T)$ – необходимая длина элемента после деформации, n_1 и n_2 – количество присоединенных к смежным узлам элементов. Параметры n_1 и n_2 необходимы для обеспечения сходимости (2.60).

Примем:

$$L_0(T) = L(1 + TK_E); \quad (2.62)$$

Значение ограничения вычислим по формуле

$$R(\mathbf{Z}) = \frac{\Delta L}{L}. \quad (2.63)$$

Для веревки невязка ограничения пропорциональна уходу ее длины. Чтобы восстановить длину необходимо изменить внутренние силы смежных узлов $\mathbf{F}\mathbf{i}_1$ и $\mathbf{F}\mathbf{i}_2$ так, чтобы на следующей итерации выполнялось условие (2.60). При этом значение невязки и ухода уменьшится.

Введем понятие невязки внутренней силы ΔF . Силы $\mathbf{F}\mathbf{i}_1$ и $\mathbf{F}\mathbf{i}_2$ изменяются на значение этой невязки в направлении вдоль веревки к ее центру (рисунок 2.16) по следующим формулам:

$$\mathbf{F}i_{li+1} = \mathbf{F}i_{li} + \frac{\mathbf{D}}{D} \Delta F, \quad \mathbf{F}i_{2i+1} = \mathbf{F}i_{2i} - \frac{\mathbf{D}}{D} \Delta F \quad (2.64)$$

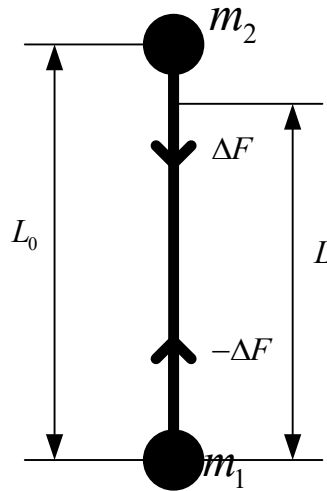


Рисунок 2.16 - Изменение внутренних сил

Невязка внутренней силы вычисляется по формуле:

$$\Delta F = \frac{\Delta L}{\left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) t} \quad (2.65)$$

Одновременно с коррекцией внутренних сил корректируется и сила натяжения веревки:

$$T_{i+1} = T_i + \Delta F \quad (2.66)$$

Для расчета внешних сил гидродинамического сопротивления при статической постановке задачи применялся предварительный поворот орудия рыболовства так, чтобы вектор скорости течения был направлен по оси OX . В случае динамической постановки такой метод не подходит, так как необходимо учитывать скорости каждого узла, направление векторов которых не совпадают. Необходимо осуществлять поворот (прямой и обратный) для каждого элемента.

Опишем метод расчета внешних сил с использованием аффинных преобразований в пространстве (на плоскости при двухмерной постановке задачи)

[16]. Свойства аффинного преобразования в трехмерном пространстве заключаются в следующем:

- n -мерный объект отображается в n -мерный, т.е. точка в точку, линия в линию, поверхность в поверхность;
- сохраняется параллельность линий и плоскостей;
- сохраняются пропорции параллельных объектов — длин отрезков на параллельных прямых и площадей на параллельных плоскостях.

В общем случае любое аффинное преобразование можно задать матрицей линейного оператора над пространством трехмерных векторов \mathbf{M} размерностью 3×3 (определитель которой не равен нулю) и вектором переноса \mathbf{e} :

$$\mathbf{v}' = \mathbf{M}\mathbf{v} + \mathbf{e}, \quad (2.67)$$

где \mathbf{v} — исходный вектор (либо координаты точки), \mathbf{v}' — преобразованный вектор.

Для оптимизации вычислений с использованием центрального либо графического процессоров с применением SIMD-команд (каждая команда обрабатывает несколько данных), в которых одновременно обрабатывается 4 операнда, преобразование (2.67) переписывается в виде:

$$\mathbf{v}' = \mathbf{M}_4 \mathbf{v}, \quad (2.68)$$

где \mathbf{M}_4 — матрица размерностью 4×4 :

$$\mathbf{M}_4 = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & e_x \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & e_y \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & e_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.69)$$

Преобразование (2.68) также можно применять и при перспективном преобразовании (при проецировании трехмерного пространства на плоскость при отображении на экране). При перспективном преобразовании три первые элемента последней строки матрицы (2.69) не будут нулевыми.

Рассмотрим преобразование поворота вектора. Так как при повороте переноса не происходит, то $\mathbf{e}=0$. Вычислим значение матрицы \mathbf{M} .

Скорость потока воды относительно узла:

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v}_a - \mathbf{v}_w, \quad (2.70)$$

где \mathbf{v}_a - абсолютная скорость узла, \mathbf{v}_w - скорость течения.

Единичный вектор \mathbf{e}_{vr} , направленный по направлению \mathbf{v}_r

$$\mathbf{e}_{vr} = \mathbf{v}_r / v_r. \quad (2.71)$$

Введем единичный вектор \mathbf{e}_x , направленный вдоль оси OX . Тогда для преобразование из ортогонального базиса $OXYZ$ в ортогональный базис $OX_rY_rZ_r$, в котором скорость направлена по направлению OX_r , применив (2.67) при $\mathbf{e}=0$ получаем

$$\mathbf{e}_x = \mathbf{M}\mathbf{e}_{vr} \quad (2.72)$$

или

$$\mathbf{M} = \mathbf{e}_x \mathbf{e}_{vr}^{-1}. \quad (2.73)$$

Силы, действующие на отрезок прямой веревки, показаны на рисунке 2.17. Здесь X_1, X_2 – координаты концов веревки (узлов), L – длина веревки, G – вес отрезка веревки в воде, R_x, R_y, R_z - проекции гидродинамических сил на оси координат.

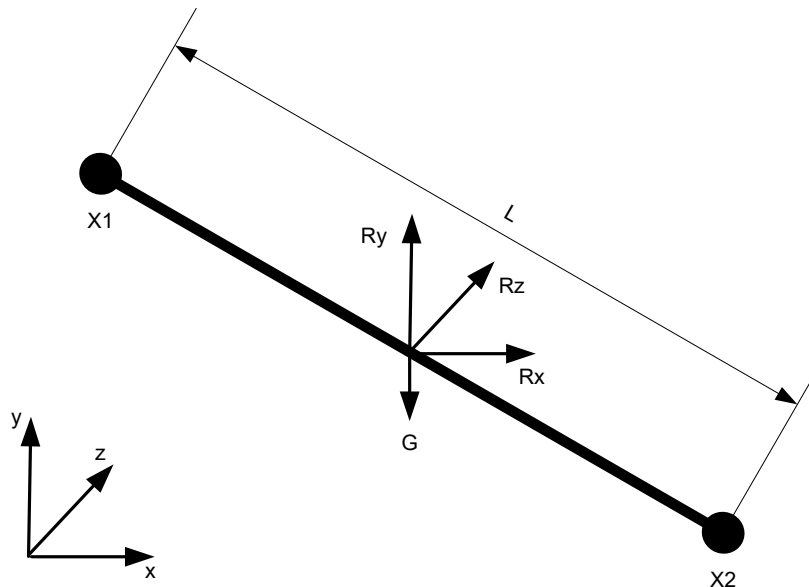


Рисунок 2.17 - Внешние силы, действующие на отрезок веревки

Запишем смещение второго конца веревки относительно первого в базисе $OXYZ$:

$$\mathbf{D} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1. \quad (2.74)$$

Тогда смещение второго конца веревки относительно первого в базисе $Ox_r Y_r Z_r$:

$$\mathbf{D}_r = \mathbf{M}\mathbf{D}. \quad (2.75)$$

Длина веревки:

$$L = \sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2}, \quad (2.76)$$

где D_x, D_y, D_z - проекции смещения на оси координат.

Проекции гидродинамических сил на узел от каждой веревки в базисе $Ox_r Y_r Z_r$ определяются по формулам:

$$\begin{aligned} R_{r,x} &= \frac{\pi}{4} \left(c_0 + (c_{90} - c_0) \frac{\sqrt{D_{r,y}^2 + D_{r,z}^2}}{L} \right) dL \rho_w v_r^2, \\ R_{r,y} &= \frac{\pi}{4} c_{90} \frac{D_{r,x} D_{r,y}}{D_{r,x}^2 + D_{r,y}^2} dL \rho_w v_r^2, \\ R_{r,z} &= \frac{\pi}{4} c_{90} \frac{D_{r,x} D_{r,z}}{D_{r,x}^2 + D_{r,z}^2} dL \rho_w v_r^2, \end{aligned} \quad (2.77)$$

где d - диаметр веревки; v_r - скорость потока воды относительно узла; ρ_w - плотность воды; c_0 и c_{90} - гидродинамические коэффициенты.

Для обратного преобразования из базиса $Ox_r Y_r Z_r$ в базис $OXYZ$ необходимо найти обратную матрицу \mathbf{M}^{-1} . Матрица поворота обладает свойством ортогональности:

$$\mathbf{M}^T \mathbf{M} = \mathbf{M} \mathbf{M}^T = \mathbf{E}, \quad (2.78)$$

где \mathbf{E} – единичная матрица.

Из этого следует, что

$$\mathbf{M}^{-1} = \mathbf{M}^T. \quad (2.79)$$

Результирующая гидродинамических сил, действующая на узел i в базисе $OXYZ$:

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{M}^{-1} \left(\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \mathbf{R}_{r,ij} \right), \quad (2.80)$$

где $\mathbf{R}_{r,ij}$ - сила, действующая от веревки между узлами i и j , n – количество веревок, связанных с узлом i .

Внешняя сила, действующая на узел:

$$\mathbf{F}_e = \mathbf{R}_i + \mathbf{Q} + \mathbf{G}, \quad (2.81)$$

где \mathbf{Q} – вектор гидростатической силы (для воздуха $\mathbf{Q}=0$); \mathbf{G} – вектор силы тяжести, при OY , направленной вверх:

$$\mathbf{G}=(0,-mg,0). \quad (2.82)$$

На основе предложенной расчетной схемы можно реализовать алгоритм имитационного моделирования канатно-веревочных изделий в динамике, описание которого будет представлено ниже.

2.5.2 Расчетная схема плавной сети при изменяющемся течении

Рассмотрим одно из приложений метода точечных масс применительно к плавной сети с прямолинейными верхней и нижней подборой, находящейся в потоке воды с изменяющейся во времени скоростью течения. На верхней подборе сети расположены плавы, нижняя подбора подгружена. Сетная оболочка прикреплена поводцами за угловые огоны верхней и нижней подбор к оттяжкам вешек. Каждая оттяжка прикреплена к вешке. Рассмотрим участок сети между двумя вешками.

Пусть поток воды направлен параллельно поверхности воды, перпендикулярно горизонтальным подборам. При таких условиях расчет можно проводить в плоскости, перпендикулярной подборам OXY , то есть в двумерном пространстве. В плоскости OXY сетная оболочка представляет собой кривую. Разобьем кривую на несколько участков и заменим каждый участок отрезком прямой линии как показано на рисунке 2.18.

Чем больше разбиений, тем точнее будет расчетная схема. Поводцы и оттяжку вешки представим в виде дополнительных участков. Добавим узел в соединении оттяжки и поводцов и узел на месте крепления оттяжки к вешке. В

Сила, действующая на узел, определяется из выражения:

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j \in N_i} \left(\mathbf{D}_{ij} \frac{T_{ij}}{D_{ij}} + \frac{\mathbf{R}_{ij} - \overline{(0, G_{ij})}}{2} \right) + \mathbf{F}a_i, \quad (2.83)$$

где \mathbf{R}_{ij} - сила гидродинамического сопротивления, действующая на участок сети между узлами i и j ; \mathbf{D}_{ij} - смещение узла j относительно узла i (2.74); G_{ij} - вес участка сети между узлами i и j ; T_{ij} - сумма сил натяжения всех ниток, пересекающих плоскость, проходящую между узлами i и j параллельно плоскости OXZ ; $\mathbf{F}a_i$ - дополнительная сила, действующая на узел i (от вешки, плавов или сила трения); N_i - множество всех узлов, смежных узлу i по ребру (i,j) .

При расчете ускорений необходимо учесть влияние присоединенной массы. Для упрощения вычислений будем считать присоединенную массу каждой нитки как для цилиндра диаметром, равным диаметру нитки. Присоединенная масса для цилиндра равна массе жидкости в его объеме [52].

Суммарная сила натяжения на участке (i,j) определяется из выражения:

$$T_{ij} = \begin{cases} (D_{ij} / L_{0,ij} - 1) E_{ij} A_{ij}, & \text{при } D_{ij} > L_{0,ij} \\ 0, & \text{при } D_{ij} \leq L_{0,ij} \end{cases}, \quad (2.84)$$

где A_{ij} - сумма площадей поперечного сечения всех ниток, оттяжек или поводцов на участке (i,j) плоскостью, проходящей между узлами i и j параллельно плоскости OXZ ; L_{ij} - длина участка (i,j) при $T_{ij}=0$ (без растяжения); E_{ij} - модуль упругости материала сети (для капрона принят $1,7 \cdot 10^9$ Па).

Найдем для каждого узла m_i и $\mathbf{F}a_i$, а для каждого участка G_{ij} , \mathbf{R}_{ij} и A_{ij} , и подставим их в (2.83) и (2.84).

$$m_i = m_{0i} + \frac{1}{2} \sum_{j \in N_i} \left((\rho_{ij} + \rho) V_{ij} \right), \quad G_{ij} = (\rho_{ij} - \rho) V_{ij} g, \quad (2.85)$$

где ρ_{ij} - усредненная плотность ниток участка (i,j) ; ρ - плотность воды; V_{ij} - объем ниток участка (i,j) ; m_{0i} - собственная масса (с учетом присоединенной) узла i без участков.

Для узлов $i=[1 \dots k-2]$ и $i=k$: $F_i=0$; $m_{0i}=0$. Для узла $i=0$ (нижняя подбора, точка G):

$$\mathbf{F}\mathbf{a}_0 = -\overline{(0, 2Gnau_x)} + \mathbf{v}_{r,0} \frac{R_G}{v_{r,0}} - \overline{(F_f, 0)}, \quad m_{0i} = \frac{2nau_x G(\rho_G + \rho)}{(\rho_G - \rho)g}, \quad (2.86)$$

где G - погонный вес в воде нижней подборы; n - количество ячей по верхней подборе; u_x - посадочный коэффициент по верхней подборе; a - шаг ячее; R_G - сила гидродинамического сопротивления участка нижней подборы; $\mathbf{v}_{r,i}$ - скорость потока воды относительно узла i (2.70); F_f - сила трения нижней подборы о дно водоема; ρ_G - усредненная плотность нижней подборы с загрузкой.

Для узла $i=k-1$ (верхняя подбора, точка Q):

$$\mathbf{F}\mathbf{a}_{k-1} = \overline{(0, 2Qnau_x)} + \mathbf{v}_{k-1,i} \frac{R_Q}{v_{k-1,i}}, \quad m_{0,k-1} = \frac{2nau_x Q(\rho_Q + \rho)}{(\rho - \rho_Q)g}, \quad (2.87)$$

где Q - погонная плавучесть верхней подборы; R_Q - сила гидродинамического сопротивления участка верхней подборы; ρ_Q - усредненная плотность верхней подборы.

Для узла $i=k+1$ (вешка, точка B):

$$\mathbf{F}\mathbf{a}_{k+1} = \overline{(0, 2Q_v)} + \mathbf{v}_{r,k+1} \frac{R_v}{v_{r,k+1}}, \quad m_{0,k+1} = \frac{Q_v(\rho_v + \rho)}{(\rho - \rho_v)g}, \quad (2.88)$$

где Q_v - плавучесть вешки; ρ_v - усредненная плотность вешки; R_v - сила гидродинамического сопротивления вешки.

Для вычисления силы гидродинамического сопротивления R_{ij} используются эвристические зависимости [31; 37], связывающие проекции этих сил на оси декартовой системы координат в базисе $OX_r Y_r$, в котором ось абсцисс направлена по вектору скорости \mathbf{v}_r с проекциями участка сети в том же базисе. Преобразования выполняются согласно (2.75) и (2.87).

Матрица поворота для каждого узла i находится по формулам:

$$\mathbf{M}_i = \begin{pmatrix} \cos \alpha_i & \sin \alpha_i \\ -\sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{pmatrix}, \quad \alpha_i = \arctan \frac{v_{r,i,y}}{v_{r,i,x}}, \quad (2.89)$$

где α_i - угол поворота; $v_{r,i,x}$, $v_{r,i,y}$ - проекции вектора скорости $\mathbf{v}_{r,i}$ на оси системы координат OXY .

Для сети проекции гидродинамических сил имеют следующие зависимости от проекций участка сети [31]:

$$R_{r,ij,x} = \frac{1}{2} \left(c_0 + (c_{90} - c_0) \frac{D_{r,ij,y}}{\sqrt{D_{r,ij,x}^2 + D_{r,ij,y}^2}} \right) v_{r,i}^2 \rho S_{ij}, \quad (2.90)$$

$$R_{r,ij,y} = -\frac{1}{2} c_{90} \frac{D_{r,ij,x} D_{r,ij,y}}{D_{r,ij,x}^2 + D_{r,ij,y}^2} v_{r,i}^2 \rho S_{ij}, \quad (2.91)$$

где c_0 - гидродинамический коэффициент для сети, расположенной параллельно потоку воды; c_{90} - гидродинамический коэффициент для сети, расположенной перпендикулярно потоку воды; S_{ij} - площадь сечения ниток участка сети в плоскости сети.

Гидродинамические коэффициенты находятся по формулам [31]:

$$c_0 = F_o \text{Re}^{-0.165}, \quad c_{90} = 16 \left(\frac{2F_o}{\text{Re}} \right)^{0.28}, \quad \text{Re} = \frac{d}{\nu} v_i, \quad (2.92)$$

где F_o - сплошность сети; Re - число Рейнольдса для участка сети; ν - кинематическая вязкость воды.

Для участков сети (между точками Q и G):

$$L_{ij} = 2ma\sqrt{1-u_x^2}, \quad A_{ij} = 2n\frac{\pi d^2}{4}, \quad S_{ij} = 4nmad, \quad (2.93)$$

$$V_{ij} = \frac{\pi}{4} S_{ij} d, \quad F_o = \frac{d}{au_x \sqrt{1-u_x^2}},$$

где d - диаметр ниток сетной оболочки; m - количество ячеек на участке сетной оболочки по боковой подборе.

Для поводцов и оттяжки: L_{ij} - входной параметр, $F_o=1$,

$$A_{ij} = \pi d_{ij}^2 / 4, \quad V_{ij} = A_{ij} L_{ij}, \quad S_{ij} = L_{ij} d_{ij}, \quad (2.94)$$

где d_{ij} - диаметр поводца или оттяжки.

Рассчитаем гидродинамическую силу нижней и верхней подборы, используя эмпирические зависимости для цилиндра:

$$R_G = \frac{1}{2} b_1 k_{1G} \left(\frac{d_G v_{r,0}}{\nu} \right)^{-0.16} v_{r,0}^2 \rho d_G (2a u_x), \quad (2.95)$$

$$R_Q = \frac{1}{2} b_1 k_{1Q} \left(\frac{d_Q v_{r,k-1}}{g} \right)^{-0.16} v_{r,k-1}^2 \rho d_Q (2anu_x), \quad (2.96)$$

где d_G - диаметр нижней подборы; d_Q - диаметр верхней подборы; $b_1=4,2$ - коэффициент для шестипрядных полиэтиленовых канатов [31]; k_1 - поправочные коэффициенты, определяющие удлинение цилиндра.

$$k_{1G} = \frac{1}{1 + (d_G / (2anu_x))^{1/3}}, \quad k_{1Q} = \frac{1}{1 + (d_Q / (2anu_x))^{1/3}}. \quad (2.97)$$

Рассчитаем гидродинамическую силу сопротивления вешки, применив эмпирические зависимости для цилиндра:

$$R_v = \frac{1}{2} b_v k_v \left(\frac{d_v v_{r,k+1}}{v} \right)^{-0.16} v_{r,k+1}^2 \rho d_v h_v, \quad k_v = \frac{1}{1 + (d_v / h_v)^{1/3}}, \quad (2.98)$$

где d_v - диаметр пенопласта вешки, h_v - высота пенопласта вешки, $b_v=3,0$ - коэффициент для гладкого цилиндра [31], k_v - поправочный коэффициент, определяющий удлинение цилиндра.

Сила трения нижней подборы о дно водоема:

$$F_f = \begin{cases} fF_y, & \text{при } F_y < 0 \text{ и } v_{r,0,x} \geq 0 \\ -fF_y, & \text{при } F_y < 0 \text{ и } v_{r,0,x} < 0, \\ 0 & | F_y \geq 0 \end{cases} \quad (2.99)$$

где, F_y - проекция равнодействующей сил за вычетом силы трения, приложенных к нижней подборе на ось OY ; f - коэффициент трения нижней подборы.

$$F_y = \left(\sum_{j \in [1,k]} \left(\mathbf{D}_{0j} \frac{T_{0j}}{D_{0j}} + \frac{\mathbf{R}_{0j} - \overline{(0, G_{0j})}}{2} \right) + \mathbf{F} \mathbf{a}_0 \right)_y. \quad (2.100)$$

2.5.3 Расчетная схема крыла ставного подвешного невода при изменяющемся течении

Рассмотрим другое приложение метода точечных масс применительно к расчету крыла ставного подвешного невода, расположенного перпендикулярно

потоку воды с изменяющейся во времени скоростью течения. На верхней подборе крыла расположены оснастка и плав, нижняя подбора подгружена. Крыло ставного подвесного невода закреплено при помощи горизонтальных и наклонных оттяжек к якорю. На горизонтальных оттяжках расположен плав.

Пусть поток воды направлен параллельно ее поверхности по нормали к крылу невода. При таких условиях расчет можно проводить в плоскости OXY (рисунок 2.19), то есть в двумерном пространстве.

В плоскости OXY крыло ставного невода представляет собой кривую линию. Применяв метод конечных элементов, разобьем эту кривую на несколько участков и заменим каждый участок прямолинейным отрезком. Чем больше разбиений, тем точнее будет расчетная схема. Аналогично поступим с оттяжками. Каждую оттяжку представим одним прямолинейным отрезком. Введем понятие узла как точку на конце отрезка. В результате получим ненаправленный односвязный граф, состоящий из множества вершин N , являющихся точками соединения отрезков (участков крыла невода и оттяжек) и множества ребер, замещающих отрезки (рисунок 2.20).

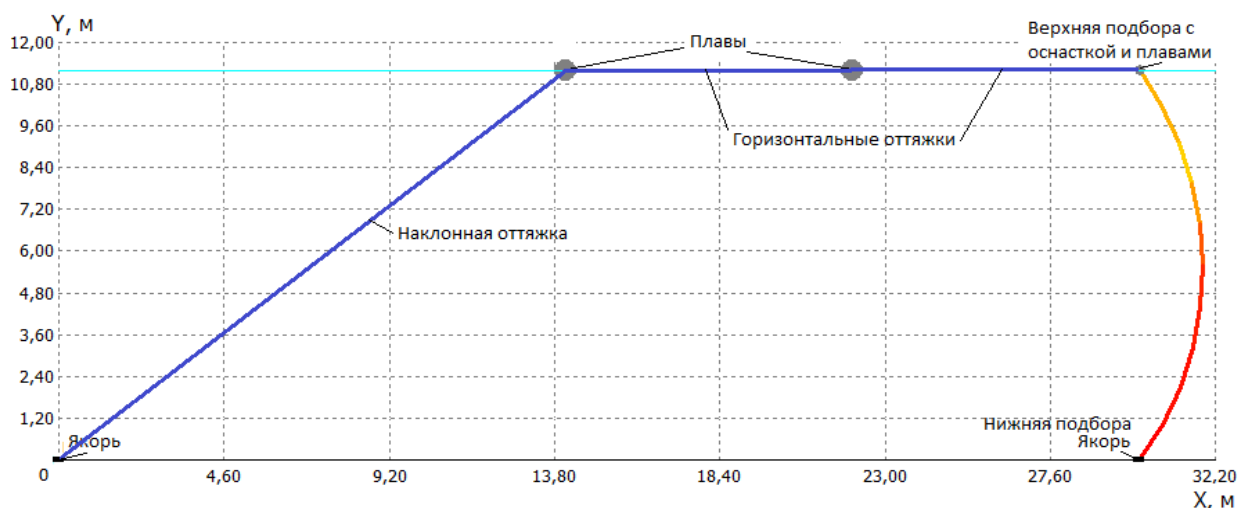


Рисунок 2.19 - Вид крыла ставного подвесного невода в плоскости OXY

В результате мы получим расчетную схему, аналогичную как для плавной сети. Решим задачу аналогичным для плавной сети способом. При этом для узла $i=0$ (нижняя подбора, вертикальная оттяжка и якорь) заменим формулы (2.86) на

$$\mathbf{F}\mathbf{a}_0 = -\overline{(0, 2G_{naux} + G_B)} + \mathbf{v}_{r,0} \frac{R_G}{v_{r,0}} - \overline{(F_{jB}, 0)},$$

$$m_{0i} = \frac{(2nauxG + G_B)(\rho_G + \rho)}{(\rho_G - \rho)g}, \quad (2.101)$$

где G_B – вес якоря вертикальной оттяжки; F_{jB} – сила удержания якоря вертикальной оттяжки; ρ_G – усредненная плотность нижней подборы с якорем.

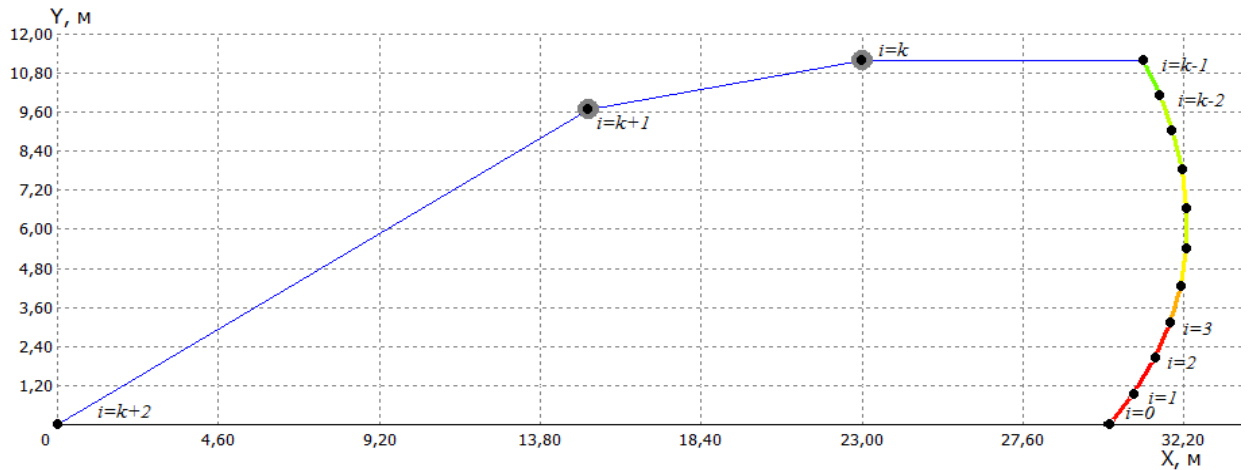


Рисунок 2.20 - Граф расчетной схемы крыла ставного подвесного невода

Для узлов $i=k$ и $i=k+1$ (плава на горизонтальных оттяжках) заменим формулу (2.88) на

$$\mathbf{F}\mathbf{a}_i = \overline{(0, Q_v)} + \mathbf{v}_{r,i} \frac{R_v}{v_{r,i}}, \quad m_{0i} = \frac{Q_v(\rho_v + \rho)}{(\rho - \rho_v)g}, \quad (2.102)$$

где Q_v – плавучесть плава; ρ_v – усредненная плотность плава; R_v – сила гидродинамического сопротивления плава.

Для узла $i=k+2$ (якорь на наклонной оттяжке) добавим:

$$\mathbf{F}\mathbf{a}_i = -\overline{(0, G_H)} - \overline{(F_{jH}, 0)}, \quad m_{0i} = \frac{G_H(\rho_{GH} + \rho)}{(\rho - \rho_{GH})g}, \quad (2.103)$$

где G_H – вес якоря наклонной оттяжки; F_{jH} – сила удержания якоря наклонной оттяжки; ρ_{GH} – плотность якоря наклонной оттяжки.

Геометрические характеристики оттяжек определим по формулам (2.94). Гидродинамическую силу сопротивления плавов определим аналогично вешкам для сети (2.98). Силу удержания якоря вертикальной оттяжки определим по формулам (2.99) и (2.100). Силу удержания якоря наклонной оттяжки определим по формулам:

$$F_{fH} = \begin{cases} f_H F_{y,k+2}, & \text{при } F_{y,k+2} < 0 \text{ и } v_{r,k+2,x} \geq 0 \\ -f_H F_{y,k+2}, & \text{при } F_{y,k+2} < 0 \text{ и } v_{r,k+2,x} < 0, \\ 0 & | F_{y,k+2} \geq 0 \end{cases}, \quad (2.104)$$

$$F_{k+2,y} = \left(\mathbf{D}_{k+2,k+1} \frac{T_{k+2,k+1}}{D_{k+2,k+1}} + \frac{\mathbf{R}_{k+2,k+1} - \overline{(0, G_H)}}{2} + \mathbf{F} \mathbf{a}_{k+2} \right)_y, \quad (2.105)$$

где, $F_{k+2,y}$ - проекция на ось OY равнодействующей сил за вычетом силы трения, приложенных к якорю; f_H - коэффициент держащей силы якоря наклонной оттяжки; $v_{r,k+2,x}$ - абсолютная скорость якоря.

2.5.4 Расчетная схема волнения

Выше были рассмотрены расчетные схемы плавной сети и крыла ставного подвешного невода при изменяющейся во времени скорости течения. При этом направление течения считалось неизменным. Усложним задачу, добавив влияние на орудие рыболовства такого воздействия, как волнение. Рассмотрим экстремальный случай, когда фронт волны распространяется противоположно направлению сплава сети или перпендикулярно крылу невода в направлении течения. В указанных условиях задачу можно свести к двумерному случаю, рассматривая процесс в плоскости, перпендикулярной течению и фронту волны.

В данной плоскости согласно волновой модели Стокса-Релея, описанной в [43], частицы воды у поверхности движутся по эллиптическим траекториям (рисунок 2.21). Вектор скорости течения $(u; w)$ относительно дна водоема в точке $(x_0; z_0)$ является суммой трех составляющих:

$$(u; w) = (v; 0) + (u_g; 0) + (u_w; w_w), \quad (2.106)$$

где v – скорость вынужденного течения (речного); u_e – скорость волнового течения; u_w – горизонтальная и w_w – вертикальная проекции скорости вращения воды, вызванного волной, на оси декартовой системы координат.

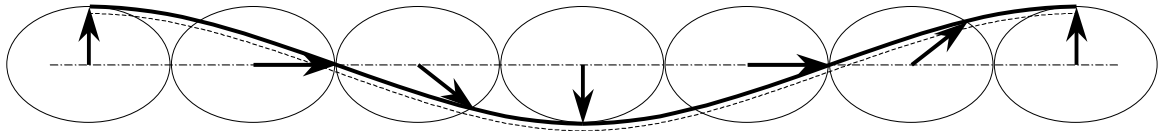


Рисунок 2.21 - Профиль волны, соответствующий модели Стокса-Релея

Проекции скорости вращения воды, вызванного волной, на оси декартовой системы координат определяются системой параметрических уравнений [35]:

$$\begin{cases} u_w = \frac{hg}{2c} \cdot \frac{\cosh(kz_0)}{\cosh(kH)} \cos t_w \\ w_w = \frac{hg}{2c} \cdot \frac{\sinh(kz_0)}{\cosh(kH)} \sin t_w \end{cases}, \quad (2.107)$$

где h – высота волны; c – скорость распространения волны; g – ускорение свободного падения; $k=2\pi/\lambda$; λ – длина волны; H – глубина места лова; z_0 – высота от дна водоема; t_w – промежуточная величина системы параметрических уравнений.

Скорость распространения волны определяется зависимостью:

$$c = \sqrt{gR \tanh(kH)}, \quad R=1/k. \quad (2.108)$$

Скорость волнового течения [66]:

$$u_e = u_{en} \cdot \frac{\cosh(kz_0)}{\cosh(kH)}, \quad (2.109)$$

где $u_{en}=0.25h^2k^2c$ – скорость ветрового течения на поверхности.

Скорость вынужденного течения на высоте от дна водоема z_0 определяется зависимостью:

$$v = v_n \cdot \sqrt{1 - (0.57 + 3.3/C) \frac{(H - z_0)^2}{H^2}}, \quad (2.110)$$

где v_n – скорость вынужденного течения на поверхности; C – коэффициент формулы Шези, изменяющийся для рек в пределах $10-60 \text{ м}^{1/2}/\text{с}$.

При разработке расчетной схемы необходимо учесть, что элементы орудия рыболовства могут находиться на поверхности воды. В связи с этим необходимо знать зависимость профиля волны от времени в декартовой системе координат $(x; z)$. Данная зависимость определяется системой параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x = Rt_w + a_0 \sin t_w + ct \\ z = H + d_0 - b_0 \cos t_w \end{cases}, \quad (2.111)$$

где t – время; a_0 – горизонтальная, b_0 – вертикальная полуоси эллипса (рисунки 2.21); $d_0 = 0.25\pi h^2 / \lambda$ – поднятие центра орбит, вызванное несимметричностью волны относительно линии, определяющей положение воды в покое [64].

Согласно волновой модели Стокса-Релея, размеры полуосей эллипса определяются как функции от z_0 по формулам:

$$\begin{aligned} a_0(z_0) &= \frac{h}{2} \cdot \frac{\cosh(kz_0)}{\sinh(kH)} \\ b_0(z_0) &= \frac{h}{2} \cdot \frac{\sinh(kz_0)}{\sinh(kH)} \end{aligned} \quad (2.112)$$

При расчете сил гидродинамического сопротивления необходимо учитывать скорость движения элементов орудия рыболовства относительно воды. Результирующий вектор мгновенной скорости в произвольной точке определяется как разность вектора скорости движения этой точки и вектора движения воды относительно дна водоема $(u; w)$.

2.5.5 Расчетная схема ставной сети на волнении

Рассмотрим композицию предложенной выше расчетных схем волнения и ставной сети, находящейся в потоке воды при наличии волнения. На верхней подборе сети расположены оснастка и плав, нижняя подборка подгружена. Ставная сеть закреплена при помощи горизонтальных и наклонных оттяжек к

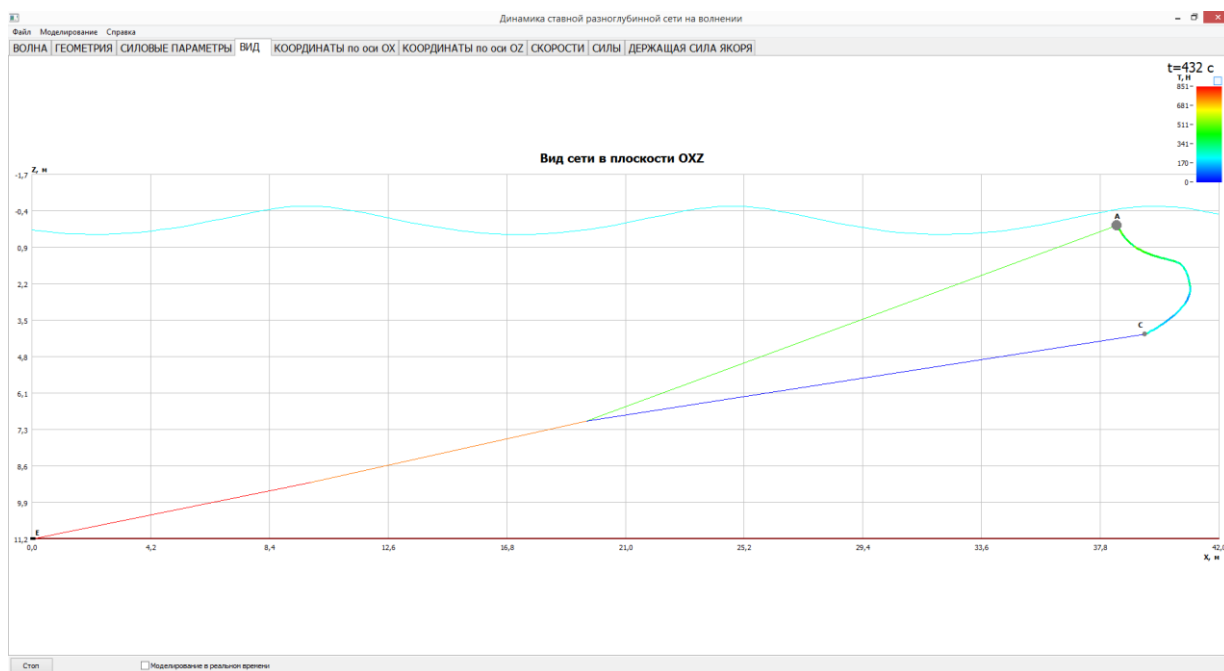
якорю.

Пусть поток воды направлен параллельно ее поверхности. В плоскости OXZ сечение сетного полотна представляет собой кривую линию (рисунок 2.22). Применяв метод конечных элементов, разобьем эту кривую на несколько участков и заменим каждый участок прямолинейным отрезком аналогично как для плавной сети (рисунок 2.18). В результате мы получим расчетную схему, аналогичную как для плавной сети. Подставив в (2.90-2.98) вместо скорости течения формулу (2.106), решим задачу.

При этом для узла $i=0$ (нижняя подбора) в (2.86) заменим вычисление силы на:

$$\mathbf{F}a_i = -\overline{(0,2Gnau_x)} + \mathbf{v}_{r,i} \frac{R_G}{v_{r,i}}, \quad (2.113)$$

убрав составляющую силы трения нижней подборы.



A – верхняя подбора с плавками; C – нижняя подбора с загрузкой; E – якорь наклонной оттяжки

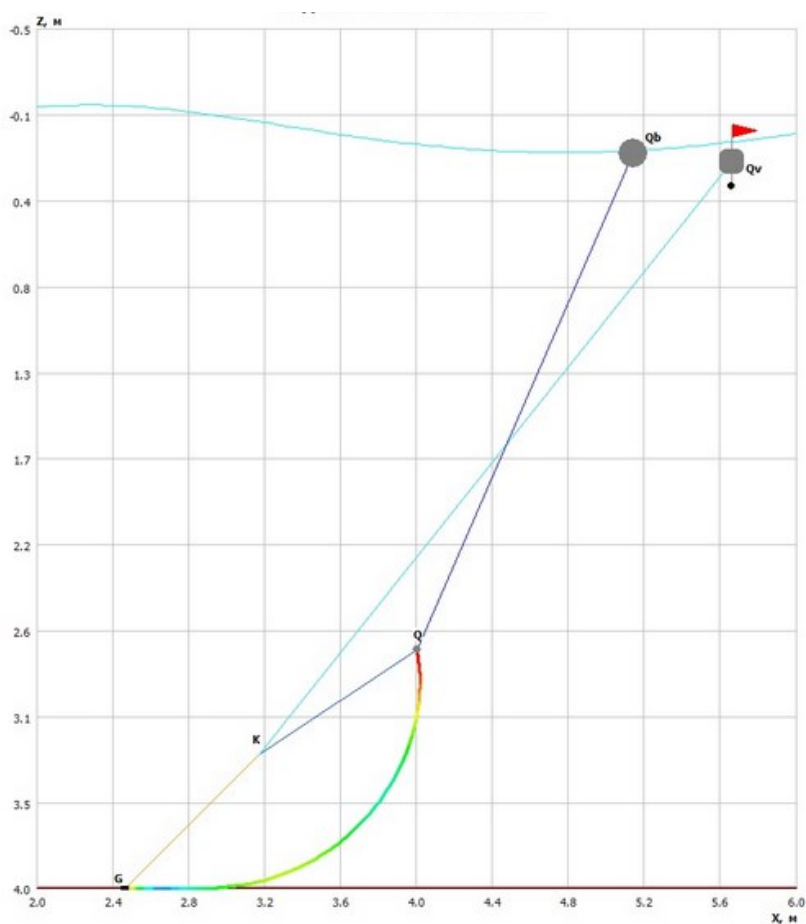
Рисунок 2.22 - Вид ставной сети в плоскости сечения OXZ

Для вычисления внешней силы, действующей на якорь наклонной оттяжки, и его массы используем формулы для крыла ставного невода (2.103). Силу удержания якорей определим по формулам (2.104), (2.105).

2.5.6 Расчетная схема плавной сети на волнении

Рассмотрим композицию предложенной выше расчетных схем волнения и плавной сети, находящейся в потоке воды при наличии волнения. На верхней подборе сети расположены оснастка и плав, нижняя подборка подгружена.

Пусть поток воды направлен параллельно ее поверхности. В плоскости Oxz сечение сетного полотна представляет собой кривую линию (рисунок 2.23).



Q_b – буй; Q_v – вешка; Q – верхняя подборка с плавками; G – нижняя подборка с загрузкой и грузом (мешком с песком); K – точка крепления оттяжки к поводцам

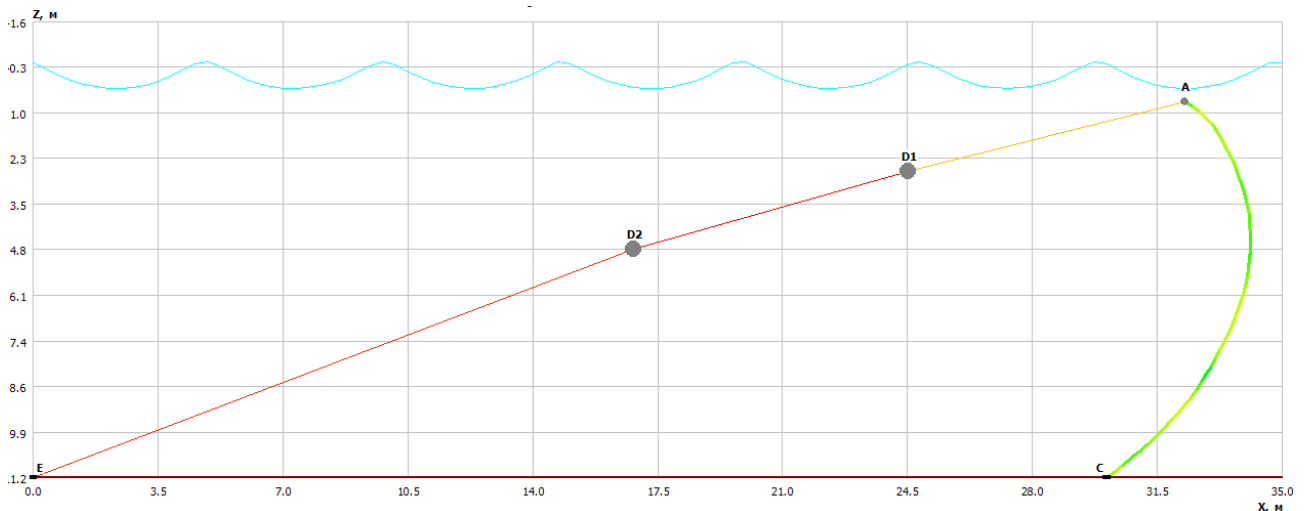
Рисунок 2.23 - Вид плавной сети в плоскости сечения Oxz

Применив метод конечных элементов, разобьем эту кривую на несколько участков и заменим каждый участок прямолинейным отрезком аналогично как на рисунке 2.18. Для буя используем зависимости как для вешки (2.98). Подставив в (2.90) - (2.98) вместо скорости течения формулу (2.106), решим задачу.

2.5.7 Расчетная схема крыла ставного подвешного невода на волнении

Рассмотрим метод расчета поведения крыла ставного подвешного невода конструкции, указанной в разделе 2.5.3, находящегося в потоке воды при наличии волнения на основе композиции, предложенной выше расчетных схем волнения и крыла невода (рисунок 2.24).

Пусть поток воды направлен параллельно поверхности крыла по нормали к крылу невода. В плоскости OXZ сечение крыла представляет собой кривую линию (рисунок 2.24). Применив метод конечных элементов, разобьем эту кривую на несколько участков и заменим каждый участок прямолинейным отрезком (рисунок 2.20). Подставив в (2.90-2.98) вместо скорости течения формулу (2.106) мы решим поставленную задачу.



А - верхняя подбора с плавками; D1 - первый плав; D2 - второй плав; С - якорь на вертикальной оттяжке; Е - якорь на горизонтальной оттяжке

Рисунок 2.24 - Вид крыла ставного подвешного невода в плоскости сечения OXZ

2.5.8 Применение неявных конечно-разностных схем в задачах расчета динамики орудий рыболовства

Рассмотрим метод расчета с использованием неявной конечно-разностной схемы [2]. Неявные конечно-разностные схемы отличаются большей точностью, более быстрой сходимостью и устойчивостью по сравнению с явными. Недостатком неявных схем можно считать их сложность. Проблема устойчивости особенно важна при решении жестких систем дифференциальных уравнений, когда при переходных процессах возможно скачкообразное многократное изменение величин. К таким уравнениям относятся и дифференциальные уравнения движения с учетом сил натяжения. В них при незначительном перемещении возможны значительные кратковременные изменения сил натяжения.

В неявных конечно-разностных схемах на каждом временном шаге значения искомых величин берутся не с предыдущего (уже вычисленного) временного слоя, а со следующего (еще неизвестного). Таким образом для нахождения неизвестных необходимо решить систему уравнений.

Задачей при разработке расчетной схемы является сведение систем математических уравнений к линейным. Обычно задача линеаризации не имеет аналитического решения. Поэтому прибегают к упрощениям, заменяя значения некоторых вхождений неизвестных нелинейными коэффициентами, значения которых берутся с предыдущего временного слоя (уже вычисленные). При этом временной шаг разбивается на дробные шаги коррекции нелинейных коэффициентов.

В методе взаимодействующих частиц сетное орудие рыболовства представляется множеством точечных масс (узлов) с такими известными и искомыми параметрами, как масса, скорость, перемещение, внешняя сила, и связей между узлами с такими известными и искомыми параметрами, как длина связи и сила натяжения.

Запишем уравнения движения узла в векторной форме:

$$\frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{v}_i, \quad (2.114)$$

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \mathbf{F}_i + \mathbf{R}_i + \mathbf{Q}_i \quad (2.115)$$

при начальных условиях:

$$\mathbf{r}_i|_{t_0} = \mathbf{r}_0, \quad \mathbf{v}_i|_{t_0} = \mathbf{0}, \quad (2.116)$$

где \mathbf{r}_i – положение узла; \mathbf{v}_i – скорость узла; t – время; \mathbf{F}_i – сумма внутренних сил, действующих на узел со стороны других узлов; m_i – масса, сосредоточенная в узле (с учетом присоединенной массы); \mathbf{R}_i – гидродинамическая сила; \mathbf{Q}_i – другие силы, включая гидростатические (рисунок 2.25).

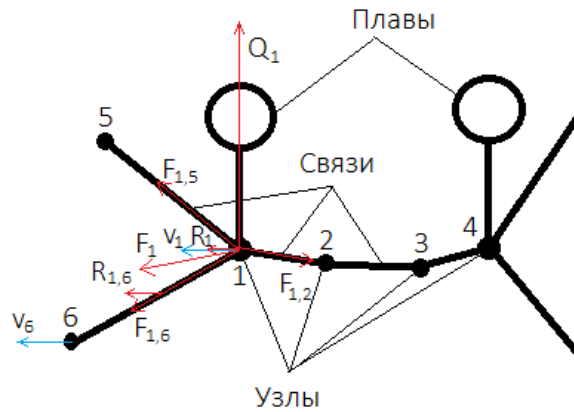


Рисунок 2.25 – Схематизация участка сетного полотна в методе взаимодействующих частиц

Решим полученную систему неявным методом Эйлера [65], являющимся абсолютно устойчивым, используя конечно-разностную схему:

$$\mathbf{r}_i^{[n+1]} - \mathbf{r}_i^{[n]} = h\mathbf{v}_i^{[n+1]}, \quad (2.117)$$

$$\mathbf{v}_i^{[n+1]} - \mathbf{v}_i^{[n]} = \frac{h}{m_i} (\mathbf{F}_i^{[n+1]} + \mathbf{R}_i^{[n+1]} + \mathbf{Q}_i), \quad (2.118)$$

где h – шаг по времени.

Обозначив

$$\mathbf{F}_i^{[n+1]} + \mathbf{R}_i^{[n+1]} + \mathbf{Q}_i = \mathbf{f}_i(\mathbf{v}_i^{[n+1]}, \mathbf{r}_i^{[n+1]}), \quad (2.119)$$

$$\mathbf{v}_i^{[n+1]} - \mathbf{v}_i^{[n]} = \Delta\mathbf{v}_i, \quad \mathbf{r}_i^{[n+1]} - \mathbf{r}_i^{[n]} = \Delta\mathbf{r}_i \quad (2.120)$$

и применив разложение функции \mathbf{f}_i в ряд Тейлора в окрестностях $\mathbf{f}_i(\mathbf{v}_i^{[n]}, \mathbf{r}_i^{[n]})$ с аппроксимацией первого порядка, получим:

$$\mathbf{f}_i(\mathbf{v}_i^{[n]} + \Delta\mathbf{v}_i, \mathbf{r}_i^{[n]} + \Delta\mathbf{r}_i) = \mathbf{f}_i(\mathbf{v}_i^{[n]}, \mathbf{r}_i^{[n]}) + \frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{r}_i, \mathbf{v}_i)}{\partial\mathbf{r}_i} \Delta\mathbf{r}_i + \frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{r}_i, \mathbf{v}_i)}{\partial\mathbf{v}_i} \Delta\mathbf{v}_i. \quad (2.121)$$

Подставив (2.121) и (2.117) в (2.118) получим:

$$\Delta\mathbf{v}_i = \frac{h}{m_i} \left(\mathbf{f}_i(\mathbf{v}_i^{[n]}, \mathbf{r}_i^{[n]}) + \frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{r}_i, \mathbf{v}_i)}{\partial\mathbf{r}_i} h(\mathbf{v}_i^{[n]} + \Delta\mathbf{v}_i) + \frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{r}_i, \mathbf{v}_i)}{\partial\mathbf{v}_i} \Delta\mathbf{v}_i \right). \quad (2.122)$$

Перегруппировав отдельные составляющие (2.122) запишем систему уравнений для всех узлов в матричном виде:

$$\mathbf{A}\Delta\mathbf{v} = \mathbf{b}, \quad (2.123)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{M} - h \frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{v}, \mathbf{r})}{\partial\mathbf{v}} - h^2 \frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{v}, \mathbf{r})}{\partial\mathbf{r}} \quad (2.124)$$

$$\mathbf{b} = h\mathbf{f}(\mathbf{v}^{[n]}, \mathbf{r}^{[n]}) + h \frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{v}, \mathbf{r})}{\partial\mathbf{r}} \mathbf{v}^{[n]}$$

где \mathbf{A} – матрица размером $3N \times 3N$; \mathbf{M} – диагональная матрица узловых масс размером $3N \times 3N$; $\Delta\mathbf{v}$, $\mathbf{v}^{[n]}$, $\mathbf{f}(\mathbf{v}, \mathbf{r})$ и \mathbf{b} – вектора размером $3N$; N – количество узлов.

Разрешив (2.123) относительно $\Delta\mathbf{v}$ и подставив $\Delta\mathbf{v}_i$ в (2.117) и (2.120) найдем искомые $\mathbf{v}_i^{[n+1]}$ и $\mathbf{r}_i^{[n+1]}$ для всех узлов.

Для нахождения $\mathbf{f}(\mathbf{v}, \mathbf{r})$ и ее частных производных необходимо вычислить \mathbf{F}_i и \mathbf{R}_i , и задать \mathbf{Q}_i на временном слое $[n]$. Обозначив $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i$, $\mathbf{v}_{ij} = \frac{\mathbf{v}_j + \mathbf{v}_i}{2}$

получим:

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j \in N_i} \frac{\pi}{4} d_{ij}^2 E_{ij} \left(1 - \frac{L_{0,ij}}{r_{ij}} \right) \mathbf{r}_{ij}, \quad (2.125)$$

$$\mathbf{R}_i = \sum_{j \in N_i} (\mathbf{R}_{L,ij} - \mathbf{R}_{D,ij}), \quad (2.126)$$

$$\mathbf{R}_{D,ij} = \frac{c_{D,ij} v_{ij} \rho d_{ij}}{2} \sqrt{r_{ij}^2 - r_{x,ij}^2} \mathbf{v}_{ij}, \quad (2.127)$$

$$\mathbf{R}_{L,ij} = \frac{c_{L,ij} v_{ij}^2 \rho d_{ij}}{2} r_{x,ij} \frac{\mathbf{n}_{L,ij}}{n_{L,ij}}, \quad (2.128)$$

$$r_{x,ij} = \frac{\mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{r}_{ij}}{v_{ij}}, \quad \mathbf{n}_{L,ij} = \mathbf{v}_{ij} \times (\mathbf{v}_{ij} \times \mathbf{r}_{ij}), \quad (2.129)$$

где d_{ij} – диаметр веревки; E_{ij} – модуль Юнга веревки; $L_{0,ij}$ – длина участка веревки до деформации; $\mathbf{R}_{D,ij}$ – сила сопротивления; $\mathbf{R}_{L,ij}$ – подъемная сила; $c_{D,ij}$ – гидродинамический коэффициент силы сопротивления; $c_{L,ij}$ – гидродинамический коэффициент подъемной силы; ρ – плотность воды; $\mathbf{n}_{L,ij}$ – вектор по направлению подъемной силы; $r_{x,ij}$ – проекция участка веревки на ось OX после деформации; N_i – множество узлов, связанных с узлом i ; \cdot – скалярное произведение; \times – векторное произведение.

Частная производная внутренних сил по скорости для всех узлов:

$$\frac{\partial \mathbf{F}_i}{\partial \mathbf{v}_i} = \mathbf{0}. \quad (2.130)$$

Матрица частная производных внутренних сил по перемещению является квадратной матрицей, состоящей из $N*N$ блоков размером $3*3$. Каждый блок характеризует изменение внутренней силы под действием перемещения для узла i от узла j , где i,j – номер блока по столбцам и строкам матрицы:

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{r}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial \mathbf{r}_1} & \dots & \frac{\partial \mathbf{F}_N}{\partial \mathbf{r}_1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \mathbf{F}_1}{\partial \mathbf{r}_N} & \dots & \frac{\partial \mathbf{F}_N}{\partial \mathbf{r}_N} \end{bmatrix}, \quad (2.131)$$

$$\frac{\partial \mathbf{F}_i}{\partial \mathbf{r}_j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{x,i}}{\partial r_{x,j}} & \frac{\partial F_{y,i}}{\partial r_{x,j}} & \frac{\partial F_{z,i}}{\partial r_{x,j}} \\ \frac{\partial F_{x,i}}{\partial r_{y,j}} & \frac{\partial F_{y,i}}{\partial r_{y,j}} & \frac{\partial F_{z,i}}{\partial r_{y,j}} \\ \frac{\partial F_{x,i}}{\partial r_{z,j}} & \frac{\partial F_{y,i}}{\partial r_{z,j}} & \frac{\partial F_{z,i}}{\partial r_{z,j}} \end{bmatrix}. \quad (2.132)$$

Продифференцировав (2.125) для составляющей по координате x получим:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F_{x,i}}{\partial r_{x,j}} &= \frac{\pi}{4} d_{ij}^2 E_{ij} \frac{L_{0,ij} (r_{ij}^2 - r_{x,ij}^2) - r_{ij}^3}{r_{ij}^3}, \\
\frac{\partial F_{x,i}}{\partial r_{y,j}} &= -\frac{\pi}{4} d_{ij}^2 E_{ij} \frac{L_{0,ij} r_{x,ij} r_{y,ij}}{r_{ij}^3}, \\
\frac{\partial F_{x,i}}{\partial r_{z,j}} &= -\frac{\pi}{4} d_{ij}^2 E_{ij} \frac{L_{0,ij} r_{x,ij} r_{z,ij}}{r_{ij}^3}.
\end{aligned} \tag{2.133}$$

Аналогично для составляющих по координатам y и z .

Аналогичный (2.131) и (2.132) вид имеют матрицы для сил гидродинамического сопротивления (2.126). Для нахождения частных производных можно воспользоваться разностной схемой:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial R_{x,i}}{\partial v_{x,j}} &= \frac{1}{2h_v} (R^+ - R^- + |R^+| - |R^-|), \\
R^+ &= R_{x,ij} (v_{x,ij} + h_v, v_{y,ij}, v_{z,ij}, \mathbf{r}_{ij}), \\
R^- &= R_{x,ij} (v_{x,ij} - h_v, v_{y,ij}, v_{z,ij}, \mathbf{r}_{ij}),
\end{aligned} \tag{2.134}$$

где h_v – шаг интегрирования по скорости, например, $v_{max}/1000$; v_{max} – максимальная скорость.

В схеме для повышения устойчивости используются противоточные производные. Аналогично (2.130) находится частная производная по перемещению.

Для решения системы линейных уравнений (2.123) можно воспользоваться методом сопряженных градиентов [27]:

$$\begin{aligned}
\Delta \mathbf{v}_0 &= \mathbf{b}, \quad \delta_0 = \mathbf{k}_0 = \mathbf{b} - \mathbf{A} \Delta \mathbf{v}_0, \\
\alpha_i &= \frac{\mathbf{k}_i^T \mathbf{k}_i}{\delta_i^T \mathbf{A} \delta_i}, \quad \Delta \mathbf{v}_{i+1} = \Delta \mathbf{v}_i + \alpha_i \delta_i, \\
\mathbf{k}_{i+1} &= \mathbf{k}_i - \alpha_i \mathbf{A} \delta_i, \\
\beta_{i+1} &= \frac{\mathbf{k}_{i+1}^T \mathbf{k}_{i+1}}{\mathbf{k}_i^T \mathbf{k}_i}, \quad \delta_{i+1} = \mathbf{k}_{i+1} + \beta_{i+1} \delta_i,
\end{aligned} \tag{2.135}$$

где α , β , δ , \mathbf{k} – временные переменные.

В качестве критерия остановки итерационного процесса используем $k_i < \varepsilon$, где ε – требуемая точность вычислений.

2.6 Выводы по главе 2

В главе 2 были:

- определены требования, накладываемые при расчете орудий рыболовства, абиотические и биотические факторы воздействия, влияющие на процесс лова;

- поставлены задачи расчета сетных орудий рыболовства в статике и динамике, обоснована необходимость применения вычислительной техники для расчета орудий и процессов рыболовства;

- выделены достоинства применения дискретной расчетной схемы и обозначен круг задач, которые можно решить только посредством дискретных расчетных схем;

- рассмотрены дискретные расчетные схемы при статической постановке задачи: сетной конструкции цилиндрической формы с загрузкой и без нее; расчета ставной пространственной сети по базовым точкам с последующей интерполяцией по расчетной сетке (рассчитывается геометрия и силовые характеристики без учета растяжений и провисаний ниток); ставной сети методом точечных масс (МКЭ) с учетом растяжения и провисания ниток; крыла ставного невода с жестким каркасом методом точечных масс; крыла ставного подвешного невода методом точечных масс;

- рассмотрены дискретные расчетные схемы на основе метода точечных масс при динамической постановке задачи для плавной сети и крыла ставного подвешного невода в условиях изменяющегося во времени течения;

- рассмотрена расчетная схема волнения при двумерной постановке задачи;

- рассмотрена композитная дискретная расчетная схема волнения и точечных масс при динамической постановке задачи для ставной сети, плавной сети и крыла ставного подвешного невода;

- рассмотрено решение методом точечных масс с применением неявной конечно-разностной схемы при динамической постановке задачи.

3 АЛГОРИТМЫ РАСЧЕТА СЕТНЫХ ОРУДИЙ РЫБОЛОВСТВА

С развитием вычислительной техники компьютер все больше приходит на помощь разработчикам и эксплуатационному персоналу. Его применение в качестве средств автоматизации проектирования и в процессе эксплуатации орудий рыболовства позволяет сократить общее время разработки и установки, а также уменьшить количество возможных ошибок.

Для ускорения процесса разработки орудия рыболовства и предварительного мониторинга его поведения в процессе эксплуатации целесообразно применять вычислительный эксперимент на ЭВМ. Вычислительный эксперимент облегчает и ускоряет процесс выявления «узких» мест орудия и позволяет определить его силовые и пространственно-временные характеристики при различных процессах и условиях эксплуатации.

3.1 Вычислительная база

При расчете на ЭВМ орудий лова важную роль играет эффективность алгоритмов. Вычислительный эксперимент в отличие от других видов исследований таких, как натурный эксперимент или физическое моделирование является наименее затратным и наиболее оперативным. С постоянным совершенствованием элементной базы ЭВМ и, одновременно, их удешевлением, последние становятся все более доступны широкому кругу пользователей.

Современные персональные компьютеры и рабочие станции имеют мощные вычислительные ресурсы, способные эффективно обрабатывать большие объемы данных в реальном времени. Это достигается возможностью одновременной обработки множества данных на одном или нескольких вычислительных модулях таких, как центральный и графический процессоры.

Достоинством графического процессора является возможность производить параллельные вычисления над множеством однотипных элементов, из которых состоит сетное орудие рыболовства.

Для взаимодействия с графическим процессором выбран набор программных интерфейсов, входящих в состав библиотеки DirectX API (интерфейс программирования приложений). Библиотека DirectX предназначена для решения задач, связанных с программированием под операционную систему Microsoft Windows и входит в ее состав [60].

Для приложения DirectX представляет собой некий каркас, в который добавляются реализации вычислительных алгоритмов и алгоритмов визуализации (2D, 3D, стерео 3D). В зависимости от установленного аппаратного обеспечения DirectX автоматически распределяет нагрузку между аппаратной и программной частями конвейера видеоадаптера. Связь между различными модулями в программной модели DirectX (вычислительными, визуализирующими) возможна как посредством внутренней памяти видеоадаптера (наиболее быстрый, но наименее гибкий метод), так и посредством общей памяти всей системы.

Программные участки конвейера видеоадаптера (шейдеры) выполняются графическим процессором. Загрузка кода в память процессора осуществляется самой библиотекой DirectX. Перед загрузкой встроенными средствами библиотеки осуществляется преобразование аппаратно-независимого псевдокода в аппаратно-зависимый исполняемый код, характерный для установленного в системе графического процессора (графических процессоров).

Псевдокод шейдера генерируется при создании программы посредством входящего в состав DirectX компилятора с языка высокого уровня HLSL. Язык HLSL разработан специально для параллельных реализаций алгоритмов на графических процессорах и имеет синтаксис, основанный на языке программирования Си.

Существуют различные модели шейдеров, различающихся функциональностью. Для реализации вычислительных алгоритмов расчета ставного подвесного невода была выбрана наиболее мощная с точки зрения функциональности модель шейдеров версии 5 (Shader Model 5). В шейдерной модели версии 5 (как и в версии 4) возможно создание вычислительных шейдеров. Эти

шейдера не участвуют в графическом конвейере видеоадаптера. Их основное предназначение – вычисления. За поддержку вычислений в библиотеке DirectX отвечает компонент DirectCompute [60].

Обобщенная архитектура графического процессора [1; 62] показана на рисунке 3.1.

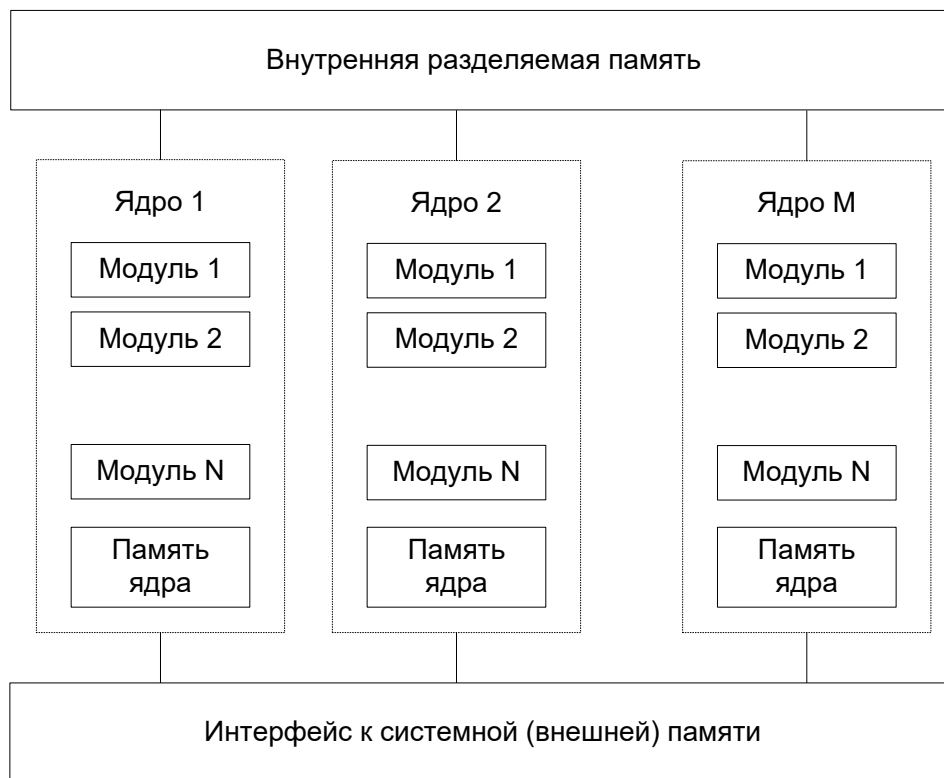


Рисунок 3.1 - Архитектура графического процессора

Каждое ядро процессора состоит из множества модулей. Все модули в ядре одновременно работают по одному алгоритму, но обрабатывают разные данные. В коде шейдера в качестве входных параметров задается идентификатор модуля. Идентификатор является вектором. Размерность вектора (1, 2 или 3) задается программным способом.

3.2 Инструментальные средства разработки программного обеспечения

Компьютерная программа расчета динамических характеристик крыла ставного невода разработаны в системе Embarcadero RAD Studio XE2. Программный код написан на объектно-ориентированном языке высокого уровня

C++ с использованием вставок на языке низкого уровня Ассемблер. Применение таких вставок обусловлено необходимостью максимальной оптимизации алгоритмов расчета, критичных к скорости исполнения.

Embarcadero RAD Studio - мультязыковая среда быстрой разработки приложений (RAD) от Embarcadero Technologies для платформ Microsoft Windows, .NET, Mac OS, iOS, ARM, объединяющая Delphi и C++ Builder в единую интегрированную среду разработки. Это единственная интегрированная среда разработки (IDE), в которой одновременно реализована поддержка языков Паскаль, C++ и Ассемблер.

Первым шагом в разработке приложения является создание проекта. Файлы проекта содержат автоматически генерируемый исходный текст, который компилируется и становится частью приложения после его сборки. На рисунке 3.2 показано окно менеджера проекта со списком исходных файлов.

После создания проекта к нему необходимо добавить одну или несколько форм. Информация о каждой форме хранится в отдельных файлах исходного кода и файлах ресурсов. При добавлении формы на экране в дизайнера форм отображается пустая форма.

Далее, на форму помещаются необходимые компоненты: визуальные и невизуальные. Визуальные компоненты предназначены для взаимодействия с пользователем. Эти компоненты в последствие будут отображаться в программе. Невизуальные компоненты отображаются только на этапе создания приложения. Они инкапсулируют функциональность определенных объектов системы. Например, компонент «таймер» предназначен для вызова на исполнение участка программы через заданные промежутки времени. Дизайнер форм показан на рисунке 3.3.

Далее, у форм и компонентов необходимо установить свойства и назначить обработчики событий. Это делается в инспекторе объектов.

Свойства определяют поведение объектов (форм и компонентов). Например, у многих визуальных компонентов и форм есть свойства, определяющие их размер и положение.

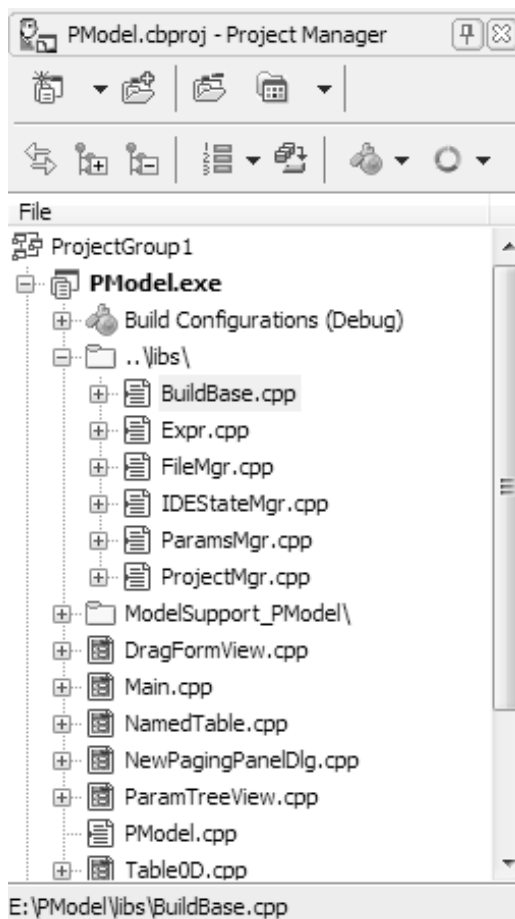


Рисунок 3.2 - Менеджер проекта Embarcadero RAD Studio XE2

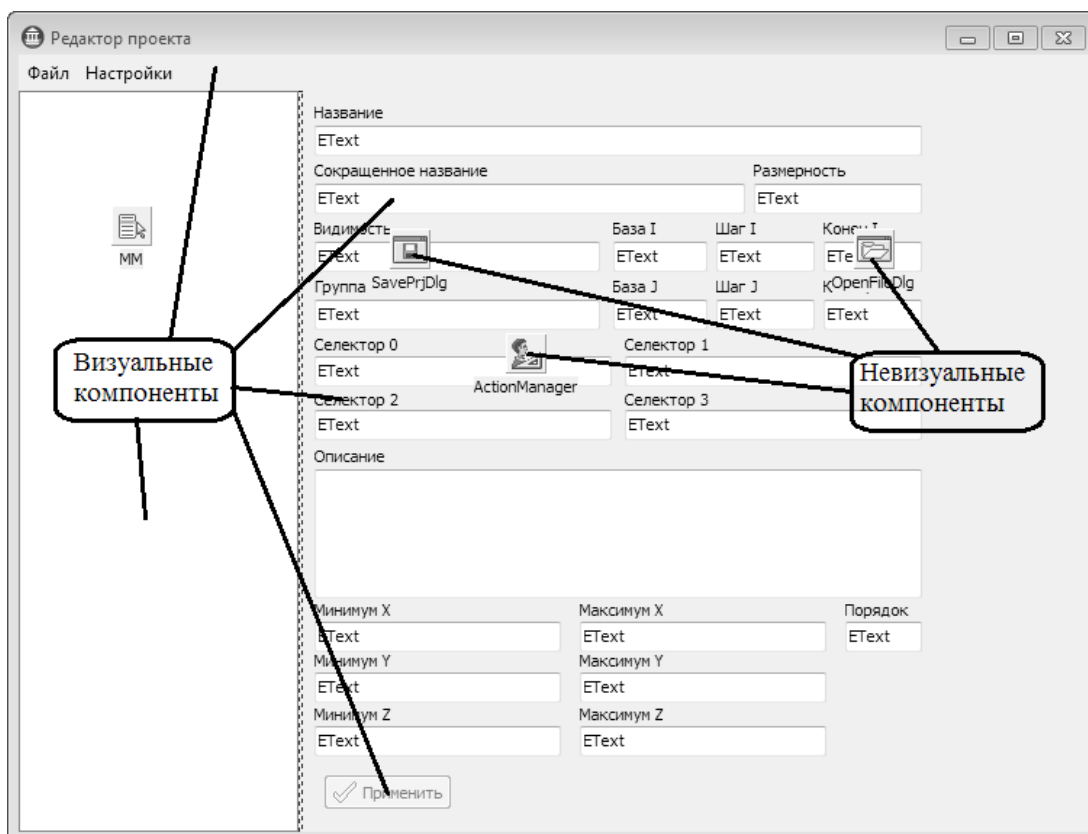


Рисунок 3.3 - Дизайнер форм

Обработчики событий предназначены для определения реакции объекта на какое-либо событие. Например, событие нажатия левой кнопки мышки на компоненте ввода. Обработчики событий пишутся на языке исходного кода (C++ или Object Pascal) в файле с исходным кодом для соответствующей формы. Окно инспектора объектов показано на рисунке 3.4.

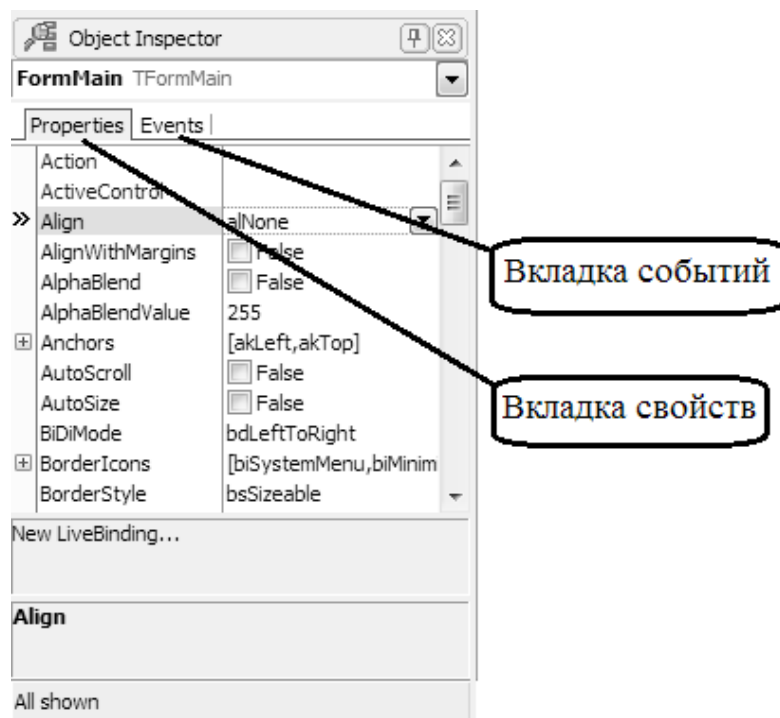


Рисунок 3.4 - Инспектор объектов

Наконец, приложение нужно скомпилировать и собрать. Это делается нажатием на клавишу «F9». После сборки при отсутствии ошибок, приложение автоматически запускается в режиме отладки.

Более подробно с процессом создания приложений в RAD Studio можно ознакомиться в [50]. В [55] описаны принципы объектно-ориентированного программирования. В [56] описан синтаксис языка высокого уровня C++.

3.3 Алгоритмы решения задачи на ЭВМ при статической ее постановке

Рассмотрим алгоритмы расчета сетных орудий рыболовства, основанные на описанной в предыдущей главе дискретной расчетной схемы, основанной на методе точечных масс, при статической постановке задачи.

В данном разделе будет описан итеративный алгоритм, основными этапами которого являются: вычисление внешних сил; предсказание перемещений; вычисление внутренних сил; коррекция перемещений; коррекция шага итерации.

Для сокращения времени расчета предлагается алгоритм автоматического «грубого» начального размещения узлов орудия рыболовства (точечных масс). При проведении перед основным расчетом начального размещения сокращается количество итераций алгоритма моделирования. При этом время сходимости сокращается.

Также будут предложены пути повышения эффективности работы алгоритма с использованием параллельных, распределенных вычислений, SIMD инструкций центрального и графического процессоров (одна инструкция одновременно обрабатывает несколько данных), гетерогенной системы (совместная работа ядер графического и графического процессоров и их взаимодействие).

3.3.1 Алгоритм расчета канатно-веревочного изделия методом точечных масс

Рассмотрим алгоритм расчета канатно-веревочного изделия, применимый к большинству сетных орудий рыболовства. Переписав (2.32)-(2.34) в виде:

$$T_{t,ij} = k_{ij} (D_{ij} - L_{t,ij}) / L_{t,ij}, \quad (3.1)$$

получим общую формулу для вычисления реакции любой связи, где k – реактивный коэффициент, принимающий различные значения в зависимости от типа связи и условий.

Так, как для любой пары узлов (2.32) и (2.33) имеют непересекающиеся области определения (см. условия), объединим соответствующие им связи в одну. В результате три типа связей сократим до двух, реагирующих при любых

значениях длины L . Для унификации алгоритма расчета связей различных типов сопоставим каждой связи два коэффициента k_1 и k_2 . При выполнении условия (2.32) в формулу (3.1) подставим $k=k_1$, иначе $k=k_2$. Примем для связи, сопоставленной взаимодействию изгибу в узле, $k_1=k_2$.

Рассмотрим работу алгоритма расчета КВИ (канатно-веревочного изделия) в статике, предложенного в данной статье. БСА (блок-схема алгоритма) показана на рисунке 3.5.

Алгоритм состоит из двух вложенных циклов (смотрите номера в круглых скобках на рисунке 3.5). Во внутреннем цикле (1) рассчитываются перемещения узлов и реакции связей по заданным внешним силам. Во внешнем цикле (2) осуществляется расчет внешних сил по текущим позициям узлов.

Перед началом процесса расчета необходимо установить такие начальные параметры всех узлов и связей, как положение узлов в пространстве и длины связей в свободном состоянии. Положение фиксированных узлов, значение координат которых не должно изменяться в процессе расчета, и длины связей задаются исходя из условия задачи. Начальное положение остальных узлов может быть задано произвольными координатами.

Правильное задание начальных координат узлов влияет на скорость расчета. Поэтому для начального размещения желательно применение одного из алгоритмов автоматического размещения. Пример алгоритма начального размещения приведен ниже в этой статье.

Рассмотрим по шагам алгоритм, показанный на рисунке 3.5. Данный алгоритм является итеративным с переменным шагом.

Алгоритм может выполняться как после фазы начального размещения, так и после изменения условий задачи в процессе расчета. На первом этапе алгоритма вычисляется минимальный шаг и масштабный коэффициент шага. Для увеличения точности необходимо уменьшать шаг, тем самым увеличивая количество итераций алгоритма. Для непрерывных значений чисел

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} \varepsilon = 0, \quad (3.2)$$

где ε – погрешность вычисления; λ – значение шага итерации.

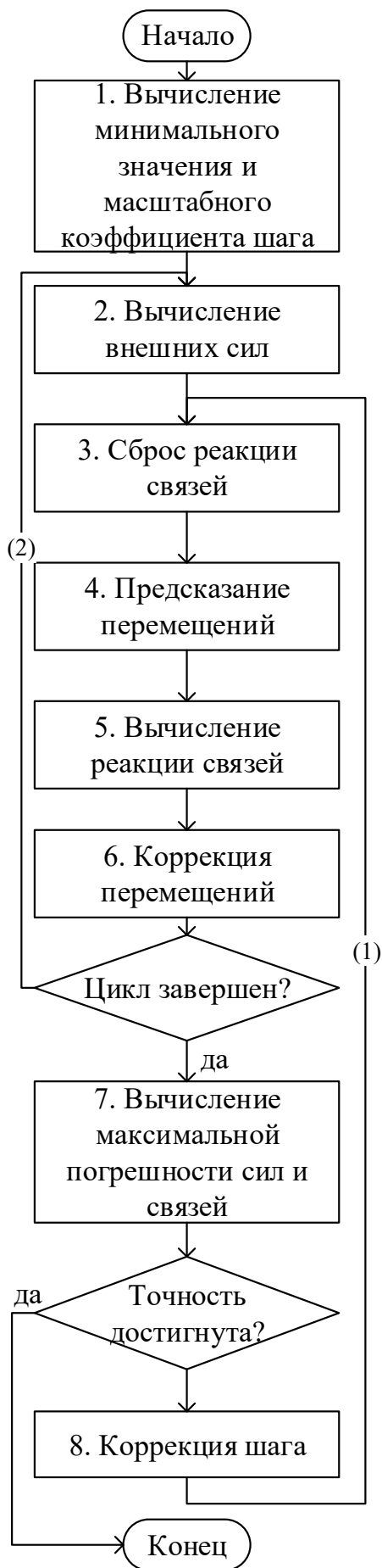


Рисунок 3.5 - БСА расчета КВИ в статике

Так, как в цифровой технике числа представляются дискретными значениями, то нулевая погрешность вычислений не достижима. Более того, при уменьшении шага итерации меньше определенного значения, из-за потери точности на операциях сложения погрешность вычислений начнет увеличиваться.

В предложенном алгоритме минимальный шаг вычисляется по следующей формуле:

$$\lambda_{min} = k_{\varepsilon} \min_{i \in N} \frac{\min_{j \in N_i} L_{0,ij}}{F_i}, \quad (3.3)$$

где k_{ε} —коэффициент, зависящий от точности представления чисел в системе; N — множество не фиксированных узлов; $L_{0,ij}$ —длина в свободном состоянии связи между узлами i и j ; F_i — абсолютное значение равнодействующей внешних сил, приложенных к узлу i .

Значение коэффициента $k_{\varepsilon}=0,004$ для чисел одинарной точности было установлено экспериментально путем сопоставления результатов численных экспериментов при различных значениях k_{ε} с результатами модельных и натуральных экспериментов.

Для определения внешних сил, необходимых для первого этапа, нужно однократно запустить этап 2 алгоритма (рисунок 3.5). Поэтому код этапа 2 лучше оформить в виде подпрограммы.

Масштабный коэффициент шага определяет скорость уменьшения шага итерации в процессе расчета:

$$\chi = \min(0,75; 1 - 181n_l^{-1,43}), \quad (3.4)$$

где n_l — количество связей в расчетной схеме.

Зависимость (3.4) получена экспериментально при тестировании алгоритма для различных χ и замере времени расчета.

На втором этапе исходя из геометрии КВИ для каждого узла вычисляется равнодействующая внешних сил. К ним относятся гидростатические, гидродинамические силы и силы тяжести. Методы определения внешних сил описаны в [31].

На третьем этапе осуществляется сброс (обнуление) реакций (внутренних сил) всех связей.

На этапе предсказания перемещений осуществляется перемещение узлов с учетом усредненных внешних сил без учета реакции связей:

$$\mathbf{r}_{p,i}^{[I]} = \mathbf{r}_i^{[I-1]} + \lambda^{[I]} \mathbf{F}_{a,i}^{[I]}, \quad (3.5)$$

$$\mathbf{F}_{a,i}^{[I]} = 0,9\mathbf{F}_{a,i}^{[I-1]} + 0,1\mathbf{F}_i^{[I]}, \quad (3.6)$$

где значение в квадратных скобках над переменной показывает номер итерации; I – номер текущей итерации; $\mathbf{r}_{p,i}$ – предсказанное перемещение узла i ; $\mathbf{F}_{a,i}$ – вектор усредненной равнодействующей внешних сил, приложенных к узлу i ; \mathbf{F}_i – вектор равнодействующей внешних сил, приложенных к узлу i ; \mathbf{r}_i – координаты узла i ; λ – текущий шаг итерации.

С целью предотвращения резких изменений внешних сил на границе раздела сред (вода-воздух) на этапе предсказания перемещений используется аппроксимация значений равнодействующей внешних сил (3.6).

Для первой итерации ($I=1$):

$$\mathbf{F}_i^{[0]} = 0, \quad \lambda^{[1]} = \lambda_{max}, \quad (3.7)$$

где λ_{max} – максимальное значение шага итерации.

Максимальное значение шага итерации

$$\lambda_{max} = k_\lambda \lambda_{min}, \quad (3.8)$$

где k_λ – динамический коэффициент шага, влияющий на скорость сходимости алгоритма.

Значение номера итерации I увеличивается в конце каждого внутреннего цикла (1) (рисунок 3.5).

Динамический коэффициент шага определяется экспериментально замерами времени расчета при различных k_λ и прочих равных условиях. В экспериментах, описанных в главе 3, k_λ принимался равным 10000.

На этапе вычисления реакции связей для каждой связи вычисляется такое значение реакции, которое на этапе коррекции перемещений должно уменьшить невязку длины этой связи:

$$T_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^{-1}}{1 + k_{ij}\lambda_{ij}^{-1}} (L_{ij} - L_{0,ij}), \quad (3.9)$$

$$\lambda_{ij} = \lambda (w_i + w_j), \quad (3.10)$$

где $L_{ij} = |\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|$ – текущая длина связи; λ_{ij} – взвешенный шаг итерации для связи ij ; k_{ij} – коэффициент реакции связи, определяемый из условий (2.32)–(2.34); w_i, w_j – веса узлов, равные нулю для фиксированных и единице для не фиксированных узлов.

Уравнение (3.9) не имеет решения при $w_i = w_j = 0$ (два фиксированных узла соединены связью). Так как такие связи не имеют смысла, перед началом работы алгоритма необходимо их удалить.

На этапе коррекции перемещений каждый не фиксированный узел перемещается с учетом реакций связей, полученных на предыдущем этапе:

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{p,i} + \lambda \sum_{j \in N_i} \frac{T_{a,ij}^{[I]} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{L_{ij}}, \quad (3.11)$$

$$T_{a,ij}^{[I]} = 0,9 T_{a,ij}^{[I-1]} + 0,1 T_{ij}, \quad (3.12)$$

где N_i – множество узлов, смежных узлу i .

С целью предотвращения резких изменений реакций связей при изменении коэффициента реакции связи k используется аппроксимация значений реакций связей (3.12).

Для первой итерации ($I=1$) $T_{ij}^{[0]} = 0$.

Этапы 2-6 выполняются многократно во внутреннем цикле алгоритма (рисунок 3.5). Количество повторений задается исходя из двух соображений:

- при уменьшении количества итераций внутреннего цикла увеличивается удельное время, приходящееся на расчет внешних сил;
- при увеличении количества итераций внутреннего цикла уменьшается реакция на изменение геометрии, что в свою очередь приводит к увеличению общего числа циклов расчета.

Поэтому оптимальное значения количества итераций внутреннего цикла задается исходя из трудоемкости вычисления внешних сил. При проведении экспериментов из главы 3 внутренний цикл состоял из 1000 итераций.

На этапе вычисления максимальной погрешности сил и связей рассчитываются текущие невязки сил для всех узлов и связей, по которым определяются соответствующие погрешности. С учетом вычисленных погрешностей принимается решение о необходимости дальнейшего расчета (перехода на новую итерацию алгоритма и на новую итерацию внешнего цикла). Если среднее значение максимальных погрешностей сил и связей на текущей итерации меньше заданного, процесс расчета завершается:

$$\varepsilon = (\varepsilon_{l,max} + \varepsilon_{F,max}) / 2, \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_{l,max} = \max_{i \in N, j \in N_i} \frac{|L_{ij} - L_{0,ij}|}{L_{0,ij}}, \quad (3.14)$$

$$\mathbf{e}_l = \begin{cases} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) / L_{ij} & | L_{ij} \neq 0 \\ (1, 0, 0) & | L_{ij} = 0 \end{cases}, \quad (3.15)$$

$$\varepsilon_{F,max} = \max_{i \in N} \frac{\left| \mathbf{F}_{a,i} + \sum_{j \in N_i} T_{a,ij} \mathbf{e}_l \right|}{\sum_{j \in N_i} T_{a,ij}}, \quad (3.16)$$

где $\varepsilon_{l,max}$ – максимальная погрешность всех связей; $\varepsilon_{F,max}$ – максимальная погрешность всех сил; \mathbf{e}_l - единичный направляющий вектор связи.

Этап коррекции текущего значения шага итерации введен для ускорения расчета. В начале расчета значение шага устанавливается равным максималь-

ному значению шага итерации (3.8). При таком шаге точность расчета минимальна, а скорость сходимости алгоритма максимальна. По мере работы алгоритма значение текущего шага уменьшается:

$$\lambda^{[I]} = \max\left(\min\left(\lambda^{[I-1]} \chi; \lambda_{\max}\right); \lambda_{\min}\right). \quad (3.17)$$

3.3.2 Алгоритм начального размещения

Для ускорения расчета перед его запуском следует произвести начальное размещение элементов расчетной схемы. Условием такого размещения является уменьшение количества связей с ненулевой реакцией, то есть с длиной $L \neq L_0$

Блок-схема алгоритма начального размещения показана на рисунке 3.6. Алгоритм является итеративным с одним циклом. Каждая итерация состоит из трех этапов. На первом этапе по невязке каждой связи предсказывается перемещение инцидентных ей узлов. На втором этапе каждый узел перемещается с учетом предсказанных перемещений от всех инцидентных ему связей.

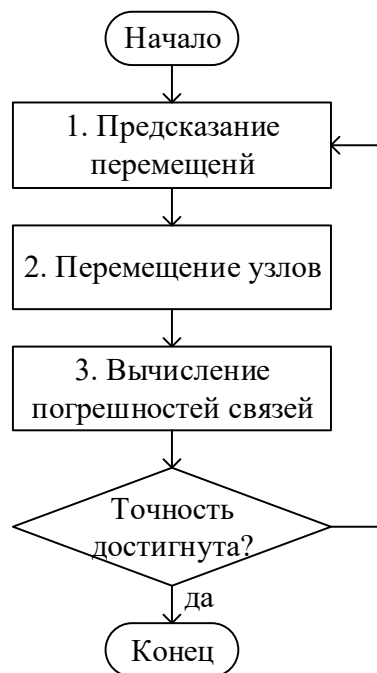


Рисунок 3.6 - БСА начального размещения

Оба этапа можно записать следующей итеративной формулой:

$$\mathbf{r}_i^{[l]} = \mathbf{r}_i^{[l-1]} + \frac{w_i}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} (L_{ij} - L_{0,ij}) \mathbf{e}_l, \quad (3.18)$$

где $|N_i|$ - мощность множества связей (количество связей), инцидентных узлу i .

В формуле (3.18) деление на $|N_i|$ необходимо для обеспечения сходимости алгоритма.

На третьем этапе вычисляется максимальная (3.19) или средняя (3.20) относительная погрешность связей. При уменьшении этой погрешности меньше заданного значения алгоритм размещения прекращает свою работу. Иначе происходит выполнение следующей итерации.

$$\varepsilon_{l,max} = \max_{i \in N, j \in N_i} \varepsilon_{l,ij}, \quad (3.19)$$

$$\varepsilon_{l,max} = \frac{1}{|N|} \sum_{i \in N} \frac{1}{|N_i|} \sum_{j \in N_i} \varepsilon_{l,ij}, \quad (3.20)$$

$$\varepsilon_{l,ij} = |L_{ij} - L_{0,ij}| / L_{0,ij}, \quad (3.21)$$

где $\varepsilon_{l,ij}$ - относительная погрешность одной связи.

3.3.3 Оптимизация алгоритма расчета методом точечных масс

Предложенные алгоритмы расчета КВИ в статике и начального размещения рассчитаны на работу с применением параллельных вычислений на одном или нескольких вычислительных устройствах.

Условием эффективного распараллеливания алгоритма является сведением к минимуму числа возможных одновременных обращений (коллизий) к одним данным со стороны различных вычислительных потоков.

При работе в гетерогенной или распределенной среде, где у различных вычислительных устройств может быть своя локальная память нужно свести к минимуму обмен данными между этими устройствами.

Коллизии возможны только на этапе вычисления реакций связей или на этапе предсказания перемещения алгоритма начального размещения. На этих

этапах различные потоки могут одновременно изменять параметры одного узла. При переборе всех связей для каждой изменяются параметры инцидентных ей узлов. При этом две связи, одновременно обрабатываемые в разных потоках, могут иметь общие узлы.

Для сведения вероятности одновременного доступа к нулю предлагается разбить массив связей на несколько сегментов и выполнять сегменты последовательно, а связи одного сегмента – параллельно во времени. Разбиение нужно произвести так, чтобы связи в одном сегменте не имели общих узлов. Такое разбиение позволяет осуществить алгоритм раскраски графов [58]. При этом узлам расчетной схемы сопоставляются вершины, а связям – ребра графа.

При работе алгоритма на нескольких вычислительных модулях в гетерогенной и/или распределенной среде необходимо минимизировать объем общих данных (узлов и связей) этих модулей. Для выполнения этого условия предлагается разделить узлы расчетной схемы на несколько групп по одной на каждый вычислительный модуль. Размер каждой группы определяется исходя из мощности модуля. Связи, инцидентные только узлам одной группы размещаются и обрабатываются в соответствующем вычислительном модуле одновременно с другими модулями. Связи, инцидентные узлам разных групп, размещаются и обрабатываются в модуле, имеющем доступ к памяти всех других модулей, после обработки связей всех групп.

Для уменьшения обмена данными между группами необходимо произвести такое разделение, при котором количество межгрупповых связей будет минимально. Такое разделение позволяет выполнить эффективный алгоритм разделения графов на слабосвязанные сегменты [68].

3.3.4 Применение графического процессора в задачах расчета сетных орудий рыболовства

Рассмотрим реализацию алгоритма расчета, основанного на методе взаимодействующих частиц (методе точечных масс) на графическом процессоре при статической постановке задачи.

Далее будет описана реализация алгоритма для шейдера, работающего на графическом процессоре [1; 7; 62]. В качестве идентификатора модуля графического процессора в описываемом алгоритме используются одномерные вектора, определяющие смещение элемента (узла) в массиве узлов и смещение связи между элементами в массиве связей. Таким образом графический процессор одновременно обрабатывает множество узлов и связей расчетной схемы.

Рассмотрим реализацию алгоритма на языке HLSL для шейдерной модели версии 5. Основываясь на описанной выше расчетной схеме, составим обобщенную блок-схему алгоритма, показанную на рисунке 3.7.

Алгоритм состоит из двух вложенных циклов. Во внутреннем цикле осуществляется расчет внутренних сил взаимодействия между элементами (точечными массами) методом последовательных приближений (шейдер IntLinks) и последующая коррекция перемещения элементов (шейдер IntNodes). Условием выхода из внутреннего цикла может служить как достижение необходимой точности с учетом ограничений (расстояния между элементами), так и выполнение заданного количества итераций цикла.

Во внешнем цикле осуществляется расчет внешних сил с учетом текущих геометрических характеристик (шейдер ExtLinks) и перемещение элементов (массовых точек) (шейдер ExtNodes). Условием выхода из внешнего цикла является внешнее событие, связанное либо с действием пользователя, либо с переходом в состояние выполнения одного из условий завершения процесса расчета.

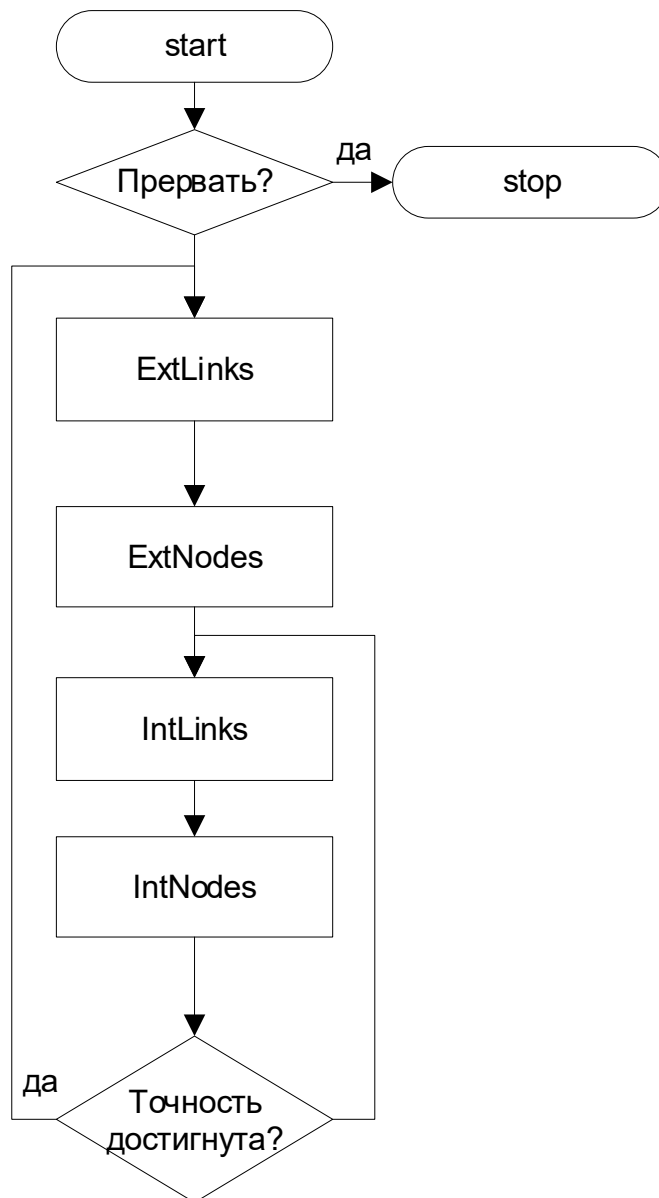


Рисунок 3.7 - Обобщенная блок-схема реализации алгоритма на шейдерной модели версии 5

3.3.5 Оптимизация расчета сил гидродинамического сопротивления

Одним из трудоемких этапов расчета силовых и геометрических характеристик сетного орудия рыболовства, находящегося в потоке воды, является вычисление сил гидродинамического сопротивления, приложенных к каждому элементу орудия. Рассмотрим данный процесс более подробно.

Проекции сил гидродинамического сопротивления имеют следующие эвристические зависимости от проекций участка сетного полотна:

$$R_x = \frac{1}{2} \left(c_0 + (c_{90} - c_0) \frac{\sqrt{r^2 - r_x^2}}{r} \right) v^2 \rho S F_o, \quad (3.22)$$

$$R_y = \frac{1}{2} c_{90} \frac{r_x r_y}{r^2} v^2 \rho S F_o, \quad (3.23)$$

$$R_z = \frac{1}{2} c_{90} \frac{r_x r_z}{r^2} v^2 \rho S F_o, \quad (3.24)$$

где R_x, R_y, R_z - проекции сил гидродинамического сопротивления; c_0 - гидродинамический коэффициент для сетного полотна, расположенного параллельно потоку воды; c_{90} - гидродинамический коэффициент для сетного полотна, расположенного перпендикулярно потоку воды; r - длина связи между узлами расчетной схемы (точечными массами); r_x, r_y, r_z - длина проекции связи на оси прямоугольной декартовой системы координат, ось OX которой направлена по направлению вектора скорости перемещения узла относительно воды; v - абсолютное значение скорости перемещения узла относительно воды; ρ - плотность воды; S - площадь участка сетного полотна, F_o - сплошность сетного полотна.

Гидродинамические коэффициенты находятся по формулам [31]:

$$c_0 = F_o \text{Re}^{-b}, \quad (3.25)$$

$$c_{90} = 16 \left(\frac{2F_o}{\text{Re}} \right)^{0.28}, \quad (3.26)$$

$$\text{Re} = \frac{d}{\nu} v, \quad (3.27)$$

где Re - число Рейнольдса для сетного полотна; d - диаметр ниток сетного полотна; ν - кинематическая вязкость воды; b - коэффициент, учитывающий тип материала сетного полотна ($b=0.165$ для капрона, $b=0.16$ - для полиэтилена) [31].

Для вычисления гидродинамических коэффициентов в формулах (3.25) и (3.26) используется математическая операция возведения в степень. Данная операция достаточно трудоемка при вычислениях на ЭВМ.

Рассмотрим метод оптимизации вычисления сил гидродинамического сопротивления, основанный на разложении их функции от скорости в ряд Тейлора [21] и применении SIMD-инструкций [78] центрального и графического процессоров.

Подставив формулы (3.25) - (3.27) в формулы (3.22) - (3.24) можно преобразовать последние к виду:

$$R = k_0 v^{2-b} + (k_{90} v^{1.72} - k_0 v^{2-b}) \chi, \quad (3.28)$$

где R – одна из проекций сил гидродинамического сопротивления; k_0, k_{90} – постоянные для участка сетного полотна коэффициенты, зависящие от параметров посадки и материала участка; χ – безразмерный параметр, определяющий ориентацию участка относительно вектора относительной скорости v .

Коэффициент k_{90} одинаков для каждой проекции R . Коэффициент k_0 различен для каждой проекции R . Для проекций на оси координат OY и OZ исходя из (3.23), (3.24) $k_0=0$. Данные коэффициенты постоянны в течение всего процесса расчета и вычисляются перед началом работы основного цикла алгоритма.

Параметр χ является переменным и вычисляется на каждой итерации алгоритма для каждой проекции R .

В выражении (3.28) математические операции возведения переменной v в степень запишем в виде:

$$f(v) = v^p, \quad (3.29)$$

где $p=2-b$ для k_0 и $p=1.72$ для k_{90} (3.28).

Разложим (3.29) в ряд Тейлора четвертого порядка [21]. Общий вид разложения задается выражением:

$$f(v) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{f^{(i)}(a)}{i!} (v-a)^i, \quad (3.30)$$

где $f^{(i)}(a)$ – значение производной i -го порядка разлагаемой функции в точке a .

При $a=1$ для (3.29) при разложении четвертого порядка получим:

$$f(v) = 1 + p(v-1) \left(1 + \frac{1}{2}(p-1)(v-1) \left(1 + \frac{1}{3}(p-2) \left((v-1) \left(1 + \frac{1}{4}(p-3)(v-1) \right) \right) \right) \right) \right), \quad (3.31)$$

В выражении (3.31) используются только операции умножения, сложения и вычитания. Данные операции на современных процессорах выполняются аппаратными средствами и быстро.

Реализуем алгоритм вычисления (3.31) с использованием SIMD-инструкций для работы на центральном или графическом процессоре. В современном центральном процессоре архитектуры x86 и большинстве графических процессоров одна SIMD инструкция способна обрабатывать до четырех вещественных значений одинарной точности одновременно. Учитывая это и то, что в выражении (3.31) присутствует четыре группы однотипных последовательностей операций, данный алгоритм можно оптимизировать. При оптимизации необходимо учесть и тот факт, что для вычисления трех проекций силы гидродинамического сопротивления для каждого узла необходимо вычислить (3.29) дважды (для k_0 и k_{90}).

Для анализа эффективности и точности описанного алгоритма и определения его основных характеристик (области определения, скорости работы, погрешности вычислений) была разработана компьютерная программа. При помощи компьютерной программы был проведен численный эксперимент, описанный в главе 4.

При разработке программы был реализован предлагаемый алгоритм с использованием вычислительных ресурсов центрального процессора с набором инструкций SSE3.

3.3.6 Пример реализации

По описанному выше алгоритму была разработана компьютерная программа расчета ставной разноглубинной сети с вешками в статике, позво-

ляющая определить геометрию сети и натяжения во всех ее элементах при заданных конструктивных параметрах сети и параметрах внешней среды (скорости и направлении течения, плотности и кинематической вязкости воды). Внешний вид программы показан на рисунке 3.8.

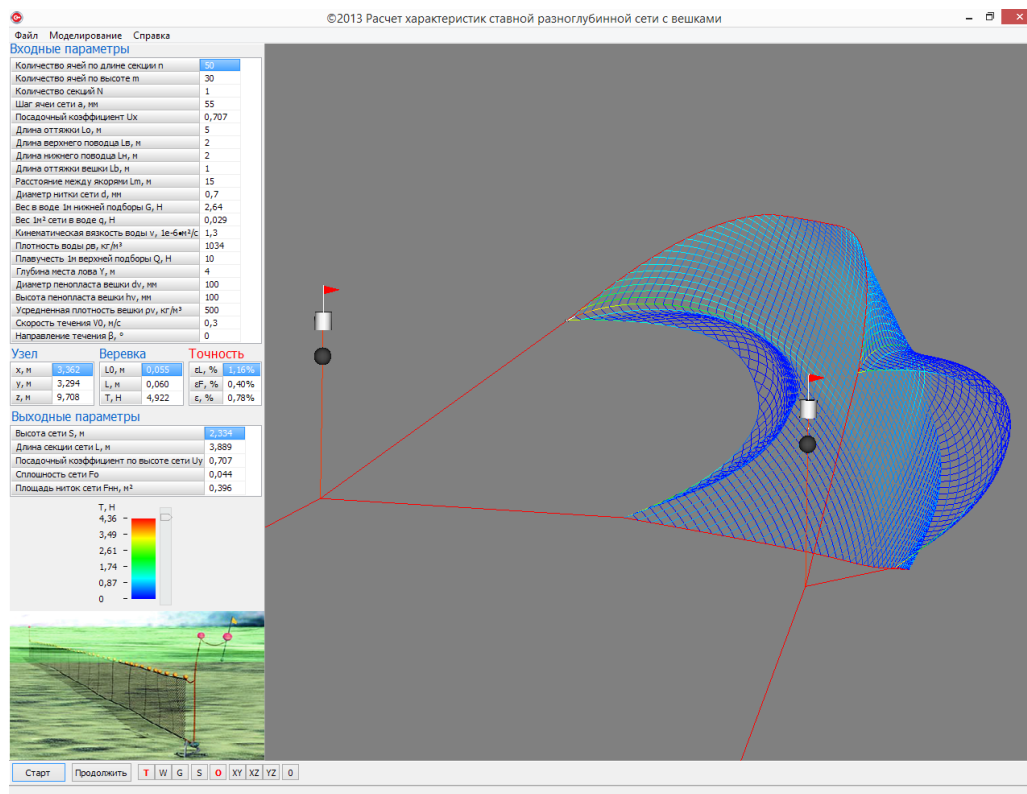


Рисунок 3.8 - Компьютерная программа расчета ставной сети в статике

Данная программа написана с применением современных технологий, таких как вычисления с использованием графического процессора [1; 7; 62] и отображение вида сети в стереоскопическом режиме (при наличии соответствующего оборудования) [59].

3.4 Алгоритмы решения задачи на ЭВМ при динамической ее постановке

Рассмотрим алгоритмы расчета сетных орудий рыболовства методом точечных масс при динамической постановке задачи.

В данном разделе будет описана модификация итеративного алгоритма, предложенного в предыдущем разделе, применительно к динамике, а также

его реализация на центральном процессоре с применением набора SIMD-команд (одна команда одновременно обрабатывает несколько данных). В конце раздела показан пример реализации алгоритма в виде компьютерной программы на примере ставного невода.

3.4.1 Алгоритм расчета канатно-веревочного изделия методом точечных масс

Рассмотрим работу алгоритма расчета КВИ в статике, предложенного в данной статье. БСА (блок-схема алгоритма) показана на рисунке 3.9. Расчет реакции связей проведем аналогично расчету в статике.

Алгоритм состоит из двух вложенных циклов (смотрите номера в круглых скобках на рисунке 3.9). Во внутреннем цикле (1) рассчитываются перемещения узлов и реакции связей за текущий временной шаг с учетом внешних сил. Во внешнем цикле (2) осуществляется расчет внешних сил по текущим координатам узлов на текущем временном шаге и обновление значений координат и скоростей узлов для следующего временного шага. Условием завершения внутреннего цикла является достижение максимальной заданной погрешности на длину всех связей (длина ниток). Внешний цикл является бесконечным и прерывается извне (по команде пользователя либо выполнения заданных условий задачи).

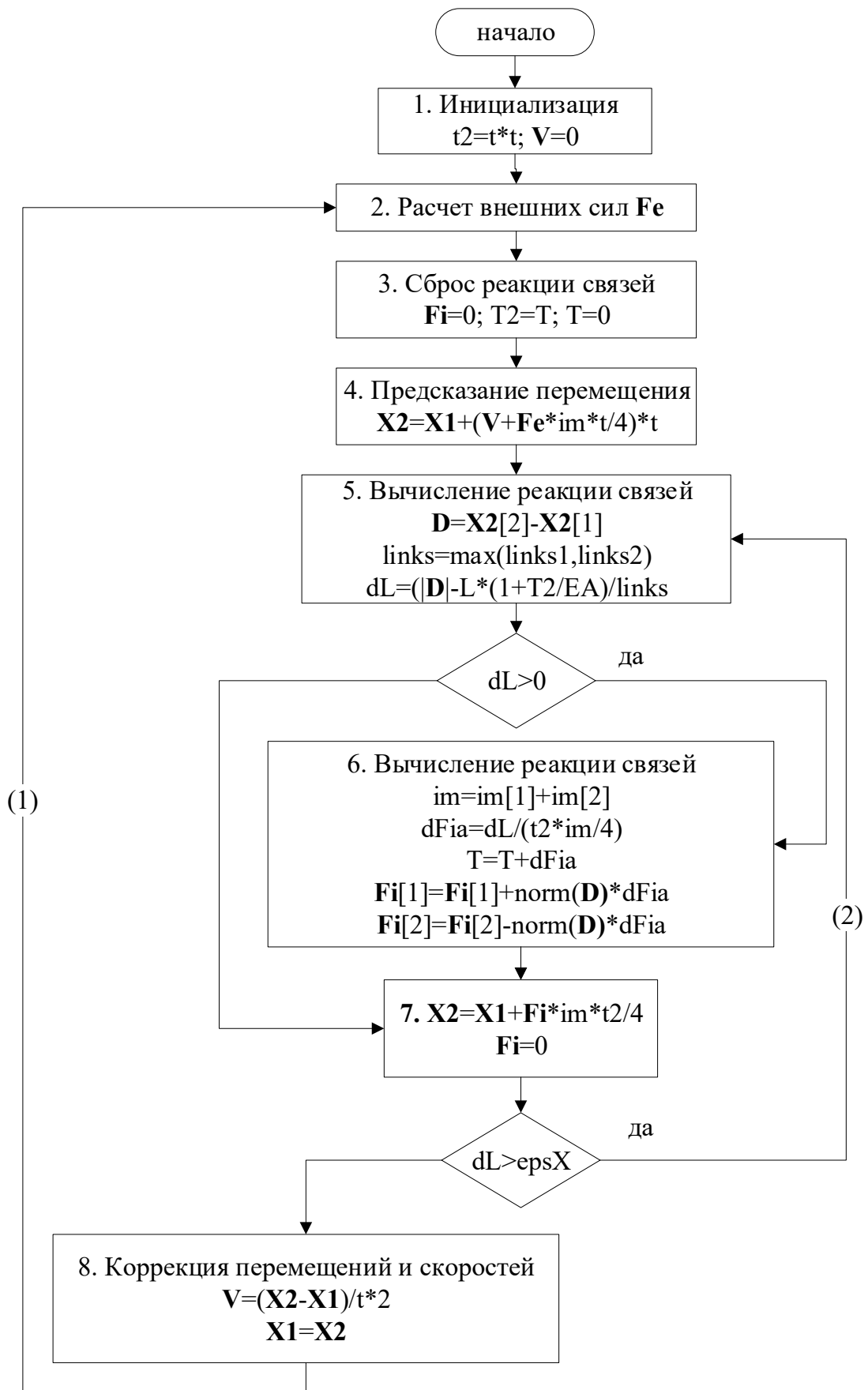


Рисунок 3.9 – БСА расчета КВИ в динамике

На рисунке 3.9 использованы следующие обозначения физических величин:

- \mathbf{F}_i – внутренняя сила, приложенная к узлу;
- \mathbf{F}_e – внешняя сила, приложенная к узлу;
- T – сила натяжения элемента (веревки);
- T_2 – итоговая сила натяжения элемента (результат);
- \mathbf{X}_1 – координаты узла в начале расчетного шага;
- \mathbf{X}_2 – координаты узла в конце расчетного шага;
- \mathbf{V} – вектор средней скорости перемещения узла на период шага;
- $m = 1/m$ – обратная масса, сосредоточенная в узле (для фиксированных узлов $m=0$);
- D – покоординатный размер элемента после перемещения;
- $links_1, links_2$ – количество элементов, связанных с узлом;
- L – начальная длина элемента (без растяжения);
- E – модуль упругости элемента;
- A – площадь поперечного сечения элемента;
- dL – невязка по длине;
- dF_i – невязка по натяжению;
- t – длительность расчетного шага;
- eps_X – заданная погрешность расчета перемещений.

Индексы [1] и [2] обозначают первый и второй узел элемента. Величины, выделенные жирным шрифтом, являются векторными. Функция \max возвращает большее из двух значений своих аргументов. Функция norm выполняет нормализацию вектора, приводя его к единичному.

Перед началом расчета необходимо задать такие начальные значения, как скорость и положение узлов в пространстве, а также выбрать фиксированные в пространстве узлы. Указанные параметры могут быть заданы как условием задачи, так и предварительным начальным размещением при помощи алгоритма расчета при статической постановке задачи, описанного выше.

Процесс является бесконечным. Обмен данными с системой визуализации осуществляется одновременно (отдельными потоками) с работой основного алгоритма. Входными/выходными параметрами являются:

- конструкция КВИ;
- координаты всех узлов X ;
- скорости всех узлов V ;
- обратные массы, сосредоточенные в узлах im ;
- длины всех веревок L ;
- площади поперечных сечений веревок A ;
- коэффициенты упругости веревок E ;
- погрешность вычислений $epsX$;
- длительность расчетного шага t .
- силы натяжения веревок.

Рассмотрим по шагам алгоритм расчета, приведенный на рисунке 3.9.

Данный алгоритм является итеративным с заданным временным шагом:

1. Вычислим t_2 – квадрат времени шага, зададим $V=0$ для всех узлов.
2. По координатам узлов X и их скоростям V рассчитаем внешние силы F_e для каждого узла.
3. Для каждого узла установим $F_i=0$, для каждого элемента (веревки) установим $T=0$ и сохраним T в T_2 .
4. Для каждого узла по формуле $X_2=X_1+(V+F_e*im*t/4)*t$ вычислим предсказанные координаты X_2 по истечении времени t .
5. Для каждого элемента вычислим получившийся после предсказания размер $D=X_2[2]-X_2[1]$, где индексы обозначают номер узла элемента; для каждого элемента вычислим количество элементов $links1$ и $links2$, соединенных с его концами (включая сам элемент); для каждого элемента вычислим $dL=(|D|-L*(1+T_2/(E*A)))/\max(links1,links2)$.
6. Для элементов, у которых $dL>0$, вычислим
 $im=im[1]+im[2]$;
 $dF_{ia}=dL/(t_2/4*im)$;

$$T=T+dFia;$$

$$F_i[1]=F_i[1]+norm(D)*dFia;$$

$$F_i[2]=F_i[2]-norm(D)*dFia.$$

7. Для каждого узла вычислим $X_2=X_1+F_i*im*t^2/4$; для каждого узла установим $F_i=0$. Если хоть у одного элемента $dL>epsX$, то переходим к шагу 5.
8. Для каждого узла вычислим $V=(X_2-X_1)/t*2$ и установим $X_1=X_2$; переходим к шагу 2.

3.4.2 Пример реализации

Для расчета динамики ставного подвесного невода была создана компьютерная программа: «Динамика крыла ставного подвесного невода». Так, как поток воды направлен параллельно поверхности воды, перпендикулярно крылу невода, то расчет можно проводить в плоскости, перпендикулярной крылу, то есть в двумерном пространстве.

Рассмотрим работу программы «Динамика крыла ставного подвесного невода». Окно программы, показанное на рисунке 3.10, разделено на несколько основных частей:

- главного меню для управления программой;
- вкладок для выбора необходимой страницы;
- области отображения активной страницы;
- панели быстрого доступа, дублирующей некоторые основные команды главного меню.

Главное меню программы состоит из трех подменю: «Файл», «Моделирование» и «Справка». В подменю «Файл» находятся команды загрузки и выгрузки файлов входных параметров. В подменю «Моделирование» находятся команды управления процессом расчета:

- «Старт» - запуск/перезапуск расчета;
- «Стоп» - приостановка расчета;
- «Продолжить» - продолжение расчета после приостановки.

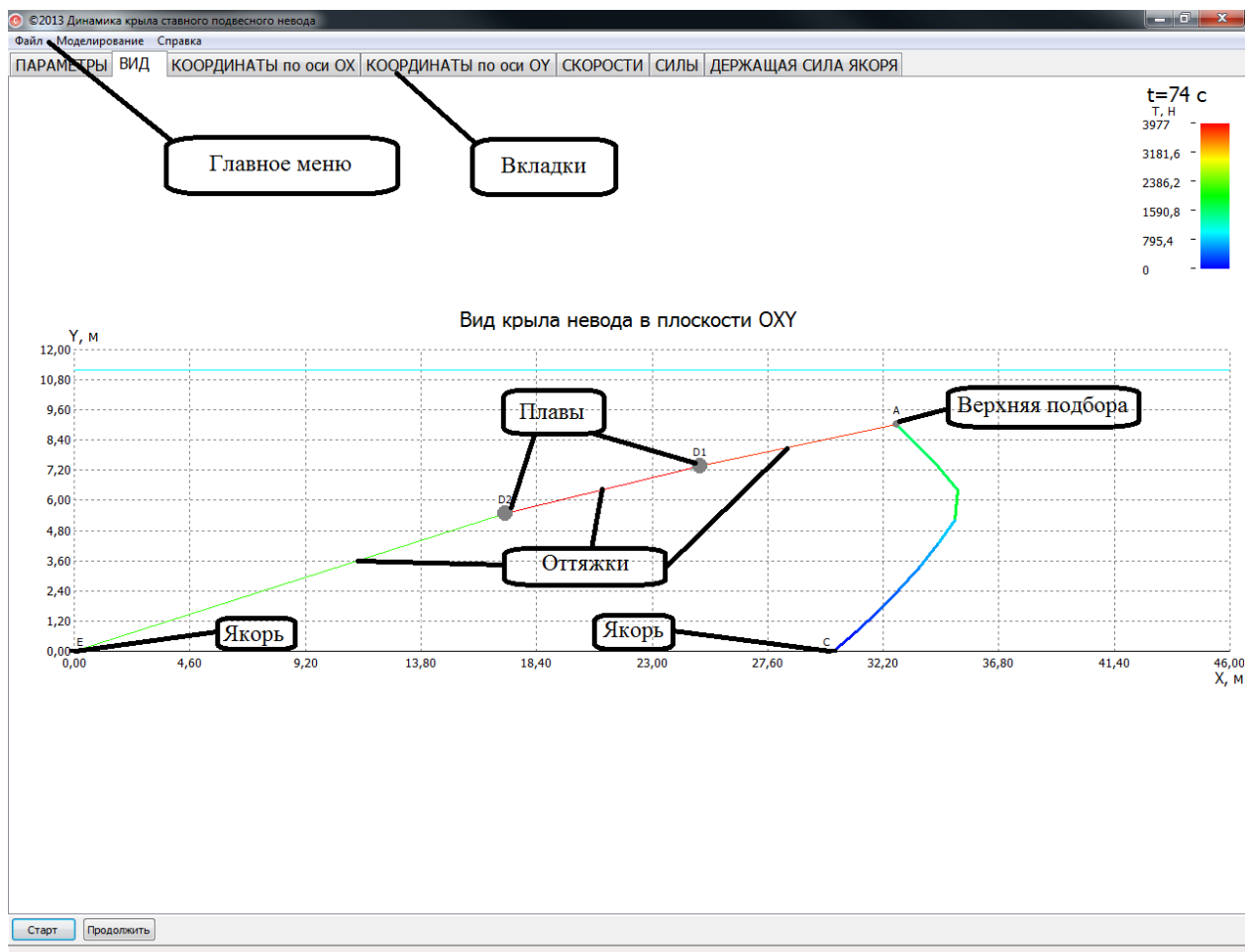


Рисунок 3.10 - Компьютерная программа
«Динамика крыла ставного подвешного невода»

Все три команды дублируются кнопками на панели быстрого доступа. Возможность приостановки расчета с последующим продолжением используется для корректирования входных параметров в ходе расчета.

В подменю «Справка» находятся команда вызова справки по условным обозначениям, используемым в программе, а также команда открытия диалога «О программе».

Для выбора необходимой страницы предназначены семь вкладок, расположенных над областью отображения страниц. Все страницы можно разделить на три группы:

1. ввода входных и отображения выходных параметров;
2. схематического отображения крыла невода;
3. графиков зависимостей.

В первой группе содержится страница «ПАРАМЕТРЫ», во второй – «ВИД», а в третьей страницы: «КООРДИНАТЫ по оси ОХ», «КООРДИНАТЫ по оси ОУ», «СКОРОСТИ», «СИЛЫ» и «ДЕРЖАЩАЯ СИЛА ЯКОРЯ» (см. рис. 5).

Страница «ПАРАМЕТРЫ», показанная на рисунке 3.11, разделена на четыре области:

1. область ввода входных параметров;
2. область вывода выходных параметров в виде числовых значений;
3. область графика зависимости скорости течения от времени, построенного по входным параметрам;
4. информационной области с изображением графика зависимости скорости течения от времени.

Входные параметры программы можно разделить на три группы:

1. конструктивные параметры;
2. параметры, определяющие скорость течения воды;
3. параметры, не входящие в первые две группы.

Конструктивные параметры влияют на геометрию крыла ставного невода, поэтому при их изменении дальнейшее продолжение расчета после его приостановки невозможно. Параметры, определяющие скорость течения воды, задают начальную скорость течения и коэффициенты, используемые в выражении зависимости скорости течения от времени. После изменения данной группы параметров автоматически обновляется график зависимости скорости течения воды от времени.

К конструктивным параметрам относятся параметры, задающие:

- количество ячеек по верхней и боковой кромке крыла: n , m ;
- шаг ячеек дели крыла: a (мм);
- посадочный коэффициент по длине крыла: U_x ;
- длины оттяжек: L_{OT} , $L_{Г1}$, $L_{Г2}$ (м).

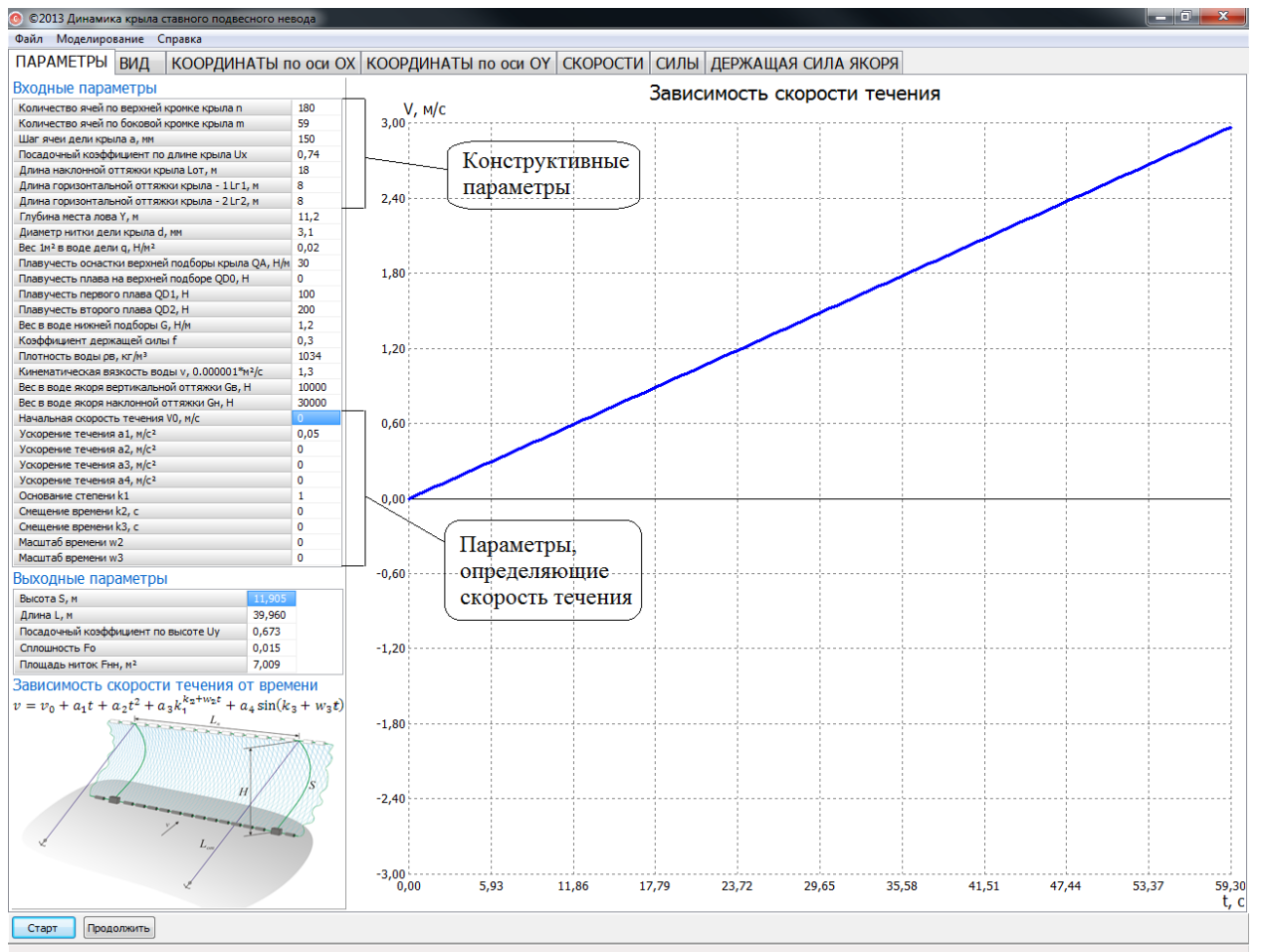


Рисунок 3.11 - Страница «ПАРАМЕТРЫ»

К параметрам, определяющим скорость течения, относятся: скорость течения в начале расчета v_0 и коэффициенты a_1 - a_4 , k_1 - k_3 , w_2 , w_3 в функции зависимости скорости течения от времени

$$v = v_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 k_1^{k_2 + w_2 t} + a_4 \sin(k_3 + w_3 t) \quad (3.32)$$

В третью группу собраны все остальные параметры:

- глубина места лова: Y (м);
- диаметр ниток дели крыла: d (мм);
- плавучесть дели, оснастки верхней подборы и плавов: q , Q_A , Q_{D0} , Q_{D1} , Q_{D2} (Н);
- вес нижней подборы: G (Н);
- плотность и кинематическая вязкость воды: ρ_B (кг/м³), ν (м²/с);
- коэффициент держащей силы: f .

На странице «ВИД», показанной на рисунке 3.10, отображается проекция крыла невода в плоскости OXY . В правом верхнем углу отображаются текущее время процесса и цветовая гистограмма сил натяжения в элементах крыла. Текущие значения таких параметров, как координаты и силы натяжения для различных элементов крыла можно определить как по координатной сетке и цветовой гистограмме, так и наведением указателя мыши на соответствующий элемент. Отдельные элементы крыла на виде подписаны буквенными обозначениями, расшифровку которых можно найти по команде «Условные обозначения» в подменю «Справка».

На страницах «КООРДИНАТЫ по оси OX » и «КООРДИНАТЫ по оси OY » отображаются графики зависимостей координат различных точек крыла ставного подвешного невода от времени. По мере хода процесса графики постоянно обновляются. При перемещении указателя мыши по графикам одновременно отображаются значения времени и координат в точке под указателем.

На странице «СКОРОСТИ» графически отображаются зависимости скоростей течения, подбор и якорей от времени.

На странице «СИЛЫ» графически отображаются зависимости от времени сил натяжения в оттяжках и гидродинамического сопротивления крыла невода.

На странице «ДЕРЖАЮЩАЯ СИЛА ЯКОРЯ» графически отображаются зависимости от времени держащих сил якорей вертикальной и наклонной оттяжек невода.

3.5 Выводы по главе 3

В главе 3 были рассмотрены:

- вычислительная база на основе персонального компьютера с центральным и графическим процессорами;
- инструментарий разработки программного обеспечения;

- алгоритмы, основанные на методе точечных масс, для расчета орудий рыболовства, состоящих из большого числа гибких ниток и веревок, при статической и динамической постановке задачи;
- блок-схемы и пошаговое описание алгоритмов;
- фрагменты кодов на центральном процессоре с использованием SIMD-инструкций и на графическом процессоре;
- примеры реализации алгоритмов в компьютерных программах.

Прикладная значимость разработанных в процессе выполнения диссертационного исследования алгоритмов заключается в практическом применении результатов в виде компьютерных программ расчета орудий и процессов рыболовства.

Разработанные и зарегистрированные в Роспатенте в ходе выполнения исследования компьютерные программы представлены в Приложении А.

Все компьютерные программы используются в учебном процессе в ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет».

ГЛАВА 4. ВЕРИФИКАЦИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В главе рассмотрены результаты работ компьютерных программ, разработанных в процессе выполнения диссертационного исследования на основе расчетных схем и алгоритмов, описанных в предыдущих главах.

Часть результатов вычислительных экспериментов, проведенных с использованием разработанных компьютерных программ, сопоставлены с имеющимися и полученными в ходе исследования экспериментальными данными, а также с результатами, полученными эмпирическим путем.

4.1 Вычислительные эксперименты при статической постановке задачи

4.1.1 Цилиндрическая сетная конструкция

Проведем численные эксперименты по определению геометрии и натяжений в нитках сетного полотна цилиндрической формы, равномерно закрепленного между двумя обручами и находящейся под действием сил тяжести. Входные параметры экспериментов:

- шаг ячеей $a=35$ мм;
- количество равномерно посаженных по обручу ячеей $n=10$;
- количество ячеей по высоте сетного полотна $m=8$;
- диаметр нитки $d=2$ мм;
- диаметр нижнего обруча $D_1=156$ мм;
- диаметр верхнего обруча эксперимента 2 $D_2=156$ мм;
- вес нитки $q_H=Q/4nm=0,001875$ Н при $Q=0,6$ Н;
- вес нижнего обруча с грузом $G=13$ Н.

Входные параметры для экспериментов 1 и 2 показаны на рисунках 4.1 и 4.2 соответственно. На рисунках 4.3 и 4.4 показан трехмерный вид (рисунки 4.3а и 4.4а) и график меридиана (рисунки 4.3б и 4.4б) для первого и второго эксперимента соответственно.

Количество ячеек по обручу n	10
Количество ячеек по высоте m	8
Вес груза G , Н	50
Диаметр верхнего обруча d_2 , мм	0
Диаметр нижнего обруча d_1 , мм	156

Задание параметров для всех рядов ✕

Шаг ячейки a , мм	Диаметр нитки d , мм
<input type="text" value="35"/>	<input type="text" value="2"/>
Вес нитки q , Н	Модуль упругости нитки E , ГПа
<input type="text" value="0,001875"/>	<input type="text" value="1,5"/>

Рисунок 4.1 – Входные параметры - эксперимент 1

Количество ячеек по обручу n	10
Количество ячеек по высоте m	8
Вес груза G , Н	13
Диаметр верхнего обруча d_2 , мм	156
Диаметр нижнего обруча d_1 , мм	156

Задание параметров для всех рядов ✕

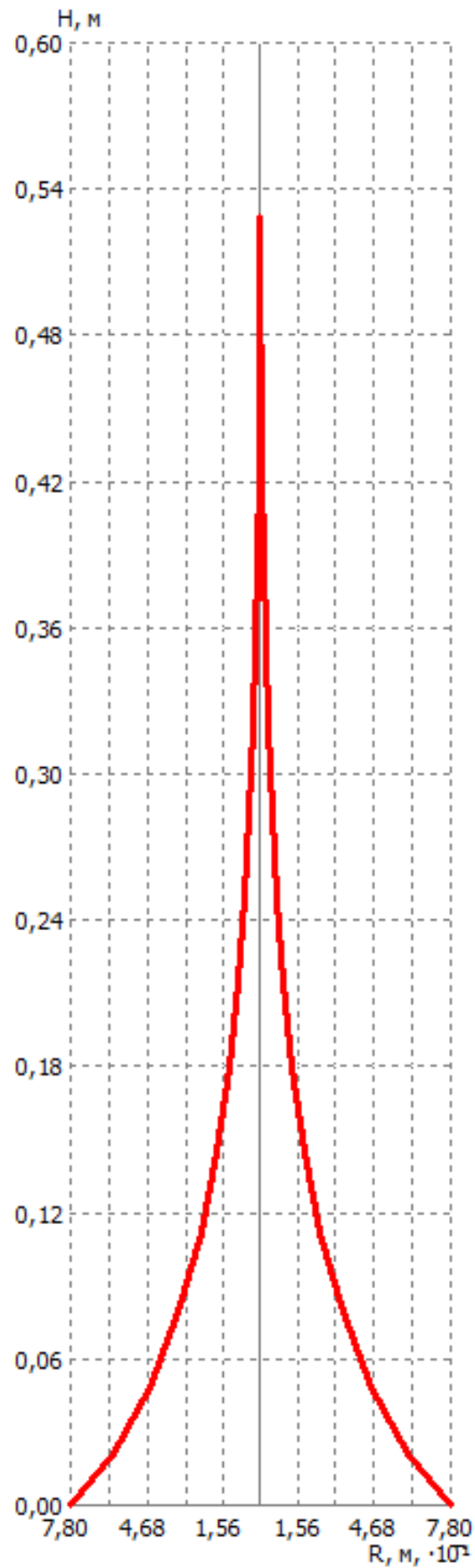
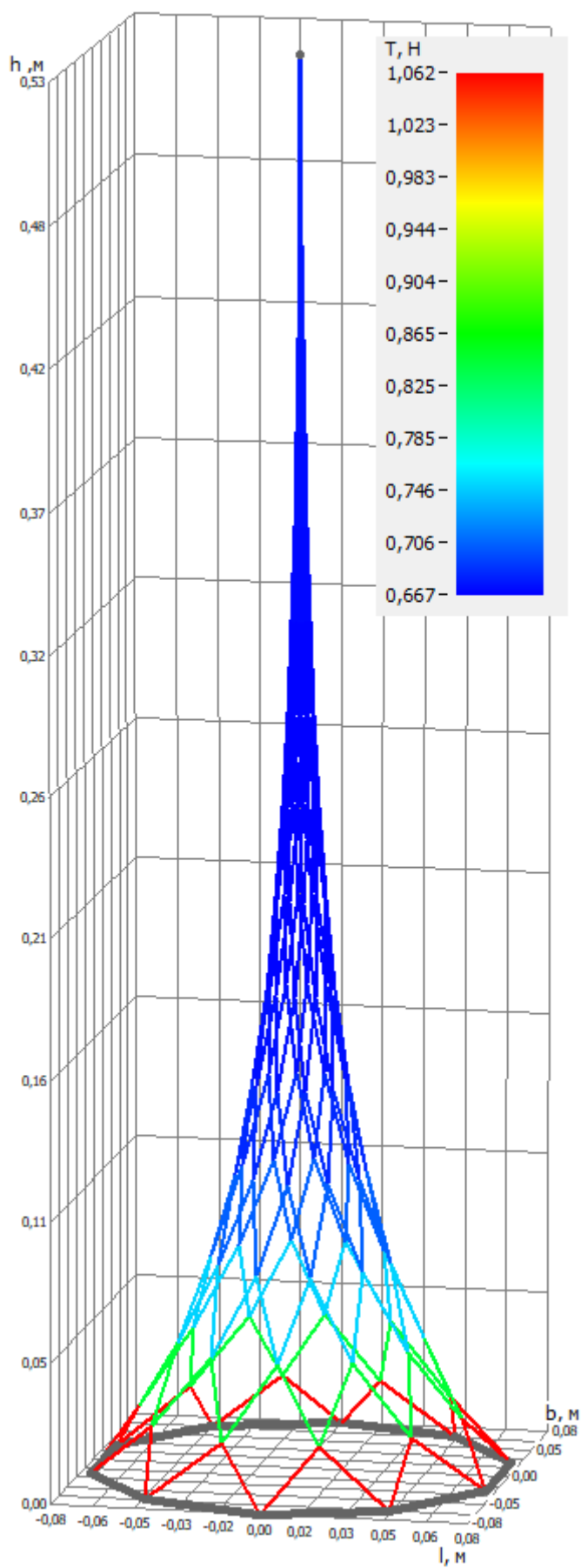
Шаг ячейки a , мм	Диаметр нитки d , мм
<input type="text" value="35"/>	<input type="text" value="2"/>
Вес нитки q , Н	Модуль упругости нитки E , ГПа
<input type="text" value="0,001875"/>	<input type="text" value="1,5"/>

Рисунок 4.2 – Входные параметры - эксперимент 2

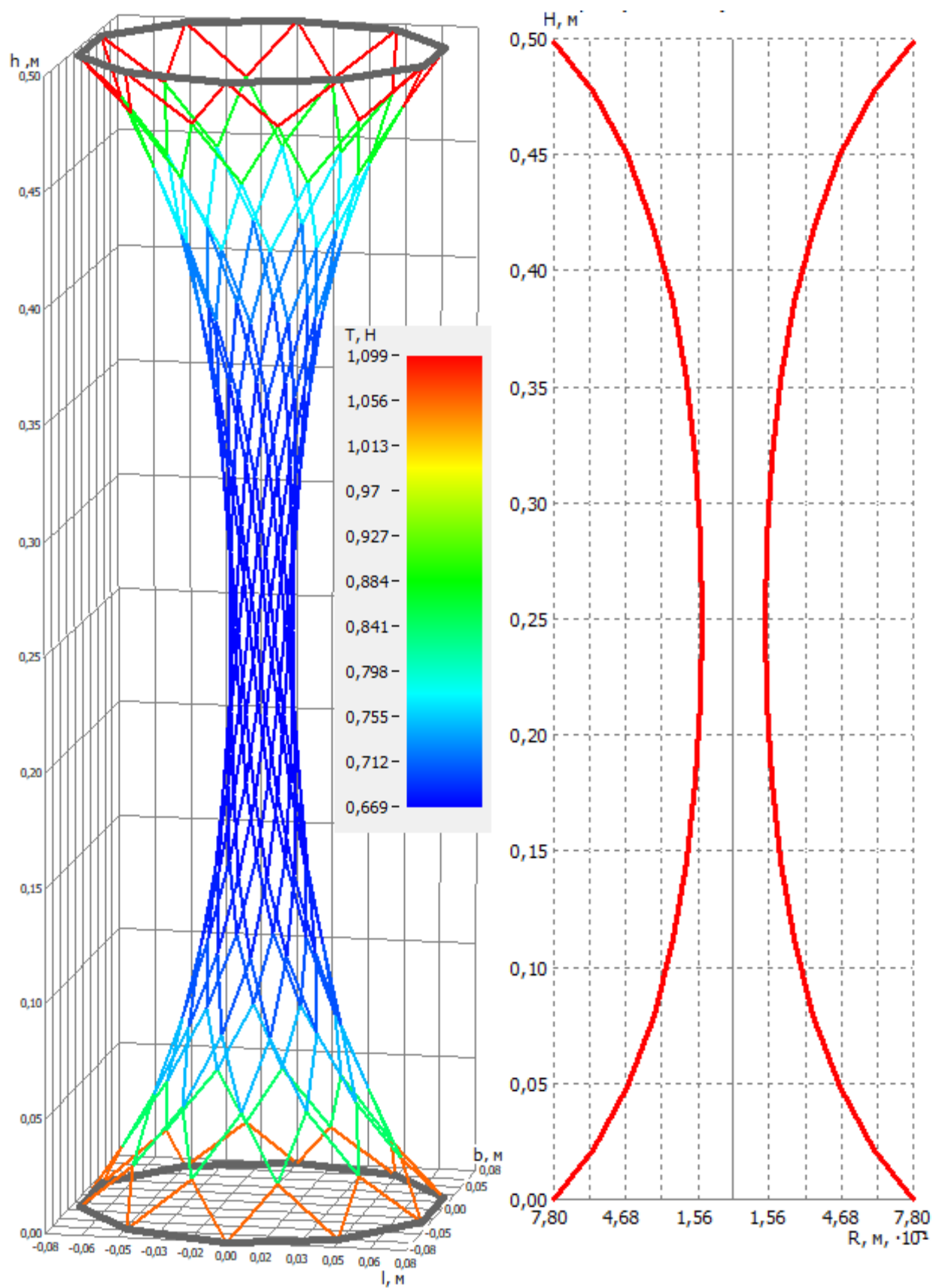
В таблице 4.1 приведены расчетные значения посадочного коэффициента U_x по шести нижним рядам для эксперимента 1. В таблице 4.2 приведены расчетные значения посадочного коэффициента U_x и высоты ряда h по всем рядам для эксперимента 2.

Таблица 4.1 - Посадочный коэффициент U_x по рядам – эксперимент 1

№ ряда	6	5	4	3	2	1
U_x	0,27	0,29	0,35	0,43	0,55	0,70



а) б)
Рисунок 4.3 - Эксперимент 1 – сетной конус



а)

б)

Рисунок 4.4 – Эксперимент 2 – сетное полотно, закрепленное между обручами

Таблица 4.2 - Расчетные параметры – эксперимент 2

№ ряда	U_x	h , мм
16	0,56	21,6
15	0,42	27,2
14	0,31	30,6
13	0,24	32,6
12	0,18	33,7
11	0,15	34,3
10	0,13	34,6
9	0,12	34,7
8	0,13	34,7
7	0,15	34,6
6	0,18	34,3
5	0,24	33,7
4	0,31	32,6
3	0,41	30,6
2	0,54	27,1
1	0,70	21,5

4.1.2 Ставная сеть

Проведем вычислительный эксперимент с применением компьютерной программы, разработанной на основе дискретной расчетной схемы ставной сети с использованием интерполяции, описанной в главе 2.

В качестве входных параметров для вычислительного эксперимента возьмем параметры моделей сетей № 4 и № 5 из экспериментов, проводимых в гидроканале ЗАО «МариНПО» (г. Калининград) [34] в 2010 году. Параметры этих моделей указаны в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Конструктивные характеристики моделей сетей

Мо- дель №	Диаметр нитей d , мм	Шаг ячей a , мм	Длина сети L , м	Вы- сота сети S , м	Площадь ниток F_n , м ²	Сплош- ность F_o	Вес в воде q , Н
4	2,1	30	1,2	0,85	0,146	0,14	0,8
5	1,1	55	1,3	0,86	0,045	0,04	0,43

Результаты расчета в виде проекции трехмерных видов сетей показаны на рисунках 4.5 и 4.6.

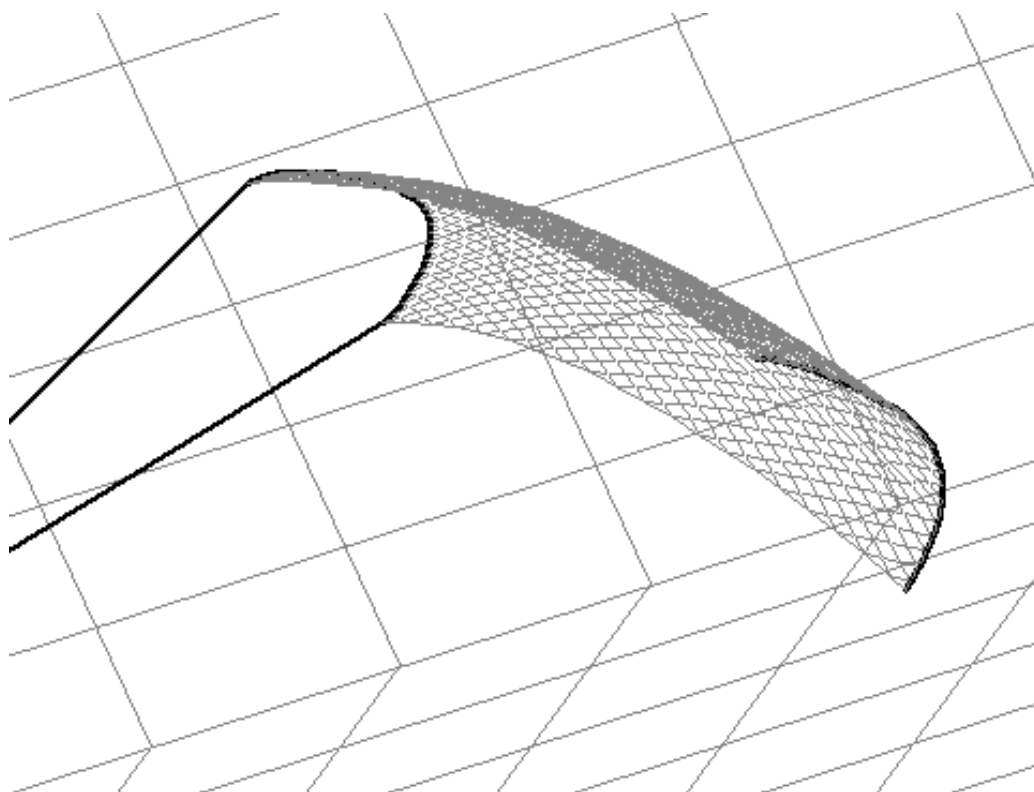


Рисунок 4.5 – Расчетный вид пространственной сети № 4

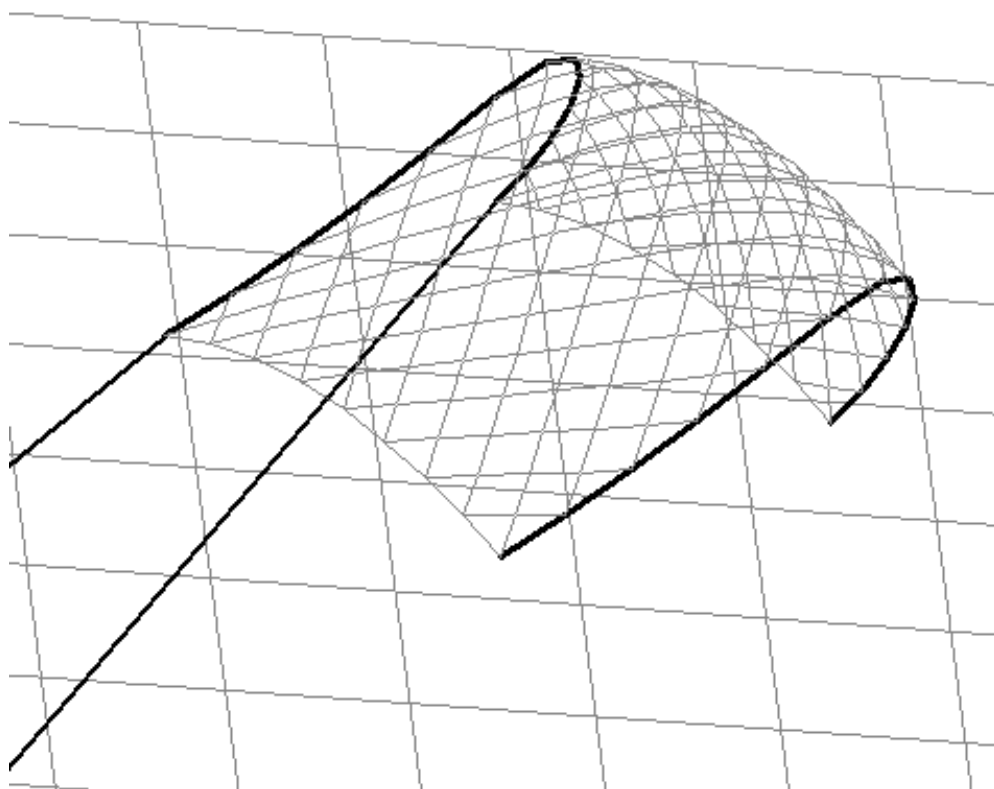


Рисунок 4.6 – Расчетный вид пространственной сети № 5

Полученные результаты численного эксперимента ниже графически сопоставлены с результатами эксперимента [34].

Для ставной сети проведем вычислительный эксперимент при помощи программы для ЭВМ, работающей на основе метода точечных масс, описанного в главе 2, и соответствующего алгоритма расчета, описанного в главе 3.

В таблице 4.4 приведены входные параметры сети, используемые при численном эксперименте. В таблице 4.5 приведены результаты расчета при двух скоростях течения $v=0,03$ м/с и $v=0,1$ м/с. На рисунках 4.7 и 4.8 показаны проекции трехмерных видов сети при различных скоростях течения.

Таблица 4.4 - Параметры сети

Параметр	Значение
Количество ячей по верхней подборе	20
Количество ячей по боковой подборе	10
Посадочный коэффициент по длине сети	0,5
Диаметр ниток сети	0,63 мм
Диаметр верхней подборы	3,6 мм
Диаметр нижней подборы	1 мм
Вес в воде 1 м ² сетного полотна	0,03 Н/м ²
Усредненная плотность верхней подборы с плавками	200 кг/м ³
Усредненная плотность нижней подборы с загрузкой	2000 кг/м ³

Таблица 4.5 - Сравнительные результаты

Параметр	Расчет
Скорость течения $v=0,03$ м/с	
R_x	0,84 Н
h	1,04 м
Скорость течения $v=0,1$ м/с	
R_x	1,59 Н
H	0,79 м

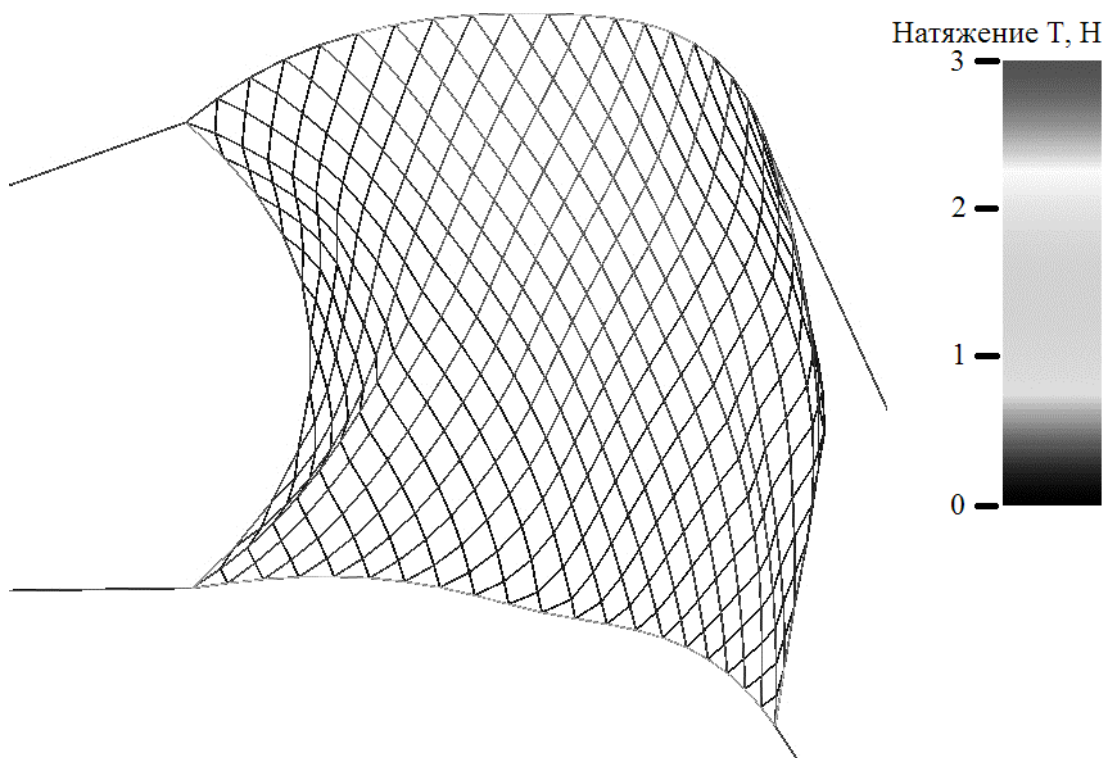


Рисунок 4.7 - Результат расчета ставной сети при $v=0,03$ м/с

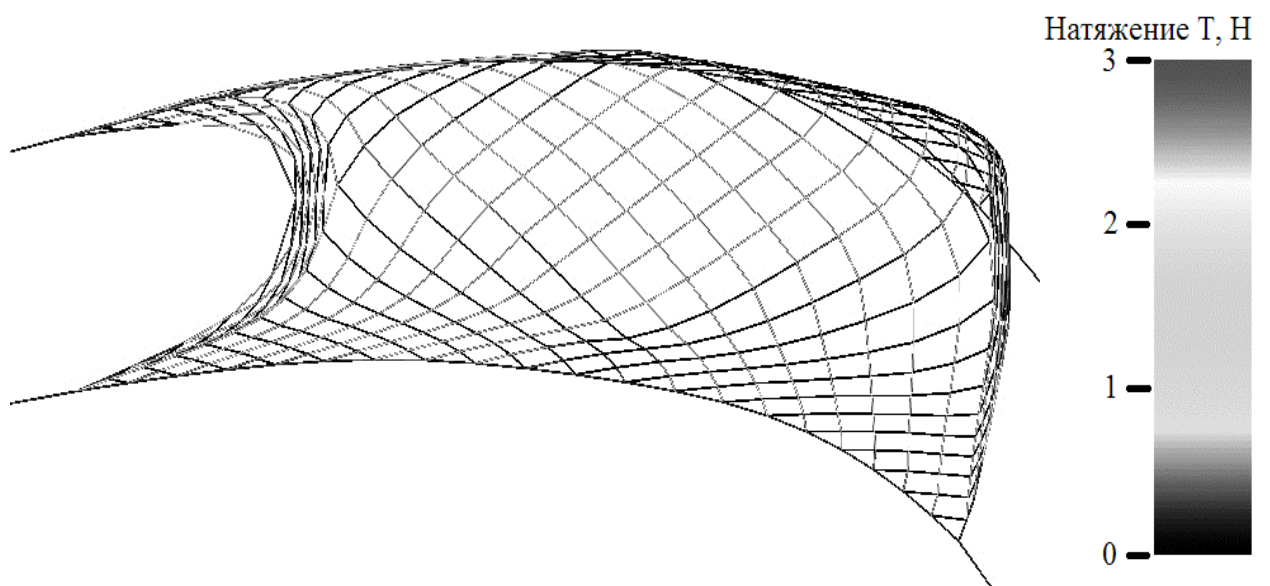


Рисунок 4.8 - Результат расчета ставной сети при $v=0,1$ м/с

Результаты численного эксперимента ниже сопоставлены с результатами расчета эмпирическим методом [44].

4.2 Вычислительные эксперименты при динамической постановке задачи

4.2.1 Ставная сеть

С целью верификации, описанной в главе 2 расчетной схемы ставной сети в условиях неравномерного течения, была создана компьютерная программа. Параметры сети указаны в таблице 4.6.

Таблица 4.6 - Параметры ставной сети

Параметр	Значение
Шаг ячеи a , мм	55
Диаметр ниток сети d , мм	0,7
Высота в посадке S , м	0,78
Сплошность F_0	0,04
Загрузка нижней подборы G , Н	2,64
Вес сети в воде q , Н	0,37
Скорость течения $v_{max} \div v_{min}$, м/с	0,79 \div 0
Время процесса t , с	353

Для верификации результатов экспериментов в компьютерной программе определена аппроксимирующая функция, связывающая скорость течения с временем процесса (4.1).

$$v = \frac{0,79}{191,7} 1,015^{353-t} \quad (4.1)$$

При вычислительном эксперименте время отсчитывалось от установившегося состояния сети при скорости течения 0,79 м/с.

Графики зависимостей, полученных в результате вычислительного эксперимента, показаны на рисунках 4.9-4.11.

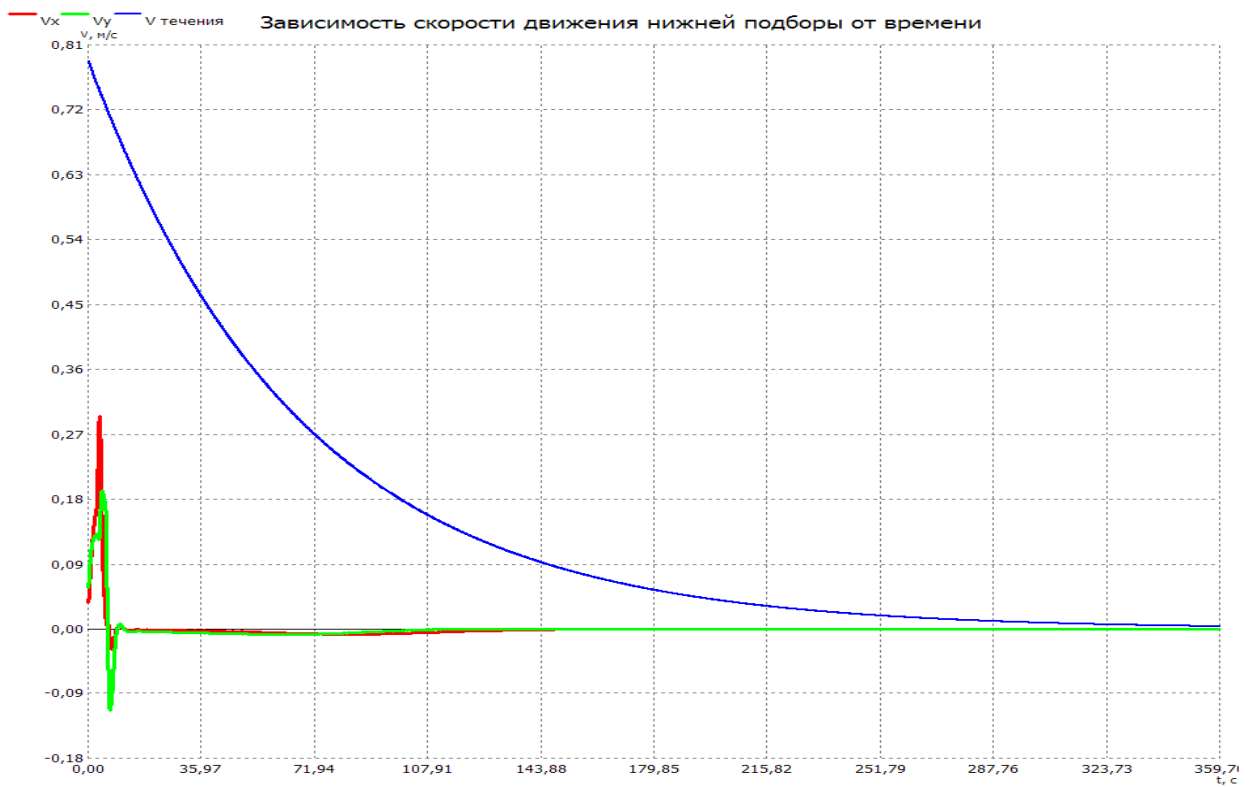


Рисунок 4.9 - График зависимости скорости течения от времени

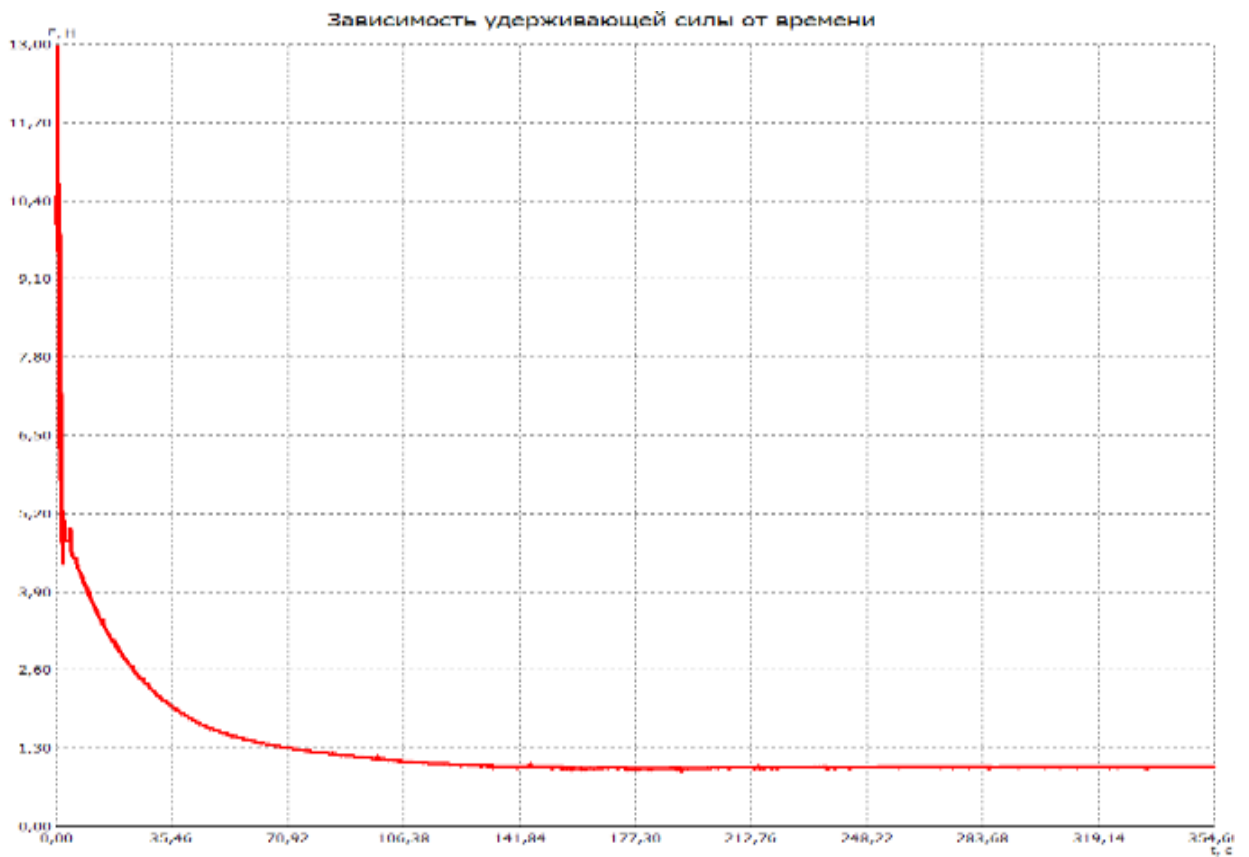


Рисунок 4.10 - График зависимости силы натяжения от времени

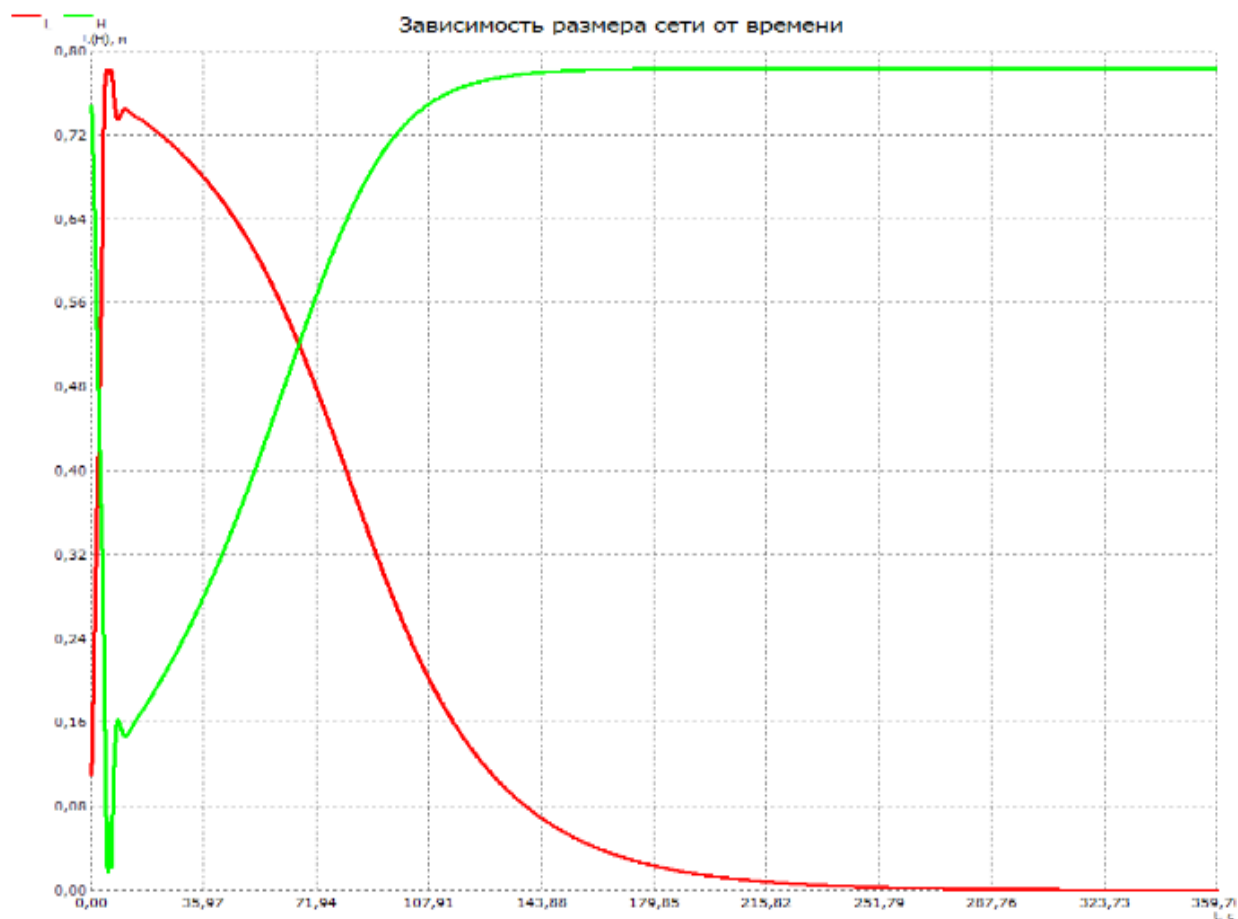


Рисунок 4.11 - График зависимости размеров от времени

Результаты расчета компьютерной программы ниже подтверждены экспериментально.

4.2.2 Плавная сеть

С целью верификации, описанной в главе 2 расчетной схемы плавной сети в условиях неравномерного течения, была создана компьютерная программа. Параметры сети указаны в таблице 4.7. В начальный момент времени сеть была неподвижна. Нижняя подбора находилась на дне водоема в начале системы координат. Вешки находились на поверхности воды в координатах $(0; Y)$, где $Y=4$ м - глубина водоема в месте расположения сети. Скорость течения воды в течение всего процесса была постоянна и равна $v=0,3$ м/с. Сетная оболочка была разбита по высоте на 10 одинаковых участков. Количество ячеей по вертикальной подборе 30.

Таблица 4.7 - Параметры плавной сети

Параметр	Значение
Количество ячеей по горизонтальной подборе n	650
Количество ячеей на участке m	3
Шаг ячеей a , мм	55
Посадочный коэффициент по верхней подборе U_x	0,707
Длина верхнего поводца $L_{k-1,k}$, м	1,0
Длина нижнего поводца $L_{0,k}$, м	1,0
Длина оттяжки вешки $L_{k,k+1}$, м	4,0
Диаметр ниток сети d , мм	0,6
Плотность нижней подборы с грузом ρ_G , кг/м ³	7850
Плотность верхней подборы с поплавками ρ_O , кг/м ³	700
Плотность вешки ρ_v , кг/м ³	500
Плавучесть 1 метра верхней подборы, Н	0,5
Вес 1 м ² сети, Н	0,029
Вес в воде 1 метра нижней подборы, Н	1,5
Плавучесть вешки Q_v , Н	30
Коэффициент трения нижней подборы f	0,3

Графики зависимостей различных параметров сети от времени показаны на рисунках 4.12 - 4.17.

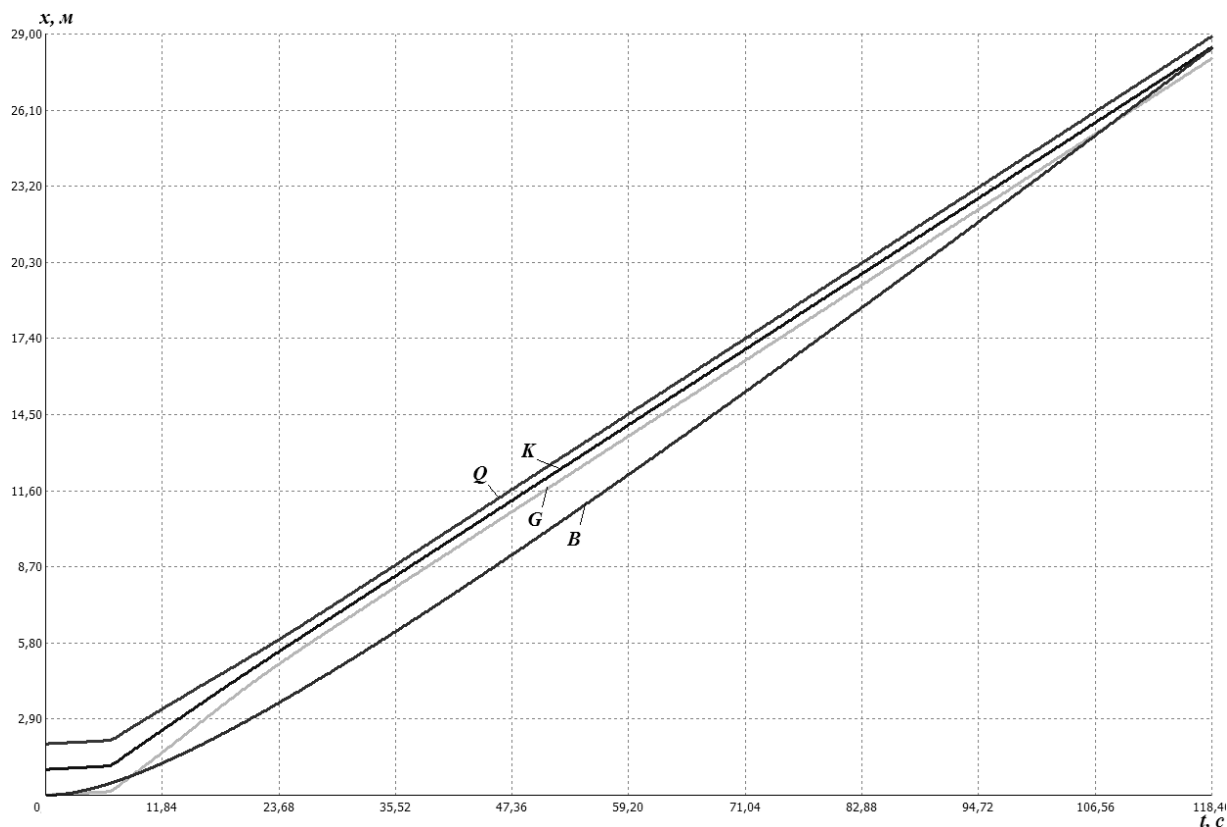


Рисунок 4.12 - Зависимость координат на оси OX от времени

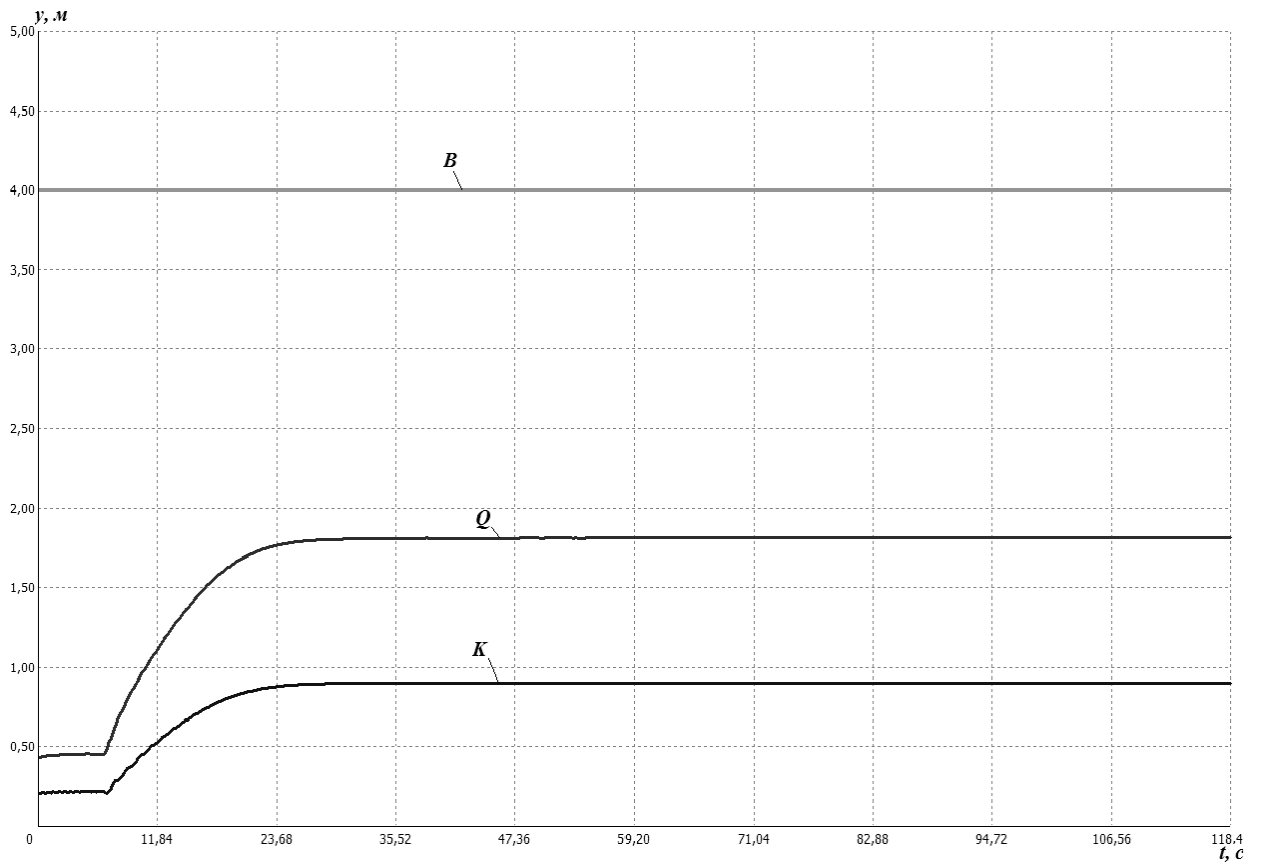


Рисунок 4.13 - Зависимость координат на оси OY от времени

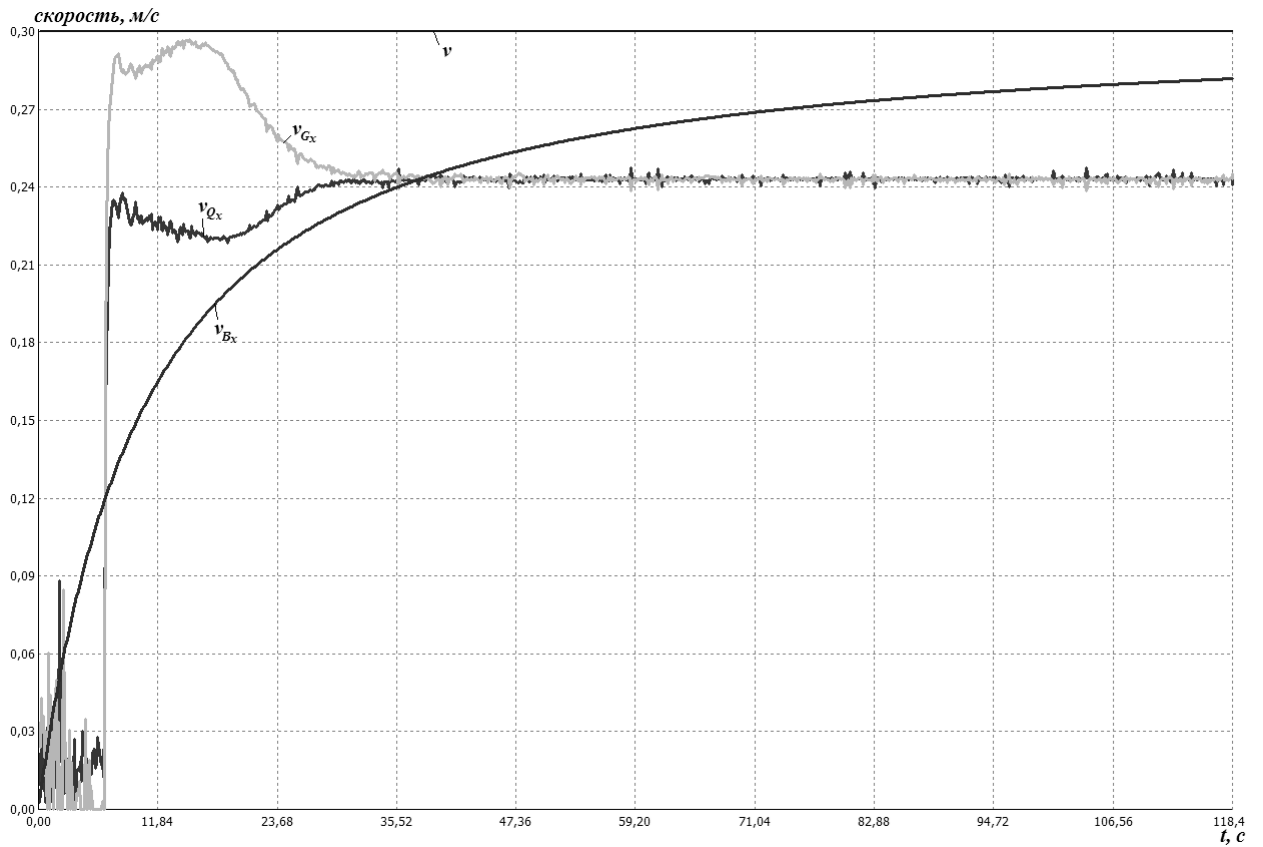


Рисунок 4.14 - Зависимость проекции скорости на ось OX от времени

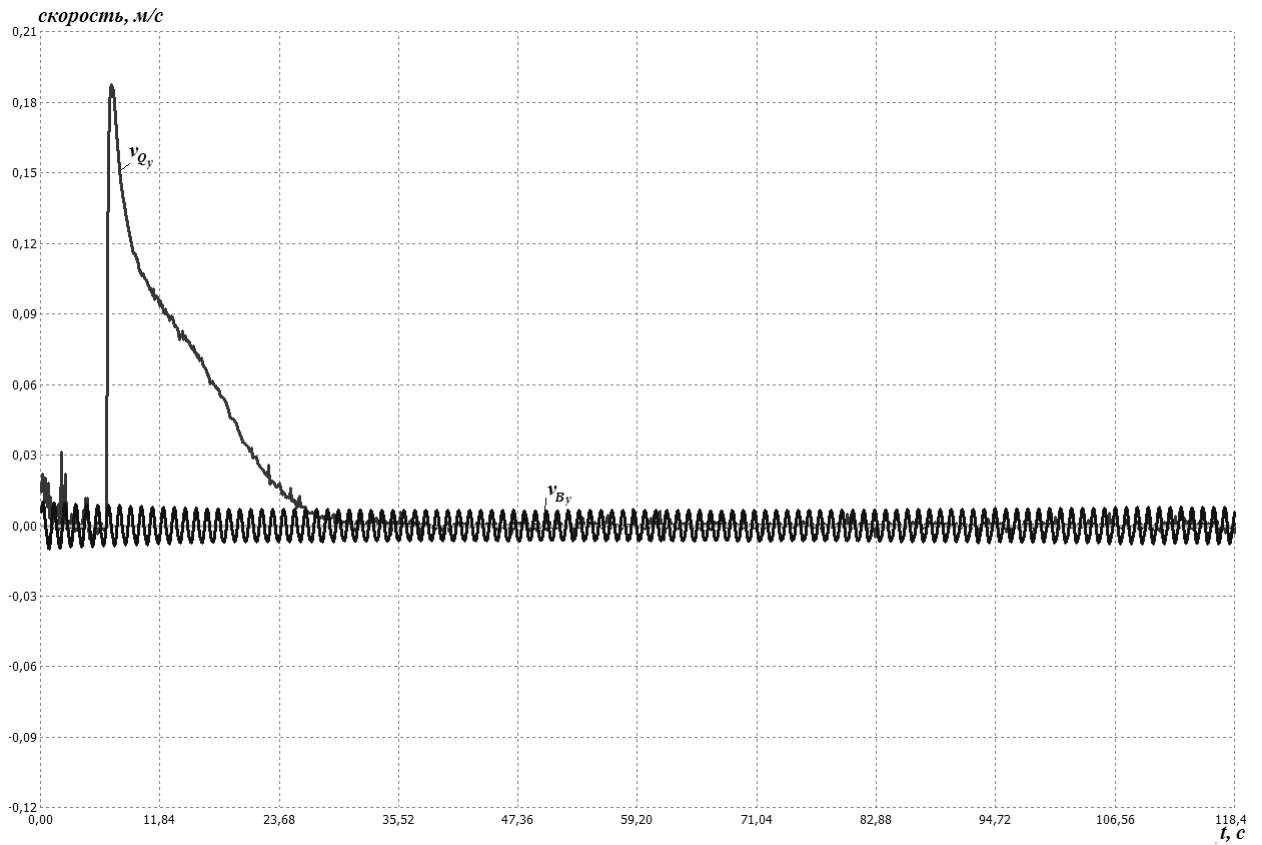


Рисунок 4.15 - Зависимость проекции скорости на ось OY от времени

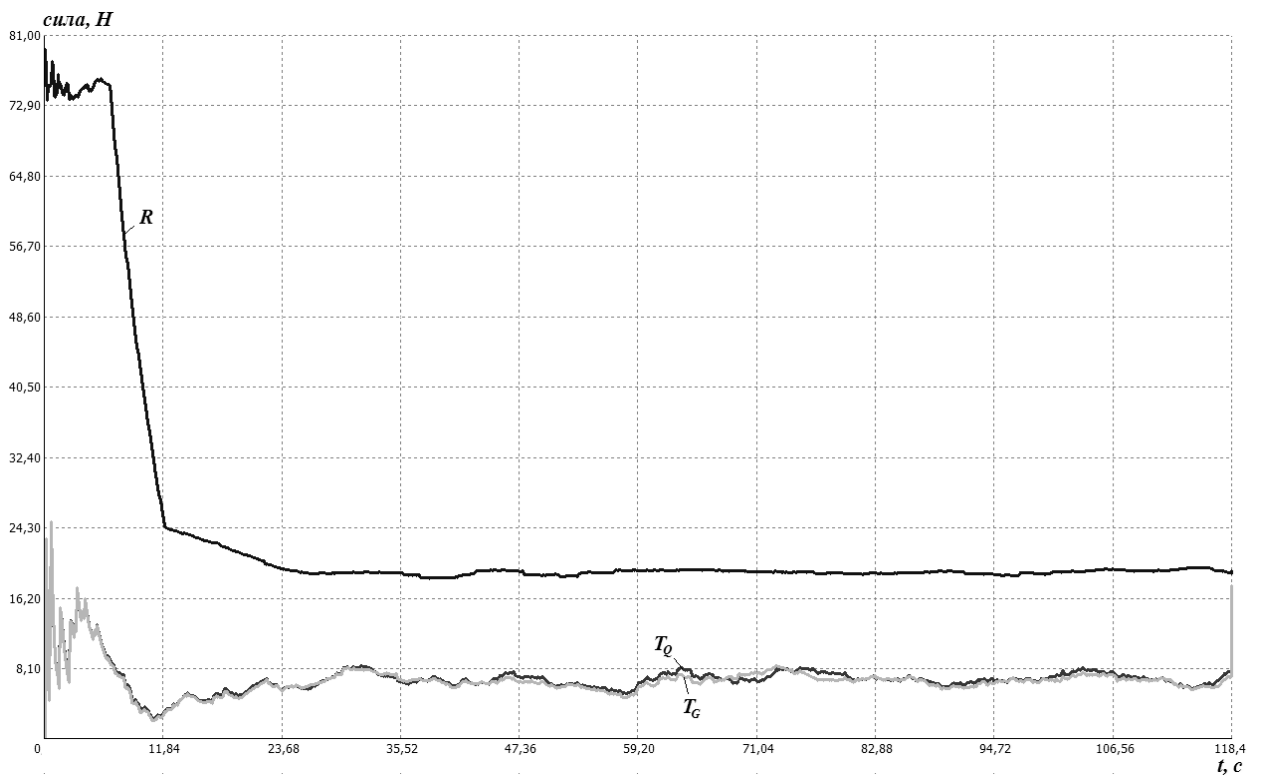


Рисунок 4.16 - Зависимость гидродинамической силы сопротивления и натяжений в поводцах от времени



Рисунок 4.17 - Зависимость силы трения нижней подбора
о дно водоема от времени

На графиках используются следующие обозначения: Q - верхняя подбора; G - нижняя подбора; K - точка соединения поводцов и оттяжки вешки; B - вешка; v - скорость течения; v_{Gx} - скорость нижней подбора по оси OX ; v_{Qx} - скорость верхней подбора по оси OX ; v_{Bx} - скорость вешки по оси OX ; v_{Qy} - скорость верхней подбора по оси OY ; v_{By} - скорость вешки по оси OY ; T_Q - натяжение в верхнем поводце; T_G - натяжение в нижнем поводце; R - сила гидродинамического сопротивления сети, которая определяется как сумма проекций на ось OX всех R_{ij} между узлами Q и G ; F_f - сила трения нижней подбора о дно водоема.

4.2.3 Крыло ставного подвешного невода

Для проверки описанных в главе 2 расчетной схемы и в главе 3 алгоритма расчета крыла ставного подвешного невода была создана компьютерная программа. В компьютерной программе был смоделирован процесс погружения крыла невода при увеличении скорости течения. Процесс проводился при линейно изменяющейся скорости течения от 0 до 3 м/с за интервал времени 180 с. Параметры крыла невода указаны в таблице 4.8.

Графики зависимостей различных параметров крыла ставного подвешного невода от времени показаны на рисунках 4.18 - 4.22.

Таблица 4.8 - Параметры крыла ставного подвесного невода

Параметр	Значение
Количество ячеей по верхней кромке крыла n	180
Количество ячеей по боковой кромке крыла t	59
Шаг ячеей дели крыла a , мм	150
Посадочный коэффициент по длине крыла U_x	0,74
Длина горизонтальной оттяжки крыла $L_{k-1,k}$, м	18
Длина горизонтальной оттяжки крыла $L_{k,k+1}$, м	8
Длина наклонной оттяжки крыла $L_{k+1,k+2}$, м	8
Глубина места лова Y , м	12,2
Диаметр ниток дели крыла d , мм	3,1
Вес в воде 1 м ² дели q , Н/м ²	0,02
Плавучесть (погонная) оснастки верхней подборы крыла Q_A , Н/м	30
Плавучесть первого плава Q_{D1} , Н	100
Плавучесть второго плава Q_{D2} , Н	200
Вес (погонный) в воде нижней подборы, Н/м	1,2
Коэффициент держащей силы f	0,3
Плотность воды ρ_v , кг/м ³	1034
Кинематическая вязкость воды ϑ , 10 ⁻⁶ м ² /с	1,3
Вес в воде якоря вертикальной оттяжки G_v , Н	10000
Вес в воде якоря наклонной оттяжки G_n , Н	30000

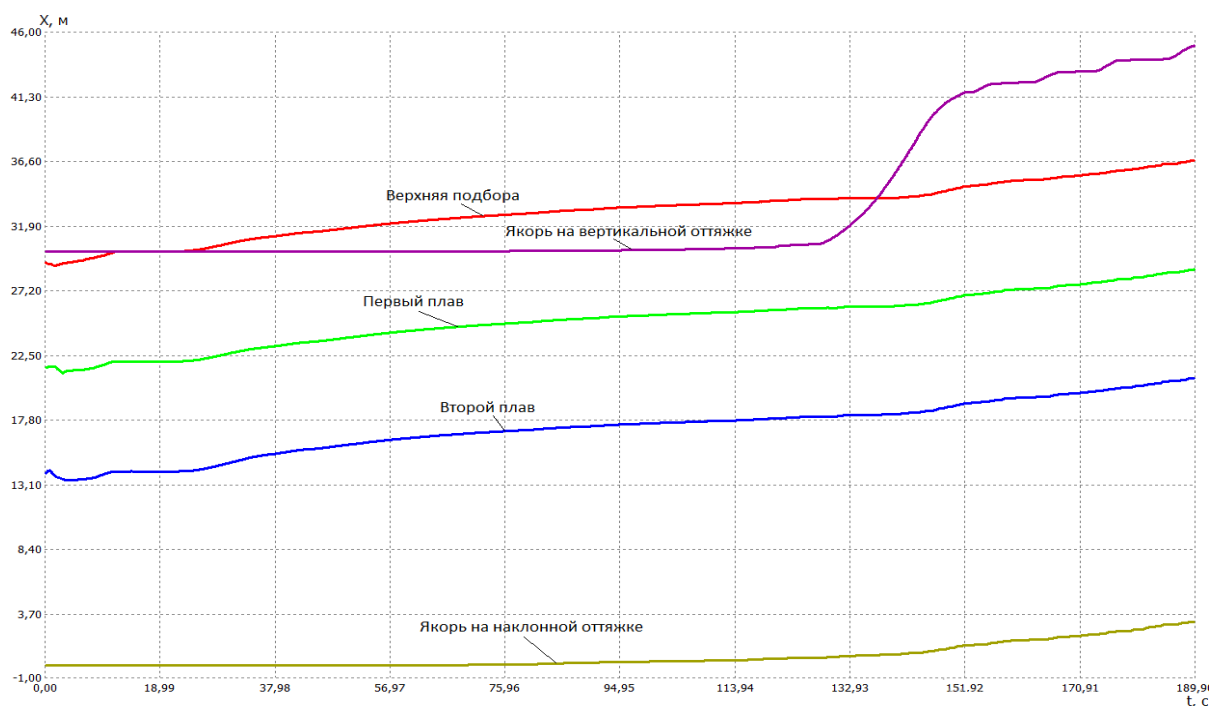


Рисунок 4.18 - Зависимость координат на оси OX от времени

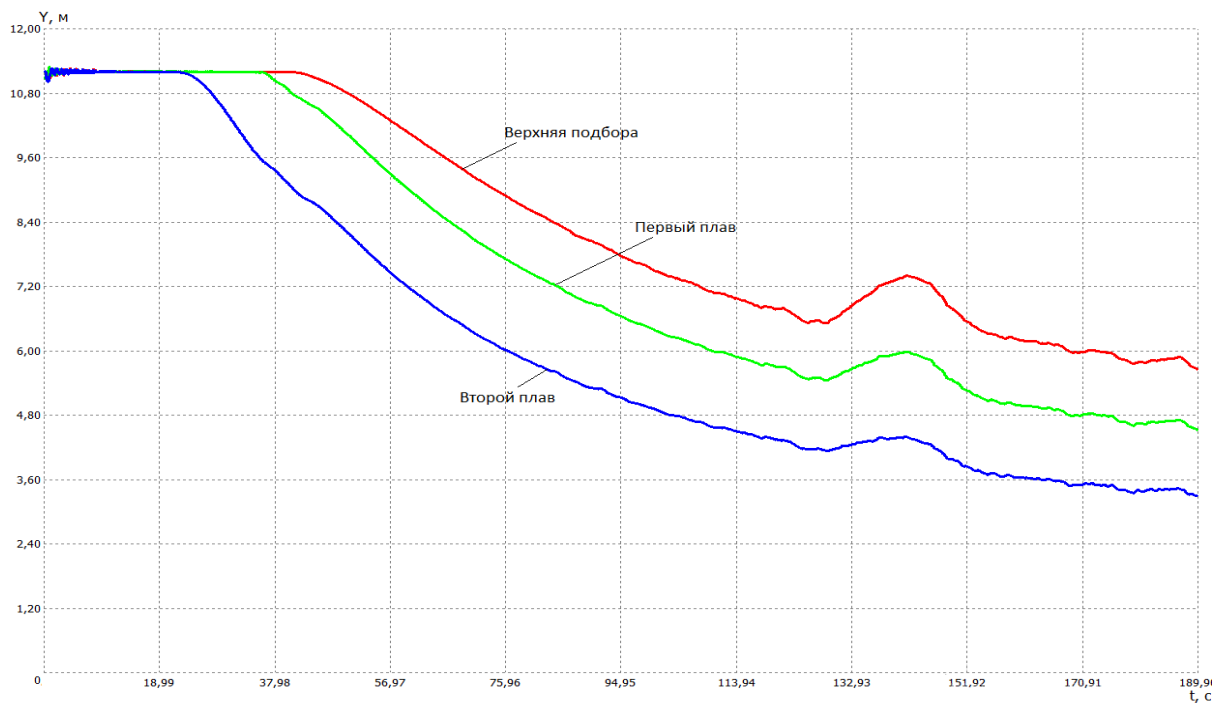


Рисунок 4.19 - Зависимость координат на оси OY от времени

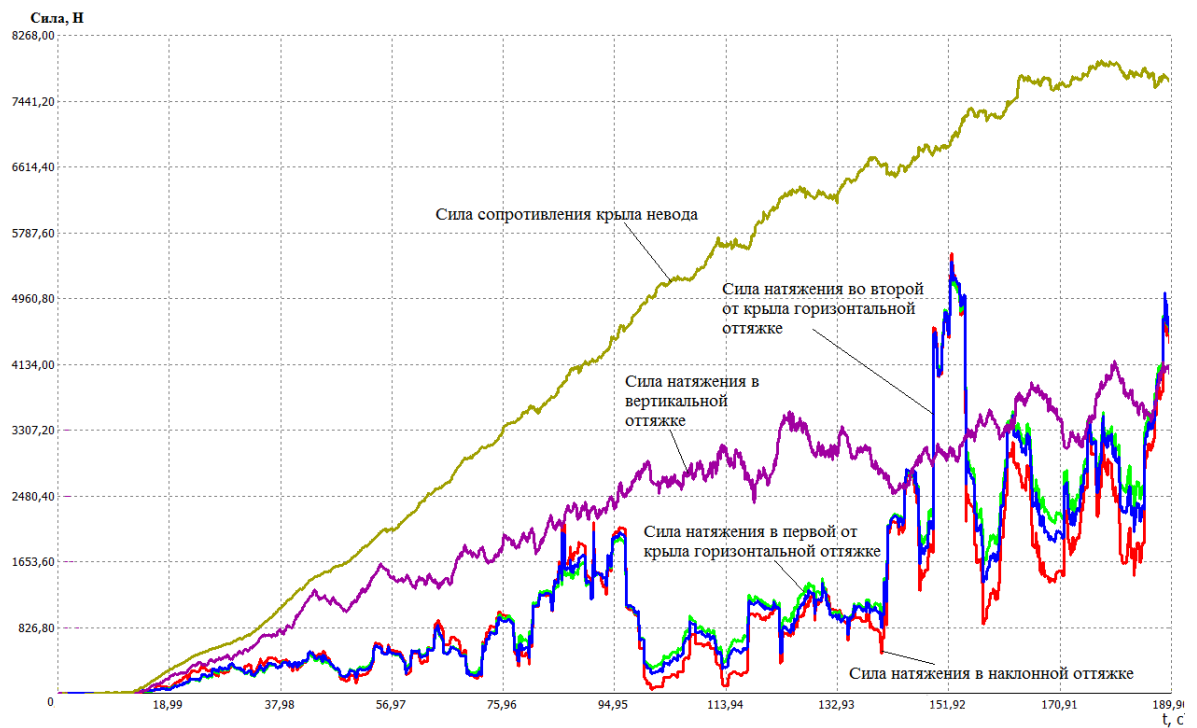


Рисунок 4.20 - Зависимость гидродинамической силы сопротивления и натяжений в оттяжках от времени

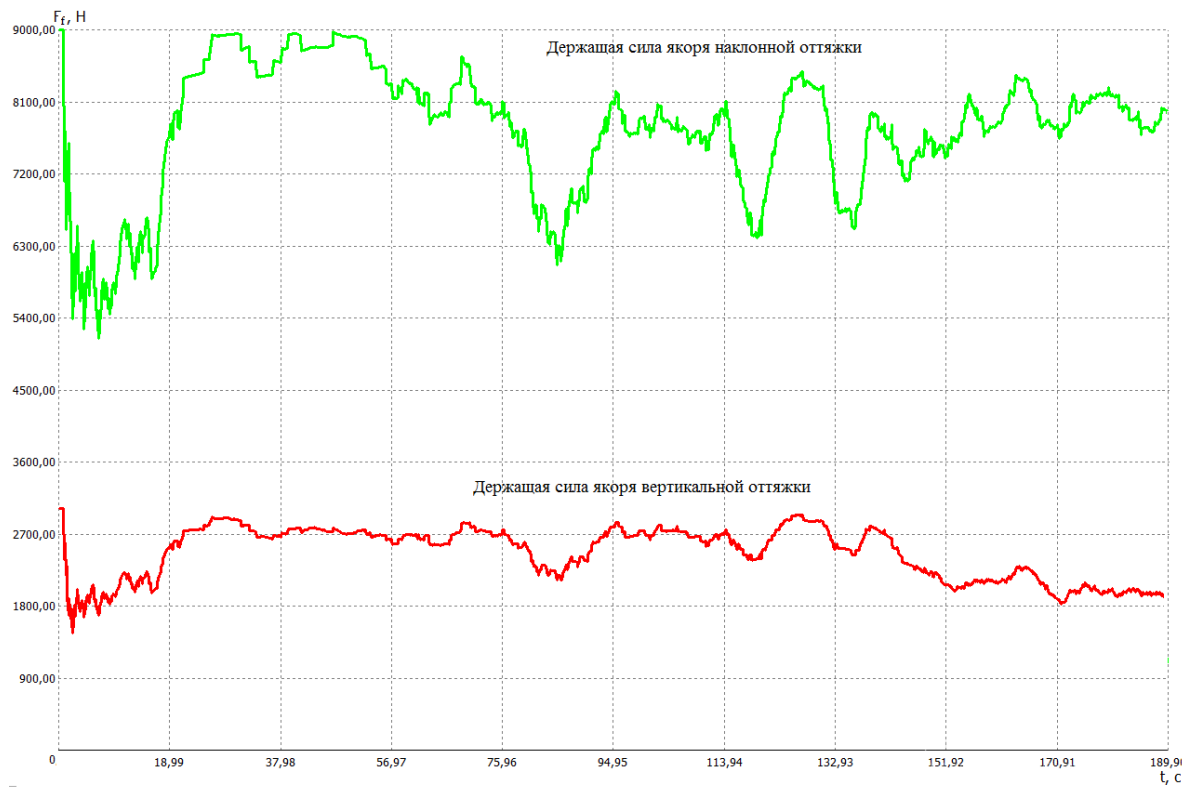


Рисунок 4.21 - Зависимость держащей силы якорей от времени

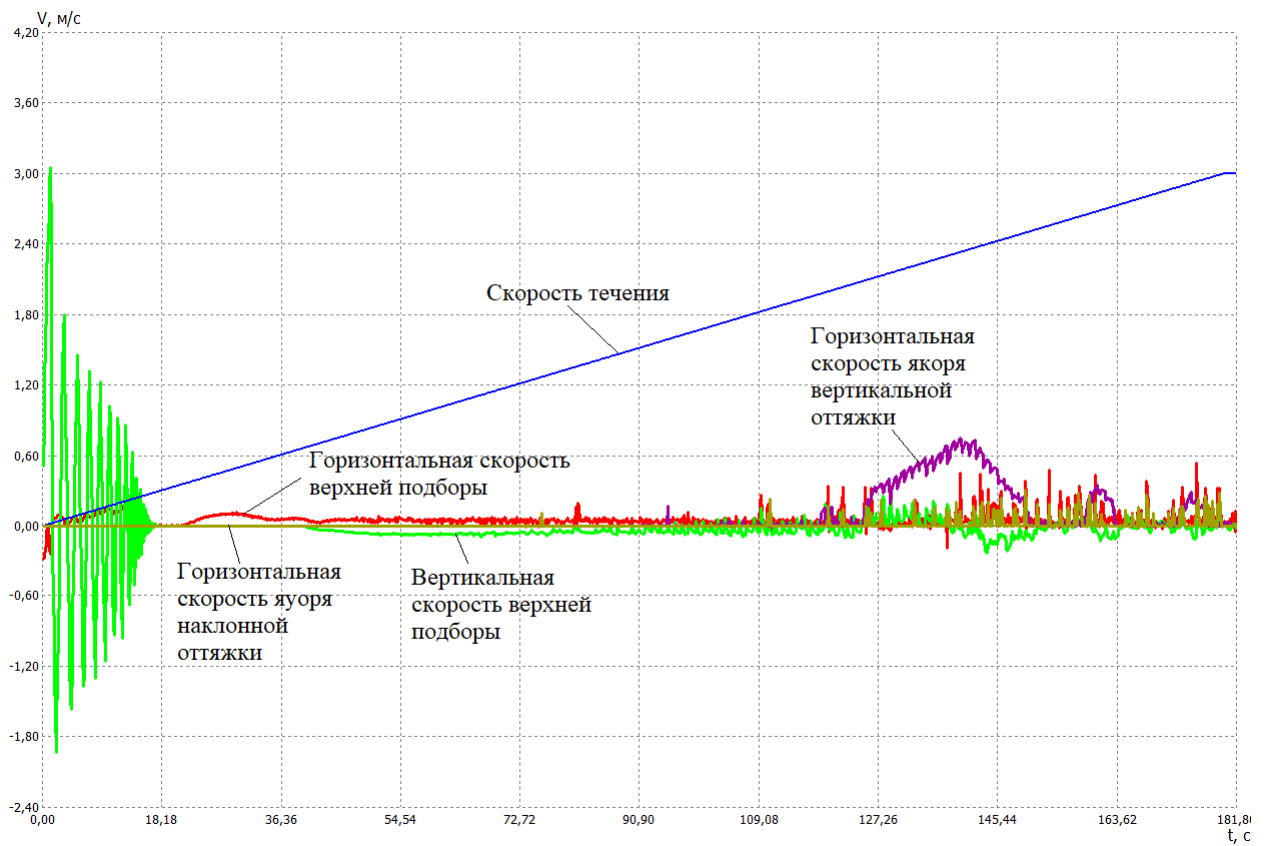


Рисунок 4.22 - Зависимость скоростей от времени

По рисунку 4.22 видно, что при скорости течения 2 м/с происходит срыв якоря вертикальной оттяжки. Начальные затухающие гармонические колебания верхней подборы (зеленый график на рисунке 4.22) вызваны переходом крыла невода из исходного состояния в рабочее.

На рисунках 4.23 и 4.24 показана геометрия и распределение сил натяжений крыла ставного подвешного невода с характеристиками, приведенными в таблице 4.8, в установившемся режиме при скоростях течения 0,36 м/с и 0,55 м/с.



Рисунок 4.23 – Геометрия крыла ставного подвешного невода при $v=0,36$ м/с



Рисунок 4.24 – Геометрия крыла ставного подвешного невода при $v=0,55$ м/с

По рисункам видно, что при увеличении скорости течения крыло невода начинает погружаться. По графику на рисунке 4.22 можно определить скорость течения в начале погружения верхней подборы, которая примерно равна 0,7 м/с. В этот момент вертикальная скорость верхней подборы (зеленый график) становится отрицательной.

По предложенной в главе 2 дискретной расчетной схеме, основанной на методе точечных масс, и волновой модели была разработана компьютерная программа расчета крыла ставного подвесного невода на волнении и проведен численный эксперимент.

Параметры крыла невода указаны в таблице 4.8. В компьютерной программе был смоделирован процесс погружения крыла невода при различных скоростях течения и высоте волны. Процесс был разбит на пять этапов:

1. 0-25 секунд - скорость течения на поверхности $v=0,3$ м/с, без волнения (высота волны $h=0$ м);
2. 25-56 секунды - $v=0,3$ м/с, $h=0,33$ м;
3. 56-107 секунды - $v=0,3$ м/с, $h=2,49$ м;
4. 107-142 секунды - $v=1,0$ м/с, $h=2,49$ м;
5. 142-185 секунды - $v=3,0$ м/с, $h=2,49$ м.

Длина волны на всех этапах была постоянной $\lambda=5$ м.

На рисунке 4.25 показан волновой профиль при $v=3,0$ м/с, $h=0,7$ м. Линиями обозначены векторы скорости потока воды в точке.

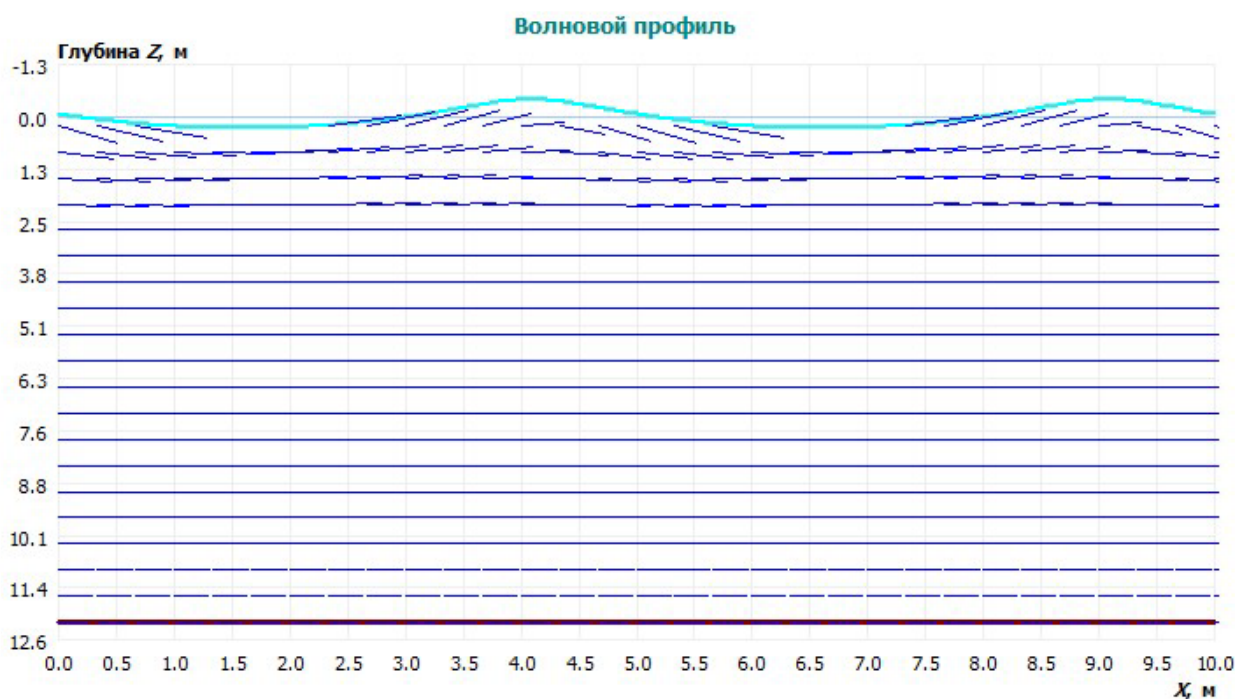


Рисунок 4.25 – Волновой профиль $v=3,0$ м/с, $h=0,7$ м

На рисунке 4.26 показана зависимость скорости течения от глубины. По рисунку видно, что при приближении к поверхности дна водоема скорость течения уменьшается.

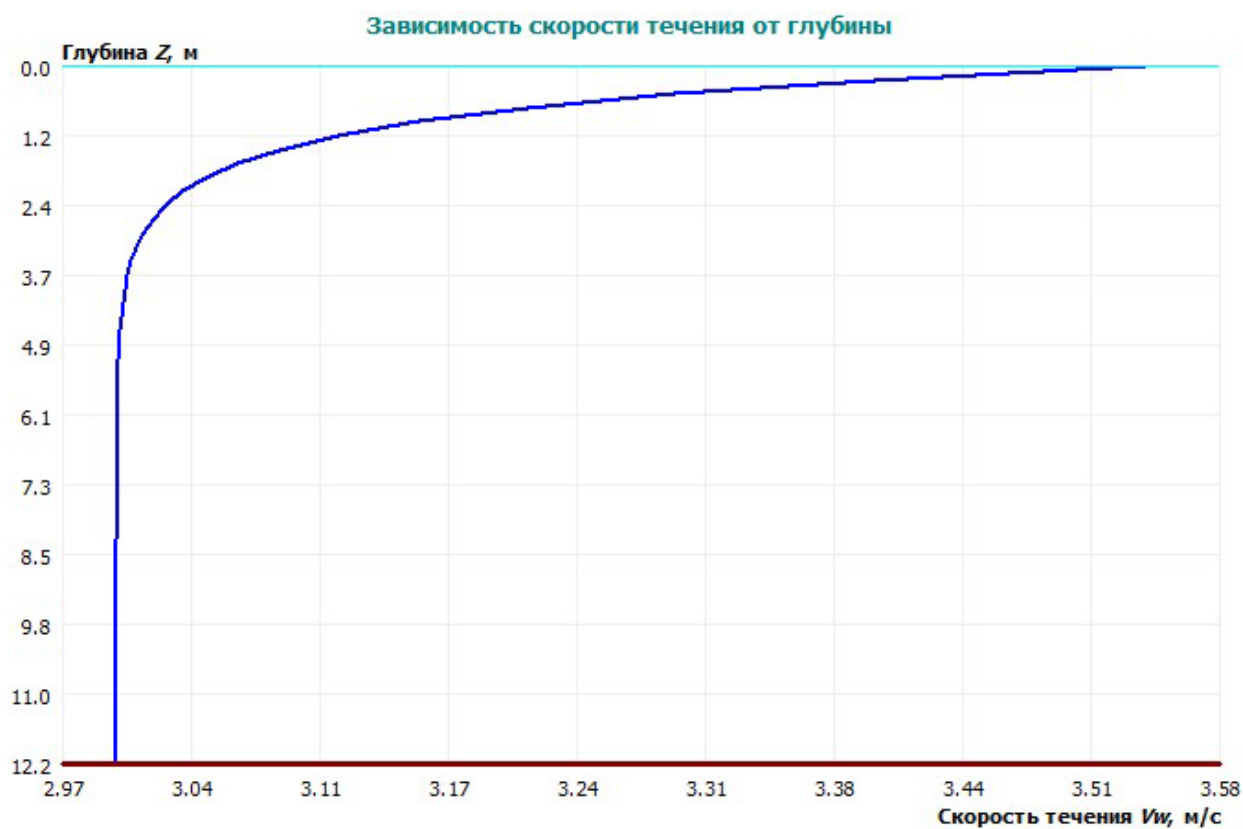


Рисунок 4.26 – Зависимость скорости течения от глубины

На рисунке 4.27 – показан вид крыла в конце эксперимента.

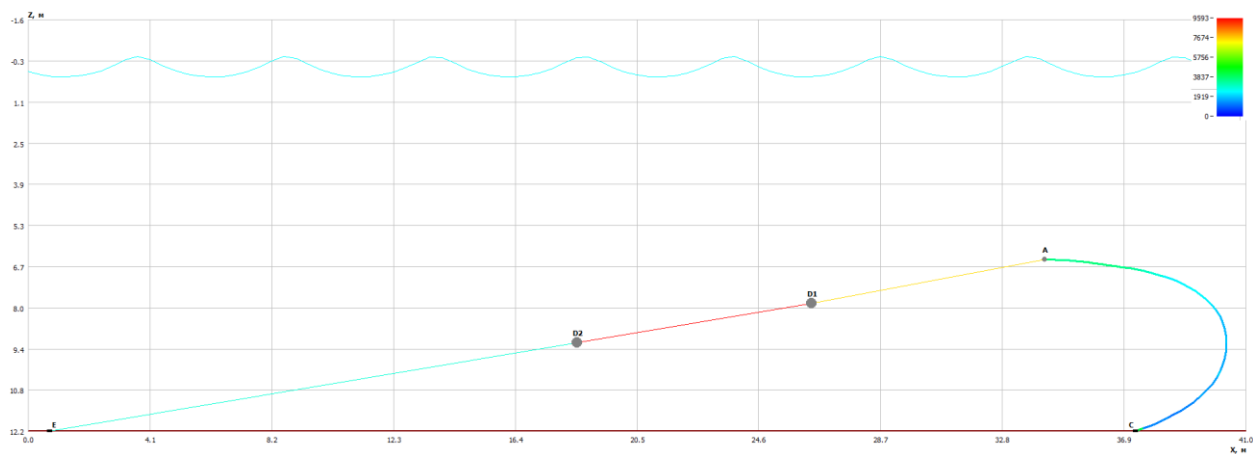


Рисунок 4.27 – Вид крыла невода

На рисунках 4.28 – 4.31 показаны графики зависимостей выходных параметров от времени.

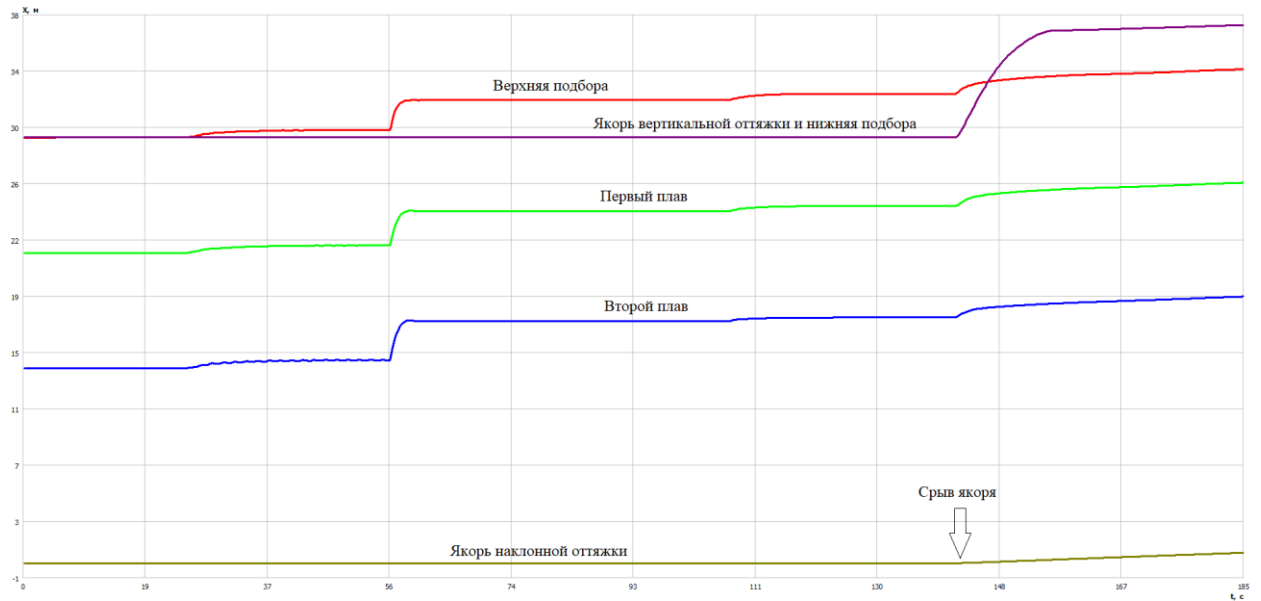


Рисунок 4.28 – Зависимость координат по горизонтали от времени

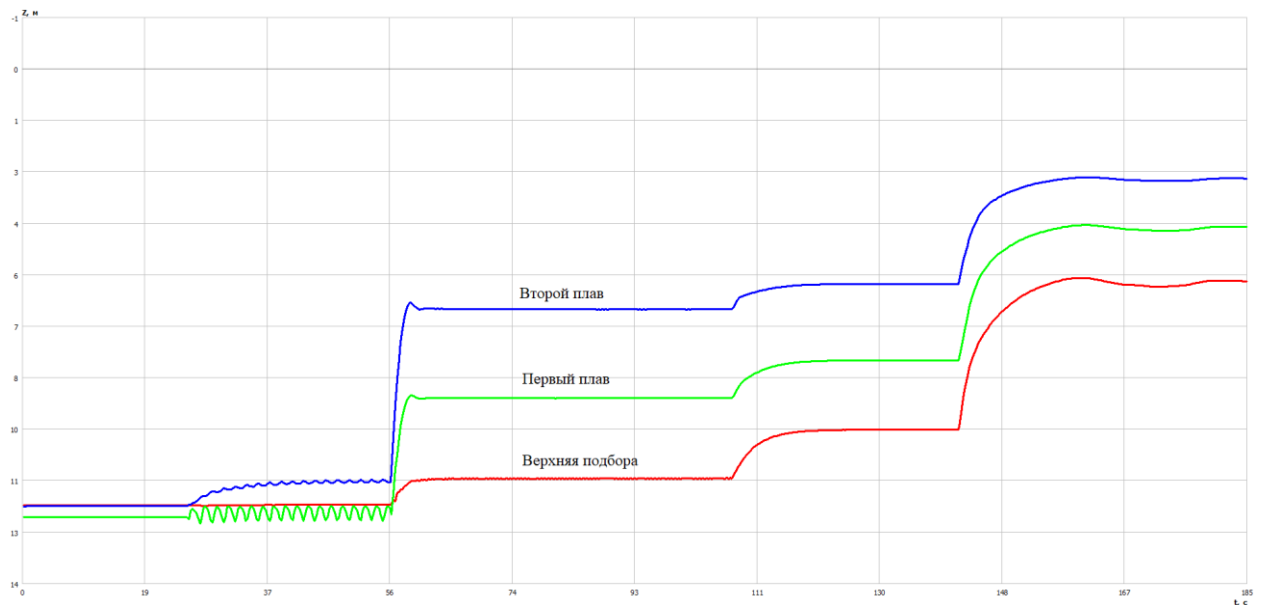


Рисунок 4.29 – Зависимость глубины погружения от времени

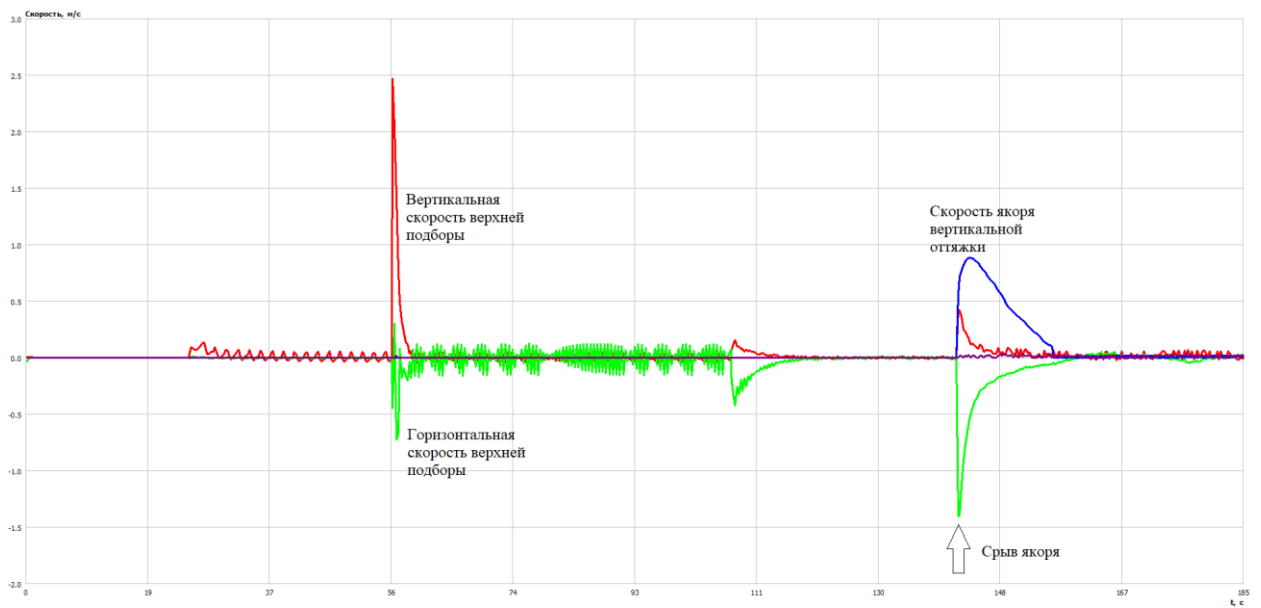


Рисунок 4.30 – Зависимость скоростей от времени

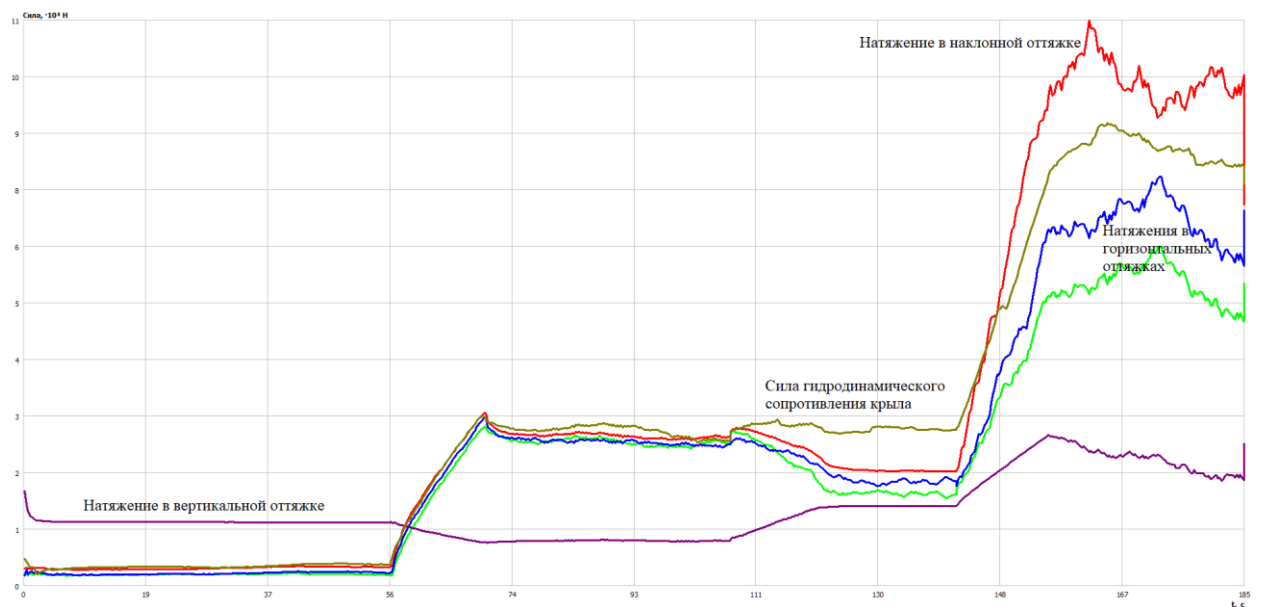


Рисунок 4.31 – Зависимость скоростей от времени

По рисункам видно, что при увеличении скорости течения и высоты волны крыло невода погружается.

4.3 Оценка сходимости теоретических положений

4.3.1 Цилиндрическая сетная конструкция

Проведем натурные эксперименты по определению геометрии и натяжений в нитках сетного полотна цилиндрической сетной конструкции, находящейся под действием сил тяжести. В первом эксперименте, показанном на рисунке 4.32, нижняя кромка сетного полотна равномерно посажена на обруч с грузом, а верх соединен в одной точке и жестко закреплен. Во втором эксперименте, показанном на рисунке 4.33, на обручи посажены верхняя и нижняя кромки сетного полотна, верхний обруч закреплен, а нижний подгружен.

Параметры сетной конструкции:

- шаг ячеей сетного полотна $a=35$ мм;
- количество равномерно посаженных по обручу ячеей $n=10$;
- количество ячеей по высоте сетного полотна $m=8$;
- вес сетного полотна $q_c=0,6$ Н;
- диаметр нитки сетного полотна $d=2$ мм;
- диаметр обручей $D=156$ мм;
- вес нижнего обруча с грузом $G=13$ Н.

Для эксперимента 1 проведем замеры геометрии 6 нижних рядов. На рисунке 4.32 ряд 6 выделен горизонтальной линией. Диаметр ряда 6 $D_6=60$ мм. Результаты замеров и соответствующие результаты, полученные при помощи вычислительного эксперимента при тех же параметрах сетного полотна (эксперимент описан выше), представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 - Результаты эксперимента 1

№ ряда	Натурный		Численный	$S, \%$
	$2aU_x, \text{ мм}$	U_x	U_x	
6	19	0,27	0,27	0
5	23	0,33	0,29	2
4	28	0,39	0,35	2
3	32	0,46	0,43	1,5
2	41	0,56	0,55	0,5
1	49	0,70	0,70	0

Для эксперимента 2 проведем замеры геометрии всех 16 рядов для обоих экспериментов. Результаты замеров и соответствующие результаты, полученные при помощи вычислительного эксперимента при тех же параметрах сетного полотна (эксперимент описан выше), представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 - Результаты эксперимента 2

№ ряда	Натурный			Численный		$S_U, \%$	$S_h, \%$
	$2aU_x, \text{мм}$	U_x	$h, \text{мм}$	U_x	$h, \text{мм}$		
16	40	0,57	21	0,56	21,6	0,9	1,4
15	30	0,44	26	0,42	27,2	2,3	2,3
14	25	0,33	29	0,31	30,6	3,1	2,7
13	19	0,27	32	0,24	32,6	5,9	4,1
12	16	0,23	32	0,18	33,7	12,2	2,6
11	15	0,21	33	0,15	34,3	16,7	1,9
10	15	0,21	33	0,13	34,6	23,5	2,4
9	14	0,20	33	0,12	34,7	25,0	2,5
8	15	0,21	33	0,13	34,7	23,5	2,5
7	15	0,21	33	0,15	34,6	16,7	2,4
6	16	0,23	32	0,18	34,3	12,2	3,5
5	19	0,27	33	0,24	33,7	5,9	1,0
4	24	0,34	31	0,31	32,6	4,6	2,5
3	30	0,43	28	0,41	30,6	2,4	4,4
2	38	0,54	26	0,54	27,1	0,0	2,1
1	49	0,70	20	0,70	21,5	0,0	3,6

Для первого эксперимента вычислим среднее квадратичное отклонение по шести нижним рядам:

$$S_C = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 S_i^2} \approx 1,3\%, \quad (4.2)$$

где S_C – среднее квадратичное отклонение по всем рядам;

S_i – среднее квадратичное отклонение по ряду i .

Для второго эксперимента вычислим среднее квадратичное отклонение по всем нижним рядам:

$$S_{C,U} = \sqrt{\frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} S_{U,i}^2} \approx 13\%,$$

$$S_{C,h} = \sqrt{\frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} S_{h,i}^2} \approx 2,8\%, \quad (4.3)$$

$$S_C = \sqrt{\frac{1}{2} (S_{C,U}^2 + S_{C,h}^2)} \approx 9,4\%, \quad (4.4)$$



Рисунок 4.32 – Эксперимент 1

Отклонения вызваны:

- технологическим разбросом изготовления натурального сетного полотна;
- толщина узлов при численном эксперименте не учитывается, форма натуральных ячеек при небольших U_x не ромбическая;
- ограниченной точностью измерений.



Рисунок 4.33 – Эксперимент 2

4.3.2 Ставная сеть

В 2010 г. проводились эксперименты с моделями ставных сетей, у которых верхняя и нижняя подборы представляли собой гибкие элементы (таблица 4.11). Эксперименты проходили в гидроканале ЗАО «МариНПО» (г. Калининград) [34] в 2010 году при диапазоне скоростей 0,2 - 0,5 м/с с различной загрузкой нижней подборы *G*. Фотографии моделей № 4 и № 5 ПС представлены на рисунках 4.34 и 4.35

Таблица 4.11 - Конструктивные характеристики моделей сетей

Мо- дель №	Диа- метр нитей d , мм	Шаг ячей a , мм	Длина сети L , м	Высота сети S , м	Пло- щадь ниток F_n , м ²	Сплош- ность F_o	Вес в воде q , Н
4	2,1	30	1,2	0,85	0,146	0,14	0,8
5	1,1	55	1,3	0,86	0,045	0,04	0,43

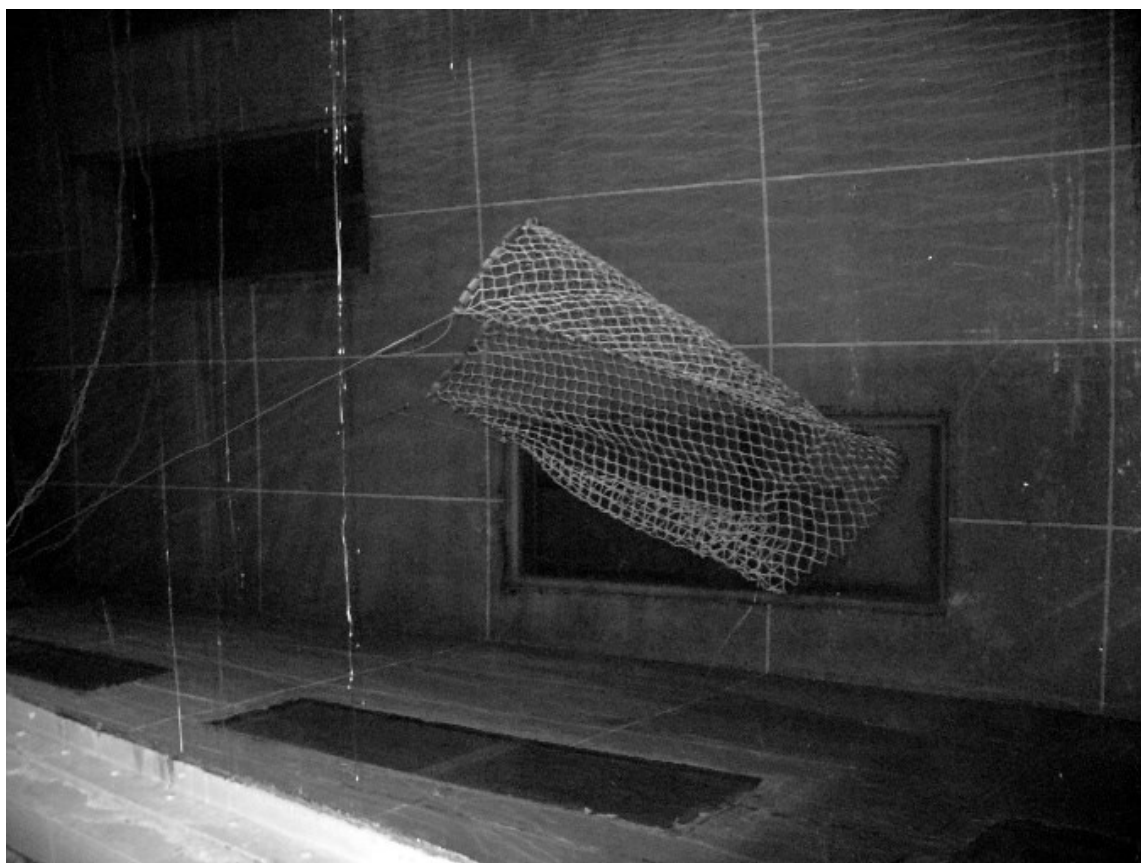


Рисунок 4.34 - Вид модели сети №4

Сравним результаты эксперимента, показанного на рисунках 4.34 и 4.35, с расчетными трехмерными видами (рисунки 4.36 и 4.37), полученными компьютерной программой.

По рисункам 4.34 – 4.37 видно, что виды сетей, полученные при фотографировании эксперимента в гидроканале ЗАО «МариНПО» и по результатам вычислительного эксперимента, совпадают [44].

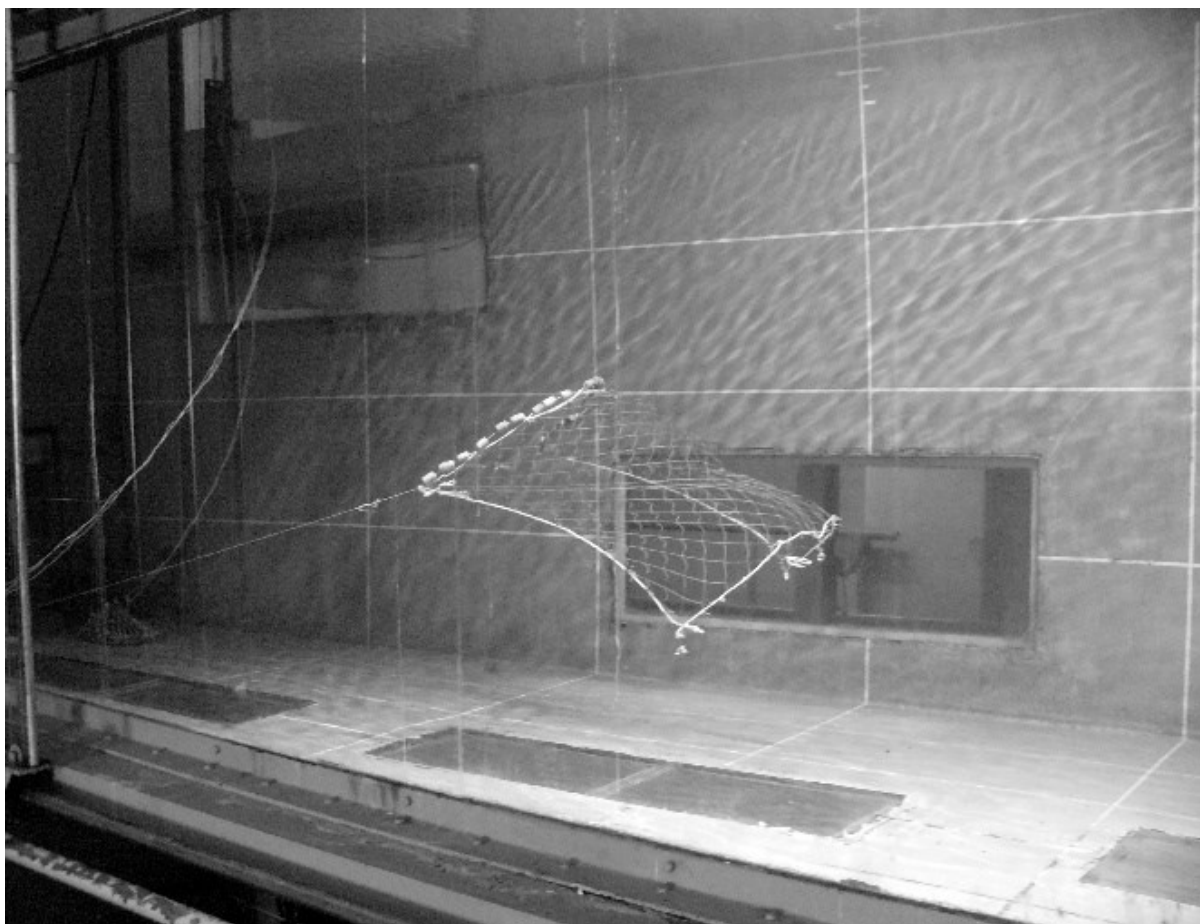


Рисунок 4.35 - Вид модели сети №5

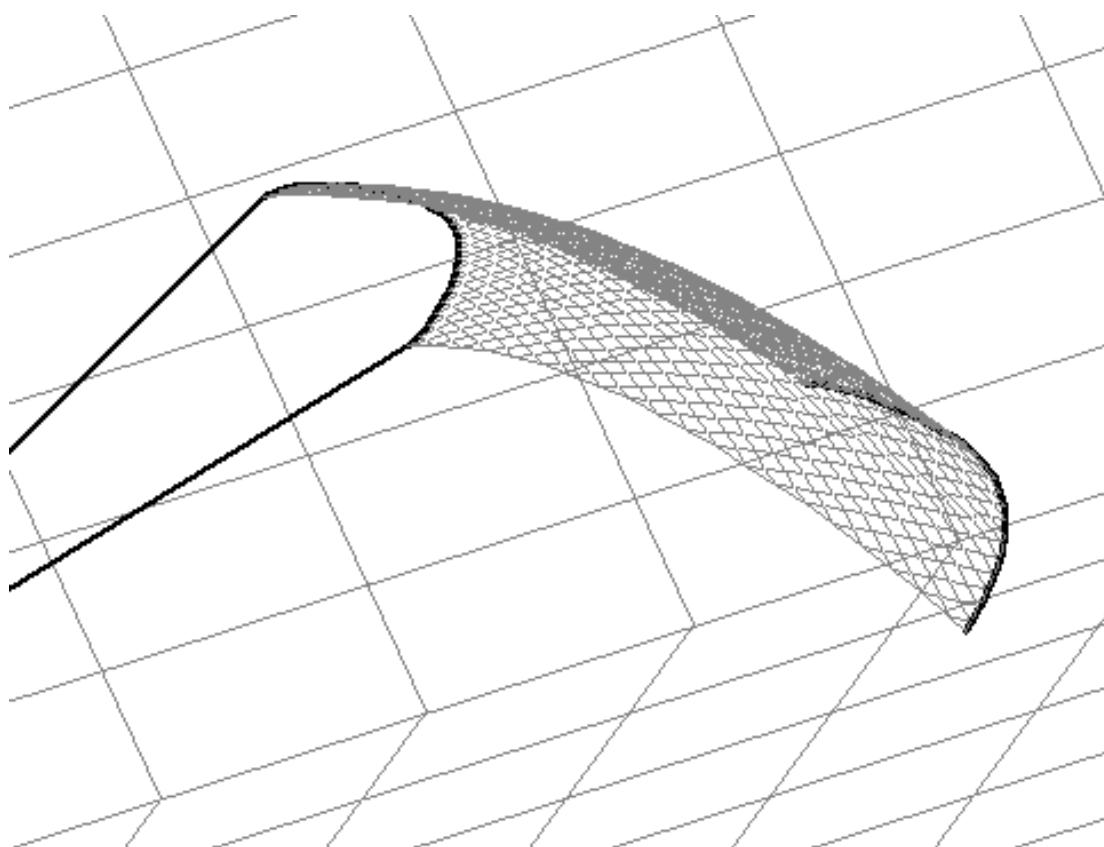


Рисунок 4.36 – Расчетный вид сети № 4

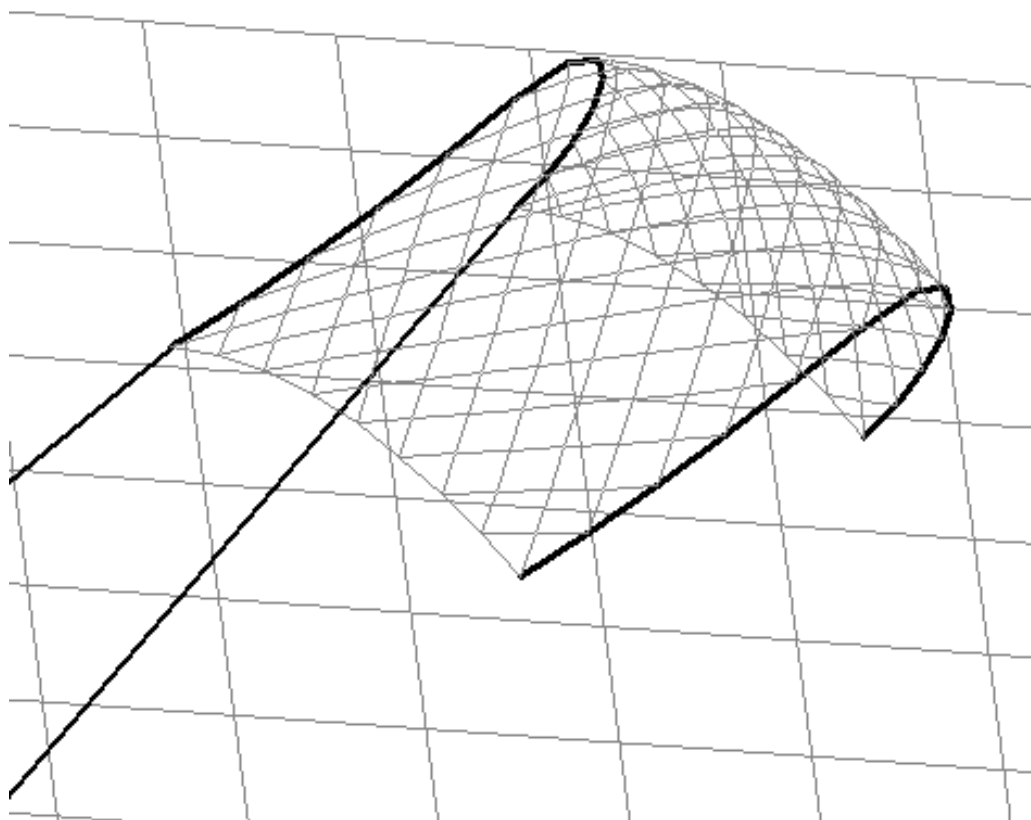


Рисунок 4.37 – Расчетный вид сети № 5

Разработанный метод расчета позволяет определить геометрические и силовые характеристики ставных сетей по известным параметрам, полученным по результатам расчета основных параметров сети. Результаты расчета компьютерной программы были подтверждены экспериментально. При этом ошибка расхождения расчетных и экспериментальных значений составила не более 8%.

Для верификации описанных в главах 2 и 3 расчетной схемы и алгоритма сравним результаты численного эксперимента, приведенного в этой главе, с результатами расчета эмпирическим методом [34] для различных скоростей течения.

Параметры сети указаны в таблице 4.12. Расчет проводился для скоростей течения $v=0,03$ м/с и $v=0,1$ м/с. Сравнительные результаты расчетов сети компьютерной программой и эмпирическим методом приведены в таблице 4.13.

Таблица 4.12 - Параметры сети

Параметр	Значение
Количество ячеек по верхней подборе	20
Количество ячеек по боковой подборе	10
Посадочный коэффициент по длине сети	0,5
Диаметр ниток сети	0,63 мм
Диаметр верхней подборы	3,6 мм
Диаметр нижней подборы	1 мм
Вес в воде 1 м ² сетного полотна	0,03 Н/м ²
Усредненная плотность верхней подборы с плавками	200 кг/м ³
Усредненная плотность нижней подборы с загрузкой	2000 кг/м ³

Таблица 4.13 - Сравнительные результаты

Параметр	Вычислительный эксперимент	Эмпирический метод
Скорость течения $v=0,03$ м/с		
R_x	0,84 Н	0,87 Н
h	1,04 м	1,06 м
Скорость течения $v=0,1$ м/с		
R_x	1,59 Н	1,67 Н
h	0,79 м	0,81 м

По этой таблице видно, что расчетное значение силы гидродинамического сопротивления сети R_x отличается от значения, полученного в результате расчета компьютерной программой, не более, чем на 5%, а значение вертикальной проекции сети h – не более, чем на 3%.

Экспериментальные исследования динамики ставных сетей на их моделях проводились в гидроканале ЗАО «МариНПО» в ноябре 2011 года. Была проведена серия опытов с пятью моделями ставных сетей, характеристики сетей приведены в таблице 4.14. У моделей сетей верхняя и нижняя подборы были прямолинейны, размер подбор составлял 1,0 м. Начальная скорость для моделей № 1, 3 и 4 составляла 0,8 м/с, у моделей № 2 и 5 - 0,7 м/с. Эксперименты проводились с различной загрузкой нижней подборы, в то время как плавучесть верхней подборы не изменялась и составляла 11,8 Н. Сетное полотно крепилось к ножам (рисунок 4.38). В процессе эксперимента измерялись

следующие характеристики: натяжение в оттяжке (сопротивления сети), вертикальная и горизонтальная проекции высоты сети h и l , а так же угол β - угол отклонения оттяжки тензодатчика от горизонта. Скорость потока жидкости изменялась от максимального значения (различного от опыта к опыту) до 0. Этот процесс фиксировался на видеокамеру. Измерения проводились с помощью тензостанции МІС-200. Тензодатчик (предел измерений 10Н, точность 0,01Н) для измерения силы сопротивления сети крепился, как показано на рисунке 4.41 [36].

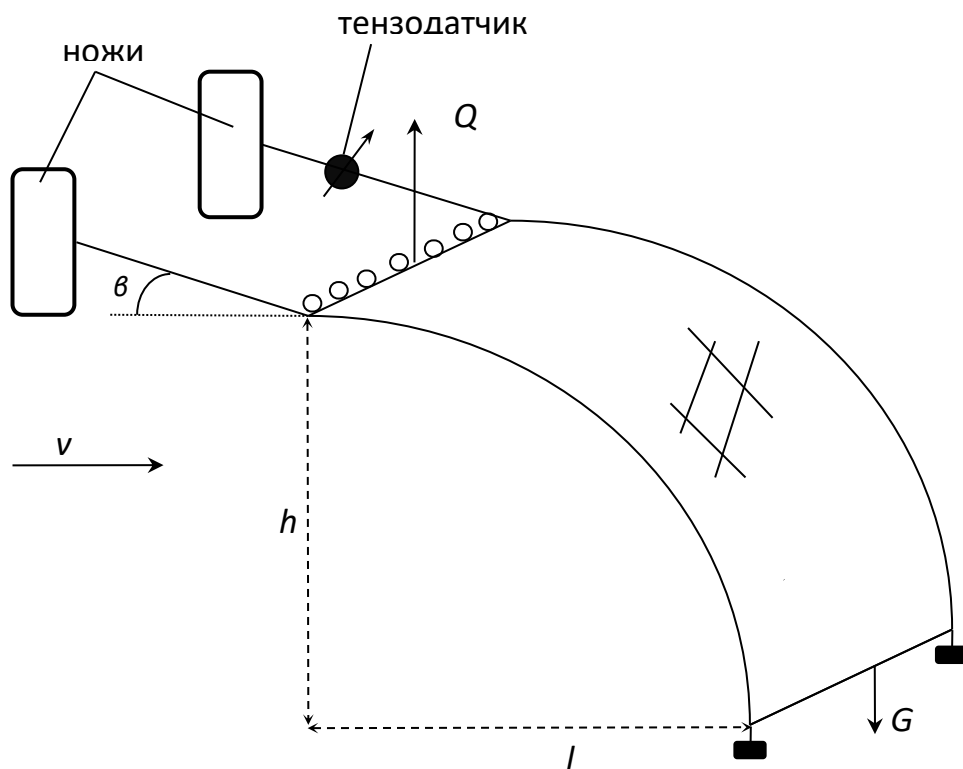


Рисунок 4.38 - Схема крепления сети и тензодатчика

Сопоставим результаты вычислительного эксперимента с данными [30] на примере модели сети с параметрами, показанными в таблице 4.15. Графики зависимостей, полученных экспериментально, показаны на рисунках 4.39а, 4.40а и 4.41а. Графики зависимостей, полученных в результате вычислительного эксперимента, показаны на рисунках 4.39б, 4.40б и 4.41б.

Таблица 4.14 - Характеристики моделей и условий эксперимента

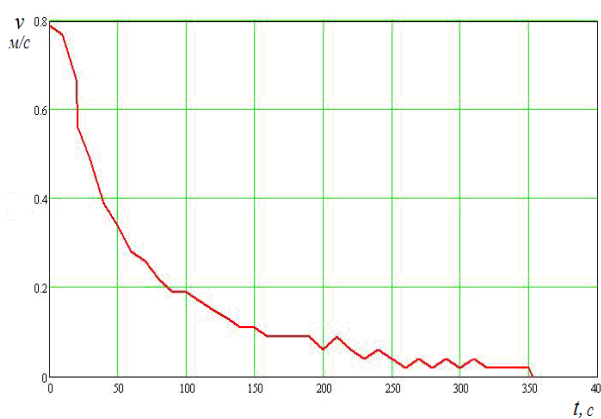
№ модели	Шаг ячейки а мм	Диаметр нити d мм	Высота в посадке S м	Сплошность, F_0	Загрузка нижней подборы G Н	Вес сети в воде q Н	Скорость $v_{max} \div v_{mi}$ м/с	Время процесса t с	Угол $\beta_{max} \div \beta_{mi}$ град
1	55	1,2	0,78	0,04	2.64	0,37	0,79 - 0	353	4-76
					3.77		0,79 - 0	398	3-90
					6.03		0,79 - 0	456	4-90
2	30	3.5	1,04	0,18	4.02	1,25	0,71 - 0	412	3-86
					6.29		0,73 - 0	403	3-83
					7.09		0,69 - 0,02	409	4-84
3	20	2	1,2	0,2	3.39	0,86	0,84 - 0,02	412	4-72
					5.65		0,82 - 0	448	4-85
4	30	1,8	1,18	0,124	2.64	0,39	0,82 - 0	425	3-71
					3.77		0,82 - 0	463	5-81
					4.9		0,84 - 0	295	4-74
5	40	2,2	1,01	0,11	2.64	0,2	0,69 - 0	407	3-73
					3.77		0,71 - 0	455	4-84
					4.9		0,71 - 0	388	3-86

В процессе эксперимента технически не представлялось возможным создать линейную зависимость скорости потока воды от времени. Поэтому для компьютерной программы (КП) была определена аппроксимирующая функция, связывающая скорость течения с временем (4.5). Время в эксперименте отсчитывалось от установившегося состояния сети при максимальной скорости течения. При компьютерном расчете время отсчитывалось от вертикального состояния сети. При этом неизбежны переходные процессы в начале расчета. Все это необходимо учесть при сравнении результатов.

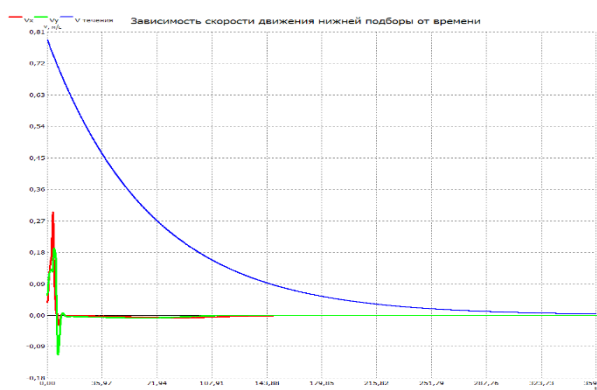
Таблица 4.15 - Входные расчетные параметры

Параметр	Значение
Шаг ячеи a , мм	55
Диаметр нитей d , мм	1,2
Высота в посадке S , м	0,78
Сплошность, F_0	0,04
Загрузка нижней подборы G , Н	2,64
Вес сети в воде q , Н	0,37
Скорость $v_{max} \div v_{min}$, м/с	0,79 \div 0
Время процесса t , с	353

$$v = \frac{0,79}{191,7} 1,015^{353-t} \quad (4.5)$$

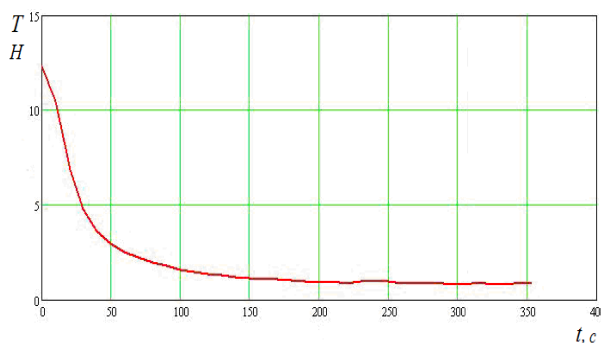


а)

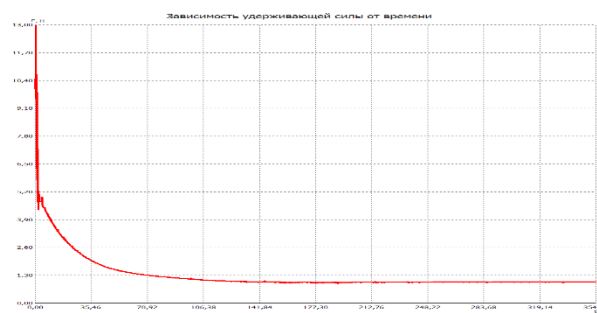


б)

Рисунок 4.39 - Графики зависимости скорости течения от времени

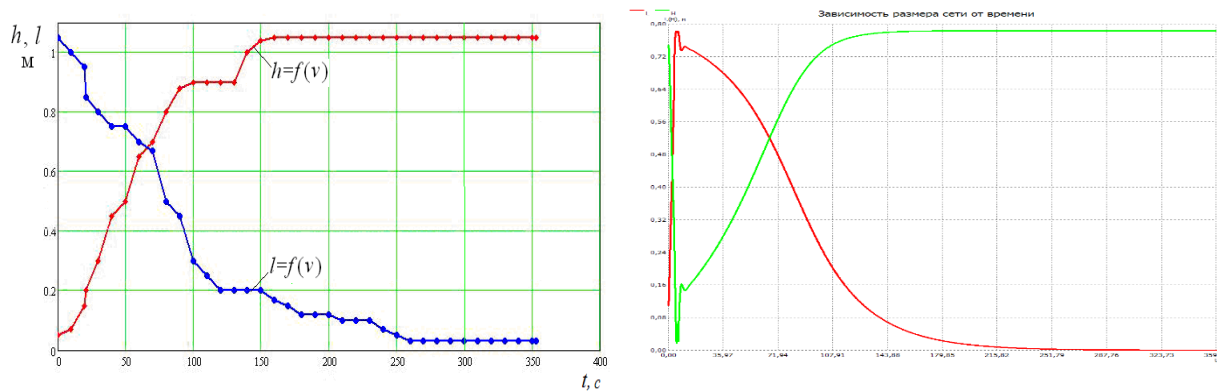


а)



б)

Рисунок 4.40 - Графики зависимости силы натяжения от времени



а)

б)

Рисунок 4.41 - Графики зависимости размеров от времени

При графическом анализе результатов ошибка расхождения экспериментальных значений составила не более 8 %.

4.4 Выводы по главе 4

- Проведены вычислительные эксперименты с цилиндрической сетной конструкцией, ставной сетью (методы интерполяции и точечных масс) при статической постановке задачи.
- Проведены вычислительные эксперименты со ставной, плавной сетью и ставным подвесным неводом в условиях неравномерного во времени течения при динамической постановке задачи.
- Проведены вычислительные эксперименты со ставным подвесным неводом в условиях волнения при динамической постановке задачи.
- Проведен анализ сходимости результатов численных и натуральных экспериментов с цилиндрической сетной конструкцией; среднее отклонение по геометрии не превышает 9 % и вызвано: технологическим разбросом изготовления натурной сети; тем, что толщина узлов при численном эксперименте не учитывается, форма натуральных ячей при небольших U_x не ромбическая; ограниченной точностью измерений.
- Проведен анализ сходимости результатов численных и натуральных экспериментов с моделями сетей; отклонения по геометрии не превышают 8 %.

- Проведен анализ сходимости результатов численных экспериментов с сетью с результатами, полученными расчетом эмпирическим методом; отклонения по геометрии не превышают 3 %, отклонения по силе гидродинамического сопротивления не превышают 5 %.
- Проведен анализ сходимости результатов численных и натуральных экспериментов с сетью при изменяющемся течении (в динамике); при графическом анализе результатов ошибка расхождения экспериментальных значений составила не более 8%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационного исследования разработаны методы, вычислительные алгоритмы и программы для ЭВМ, позволяющие на стадии проектирования и в процессе эксплуатации сетных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства определять их характеристики для выбора оптимальных режимов работы. Результаты проведенного научного исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Проведен анализ, выявлены недостатки континуальных расчетных схем и достоинства дискретных расчетных схем.
2. Задачи по расчету геометрии и сил натяжения в элементах сетной цилиндрической конструкции под действием гидростатических сил и сил тяжести при трехмерной постановке могут быть сведены к двумерному случаю для упрощения дискретной расчетной схемы. Из-за значительного сокращения размеров систем уравнений сокращается и трудоемкость расчета, что позволяет экономить время и использовать менее мощные вычислительные ресурсы.
3. В задачах, по условиям которых нет необходимости детально рассчитывать форму сети и силы натяжения в ее нитках в точности до нитки, а также при расчете без учета растяжений и провисаний ниток, можно применять огрубленный метод при помощи дискретной расчетной схемы по шести базовым расчетным точкам с последующим нахождением промежуточных значений методом интерполяции по расчетной сетке, сведя трехмерную постановку к псевдотрехмерной. Данную расчетную схему можно применять при предварительном расчете сети.
4. Для задач расчета ставной сети, крыла ставного подвесного невода и ставного невода с жестким каркасом при статической постановке (расчет при равномерном течении, расчет при предельных условиях эксплуатации), в которых необходимо учитывать натяжение в нитках, прогиб, перекося и

провисание ниток, возможный их разрыв, отклонение в длине и диаметре ниток, вызванное погрешностью при изготовлении и процессом износа орудия лова, на основе метода конечных элементов был разработан метод точечных масс. Достоинствами метода является простота полученных уравнений и возможность одновременной обработки множества узлов и связей с использованием недорогих современных гетерогенных и распределенных вычислительных систем общего назначения.

5. Для задач расчета формы плавной сети и крыла ставного подвесного невода, и нагрузок в их элементах в условиях изменяющегося во времени течения, учета переходных процессов и возникающих при них кратковременных перегрузок, расчета характеристик якоря для предотвращения его срыва, движения мешка с песком по грунту водоема с учетом сил трения, необходимо вести расчет в динамике с учетом масс и скоростей элементов. Данная задача решается тем же методом точечных масс, что и при статической постановке, но в расчетной схеме уравнения равновесия заменяются дифференциальными уравнениями движения при заданных начальных (начальная форма) и граничных (движение ниже уровня грунта и выше уровня воды) условиях.
6. Для расчета динамики орудий внутреннего и прибрежного рыболовства в условиях волнения и шторма с учетом профиля волны на поверхности водоема, зависимостей поля скоростей водной среды от глубины, скорости вынужденного и ветрового течения и шероховатости дна водоема на базе волновой модели Стокса-Релея была разработана расчетная схема волнения. С использованием разработанной расчетной схемы были разработаны эффективные расчетные схемы для ставных, плавных сетей и крыла ставных неводов в условиях волнения и шторма, основанные на композиции волновой модели и метода точечных масс, позволяющие совместить во времени вычисления профиля волны и поля скоростей с алгоритмами расчета орудия рыболовства методом точечных масс, тем

самым увеличить скорость расчета и иметь возможность применять более слабые вычислительные ресурсы для задач реального времени.

7. Применение при расчете сетей и крыла ставного невода методом точечных масс при динамической постановке задачи неявной конечно-разностной схемы позволяет увеличить точность вычислений, ускорить сходимость и увеличить устойчивость вычислительных алгоритмов. Проблема устойчивости особенно важна при решении жестких систем дифференциальных уравнений движения, когда при незначительном изменении геометрии орудия лова, а также во время переходных процессов возможны значительные кратковременные изменения сил натяжения в его элементах. Предложенный метод решения с применением неявного метода Эйлера, противоточных производных, разложением силовой функции от скоростей и перемещений в ряд Тейлора с аппроксимацией первого порядка сводит систему нелинейных уравнений к системе линейных уравнений с последующим ее решением методом сопряженных градиентов.
8. Вычислительные алгоритмы расчета ставной, плавной сетей, крыла ставного невода, разработанные на основе метода точечных масс, эффективно оптимизируются путем распределения вычислений между такими ресурсами ЭВМ, как центральные и графические процессоры (гетерогенная система).
9. По результатам анализа сходимости результатов численных экспериментов со ставной сетью при статической постановке задачи, плавной сетью и крылом ставного подвешного невода при динамической постановке задачи погрешность вычислений геометрических и силовых характеристик не превышает 9 %, что вызвано:
 - технологическим разбросом изготовления;
 - толщина узлов при численном эксперименте не учитывалась.

Разработанные методы и алгоритмы направлены способствуют автоматизации процесса проектирования и эксплуатации орудий рыболовства, что приведет к увеличению эффективности лова, улучшению качества (за счет

уменьшения ошибок проектирования, увеличения точности расчетов) сетных орудий рыболовства, ускорению процесса их проектирования, уменьшению трудозатрат при проектировании и в процессе эксплуатации, стоимости разработки и себестоимости конечного продукта. Разработанное с использованием результатов исследования программное обеспечение будет способствовать решению задачи импортозамещения программного обеспечения для рыбодобывающей отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агибалов, О.И. Современные графические процессоры как средства оптимизации параллельных вычислений. Научные технологии в космических исследованиях Земли / О.И. Агибалов, А.А. Золотарев // №4. -Т. 6. - М : ООО "Издательский дом Медиа публицер". -2014. С.60-63. ISSN: 2409-5419.
2. Бабенко, К.И. Основы численного анализа / К.И. Бабенко. - М.: Наука. - 1986. – 744 с.
3. Баранов, Ф.И. Избранные труды: в 4-х т. / Ф.И. Баранов. – Москва : Пищевая промышленность, 1971 – т.3 : Теория рыболовства. – 304 с.
4. Баранов, Ф.И. Избранные труды: в 4-х т. / Ф. И. Баранов. – Москва : Пищевая промышленность, 1970 – т.2 : Статьи по теории и практике орудий промышленного рыболовства. – 308 с.
5. Баранов, Ф.И. Избранные труды: в 4-х т. / Ф.И. Баранов. – М.: Пищевая промышленность, 1969 – т.1 : Техника промышленного рыболовства. – 719 с.
6. Берг, Й. Интерполяционные пространства. Введение / Й. Берг, Й. Лёфстрём — М.: Мир, 1980. — 264 с.
7. Боресков, А.В. Основы работы с технологией CUDA. / А.В. Боресков, А.А. Харламов – ДМК Пресс, - 2010. – 232 с.
8. Великанов, Н.Л. Гидродинамическое сопротивление плоской сети при продольном обтекании / Н.Л. Великанов, В.А. Наумов // Рыбное хозяйство. – 2016. – № 1. – С. 99-102.
9. Габрюк, В.И. Механика орудий рыболовства в математических моделях, алгоритмах, компьютерных программах: моногр. / В.И. Габрюк – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2011. – 519 с.
10. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. / Р. Галлагер — М.: Мир, 1984. – 428 с.

11. Гилл, Ф. Практическая оптимизация = Practical optimization. / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт — М.: Мир, 1985. — 509 с.
12. Горшков, А.Г. Сопротивление материалов / А.Г. Горшков, В.Н. Трошин, В.И. Шалашилин — М.: Изд. ФИЗМАТЛИТ, 2002. — 544 с.
13. Гуревич, М.И. Определение формы элементарного криволинейного треугольника сетного полотна / М.И. Гуревич, А.И. Григорьян // Тр. Мосрыбвтуза. Вып. 8. М., 1957. – С. 72-75.
14. Данилов, Ю.А. Гидродинамическое сопротивление сетей, нитей и тросов / Ю.А. Данилов, А.Л. Фридман - М.: ВНИРО, 1968. - 64 с.
15. Дверник, А.В. Устройство орудий рыболовства / А.В. Дверник, Л.Н. Шеховцев - М: Легкая и пищевая промышленность, 2004. - 280 с.
16. Дорофеев, С.Н. Геометрические преобразования в примерах и задачах: Учебное пособие / С.Н. Дорофеев – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2002. – 189 с.
17. Иванов, Э.П. Вариационные задачи теории сетных оболочек / Э.П. Иванов – Тр. КТИРПиХ, Сер. Промышленное рыболовство. Вып. 57. Калининградское книжное издательство, Калининград, 1975. - С.69-79.
18. Изнанкин, Ю.А. Основы статики сетных мешков / Ю.А. Изнанкин – Тр. КТИРПиХ, Сер. Промышленное рыболовство. Вып. 57. Калининградское книжное издательство, Калининград, 1975. - 87 с.
19. Изнанкин, Ю.А. О репрезентативности континуальной и дискретной моделей сетных мешков / Ю.А. Изнанкин, В.П. Котик - Тр. КТИРПиХ, Сер. Промышленное рыболовство. Вып. 65. Калининградское книжное издательство, Калининград, 1977. С.47-52.
20. Изнанкин, Ю.А. Возможности использования методов моделирования для расчета сетных мешков / Ю.А. Изнанкин. – Тр. КТИРПиХ, Сер. Промышленное рыболовство. Вып. 57. Калининградское книжное издательство, Калининград, 1975. С. 100-103.
21. Ильин, В. А. Математический анализ, ч. 1, изд. 3, ред. А.Н. Тихонов. / В.А. Ильин, В.А. Садовничий, Б.Х. Сендов - М.: Проспект, 2004. - 660 с.

22. Ильин, В.А. Линейная алгебра и аналитическая геометрия / В.А. Ильин, Г.Д. Ким - М.: ТК Велби, Изд во Проспект, 2007, 400с.
23. Калайда, М.Л. Методы рыбохозяйственных исследований: учебное пособие для студентов вузов / М.Л. Калайда, Л.К. Говоркова. - СПб.: Проспект Науки, 2013. - 288 с. ISBN 978-5- 903090-87-7.
24. Корпачев, В.С. Водные ресурсы и основы водного хозяйства / В.С. Корпачев, И.А. Бабкина .- СПб.: Изд-во: Лань, 2012. – 384 с. ISBN 978-5-8114-1331-7.
25. Кузнецов, А.И. Сопротивление сетного полотна волновому движению воды / А.И. Кузнецов // Тр. КТИРПиХ. Вып. XVII. Калининградское книжное издательство, Калининград. 1964. С.210-221.
26. Кулагин, В.Д. Статика сетных оболочек. Часть I / В.Д. Кулагин. - КГТУ. - 1995. - 104 с.
27. Максимов, Ю.А. Алгоритмы линейного и дискретного программирования / Ю.А. Максимов — М.: МИФИ, 1980. – 72 с.
28. Наумов, В.А. О зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления плоской сети от угла атаки / В.А. Наумов, Н.Р. Ахмедова, И.М. Ахмедов // Известия КГТУ. – 2015. – № 39. – С. 47-54.
29. Наумов, В.А. Силы гидродинамического сопротивления гибких связей буксируемых подводных объектов / В.А. Наумов // Морские интеллектуальные технологии. – 2017. – № 3(37), Т.1. С. 158-162.
30. Недоступ, А.А. Метод расчета силовых и геометрических характеристик ставных сетей. Физическое и математическое моделирование ставных сетей / А.А. Недоступ // Известия ТИНРО. Владивосток. Т. 154. 2008. С. 295 - 323.
31. Недоступ, А.А. Методы расчета пассивных сетных орудий внутреннего и прибрежного рыболовства: Монография / А.А. Недоступ - Калининград: Издательство ФГОУ ВПО «КГТУ», 2010. - 280 с.
32. Недоступ, А.А. Методы расчета сетных активных орудий прибрежного и океанического рыболовства. Методы расчета донных и разноглубинных

- тралов: Монография / А.А. Недоступ - Калининград: Издательство ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2011. - 156 с.
33. Недоступ, А.А. Физическое моделирование орудий и процессов рыболовства: Монография / А.А. Недоступ - Калининград: Издательство ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2012. - 375 с.
34. Недоступ, А.А. Метод расчета силовых и геометрических характеристик пространственных рыболовных сетей / А.А. Недоступ., Д.А. Володько // Известия ТИНРО. Владивосток. Т. 163. - 2010. - С. 388-407.
35. Недоступ, А.А. Гидродинамический расчет рыболовной сети / А.А. Недоступ., Д.А. Володько, А.О. Ражев // Сборник трудов V международной научно-практической конференции «Инженерные системы - 2012». РУДН. Москва. 2012. - С. 27-31.
36. Недоступ, А.А. Исследование силовых и геометрических характеристик рыболовной ставной сети / А.А. Недоступ, С.С. Косиков, М.В. Кузьменко // Известия КГТУ № 12. - К., 2007 – С. 13-19.
37. Недоступ, А.А. Математическое моделирование орудий и процессов рыболовства. Ч.1: Монография / А.А. Недоступ, В.А. Наумов, А.О. Ражев, А.В. Белых - Калининград: Издательство ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2013. - 253 с.
38. Недоступ, А.А. Математическое моделирование сетного полотна, закрепленного к обручу / А.А. Недоступ, А.А. Павленко, А.О. Ражев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел. №. 2-2 (292). 2012. - С. 87-95.
39. Недоступ, А.А. Исследование силовых и пространственно-временных характеристик крыла ставного невода при изменяющемся течении / А.А. Недоступ, А.О. Ражев // Рыбное хозяйство. №4. - 2014. - С. 114-116.
40. Недоступ, А.А. Математическое моделирование орудий и процессов рыболовства. Ч.II: Монография / А.А. Недоступ, А.О. Ражев - Калининград: Издательство ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. - 249 с.

41. Недоступ, А.А. Моделирование динамических характеристик ставной сети // А.А. Недоступ, А.О. Ражев // Рыбное хозяйство. №2. - 2013. - С. 97-99.
42. Недоступ, А.А. Оптимизация расчета сил гидродинамического сопротивления при компьютерном моделировании садков аквакультуры / А.А. Недоступ, А.О. Ражев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. Астрахань. АГТУ. №4. 2016. - С. 20-25.
43. Недоступ, А.А. Разработка математической модели крыла ставного подвесного невода на волнении и в условиях шторма / А.А. Недоступ, А.О. Ражев // Известия КГТУ. №35. - 2014. - С. 66-74.
44. Недоступ, А.А. Исследование геометрических и силовых характеристик ставной пространственной сети / А.А. Недоступ, А.О. Ражев, Д.А. Володько // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. Астрахань. АГТУ. №2. 2013. - С. 116-121.
45. Недоступ, А.А. Моделирование композитных сетных конструкций методом точечных масс при динамической постановке задачи / А.А. Недоступ, А.О. Ражев, В.К. Коротков // Морские интеллектуальные технологии (в базе Web of Science). №4(42) Т.4. 2018. - С. 254-258.
46. Недоступ, А.А. Математическое моделирование орудий и процессов рыболовства. Ч.III: Монография / А.А. Недоступ, А.О. Ражев, Е.В. Соколова, В.В. Макаров - Калининград: Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ», 2016. - 184 с.
47. Ортега, Дж. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений / Пер. с англ.; Под ред. Абрамова А.А. / Дж. Ортега, У. Пул - М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986, 288 с.
48. Осипов, Е.В. Методика определения параметров подхвата для лова *Rhopilema esculentum* / Е.В. Осипов // Тр. международной научной конференции "Рыбохозяйственное образование Камчатки в XXI веке". Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2002. С. 159- 163.

49. Осипов, Е.В. Моделирование рыболовных систем на основе объектно-ориентированных технологий : диссертация доктора технических наук : 05.18.17 / Е.В. Осипов - Владивосток, 2007. - 242 с.
50. Официальный сайт Embarcadero RAD Studio [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.embarcadero.com/ru/products/rad-studio>.
51. Попов, С.В. Метод определения силовых и геометрических характеристик деформированной сети : Дис. ... канд. техн. наук : 05.18.17 / С.В. Попов - Калининград, 2011 151 с. РГБ ОД, 61:12-5/3488.
52. Риман, И.С. Присоединенные массы тел различной формы / И.С. Риман, Р.Л. Крепс - М., 1947. – 48 с.
53. Розенштейн, М.М. Расчет сопротивления траловой системы, отдельных ее элементов и возможной скорости траления / М.М. Розенштейн, К.В. Соколов, Т.Ю. Соколова -М.: Российское агентство по патентам и товарным знакам, 2000. № 2000610372.
54. Розенштейн, М.М. Механика орудий рыболовства : учеб. / М.М. Розенштейн, А.А. Недоступ. – Москва : Моркнига, 2011. – 529 с.
55. Страуструп, Б. Программирование: принципы и практика использования C++, исправленное издание = Programming: Principles and Practice Using C++ / Б. Страуструп - М.: Вильямс, 2011. – 1239 с.
56. Страуструп, Б. Язык программирования C++ = The C++ Programming Language / Пер. с англ. - 3-е изд. / Б. Страуструп - СПб.; М.: Невский диалект — Бином, 1999. - 991 с.
57. Турчак, Л.И. Основы численных методов: Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. И доп. / Л.И. Турчак, П.В. Плотников - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 304 с.
58. Уилсон, Р. Введение в теорию графов / Р. Уилсон - М.: Мир, 1977. – 208 с.
59. Усенков, Д.Ю. На волне поляризации / Д.Ю. Усенков // Мир 3D/3D World. № 3. 2012. - С. 9-15.
60. Флёнов, М.Е. DirectX и C++. Искусство программирования / М.Е. Флёнов // ISBN: 5-94157-831-8. // БХВ-Петербург. – 2006. – 384 с.

61. Фридман, А.Л. Об особенностях сопротивления рыболовной сети / А.Л. Фридман, Ю.А. Данилов // Рыбное хозяйство, 1967, № 6, С. 43 - 47.
62. Фролов, В. Введение в технологию CUDA / В. Фролов // ВмиК МГУ. Сетевой журнал «Компьютерная графика и мультимедиа». №1(16). – 2008 [Электронный ресурс] // <http://cgm.computergraphics.ru/issues/issue16/cuda> (дата обращения 23.10.2018).
63. Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Дж. Иствуд - М., Мир, 1987. – 640 с.
64. Чеботарев, А.И. Общая гидрология (воды суши) / А.И. Чеботарев // Учебное пособие. - 2-е изд. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 530 с.
65. Эйлер, Л. Интегральное исчисление. Том 1. / Л. Эйлер — М.: ГИТТЛ. 1956. – 415 с.
66. Bouhoubeiny, E. Experimental investigation of the flow dynamics around moving fishing net structure / E. Bouhoubeiny, P. Druault, G. Germain // DEMAT '11. International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2011. 2011. Rostock. Germany. pp. 169-179.
67. Enerhaug, B. Experimental, numerical and analytical studies of flow through reticulate and solid cones / B. Enerhaug, S.H, Gjosund, K. Hansen // DEMAT '01. International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2001. 2001. Rostock. Germany. pp. 43-59.
68. Hendrickson, B. An improved spectral graph partitioning algorithm for mapping parallel computations / B. Hendrickson, L. Robert // SIAM Journal on Scientific Computing, 1995, Vol. 16, No. 2, pp. 452-469.
69. Karlsen, L. Escape of small fish and organisms in small-meshed trawls. Theory and Model Experiment in the Development of Reticulate Systems / L. Karlsen, B. Enerhaug // DEMAT '99. International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 1999. 1999. Rostock. Germany. pp. 77-87.

70. Mnassri, I. A numerical investigation for underwater fluid-netting interaction problem / I. Mnassri, D. Touze, B. Vincent, B. Alessandrini // DEMAT '11. International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2011. 2011. Rostock. Germany. pp. 117-129.
71. Myeong-Chul Park. Real-Time 3D Simulation for the Trawl Fishing Gear Based on Parallel Processing of Sonar Sensor Data / Myeong-Chul Park, Ok-Kyoon Ha, Seok-Wun Ha, and Yong-Kee Jun // International Journal of Distributed Sensor Networks. Vol. 10, Issue 7, 2014. pp. 1-9.
72. O'Neill, G. Evaluation of three source panel models of flow through partially blocked netting / G. O'Neill // DEMAT '05. International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2005. 2005. Busan. Korea. pp. 337-346.
73. Olukoton, K. Chip Multiprocessor Architecture: Techniques to Improve Throughput and Latency / K. Olukoton, J. Laudon — Morgan and Claypool Publishers, 2007. — 154 p. — ISBN 159829122X.
74. Paschen, M. Flow investigations of net cones. Theory and Model Experiment in the Development of Reticulate Systems / M. Paschen, H-J. Winkel // DEMAT '99. International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 1999. 1999. Rostock. Germany. pp. 197-216.
75. Paschen, M. Flow investigations of net panels for small angles of attack / M. Paschen, H. Knuths, H-J. Winkel, E. Ristow // DEMAT '07. International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2007. 2007. Rostock. Germany. pp. 23-34.
76. Paschen, M. Hydrodynamic loads on two-dimensional sheets of netting within the range of small angles of attack / M. Paschen, K. Breddermann // DEMAT '11. International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2011. 2011. Rostock. Germany. pp. 141-152.
77. Paschen, M. Analysis of current close to the surface of net structures / M. Paschen // DEMAT '09. International workshop - Contributions on the theory of

- fishing gears and related marine systems DEMAT 2009. 2009. Kinki. Japan. pp. 307-319.
78. Patterson, D.A. Computer Organization and Design, Fourth Edition: The Hardware/Software Interface / David A. Patterson, John L. Hennessy. — Morgan Kaufmann, 2011. — 914 p. — ISBN 0123747503.
79. Rong Wan. A static analysis of the tension and configuration of submerged plane nets / Rong Wan, Fuxiang Hu, Tadashi Tokai // Fisheries Science. Vol. 68. 2002. pp. 815–823.
80. Semlow, C. Impact of net mesh shape and angle of attack on the flow through a net panel-an experimental study / C. Semlow, M. Paschen // DEMAT '15. International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2015. 2015. Rostock. Germany. pp. 57-64.
81. Suzuki, K. Validity and visualization of a numerical model used to determine dynamic configurations of fishing nets / K. Suzuki, T. Takagi, T. Shimizu, T. Hiraishi, K. Yamamoto, K. Nfshimoto. // FISHERIES SCIENCE. EBSCO Publishing. 2003. pp. 695-705.
82. Tsutomu Takagi. Possibility of integrated analysis using net-shape simulator “NaLA” and CFD to estimate flow characteristics around fishing nets / Tsutomu Takagi, Hiroyuki Yoshino, Takashi Shimizu, Katsuya Suzuki // DEMAT '03. International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2003. 2003. Rostock. Germany. pp. 245-250.
83. Velikanov, N.L. Hydrodynamic drag of lattices in straight pipelines / N.L. Velikanov, S.I. Koryagin, V.A. Naumov // Russian Engineering Research. – 2014. – Vol. 34, No. 9. – pp. 554-556.
84. Winkel, H-J. Wind tunnel tests for fishing gear development – methods and limits / H-J. Winkel, M. Paschen // DEMAT '01. International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2001. 2001. Rostock. Germany. pp. 29-41.

Приложение А
обязательное
Программы для ЭВМ

1. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2014610319 (9 января 2014 г.) «**Расчет динамических характеристик ставной разноглубинной сети**». Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.1).
2. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2014610320 (9 января 2014 г.) «**Донная ставная сеть**». Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.2).
3. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2014610321 (9 января 2014 г.) «**Расчет динамических характеристик плавной сети с буюми**». Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.3).
4. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2014610325 (9 января 2014 г.) «**Расчет динамических характеристик ставной разноглубинной сети с оттяжками и поводцами**». Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.4).
5. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2014610318 (9 января 2014 г.) «**Расчет динамических характеристик ставной разноглубинной сети с вешками**». Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.5).
6. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2014610054 (9 января 2014 г.) «**Расчет динамических характеристик ставной донной сети**». Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.6).
7. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2014610317 (9 января 2014 г.) «**Динамика крыла ставного подвесного невода**». Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.7).

8. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2014610196 (9 января 2014 г.) «**Расчет динамических характеристик плавной сети**». Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.8).
9. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2015613052 (3 марта 2015 г.) «**Динамика крыла ставного подвесного невода на волнении**». Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.9).
10. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2016662584 (15 ноября 2016 г.) «**Расчет динамических характеристик ставной разноглубинной сети на волнении**». Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.10).
11. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2016662391 (9 ноября 2016 г.) «**Расчет динамических характеристик плавной сети с буюми на волнении**». Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.11).
12. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2016662583 (15 ноября 2016 г.) «**Расчет динамических характеристик плавной сети на волнении**». Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.12).
13. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2016663339 (05 декабря 2016 г.) «**Расчет динамических характеристик ставной разноглубинной сети с оттяжками и поводцами на волнении**». Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.13).
14. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2016662783 (22 ноября 2016 г.) «**Расчет динамических характеристик ставной разноглубинной сети с вешками на волнении**». Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.14).
15. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2016663268 (29 ноября 2016 г.) «**Расчет динамических характеристик**

ставной донной сети на волнении». Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.15).

16. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2017610404 (10 января 2017 г.) **«Динамика крыла ставного подвесного невода на волнении версия 2»**. Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.16).

17. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ No. 2018618725 (19 июля 2018 г.) **«Механика орудий внутреннего и прибрежного рыболовства – Менеджер программ»**. Авторы: Недоступ А.А., **Ражев А.О.** (рисунок А.17).

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014610319

Расчет динамических характеристик ставной
разноглубинной сети

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Калининградский государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)*

Заявка № 2013618422

Дата поступления 19 сентября 2013 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 09 января 2014 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Симонов', written over a light-colored background.

Б.П. Симонов



Рисунок А.1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014610320

Донная ставная сеть

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Калининградский государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)*

Заявка № **2013618423**

Дата поступления **19 сентября 2013 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **09 января 2014 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

Рисунок А.2

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014610321

Расчет динамических характеристик плавной сети с буями

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Калининградский государственный технический университет» (RU)**

Авторы: **Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)**

Заявка № **2013618424**

Дата поступления **19 сентября 2013 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **09 января 2014 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



Рисунок А.3

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014610325

**Расчет динамических характеристик ставной
разноглубинной сети с оттяжками и поводцами**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Калининградский государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)*

Заявка № **2013618407**

Дата поступления **19 сентября 2013 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **09 января 2014 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'B.P. Simonov', is written over a faint, circular watermark or seal.

Б.П. Симонов



Рисунок А.4

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014610318

**Расчет динамических характеристик ставной
разноглубинной сети с вешками**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Калининградский государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)*

Заявка № **2013618411**

Дата поступления **19 сентября 2013 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **09 января 2014 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*



Б.П. Симонов

Рисунок А.5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014610054

Расчет динамических характеристик ставной донной сети

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Калининградский государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)*

Заявка № **2013618399**

Дата поступления **19 сентября 2013 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **09 января 2014 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

Рисунок А.6

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014610317

Динамика крыла ставного подвесного невода

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Калининградский государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)*

Заявка № 2013618405

Дата поступления 19 сентября 2013 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 09 января 2014 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'B.P. Simonov', is written over a faint, circular watermark or seal.

Б.П. Симонов



Рисунок А.7

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014610196

Расчет динамических характеристик плавной сети

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Калининградский государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)*



Заявка № 2013618425

Дата поступления 19 сентября 2013 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 09 января 2014 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

Рисунок А.8

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015613052

Динамика крыла ставного подвесного невода на волнении

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Калининградский государственный технический университет» (RU)**

Авторы: **Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)**

Заявка № **2014661744**

Дата поступления **20 ноября 2014 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **03 марта 2015 г.**

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



Рисунок А.9

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016662584

**Расчет динамических характеристик ставной
разноглубинной сети на волнении**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «КГТУ») (RU)**

Авторы: **Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)**



Заявка № 2016619775

Дата поступления 19 сентября 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 15 ноября 2016 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

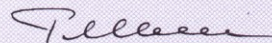
 Г.П. Ильев

Рисунок А.10

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016662391

**Расчет динамических характеристик плавной сети с буями
на волнении**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «КГТУ») (RU)*

Авторы: *Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)*

Заявка № 2016619734

Дата поступления 16 сентября 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 09 ноября 2016 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

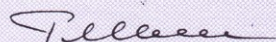
 Г.П. Ивлиев

Рисунок А.11

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016662583

**Расчет динамических характеристик плавной сети на
волнении**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «КГТУ») (RU)*

Авторы: *Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)*

Заявка № 2016619774

Дата поступления 19 сентября 2016 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 15 ноября 2016 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности


 Г.П. Ивлиев



Рисунок А.12

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016663339

**Расчет динамических характеристик ставной
разноглубинной сети с оттяжками и поводцами на волнении**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «КГТУ»)** (RU)

Авторы: **Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)**

Заявка № **2016619537**

Дата поступления **08 сентября 2016 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **05 декабря 2016 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности


 Г.П. Ивлиев



Рисунок А.13

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016662783

**Расчет динамических характеристик ставной
разноглубинной сети с вешками на волнении**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «КГТУ») (RU)*

Авторы: *Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)*

Заявка № 2016619677

Дата поступления 15 сентября 2016 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 22 ноября 2016 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности


 Г.П. Ивлиев



Рисунок А.14

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016663268

**Расчет динамических характеристик ставной донной сети
на волнении**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «КГТУ») (RU)*

Авторы: *Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)*

Заявка № **2016619489**

Дата поступления **07 сентября 2016 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **29 ноября 2016 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

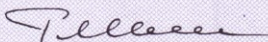
 *Г.П. Ивлиев*



Рисунок А.15

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017610404

**Динамика крыла ставного подвесного невода на волнении
версия 2**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «КГТУ») (RU)*

Авторы: *Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)*

Заявка № 2016619754

Дата поступления 16 сентября 2016 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 января 2017 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности


 Г.П. Ивлиев



Рисунок А.16

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018618725

**Механика орудий внутреннего и прибрежного рыболовства
- Менеджер программ**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «КГТУ») (RU)*

Авторы: *Недоступ Александр Алексеевич (RU),
Ражев Алексей Олегович (RU)*

Заявка № 2018615326

Дата поступления 25 мая 2018 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 19 июля 2018 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



Рисунок А.17

Приложение Б

обязательное

Публикации

Издания ВАК

1. Недоступ, А.А. Математическое моделирование сетного полотна, закрепленного к обручу / А.А. Недоступ, А.А. Павленко, **А.О. Ражев** // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел. №. 2-2 (292). 2012. - С. 87-95.
2. Недоступ, А.А. Моделирование динамических характеристик ставной сети / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Рыбное хозяйство. №2. - 2013. - С. 97-99.
3. Недоступ, А.А. Исследование геометрических и силовых характеристик ставной пространственной сети / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев**, Д.А. Володько // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. Астрахань. АГТУ. №2. 2013. - С. 116-121.
4. Недоступ, А.А. Математическое моделирование динамических процессов крыла ставного подвесного невода при изменяющемся течении типа / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Известия КГТУ. №33. - 2014. - С. 44-52.
5. Недоступ, А.А. Создание компьютерной программы моделирования динамических процессов крыла ставного подвесного невода при изменяющемся течении типа / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Известия КГТУ. №34. - 2014. - С. 95-102.
6. Недоступ, А.А. Разработка математической модели крыла ставного подвесного невода на волнении и в условиях шторма типа / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Известия КГТУ. №35. - 2014. - С. 66-74.
7. Недоступ, А.А. Исследование силовых и пространственно-временных характеристик крыла ставного подвесного невода при изменяющимся

- течении типа / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Рыбное хозяйство. №4. - 2014. - С. 110-112.
8. Недоступ, А.А. Исследование силовых и пространственно-временных характеристик крыла ставного невода на волнении / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Рыбное хозяйство. №5. - 2014. - С. 86-88.
 9. Недоступ, А.А. Разработка модели волнения при неравномерном течении на основании волнового профиля и скоростного поля водной массы типа / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Известия КГТУ. №38. - 2015. - С. 45-52.
 10. Недоступ, А.А. Создание имитационной модели погружения, всплытия ставного невода в условиях волнения при неравномерном течении / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Рыбное хозяйство. №4. - 2016. - С. 95-99.
 11. Недоступ, А.А. Расчет сил гидродинамического сопротивления сетных орудий рыболовства в задачах имитационного их моделирования / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Известия КГТУ. №42. - 2016. - С. 185-192.
 12. Недоступ, А.А. Математическое моделирование работы плавной сети в условиях волнения реки / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. Астрахань. АГТУ. №3. 2016. - С. 45-52.
 13. Недоступ, А.А. Оптимизация расчета сил гидродинамического сопротивления при компьютерном моделировании садков аквакультуры / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. Астрахань. АГТУ. №4. 2016. - С. 20-25.
 14. Недоступ, А.А. Моделирование композитных сетных конструкций методом точечных масс при динамической постановке задачи/ А.А. Недоступ, **А.О. Ражев**, В.К. Коротков // Морские интеллектуальные технологии (в базе Web of Science). №4(42) Т.4. 2018. - С. 254-258.
 15. Недоступ, А.А. Моделирование напряжений в жестких сетных конструкциях методом конечных элементов / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев**,

В.К. Коротков // Морские интеллектуальные технологии (в базе Web of Science). №4(42) Т.4. 2018. - С. 259-264.

Издания РИНЦ

1. Недоступ, А.А. Практическое применение расчета сетных оболочек с использованием дискретной модели / А.А. Недоступ, А.А. Павленко, **А.О. Ражев** // Материалы сборника «Научные труды Дальрыбвтуза». Промышленное рыболовство. Акустика. Т. 25. Владивосток, Дальрыбвтуз, 2012. - С. 44-53.
2. Недоступ, А.А. Математическое моделирование динамических процессов плавной сети / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Материалы сборника «Научные труды Дальрыбвтуза». - Т. 29. - Владивосток. - Дальрыбвтуз. - 2013. - С. 46-56.
3. Недоступ, А.А. Создание компьютерной программы по расчету динамических характеристик плавной сети / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Материалы сборника «Научные труды Дальрыбвтуза». - Т. 29. - Владивосток. - Дальрыбвтуз. - 2013. - С. 57-66.

Международные издания

1. Недоступ, А.А. Правила подобия сложных динамических систем / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Теоретическая и прикладная механика : международный научно-технический сборник : Вып. 31 / главный редактор А.В. Чигарев. - Минск: БНТУ, 2016. – С. 73-78.

Конференции в России

1. Недоступ, А.А. Использование дискретной модели для расчета характеристик сетного полотна, прикрепленного к обручу/ А.А. Недоступ, А.А. Павленко, **А.О. Ражев** // Сборник материалов II Международной научно-технической конференции: Актуальные проблемы освоения биологи-

- ческих ресурсов Мирового океана. Ч. I. Владивосток, Дальрыбвтуз, 2012. - С. 343-348.
2. Недоступ, А.А. Гидродинамический расчет рыболовной сети/ А.А. Недоступ, Д.А. Володько, **А.О. Ражев** // Сборник тезисов докладов V международной научно-практической конференции «Инженерные системы - 2012». РУДН. Москва. 2012. С. 8.
 3. Недоступ, А.А. Гидродинамический расчет рыболовной сети / А.А. Недоступ, Д.А. Володько, **А.О. Ражев** // Сборник трудов V международной научно-практической конференции «Инженерные системы - 2012». РУДН. Москва. 2012. - С. 27-31.
 4. Недоступ, А.А. Сеть, закрепленная на обруче/ А.А. Недоступ, А.А. Павленко, **А.О. Ражев** // Материалы международной научно-технической конференции «Наука и образование - 2012» - МГТУ. - Мурманск. - 2012. [Электронный ресурс] : материалы междунар. науч.-техн. конф., Мурманск, 2 - 6 апреля 2012 г. / Мурман. гос. тех. ун-т. - Мурманск : МГТУ, 2012. - 1 опт. диск (CD-ROM). - Электрон. текст подгот. ФГОУВПО «МГТУ». - НТЦ - Информрегистр № 0321201101. - С. 820-824.
 5. Недоступ, А.А. Математическое моделирование сетного полотна, закрепленного к обручу / А.А. Недоступ, А.А. Павленко, **А.О. Ражев** // Тезисы XV Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии» «Технология - 2012». Москва - Орел. 2012. - С. 235-236.
 6. Недоступ, А.А. Математическое моделирование инженерных сетных конструкций в гетерогенной среде / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Тезисы Международной конференции «Разностные схемы и их приложения», посвященной 90-летию профессора В.С. Рябенского. Москва. - 2013. - С. 81-82.
 7. Недоступ, А.А. Дискретная модель ставной сети. Статическая постановка задачи / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Материалы II Международной научно-практической конференции «Научно-практические вопросы ре-

- гулирования рыболовства» 23-24 октября 2013 г.// - Владивосток: Дальрыбвтуз, 2013, с. 269-275.
8. Недоступ, А.А. Дискретная модель ставной сети. Динамическая постановка задачи / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Материалы II Международной научно-практической конференции «Научно-практические вопросы регулирования рыболовства» 23-24 октября 2013 г.// - Владивосток: Дальрыбвтуз, 2013, с. 275-280.
 9. Недоступ, А.А. Компьютерная программа моделирования ставной сети / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Материалы II Международной научно-практической конференции «Научно-практические вопросы регулирования рыболовства» 23-24 октября 2013 г.// - Владивосток: Дальрыбвтуз, 2013, с. 280-285.
 10. Недоступ, А.А. Компьютерная программа моделирования процесса выборки ставной сети с помощью сетевыборочной машины / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование». П-Камчатский. ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ». Ч.2. - 2014. - С. 70-73.
 11. Недоступ, А.А. К разработке теории, которая с единых методологических позиций описывает всевозможные виды взаимодействий водных масс с элементами орудия рыболовства и садков аквакультуры / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование». П-Камчатский. ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ». Ч.2. - 2014. - С. 65-70.
 12. Ражев, А.О. Исследование силовых и пространственно-временных характеристик крыла ставного подвесного невода на волнении / **А.О. Ражев**, А.А. Недоступ // Сборник трудов докладов XII Международной научной конференции «Инновации в науке, образовании и бизнесе - 2014»/ КГТУ. - Ч. 1. - 2014. - С. 46-49.

13. Недоступ, А.А. Создание математической модели движения ставного подвешного невода в условиях волнения и неравномерного течения / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Материалы VI Всероссийской конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование». Часть II. П-Камчатский. ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ». - 2015. - С. 44-51.
14. Недоступ, А.А. Применение графического процессора в задачах имитационного моделирования динамических процессов в ставном подвешном неводе / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Материалы VI Всероссийской конференции «Наука, образование, инновации: пути развития». П-Камчатский. ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ». - 2015. - С. 88-92.
15. Недоступ, А.А. Математическое моделирование влияния волнения на раскрытие поверхностной плавной сети / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Сборник тезисов докладов IV международного «Балтийского морского форума» / КГТУ. - 2016. - С. 213-215.
16. Недоступ, А.А. Математическое моделирование садка индустриальной аквакультуры при трехмерной постановке задачи / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование». П-Камчатский. ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ». Часть 1. - 2016. - С. 109-112.
17. Недоступ, А.А. Оптимизация расчета сил гидродинамического сопротивления садка аквакультуры на ЭВМ / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Сборник тезисов докладов IV международного «Балтийского морского форума», XIV международной научной конференции «Инновации в науке, образовании и предпринимательстве» / КГТУ. - Т.2. - 2016. - С. 172-175.
18. Недоступ, А.А. Анализ раскрытия поверхностной плавной сети при волнении в динамической постановке задачи / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Сборник материалов IV Международной научно-технической конферен-

ции: Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана. Ч. I. Владивосток, Дальрыбвтуз, 2016. - С. 153-158.

19. Недоступ, А.А. Математическое моделирование ставной сети на основе дискретной модели в динамике / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции «Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование». П-Камчатский. ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ». Часть 1. - 2016. - С. 113-118.
20. Ражев, А.О. Динамическая постановка задачи моделирования композитных сетных конструкций методом точечных масс / **А.О. Ражев**, А.А. Недоступ // Сборник материалов Материалы II Национальной заочной научно-технической конференции «Инновационное развитие рыбной отрасли в контексте обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации» Владивосток, Дальрыбвтуз, 2018. - С. 80-86.
21. Ражев, А.О. Математическое моделирование напряжений в жестких сетных конструкциях методом конечных элементов / **А.О. Ражев**, А.А. Недоступ // Сборник материалов Материалы II Национальной заочной научно-технической конференции «Инновационное развитие рыбной отрасли в контексте обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации» Владивосток, Дальрыбвтуз, 2018. - С. 87-93.

Конференции за рубежом

1. Nedostup, A.A. A discrete model of gill nets for static and dynamic problems / A.A. Nedostup, A.O. Razhev // 11th International workshop - Contributions on the theory of fishing gears and related marine systems DEMAT 2013. V. 8. 2013. Germany. Rostock. p. 13-22.

Приложение В

обязательное

Монографии

1. Недоступ, А.А. Математическое моделирование орудий и процессов рыболовства / А.А. Недоступ, В.А. Наумов, **А.О. Ражев**, А.В. Белых // Ч.І: Монография. Калининград: Издательство ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2013. - 253 с.
2. Недоступ, А.А. Математическое моделирование орудий и процессов рыболовства / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев** // Ч.ІІ: Монография. Калининград: Издательство ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. - 249 с.
3. Недоступ, А.А. Математическое моделирование орудий и процессов рыболовства / А.А. Недоступ, **А.О. Ражев**, Е.В. Соколова, В.В. Макаров // Ч.ІІІ: Монография. Калининград: Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ», 2016. - 184 с.

Приложение Г

обязательное

Поддержка исследования

1. Инициативный проект РФФИ №11-08-00096-а «Исследование динамики орудий и процессов рыболовства». 2011-2013 гг. Рег. № 01201165423. ФГАНУ «ЦИТиС».
2. Инициативный проект РФФИ №15-08-00464-а «Математическое, физическое и имитационное моделирование сетных орудий рыболовства и аквакультуры». 2015-2017 гг.
3. Лауреат премии Калининградской области «Эврика» за работу «ФИЗИЧЕСКОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРУДИЙ И ПРОЦЕССОВ РЫБОЛОВСТВА». 2013 г.
4. НИОКР в рамках государственного задания по теме «Разработка новых методов, алгоритмов, компьютерных программ моделирования орудий и процессов рыболовства». Рег. № 01201264354. ФГАНУ «ЦИТиС». 2012 г.
5. НИОКР в рамках государственного задания по теме «Разработка новых методов, алгоритмов, компьютерных программ моделирования орудий и процессов рыболовства». Рег. № 012012643543. ФГАНУ «ЦИТиС». 2013 г.
6. НИОКР в рамках государственного задания по теме «Разработка новых методов, алгоритмов, компьютерных программ моделирования орудий и процессов рыболовства». Рег. № 012012643544. ФГАНУ «ЦИТиС». 2014 г.
7. НИОКР в рамках государственного задания по теме «Разработка новых методов, алгоритмов, компьютерных программ моделирования орудий и процессов рыболовства». Рег. № 215052040003. ФГАНУ «ЦИТ и С». 2015 г.

8. НИОКР в рамках государственного задания по теме «Разработка новых методов, алгоритмов, компьютерных программ моделирования орудий и процессов рыболовства». Рег. № АААА-А16-116072810020-4. ФГАНУ «ЦИТиС». 2016 г.
9. НИОКР в рамках государственного задания по теме «Разработка новых методов, алгоритмов, компьютерных программ моделирования орудий и процессов рыболовства». Рег. № 012012643547. ФГАНУ «ЦИТиС». 2017 г.
10. НИОКР в рамках государственного задания по теме «Разработка новых методов, алгоритмов, методик моделирования орудий и процессов рыболовства». Рег. № АААА-А18-118050490059-0. ФГАНУ «ЦИТиС». 2018 г.

Приложение Д
обязательное
Внедрение результатов

Акт о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
(рисунок Д.1).



Рисунок Д.1