

МИНИСТЕРСТВО РЫБНОГО ХОЗЯЙСТВА СССР  
Всесоюзный научно-исследовательский институт морского  
рыбного хозяйства и океанографии  
( В Н И Р О )

УДК 639.2.081.1.001.2

На правах рукописи

Кулагин Виталий Дмитриевич

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА  
ФОРМЫ И ПРОЧНОСТИ СЕТНЫХ ЧАСТЕЙ ОРУДИЙ  
ПРОМЫШЛЕННОГО РЫБОЛОВСТВА

Специальность № 05.18.17. - "Промышленное  
рыболовство"

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени доктора технических  
наук

Москва, 1988 г.

Работа выполнена в Калининградском высшем инженерном морском училище.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
С.А.Алексеев  
доктор технических наук, профессор  
Б.И.Друзь  
доктор технических наук, профессор  
А.Л.Фридман

Ведущее предприятие - Научно-производственное объединение  
по технике промышленного рыболовства

Защита состоится "12" / V \_\_\_\_\_ 1989 г. на заседа-  
нии специализированного совета Д II 7 01 01 Всесоюзного  
научно-исследовательского института морского рыбного хозяйст-  
ва и океанографии (ВНИРО), 107140, Москва, В.Красносельская  
ул.17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВНИРО.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 198 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
К.Т.Н.

В.И.Кудрявцев

Одним из путей решения задач, которые ставятся перед  
рыбной промышленностью страны партией и правительством, явля-  
ется дальнейшее совершенствование сетных орудий промышленно-  
го рыболовства, на которые в ближайшие годы будет приходиться  
основная доля вылова рыбы. Возможности совершенствования ору-  
дий рыболовства зависят от степени научной обоснованности  
теории и методов их проектирования.

Теория проектирования орудий промышленного рыболовства  
выделилась в самостоятельное научное направление, благодаря  
бурному развитию промышленного рыболовства в 1950-1960 г.г.  
и закономерной дифференциации научных знаний в этой области.  
В свою очередь при проектировании сетных орудий лова в пос-  
ледние годы наряду с экспериментальными методами стали при-  
меняться теоретические (расчетные) методы обоснования их  
формы и прочности. Разработка теоретических методов расчета  
формы и прочности сетных орудий промышленного рыболовства  
представляет собой весьма сложную задачу, что объясняется  
характером внешних сил, наличием тросовых каркасов, нестаци-  
онарностью работы, трудностью установления расчетных режимов,  
взаимосвязью формы и величины внешних сил, специфической осо-  
бенностью сетематериалов и другими факторами. Все это обус-  
ловливает своеобразие проблемы расчета формы и прочности  
сетных частей орудий рыболовства, решению которой и посвяще-  
на реферируемая работа. В работе исследуются в основном се-  
ти<sup>ж</sup> с ромбовидной ячеей. Однако ее результаты после некото-  
рой модификации могут быть использованы для расчета сетей  
иной структуры.

ж Под сетями в работе понимаются собственно сети и дели.

Впервые общие принципы расчета формы и прочности рыболовных сетей были сформулированы Ф.И.Барановым. Большой вклад в теоретические методы расчета сетей был сделан Н.Н. Андреевым. Разработкой расчетных методов занимались М.И.Гуревич, А.И.Зонов, Ю.А.Изнанкин, А.И.Сучков и др. Несмотря на проведенные исследования, теоретические методы расчета сетных орудий промышленного рыболовства до сих пор не изложены с единой научно-методической позиции, а в разработке практических приемов их расчета сделаны лишь первые шаги.

В настоящее время преобладающими являются экспериментальные методы проектирования <sup>орудий лова</sup>, базирующиеся на теории подобия и опыте эксплуатации орудий промышленного рыболовства. Экспериментальные методы проектирования требуют больших затрат времени и средств и не всегда дают возможность проанализировать с достаточной полнотой влияние на параметры орудий рыболовства их конструктивных элементов, внешних сил и других факторов. Поэтому наряду с экспериментальными методами проектирования целесообразно использовать расчетные методы. На целесообразность использования расчетных методов при проектировании рыболовных сетей указывали Ф.И.Баранов, Н.Н.Андреев, А.Л.Фридман. Так, например, Н.Н.Андреев отмечал, что "В практике проектирования, изготовления и эксплуатации орудий лова приходится сталкиваться с множеством задач, без решения которых невозможно быстрое и широкое их внедрение. Решение этих задач экспериментальным путем сопряжено с большими затратами и требует дополнительного времени".

Здесь уместно отметить, что ни экспериментальный, ни теоретический метод в отдельности не обеспечивают решения задач проектирования орудий промышленного рыболовства с дос-

точной простотой и точностью. Поэтому совершенствование теории проектирования сетных орудий должно идти по пути совместного использования экспериментальных и теоретических методов. Целесообразность совместного использования указанных выше методов была показана автором диссертации при выполнении под его руководством хозяйственной работы "Составление атласа расчетных диаграмм и рекомендации по проектированию разноглубинных кошельковых неводов", результаты которой изложены в монографии "Разноглубинные кошельковые невода" (Агропромиздат, 1985 г.).

Так как настоящая работа имеет прикладной характер, автор не стремился к глубокой проработке общей теории сетей, а рассмотрел лишь те ее аспекты, которые непосредственно связаны с исследуемой проблемой. В свою очередь подбор приведенных в диссертации прикладных задач преследовал цель показать возможные области использования теоретических методов при проектировании сетных орудий промышленного рыболовства. Решение всех прикладных задач доведено в диссертации до результатов, пригодных для использования в конструкторских бюро промышленного рыболовства.

Работы по расчету сетных орудий промышленного рыболовства проводятся автором и под его руководством в Калининградском высшем инженерном морском училище с 1969 года. За этот период под руководством автора настоящей работы было написано и защищено несколько кандидатских диссертаций по специальности промышленное рыболовство.

Актуальность темы обусловлена необходимостью совершенствования теории проектирования орудий промышленного рыболовства, что может быть достигнуто совместным использованием

экспериментальных и теоретических методов их расчета, т. е. разработкой практических схем определения параметров орудий промышленного рыболовства на основе теории моделирования и теоретических исследований.

Цель диссертации состоит в разработке с единой научно-методической позиции на базе имеющихся и ряда новых решений общих методов расчета сетных конструкций орудий промышленного рыболовства и создании на основе полученных результатов практических схем для проектирования новых и совершенствования существующих орудий лова.

Основные задачи диссертации включают:

обоснование принятой для исследования расчетной модели сети; запись общих уравнений для расчета рыболовных сетей при нагрузке их внешними силами, присущими орудиям лова;

исследование условий существования в сетях зон, в которых напряжены нити одного из семейств и нити обоих направлений, а также условий совпадения траекторий главных натяжений с линиями кривизны поверхности сети;

вывод основных зависимостей для расчета сетей в зонах, в которых напряжены нити одного из семейств;

формулировку граничных условий в типичных задачах расчета формы и прочности сетных частей орудий лова;

разработку формул подобия в расчетах геометрии и статике сетей;

разработку методов расчета растяжимых сетей вращения, цилиндрических и плоских сетей на внешние нагрузки, характерные для орудий промышленного рыболовства;

разработку методики расчета прочности кутков тралов при различных режимах их эксплуатации и выявление наиболее нап-

ряженного режима;

разработку практических схем расчета формы и прочности традиционных кошельковых неводов после замета и при кошельковании и определение влияния на их конфигурацию весомости и растяжимости нитей сети, обегания верхней подборы и других факторов;

разработку практических схем расчета разноглубинных кошельковых неводов;

разработку практических схем расчета формы и прочности ставных сетей с одной незакрепленной подборой на течении и волнении с учетом весомости и растяжимости нитей сети;

создание экспериментального оборудования и экспериментальную проверку полученных в работе теоретических результатов.

Общая методика исследования. В работе в качестве основного принят теоретический метод исследования, с помощью которого были решены почти все задачи, поставленные в диссертации. Благодаря широкому использованию формул подобия результаты теоретических исследований представлены в виде, удобном для численной реализации на ЭЦМ. Эксперименты проводились с целью проверки принятых допущений и результатов теоретических исследований. На основе общих решений рассмотрены частные задачи, имеющие практическое значение для промышленного рыболовства. Решение этих задач доведено до формул и графиков, которые позволяют свести расчет сетей к элементарным операциям.

Научная новизна работы, в первую очередь, состоит в том, что автору удалось с единой научно-методической позиции изложить методы расчета рыболовных сетей, нагруженных различными

по характеру внешними силами. В отличие от работ А.И.Зонова, который занимался преимущественно изучением геометрии сетей, в диссертации решены задачи статики, позволяющие находить форму и напряженно-деформированное состояние рассматриваемых объектов.

При выполнении работы автором получены следующие новые теоретические результаты:

записаны уравнения статики сетей в произвольных криволинейных координатах ;

записаны геометрические и статические граничные условия, необходимые для расчета рыболовных сетей ;

записаны общие уравнения и разработаны методы расчета сетей, когда сеть вырождается в систему нитей одного направления ;

получены в более общем виде, чем это было ранее сделано Г.А.Гениевым и др., условия существования в сетях различных напряженных зон и условия совпадения траекторий главных натяжений с линиями кривизны поверхности ;

записаны уравнения для расчета растяжимых сетей вращения и цилиндрических сетей, которые могут быть использованы для решения физически и геометрически нелинейных задач ; в отличие от уравнений, полученных В.Л.Бидерманом и Б.Л.Бухиным, приведенные в работе зависимости позволяют без определения начального состояния сети, которое соответствует ее нагрузке постоянным внутренним давлением, и использования шагового метода найти сразу же конечную конфигурацию деформированной сети ;

исследовано существование форм сетей различных типов ;

показано влияние на результаты расчета рыболовных сетей континуальной расчетной схемы, изгибной жесткости нитей и

неоднородности шага ячей ;

разработаны инженерные методы расчета традиционных кошельковых неводов после замета и при кошельковании с учетом весомости и растяжимости сетематериалов, опухек, гидродинамических сил и сбегания верхней подборы к центру замета ;

разработаны практические схемы проектирования разноглубинных кошельковых неводов ;

получены инженерные данные для расчета сетей в потоке с одной незакрепленной подборой с учетом волнения, растяжимости и весомости нитей сети ;

получены формулы для определения усилий в нитях сети кутка трада в различных условиях его эксплуатации.

В процессе выполнения работы под руководством автора в КВИМУ были спроектированы и изготовлены датчики для замера усилий в нитях сетей, установка для определения изгибной жесткости фалов, канатов и т.п. изделий и плавучая экспериментальная установка для опытного изучения замета, погружения, кошелькования и подъема кошельковых неводов.

Практическая ценность работы определяется возможностью использования результатов исследования в практике работы конструкторских бюро промышленного рыболовства, что обусловлено разработанными автором инженерными методами расчета кошельковых неводов, ставных сетей и кутков тралов. В конструкторских бюро промышленного рыболовства непосредственно могут быть использованы диаграммы, графики и формулы, приведенные в диссертации и опубликованных работах автора, а также расчетные уравнения, позволяющие проектировщику с помощью ЭЦМ самостоятельно определить параметры рыболовной сети. Графики и диа-

раммы приведены в работе в безразмерном виде, что дает возможность применить их для расчета целой серии подобных сетных конструкций.

Помимо этого, результаты работы можно использовать в учебном процессе при чтении курсов "Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства студентам факультетов промышленного рыболовства институтов и "Техника промышленного рыболовства" курсантам судоводительских факультетов училищ. Материалы, приведенные в диссертации, позволяют на более высоком уровне рассмотреть разделы названных курсов, связанные с изучением механики рыболовных сетей и эксплуатации сетных орудий промышленного рыболовства.

#### Реализация работ

В практику проектирования сетных орудий промышленного рыболовства внедрены Атлас расчетных диаграмм<sup>и</sup> рекомендации по проектированию разноглубинных кошельковых неводов, методика оценки общей и местной прочности траловых мешков и рекомендации для опытно-конструкторских разработок унифицированных траловых мешков.

В практику опытных разработок орудий промышленного рыболовства внедрена экспериментальная плавучая установка для проведения испытаний моделей кошельковых неводов.

В практику работы добывающего флота внедрены унифицированные траловые мешки (внедрение осуществлялось совместно с КФ НПО по технике промышленного рыболовства).

Результаты работы внедрены в учебный процесс в лекционные и лабораторные занятия, курсовое и дипломное проектирование по курсу "Техника промышленного рыболовства", а также в дипломное проектирование по дисциплине "Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства". Некоторый материал диссертации

вошел в учебники А.Л.Фридмана "Теория и проектирование орудий промышленного рыболовства" ( Пищевая промышленность, 1981 г.) и автора диссертации "Теория и устройство промысловых судов" ( Судостроение, 1986 г.).

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на II и III научно-технических конференциях КВИМУ (г. Калининград, 1970 и 1971 г.г.), IV и V Дальневосточных семинарах по мягким оболочкам (г. Владивосток, 1970 и 1976 г.), VI и VII Дальневосточных конференциях по мягким оболочкам (г.Владивосток, 1980 и 1983 г.), II - XIV научно-технических конференциях преподавателей Калининградских высших учебных заведений (г.Калининград, 1974 - 1985 г.г.), Всесоюзном симпозиуме по применению оболочек в народном хозяйстве (г.Новочеркасск, 1973 г.) и коллоквиумах лаборатории техники промышленного рыболовства ВНИРО (1981 и 1982 г.г.).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в учебнике, монографии и 39 статьях, из которых 8 статей опубликованы в центральных изданиях.

Объем работы. Диссертация состоит из предисловия, введения, двух частей из семи глав и заключения. Она содержит 399 стр. машинописного текста, в том числе 22 стр. приходится на список использованной литературы (210 наименований) и 110 стр. - на рисунки (122 рис.).

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В Предисловии в виде краткой аннотации излагается целесообразность проведения работы и то новое, что вносится автором в исследование проблемы расчета формы и прочности рыболовных сетей.

Во Введении обосновывается практическая потребность данной работы, дается классификация сетных частей орудий лова по внешней форме в рабочем состоянии и форме раскрытия и действующих на орудия лова внешних сил, описывается предмет исследования, конструктивные типы сетей и связь между их раскрытием и возможными для них внешними формами, приводятся задачи, типичные для теории и практики проектирования сетных частей орудий лова, и краткий очерк состояния проблемы расчета рыболовных сетей и, наконец, формулируется цель исследования.

Классификация сетных частей орудий лова позволила объединить их в определенные расчетные группы. В зависимости от внешней формы и рабочего состояния - подготовленном для лова рыбы положении - сетные части орудий лова разделены на плоские, цилиндрические, вращения и сложной кривизны. К плоским сетям можно отнести плавные и дрейферные сети при незначительном течении и дрейфе, элементы ловушек; к цилиндрическим - средние части длинных ставных сетей; к сетям вращения - конусные подхваты, вентеры, кошельковые невода после их замета по окружности, кутки тралов при некоторых режимах их работы. К сетям сложной кривизны отнесены рыболовные сети, тип поверхности которых в рабочем состоянии заранее неизвестен, например, бортовые подхваты для лова атлантической сардины, короткие ставные сети, крылья тралов и т.п.

В зависимости от раскрытия сетные части орудий лова разделены на сети с прямоугольной, клиновидной, трапецевидной и круговой формой раскрытия сетного полотна. Под раскрытием сетного полотна понимается форма, которую оно принимает будучи расправленным без складок и разрывов на горизонтальной поверхности. Раскрытием сетного полотна в отличие от тканей и пленок не может быть задан первой квадратичной формой, так как она зависит от угла между нитями, т.е. сетематериалы относятся к так называемым "кинематически" подвижным материалам. Эта особенность сетных материалов обуславливает отличие расчета сетных конструкций от тканевых и пленочных оболочек. В работе раскрытием сетного полотна задается числом узлов, расположенных эквидистантно его кромкам.

Внешние силы, действующие на сети, являются специфическими для каждого орудия лова и производственного процесса. Однако все они в соответствии с общепринятой классификацией могут быть разделены на две группы: статические (гидростатические, силы тяжести, силы давления рыбы на сеть) и динамические (гидродинамические, волновые, инерционные, трения, рывки и удары).

Большое влияние на работу сетных орудий лова оказывает давление, передаваемое рыбой на сеть. Занимаясь под руководством автора работы экспериментальным изучением давления рыбы на сетные стенки, Л.М.Крамской установил, что оно примерно соответствует гидростатическому закону. Поэтому в работе расчет сетей, нагруженных рыбой, производился на давление жидкости с удельным весом, равным объемному весу рыбы.

В диссертации предметом исследования являются рыболовные сети - объекты, поверхность которых образована двумя семейст-

вами пересекающихся растительных или синтетических нитей. Предполагается, что незначительная изгибная жесткость нитей не оказывает заметного влияния на принимаемую под нагрузкой форму сети и усилия в ее нитях, т.е. нити считаются абсолютно гибкими, не способными воспринимать перерезывающих сил, изгибающих и крутящих моментов и сжимающих усилий. В таких сетях внешние силы уравниваются только возникающими в нитях растягивающими усилиями. Узлы сети полагаются фиксированными. В работе вследствие большого числа структурных элементов (ячей) дискретные сети заменены континуальными. При необходимости совершается обратный переход от континуальной сети к дискретной. Таким образом, при решении целого ряда задач выбран континуально-дискретный способ. Показано, что сеть нельзя считать континуальной, когда шаг ячеек составляет более 20-25% от длины сети в жгуте. Такие сети с расчетной точки зрения относятся к крупноячейным.

Свойства сетей, обусловленные конструктивными особенностями сетематериалов, определяют специфику расчета сетных конструкций по сравнению с мягкими оболочками. Вместе с тем следует отметить, что в некоторых случаях расчет сети в своих основных чертах не будет отличаться от расчета конструкций из мягких материалов.

На внешнюю форму сетей большое влияние оказывает их конструкция и раскрой. Так, например, при постоянном внутреннем давлении сеть вращения, изготовленная из сетной трубы прямоугольного раскроя со стянутыми в жгут торцами, будет существовать лишь тогда, когда относительная длина сети в жгуте

$$\lambda = \frac{L_x}{n \ell} \leq 1,4 \quad (L_x - \text{длина сети, вытянутой в жгут по мере}$$

диану;  $n = \text{const}$  - число ячеек по параллелям оболочки). При  $\lambda > 1,4$  форма сети под нагрузкой уже не будет находиться в классе поверхностей, соответствующих  $\lambda \leq 1,4$ . В этом случае в сети появляется цилиндрический участок. Большое влияние на форму сети оказывает посадочный коэффициент. К примеру, при одной и той же осесимметричной нагрузке сеть, изготовленная из прямоугольного посаженного на два обруча сетного полотна, в зависимости от посадочного коэффициента может быть выпуклой, вогнутой или цилиндрической. Поэтому в работе уделено внимание связи конструктивных типов сетей с их раскроем и возможными для них внешними формами.

По аналогии с мягкими оболочками для сетей сформулированы три основные задачи, типичные для теории и практики проектирования сетных частей орудий лова.

Задачи I типа. Известны форма сети орудия лова в рабочем состоянии и действующие на нее внешние силы. Требуется рассчитать раскрой сетного полотна, при котором сетная часть орудия лова принимает заданную форму.

Задачи II типа. Известен характер внешних сил, действующих на сетную часть орудия лова, и раскрой сетного полотна. Требуется определить внешнюю форму сетной части в рабочем состоянии.

Задачи III типа. Известна форма поверхности тела, которое нужно покрыть сетью. Требуется определить минимальное количество сетного полотна, необходимого для покрытия поверхности тела без складок и разрывов.

Применительно к мягким оболочкам две первые задачи были впервые сформулированы С.А.Алексеевым.

Основоположником создания теоретических методов расчета



рыболовных сетей является Ф.И.Баранов, который уподобляя сеть "сплошной перепонке" установил, что между усилиями и внешней нагрузкой существует связь, описываемая так называемой формулой Лапласа. Используя формулу Лапласа и соотношения между погонными усилиями и посадочными коэффициентами, Ф.И. Баранов привел примеры расчета необходимого давления, при котором сеть сохраняет цилиндрическую форму. Расчету конусных сетей посвящены работы В.А.Попова и P. Pretsch. Принимая за криволинейные координаты длину сети, вытянутой в гнут по диагональным линиям, А.И.Зоновым впервые записаны уравнения статики рыболовной сети. За дополнительные уравнения А.И.Зоным приняты соотношения Гаусса-Кодацци. А.И.Зонов полагал, что трех уравнений статики и трех соотношений Гаусса-Кодацци достаточно для расчета сетей. Основываясь на теории поверхностей и работах М.И.Гуревича, А.И.Зонов дает общую методику исследования рыболовных сетей, расположенных на различных поверхностях. Целый ряд задач по расчету рыболовных сетей был решен Н.Н.Андреевым. Исследованиями геометрии и статики сетей также занимались Ю.А.Изнанкин, А.И.Сучков, Э.П.Иванов и др.

Задача о форме трала под действием гидродинамических сил решалась А.И.Сучковым. В.И.Толмачевым теоретически и экспериментально изучалась форма тралового мешка при заполнении его рыбой. И.Г.Смыслов привел уравнения равновесия трала в предположении, что трал при тралении не меняет своей формы. Деформированное состояние донного трала изучал В.В.Севостьянов. Большое число модельных и натуральных испытаний тралов с целью изучения влияния отдельных факторов на форму и раскрытие трала с целью изучения влияния отдельных факторов на форму и рас-

крытие трала было проведено А.Л.Фридманом и его учениками.

Первые принципы расчета внешних нагрузок и формы кошельковых неводов обоснованы в трудах Ф.И.Баранова. Обширные исследования по расчету кошельковых неводов провел Н.Н.Андреев. Принципам моделирования неводов посвящены работы А.Л.Фридмана. Отдельные вопросы статики и динамики кошельковых неводов рассматривались М.И.Гуревичем, Н.Н.Виноградовым, В.В.Хмаровым, Г.Н.Степановым, Э.А.Карпенко, Я.Я.Луцевичем и др.

Расчет сетей в потоке с одной незакрепленной подборой выполнен Б.А.Половым. Исследованиями формы и геометрии дрейферных сетей занимались Ю.А.Изнанкин, В.В.Аристов, М.М.Розенштейн, А.В.Засосов и др. Методы расчета ставных подвесных, донных и закидных неводов обоснованы в трудах Ф.И.Баранова, Н.Н.Андреева, В.А.Ионаса, В.Н.Войниканис-Мирского и др. Расчет вентереобразных орудий лова рассмотрен Н.Н.Андреевым.

Кроме задач расчета сетных частей орудий лова, имеются еще технические задачи, которые приводятся к расчетной схеме сети. Это задачи, связанные с расчетом резино-кордных конструкций, вантовых сетей, тканевых оболочек и оптимальных конструкций оболочек из ориентированного стеклопластика. Наиболее существенный вклад в теорию и методы расчета резино-кордных конструкций был сделан В.Л.Бидерманом и Б.Л.Бухиным. Современное состояние теории и практики расчета вантовых сетей изложены в монографиях В.К.Кацурина, А.Ф.Лилеева и Е.Н.Селзневой, Л.Г.Дмитрова и А.В.Касилова. Основополагающие исследования в области мягких оболочек проведены С.А.Алексеевым, В.Э.Магулой, Г.А.Гениевым, Е.А.Усюкиным, Б.И.Друзем и др.

В соответствии с проведенным обзором работ и современ-

ным состоянием теории и практики расчета рыболовных сетей автором были сформулированы цель и задачи исследования.

Часть I

В главе I рассмотрены основные зависимости общей теории растяжимых рыболовных сетей. При их выводе можно использовать две основные модели сети - дискретную и непрерывную. Последняя зачастую оказывается предпочтительнее дискретной, так как позволяет свести решение к дифференциальным уравнениям, а не к громоздкой системе алгебраических уравнений, и использовать известные зависимости теории безмоментных или мягких оболочек, учтя в них отличие сетеполотен от тканевых, пленочных и т.п. материалов. Проведя сравнительные расчеты, автор показал, что большинство сетных орудий промышленного рыболовства могут быть рассчитаны по непрерывной схеме, поскольку ее можно уже использовать при отношении шага ячеей  $l$  к длине сети  $L_{ж}$  в жгуте равном 0,25. Автором также показано незначительное влияние изгибной жесткости нитей и разброса в шаге ячеей на результаты расчета. Таким образом, в качестве расчетной модели рыболовной сети можно принять абсолютно гибкую непрерывную сеть, изготовленную из сетного полотна, все соответствующие нити которого имеют одинаковые размеры.

Если сеть с шестиугольными ячейками разбить на бесконечно малые элементы так, как это изображено на рис. I, то нетрудно выразить квазинормальные  $Q_\alpha$  и  $Q_\beta$  и квазикасательные усилия  $S$ , через усилия в нитях сети и размеры ячеей. Выражения для  $Q_\alpha$ ,  $Q_\beta$  и  $S$  приведены в таблице. Подставляя их в уравнения статики безмоментных или мягких оболочек,

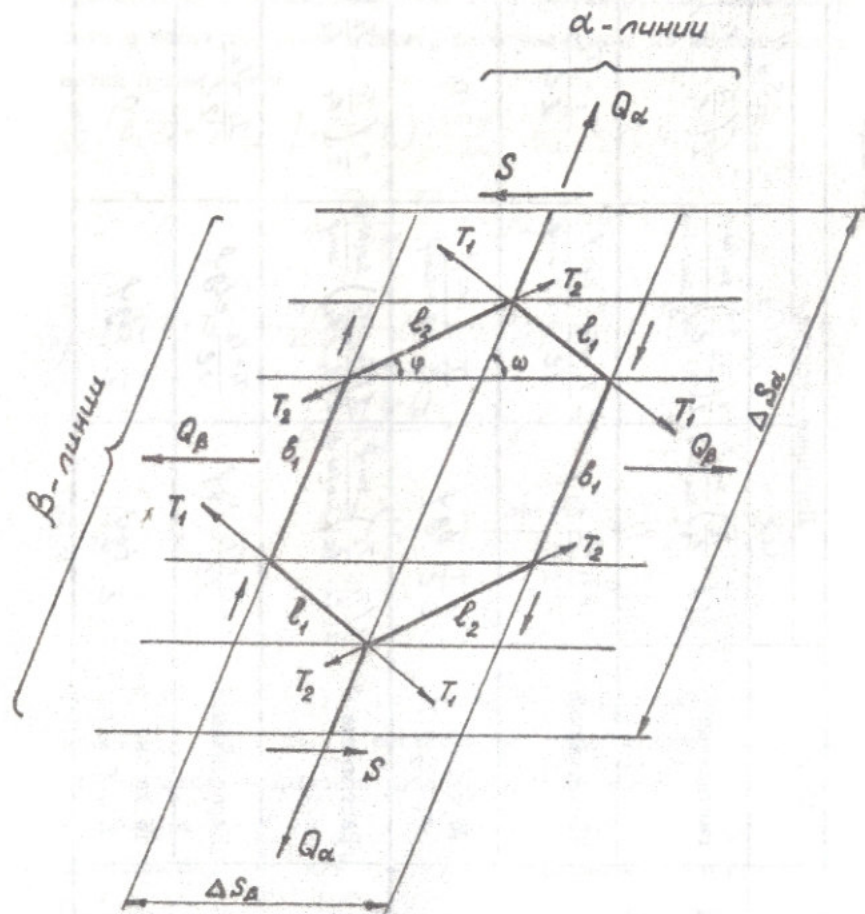


Рис. I

Таблица

Форма ячеек	Нити	Погонные условия		$S_y$
		$Q_d$	$Q_B$	
Шестиугольная	Растяжимые	$\frac{1}{2} \left( \frac{T_1}{l_1} + \frac{T_2}{l_2} \right) \frac{\sin \varphi}{\sin(\omega - \varphi)}$	$\frac{1}{2} \left( \frac{T_1 + T_2}{l_1 + l_2} \right) \frac{\sin(\omega - \varphi)}{c_1 \sin \omega + \sin \varphi}$	$\frac{1}{2} \left( \frac{T_1}{l_1} - \frac{T_2}{l_2} \right)$
	Нерастяжимые	$\frac{T_1 + T_2}{2L} \operatorname{tg} \varphi$	$\frac{T_1 + T_2}{2L} \frac{\cos \varphi}{c + \sin \varphi}$	$\frac{T_1 - T_2}{2L}$
	То же, но $T_1 = T_2 = T$	$\frac{T}{L} \operatorname{tg} \varphi$	$\frac{T}{L} \frac{\cos \varphi}{c + \sin \varphi}$	0
	Растяжимые	$\frac{1}{2} \left( \frac{T_1}{l_1} + \frac{T_2}{l_2} \right) \frac{\sin \varphi}{\sin(\omega - \varphi)}$	$\frac{1}{2} \left( \frac{T_1}{l_1} + \frac{T_2}{l_2} \right) \frac{\sin(\omega - \varphi)}{\sin \varphi}$	$\frac{1}{2} \left( \frac{T_1}{l_1} - \frac{T_2}{l_2} \right)$
Ромбовидная	Нерастяжимые	$\frac{T_1 + T_2}{2L} \operatorname{tg} \varphi$	$\frac{T_1 + T_2}{2L} c \operatorname{tg} \varphi$	$\frac{T_1 - T_2}{2L}$
	То же, но $T_1 = T_2 = T$	$\frac{T}{L} \operatorname{tg} \varphi$	$\frac{T}{L} c \operatorname{tg} \varphi$	0

Получим уравнения равновесия рыболовной сети, соответствующие приведенным в таблице случаям. Так, например, для рыболовной сети с шестиугольными ячейками, изготовленными из нерастяжимых нитей будем иметь

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \left[ B(T_1 + T_2) \operatorname{tg} \varphi \right] - (T_1 + T_2) \frac{\cos \varphi}{c + \sin \varphi} \frac{\partial B}{\partial \alpha} + 2(T_1 - T_2) \frac{\partial A}{\partial \beta} +$$

$$+ A \frac{\partial(T_1 - T_2)}{\partial \beta} + 2\rho_d \ell AB = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial \beta} \left[ A(T_1 + T_2) \frac{\cos \varphi}{c + \sin \varphi} \right] - (T_1 + T_2) \operatorname{tg} \varphi \frac{\partial A}{\partial \beta} + 2(T_1 - T_2) \frac{\partial B}{\partial \alpha} +$$

$$+ B \frac{\partial(T_1 - T_2)}{\partial \alpha} + 2\rho_B \ell AB = 0;$$

$$\frac{BL}{A} (T_1 + T_2) \operatorname{tg} \varphi + \frac{AN}{B} (T_1 + T_2) \frac{\cos \varphi}{c + \sin \varphi} + 2(T_1 - T_2)M +$$

$$+ 2\rho_n \ell AB = 0,$$

где  $A, B, L, M, N$  - коэффициенты квадратичных форм;  $\rho_d, \rho_B, \rho_n$  - составляющие внешней нагрузки на единицу площади поверхности рыболовной сети, соответственно по касательным к  $\alpha$  и  $\beta$  координатным линиям и нормали к поверхности;  $\ell$  и  $b$  - длины составляющих ячеек нитей ( $l_1 = l_2 = \ell, b_1 = b$ );  $c = b/\ell$ , при  $c = 0$  ячейка становится ромбовидной. Остальные обозначения понятны из рис. 1.

Уравнения статики сетей из шестиугольных ячеек записаны автором впервые. Также впервые записаны в произвольных координатах приведенные в диссертации уравнения статики сетей из

ромбовидных ячеей.

Если в уравнениях, приведенных в работе, за  $\alpha$  и  $\beta$  для диагональной параметризации принять числа узлов, то они совпадут с уравнениями, полученными В.Л.Бидерманом и В.Л.Бухиным. Чтобы перейти к уравнениям, записанным А.И.Зоновым, следует нити сети считать нерастяжимыми, а за  $\alpha$  и  $\beta$  принять длины сети, вытянутой в жгут по координатным (диагональным) линиям.

Уравнения статики совместно с уравнениями Гаусса-Кодаци, физическими соотношениями и дополнительными условиями, число и вид которых зависят от конкретно поставленной задачи, образуют полную систему расчетных уравнений. Чтобы ими воспользоваться, в работе сформулированы геометрические и статические граничные условия. При расчете рыболовных сетей часто встречаются со случаем, когда контур вырождается в точку, через которую проходят все нити сети (сеть собрана в жгут). В этом случае для записи граничных условий необходимо учитывать, что сеть в пределах шага ячеей работает в одноосном напряженном состоянии, т.е. она вырождается в систему нитей. Если сеть нагружена гидростатическими или гидродинамическими силами, то из-за малых размеров шага ячеей по сравнению со всей сетью можно полагать загрузку рассматриваемого участка сети постоянной, а зачастую еще и нормальной к поверхности.

В сетях могут появляться одноосно напряженные зоны не только там, где сеть собрана в жгут. Такие зоны появляются, например, в трале при его перекосе, в ставных сетях при воздействии на них сил, направленных вдоль верхней подборы, и т.п. Одноосно напряженные зоны могут также возникнуть в сетях

из-за неправильной посадки сетного полотна. Поэтому в работе записаны основные зависимости для расчета сетей в зонах, где напряжены нити только одного из семейств. Показано использование полученных общих зависимостей для решения конкретных задач. В работе детально изучено поведение сети в одноосно напряженной зоне, нагруженной нормальными к поверхности внешними силами. Анализ зависимостей для одноосно напряженных зон показал, что конфигурация сети в этих зонах для заданной нагрузки не произвольна, например, для  $p_n = const$  и совпадения линий кривизны поверхности сети с траекториями главных натяжений она определяется соотношением  $R_2 = 2R_1$  ( $R_1$  -- радиус кривизны напряженных нитей;  $R_2$  -- радиус кривизны координатных линий, ортогональных к напряженным нитям). Из уравнений также следует, что при отсутствии касательных составляющих внешней нагрузки усилия по длине каждой нагруженной нити постоянны, а сами нити направлены по геодезическим линиям поверхности сети.

В работе записаны условия, которые позволяют определить будет ли сеть работать в одноосно или двухосно (напряжены нити обоих семейств) напряженном состоянии. С помощью этих условий можно также установить класс равновесных нагрузок, которые не будут влиять на конфигурацию нерастяжимой сети, и спроектировать сеть, не имеющую за исключением особых точек одноосно напряженных зон. Для двухосно и одноосно напряженных зон получены условия совпадения траекторий главных натяжений с линиями кривизны поверхности сети. Условия совпадения для двухосных напряженных зон получены в более общем виде, чем это было сделано Г.А.Гениевым.

В работе широко использованы формулы подобия, которые

позволили упростить расчетные зависимости и представить их в виде, удобном для численной реализации на ЭЦМ, и построить расчетные графики в записи, удобной для практического использования. Формулы подобия также облегчают планирование эксперимента и обработку экспериментальных данных. Если обозначить характерный линейный размер через  $L_x$  ( $L_x = n\ell$  или  $L_x = \ell$ ), то любая величина с размерностью длины  $L$ , площади  $S$ , объема  $V$  и усилия  $T$  может быть записана в виде

$$L = \lambda L_x, \quad S = s L_x^2, \quad V = v L_x^3, \quad T = t_0 \frac{P_0}{n},$$

$$T = t_n \frac{P_n L_x^2}{n}, \quad T = t_c \frac{\gamma L_x^3}{n}, \quad T = t_g \frac{z L_x^2}{n},$$

здесь  $\lambda$ ,  $s$  и  $v$  - относительная длина, площадь и объем сети;  $t_0$ ,  $t_n$ ,  $t_c$  и  $t_g$  - относительные усилия при действии на сеть осевой силы  $P_0$ , нормального давления  $P_n$ , гидростатических и гидродинамических сил;  $\gamma$  - объемный вес заполнителя сети;  $z = C_{90} \frac{d_n}{z} \frac{\rho v^2}{2}$  - гидродинамическая сила, действующая на единицу площади;  $n$  - число ячеек, на которые воздействует внешняя нагрузка. Относительные статико-геометрические параметры сети находились непосредственно из полученных в работе решений.

В главе II рассмотрена методика расчета формы и прочности растяжимых сетей вращения. Основные расчетные зависимости, которые получены с помощью общих уравнений, приведенных в главе I, представлены системой нормальных дифференциальных уравнений I-го порядка

$$\frac{dy}{d\alpha_1} = \frac{f(\lambda_\varepsilon) \sin \alpha_1 [1 - (\frac{m}{\lambda_\varepsilon} x)^2]}{\frac{m}{\lambda_\varepsilon} x [P_n \ell \lambda_\varepsilon \sqrt{1 - (\frac{m}{\lambda_\varepsilon} x)^2} - f(\lambda_\varepsilon) \frac{m}{\lambda_\varepsilon} \sin \alpha_1]};$$

$$\frac{dx}{d\alpha_1} = \frac{f(\lambda_\varepsilon) \cos \alpha_1 [1 - (\frac{m}{\lambda_\varepsilon} x)^2]}{\frac{m}{\lambda_\varepsilon} x [P_n \ell \lambda_\varepsilon \sqrt{1 - (\frac{m}{\lambda_\varepsilon} x)^2} - f(\lambda_\varepsilon) \frac{m}{\lambda_\varepsilon} \sin \alpha_1]};$$

$$\frac{d\lambda_\varepsilon}{d\alpha_1} = \left\{ \frac{\frac{1}{m} \frac{dm}{d\alpha_1} f(\lambda_\varepsilon)}{1 - (\frac{m}{\lambda_\varepsilon} x)^2} + \frac{[2f(\lambda_\varepsilon) \frac{m}{\lambda_\varepsilon} \cos \alpha_1 - P_n \ell \lambda_\varepsilon \sqrt{1 - (\frac{m}{\lambda_\varepsilon} x)^2}] f(\lambda_\varepsilon)}{P_n \ell \lambda_\varepsilon \sqrt{1 - (\frac{m}{\lambda_\varepsilon} x)^2} - f(\lambda_\varepsilon) \frac{m}{\lambda_\varepsilon} \sin \alpha_1} \right\} \cdot \frac{1 - (\frac{m}{\lambda_\varepsilon} x)^2}{f'(\lambda_\varepsilon) [1 - (\frac{m}{\lambda_\varepsilon} x)^2] + \frac{f(\lambda_\varepsilon)}{\lambda_\varepsilon} (\frac{m}{\lambda_\varepsilon} x)^2}; \quad (1.1)$$

где  $y$  и  $x$  - ордината и абсцисса меридиана деформированной сети;  $\alpha_1$  - угол между касательной к меридиану и осью  $x$ ;  $T = f(\lambda_\varepsilon)$  - физическое соотношение;  $\lambda_\varepsilon = 1 + \varepsilon$  - степень удлинения нитей,  $\ell$  - шаг ячеек;  $m = \frac{\pi}{n\ell}$  - параметр раскрыя;  $n$  - число ячеек по параллелям сети вращения;  $P_n$  и  $P_t$  - составляющие внешней нагрузки в направлении нормали к поверхности и касательной к меридиану сети.

Следует отметить, что первые два уравнения системы (I.I) могут быть использованы для расчета сетей вращения с переменным шагом вдоль меридиана.

Система (I.I) позволяет найти уравнение меридиана деформированной сети  $y = y(x)$  и изменение деформации нитей вдоль меридиана  $\lambda_\varepsilon = \lambda_\varepsilon(\alpha_1)$ , после определения которых нетрудно подсчитать прочие параметры деформированной сети. Переход от деформированной сети к недеформированной осуществлялся с помощью соотношения

$$dL_{2x} = \frac{dL_{2x1}}{\lambda_\varepsilon}, \quad (1.2)$$

в котором  $L_{ж1}$  и  $L_{ж2}$  - длина сети в жгуте соответственно до деформации и после деформации нитей.

Применение зависимостей (I.1) и (I.2) для расчета растяжимых сетей исключает использование известного шагового метода, который по сравнению с предлагаемым способом является более трудоемким и менее естественным.

Расчет недеформированной сети сводится к одному интегро-дифференциальному уравнению

$$\left( \frac{p_0}{2\pi} + \int_{x_0}^x \rho_n x dx + \int_{x_0}^x \rho_1 y' x dx \right) \left\{ \frac{y^4}{xy^2[1+(y')^2]} + \frac{m^2(x)}{1-m^2(x)x^2} \right\} = p_n \quad (I.3)$$

или к нормальной системе обыкновенных дифференциальных уравнений I-го порядка

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx_1} &= \frac{T \sin \alpha_1 (1-m^2 x^2)}{mx(\rho_n l \sqrt{1-m^2 x^2} - Tm \sin \alpha_1)}, \\ \frac{dx}{dx_1} &= \frac{T \cos \alpha_1 (1-m^2 x^2)}{mx(\rho_n l \sqrt{1-m^2 x^2} - Tm \sin \alpha_1)}, \\ \frac{dT}{dx_1} &= \frac{T}{m(1-m^2 x^2)} \frac{dm}{dx_1} + \frac{(2Tm \cos \alpha_1 - \rho_1 l \sqrt{1-m^2 x^2}) T}{\rho_n l \sqrt{1-m^2 x^2} - Tm \sin \alpha_1}. \end{aligned} \quad (I.4)$$

Для определения длины сети в жгуте  $L_{ж2}$ , объема  $V$  и площади поверхности  $S$  сети можно воспользоваться следующими очевидными зависимостями

$$L_{ж2} = \int_{x_0}^x \sqrt{\frac{1+(y')^2}{1-m^2 x^2}} dx, \quad V = \int_{x_0}^x y' x^2 dx, \quad S = 2\pi \int_{x_0}^x \sqrt{1+(y')^2} dx.$$

Уравнение (I.3) использовано в работе для расчета рыболовных сетей, нагруженных осевыми силами и постоянным нормальным давлением, система (I.4) - сетей, нагруженных давлени-

ем рыбы и гидродинамическими силами. Все расчетные уравнения с помощью формул подобия приведены к безразмерному виду.

Для иллюстрации связи между внешними силами, конструктивными параметрами сетей и возможными для них внешними формами в работе подробно исследовано существование сетей вращения, нагруженных осевыми силами и нормальным давлением. Цилиндрическая форма сетей рассматриваемого типа для  $n = const$  возможна при угле наклона нитей к граничной параллели

$$\bar{\varphi}_0 = \arccos \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{1}{3q}}, \quad (I.5)$$

где  $\bar{\varphi}_0 = \arccos \frac{\pi}{n\pi} x_0$ ,  $q = \frac{(n l)^2}{\pi} \frac{\rho_n}{\rho_0}$ . Из (I.5) видно, что при  $q < 0,5$  сеть не может иметь цилиндрической формы. Если  $q = 0,5$  цилиндрическая форма сети возможна лишь тогда, когда нити сети направлены по параллелям и меридианам. Для  $q = \infty$  (сеть нагружена только постоянным нормальным давлением) цилиндрическая форма сети будет наблюдаться при  $\bar{\varphi}_0 = \arccos \sqrt{\frac{2}{3}} = 35^\circ 16'$ . Если  $\varphi_0 < \bar{\varphi}_0$ , то меридиан будет обращен выпуклостью к оси вращения, при  $\varphi_0 > \bar{\varphi}_0$  - от оси вращения.

В работе с помощью общих зависимостей выполнен расчет рыболовных сетей вращения, нагруженных осевыми силами, постоянным нормальным давлением, давлением рыбы и гидродинамическими силами.

Расчет сетей, нагруженных осевыми силами и постоянным нормальным давлением сведен к квадратурам.

Расчет сетей вращения, нагруженных гидродинамическими и гидростатическими силами, сведен в работе к системе обыкновенных дифференциальных уравнений.

новых дифференциальных уравнений.

Результаты расчетов представлены в виде графиков в безразмерных единицах, с помощью которых расчет сетей рассматриваемых типов сводится к элементарным операциям.

В диссертации исследована работа сетей вращения при так называемой зеркальной посадке, когда нити сети направлены по параллелям и меридианам.

Сети рассматриваемого типа могут иметь одноосно и двухосно напряженные зоны. Поэтому получены условия появления в сетях различных напряженных зон. Так, например, при  $p_x = 0$  и  $p_n = const$  сеть будет полностью находиться в одноосно напряженном состоянии, когда  $\frac{n}{n_1} \geq 4,8$  ( $n_1$  и  $n$  - число ячеей соответственно в меридиональном и широтном направлениях). Если  $\frac{n}{n_1} < 4,8$ , то в сети будут наблюдаться одноосные и двухосные напряженные зоны.

Значительный интерес для промышленного рыболовства представляют задачи, связанные с расчетом раскрыя сетного полотна по заданной конечной форме сети. В диссертации разработана методика решения таких задач, а также задач, когда задана не конечная форма сети; а ее напряженное состояние.

В работе выполнена экспериментальная проверка полученных теоретических результатов. Степень соответствия оценивалась по вероятности склонения среднеарифметических данных от теоретических не более чем на  $\pm 10\%$ . При обработке экспериментов было принято, что ошибки измерений подчиняются закону распределения Гаусса. Вероятность попадания среднеарифметических значений измеряемых величин в заданный теоретический интервал составила  $0,945 \pm 0,996$ , что свидетельствует о хорошем совпадении опытных и теоретических данных.

Глава III посвящена методике расчета формы и прочности растяжимых цилиндрических сетей. На основании общих зависимостей, полученных автором в главе I, расчетные уравнения представлены в виде

$$\frac{dx}{dd_1} = - \frac{f(\lambda_\varepsilon) \sqrt{\lambda_\varepsilon^2 - \cos^2 \varphi}}{\lambda_\varepsilon \cos \varphi} \cdot \frac{\cos d_1}{\rho_n l},$$

$$\frac{dy}{dd_1} = - \frac{f(\lambda_\varepsilon) \sqrt{\lambda_\varepsilon^2 - \cos^2 \varphi}}{\lambda_\varepsilon \cos \varphi} \cdot \frac{\sin d_1}{\rho_n l}, \quad (I.6)$$

$$\frac{d\lambda_\varepsilon}{dd_1} = - \frac{1}{\frac{f'(\lambda_\varepsilon)}{f(\lambda_\varepsilon)} + \frac{\cos^2 \varphi}{\lambda_\varepsilon (\lambda_\varepsilon^2 - \cos^2 \varphi)}} \cdot \frac{p_x}{\rho_n}$$

где

$$p_x = \rho_x \cos d_1 - \rho_y \sin d_1 - \frac{g_\lambda \lambda_\varepsilon \sin d_1}{2l^2 \sqrt{\lambda_\varepsilon^2 - \cos^2 2\varphi}},$$

$$p_n = \rho_x \sin d_1 + \rho_y \cos d_1 + \frac{g_\lambda \lambda_\varepsilon \cos d_1}{2l^2 \sqrt{\lambda_\varepsilon^2 - \cos^2 2\varphi}},$$

$g_\lambda$  - вес одной ячейки;  $\rho_x$  и  $\rho_y$  - сила сопротивления и подъемная сила, приходящиеся на единицу площади поверхности сети;  $\varphi$  - угол между нитями и образующей до деформации нитей.

Длины сетей в жгуте после деформации и до деформации нитей находились по формулам

$$\frac{dL_{x1}}{dd_1} = - \frac{f(\lambda_\varepsilon)}{\rho_n l \cos \varphi}, \quad \frac{dL_{y1}}{dd_1} = - \frac{f(\lambda_\varepsilon)}{\rho_n \lambda_\varepsilon l \cos \varphi} \quad (I.7)$$

Зависимости (I.6) и (I.7) могут быть использованы для расчета цилиндрических сетей, изготовленных из растяжимых и

весомых нитей.

Наибольший интерес для промышленного рыболовства представляет расчет помещенных в плоско-параллельный поток сетей с одной незакрепленной подборой. Расчет таких сетей выполнен с учетом весомости и растяжимости нитей.

В работе проанализировано влияние весомости и растяжимости нитей на параметры сети, работающей в плоско-параллельном потоке. Найдена максимальная длина сети в жгуте, при которой сеть еще не будет выстилаться по дну водоема. Показано, что при  $q_0 < 1$  наибольшие усилия возникают в нитях, расположенных у нижней подборки, а в более тяжелых сетях - в нитях, примыкающих к верхней подборке. Выявлено сравнительно большое влияние на габариты сети в потоке растяжимости нитей. В диссертации приведены таблицы, которые позволяют определить статико-геометрические характеристики сетей с учетом растяжимости и весомости их нитей. Весомостью сетного полотна можно пренебрегать, если параметр весомости  $q_0 = G/z \leq 0,25$  ( $G$  - вес единицы площади поверхности сети).

Сравнение теоретических результатов, полученных в работе, с экспериментальными данными, приведенными в литературе по промышленному рыболовству, подтвердило достоверность расчетных зависимостей.

В главе IV рассмотрен расчет растяжимых плоских сетей. Если за криволинейные координаты принять числа узлов, то для координатных линий, совмещенных с диагоналями ячеек, уравнения статики на основании общих зависимостей записываются так:

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{T_1}{l_1} + \frac{T_2}{l_2} \right) + \left( \frac{T_1}{l_1} + \frac{T_2}{l_2} \right) G'_{\alpha\alpha} + \left( \frac{T_1}{l_1} + \frac{T_2}{l_2} \right) G'_{\beta\beta} + 2 \left( \frac{T_1}{l_1} - \frac{T_2}{l_2} \right) G'_{\alpha\beta} + \frac{\partial}{\partial \beta} \left( \frac{T_1}{l_1} - \frac{T_2}{l_2} \right) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial \beta} \left( \frac{T_1}{l_1} + \frac{T_2}{l_2} \right) + \left( \frac{T_1}{l_1} + \frac{T_2}{l_2} \right) G''_{\beta\beta} + \left( \frac{T_1}{l_1} + \frac{T_2}{l_2} \right) G''_{\alpha\alpha} + 2 \left( \frac{T_1}{l_1} - \frac{T_2}{l_2} \right) G''_{\alpha\beta} + \frac{\partial}{\partial \alpha} \left( \frac{T_1}{l_1} - \frac{T_2}{l_2} \right) = 0,$$

здесь  $G'_{ij}$  - символы Кристоффеля 2-го рода;  $l_1$  и  $l_2$  - длины нитей после деформации.

В уравнения входит пять неизвестных величин, поэтому для решения задачи необходимо составить три дополнительных уравнения. Одно дополнительное уравнение дает соотношение Гаусса-Кодацци, а два других будут иметь вид

$$\lambda_{\varepsilon_{1,2}}^2 = \frac{A^2 \mp 2AB \cos \omega + B^2}{4l^2}.$$

Для сетей, изготовленных из нерастяжимых нитей уравнения статики сводятся к гиперболической системе в нормальном виде, а уравнение Гаусса-Кодацци, как показал А.И.Зонов, соответствует уравнению свободных колебаний струны.

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \beta^2} = 0. \quad (1.8)$$

Когда нерастяжимая сеть посажена на жесткий контур, уравнение (1.8) может использоваться отдельно от уравнений статики. При посадке сети на гибкий контур уравнения статики и геометрии решаются совместно. В работе рассмотрен расчет сетей, посаженных на жесткие и гибкие контуры и нагруженных краевыми силами, лежащими в плоскости сети. Эксперименты, проведенные Б.И.Германом и В.А.Донцовым, показали хорошее совпадение опытных и теоретических данных.

## Часть II

В главе V на основании зависимостей, полученных в части I, исследована прочность кутка трала в режиме траления, при подъеме улова на борт судна и при выливке улова. Здесь же по-



казано определение внешних сил, действующих на куток трала в рассматриваемых режимах его эксплуатации. В работе получены формулы для подсчета усилий в нитях кутка трала при различных условиях его эксплуатации. При выводе формул учитывались силы инерции от качки судна, изгиб кутка трала в месте перехода с палубы в палубу и др. факторы.

В работе с помощью записанных формул выполнены сравнительные расчеты, которые показали, что максимальные усилия в нитях кутка возникают тогда, когда куток трала с уловом лежит на слиде и палубе судна. Примерно такой же порядок будут иметь усилия в нитях при выливке из кутка улова. В остальных случаях эксплуатации кутка натяжения в нитях оказались на один-два порядка ниже.

На основании приведенного анализа получена следующая формула для выбора прочных размеров нитей кутка трала:

$$T_p \geq K_3 K_n C_n 0,05 \mu n^2 l^3,$$

где  $T_p$  - разрывное усилие нити;  $K_3$  - коэффициент запаса прочности;  $K_n$  - коэффициент, учитывающий изгиб кутка трала ( $K_n \approx 1,2$ );  $C_n$  - коэффициент, учитывающий силы инерции от качки судна ( $C_n = 1,2 + 1,4$ ).

В главе УІ приведены результаты исследования формы и прочности кошельковых неводов после их замета по окружности и при кошельковании, а также особенности расчета разноглубинных кошельковых неводов.

Отличие от известных работ Н.Н. Андреева здесь рассмотрен расчет невода с учетом опухек, весомости и растяжимости нитей сети.

Для оценки влияния перечисленных выше факторов на стати-

ко-геометрические параметры неводов были проведены сравнительные математические исследования, которые позволили сделать следующие выводы:

- при расчете формы невода опухки можно не учитывать, а при определении усилий в нитях их учет является обязательным;

- если пренебречь весомостью сетного полотна, то ошибка в определении геометрических характеристик невода составит не более 5%, натяжений в нитях - 20-25%. Вес сетного полотна следует учитывать при отношении загрузки нижней подборы к весу сетного полотна в воде менее 1;

- растяжимость нитей необходимо принимать во внимание при

$$\frac{P_0}{2n \sin \alpha_{10} \sin \varphi_0} > 0,1 \mathcal{E},$$

где  $\varphi_0$  - посадочный угол по верхней подборе,  $\alpha_{10}$  - угол наклона касательной к меридиану невода у верхней подборы,  $P_0$  - суммарная сила плавучести верхней подборы;  $\mathcal{E}$  - коэффициент пропорциональности между усилиями в нитях и их относительными удлинениями. Неучет растяжимости нитей сети при относительном их удлинении у верхней подборы 10% приводит к ошибке в определении габаритов невода не менее 5%.

В диссертации из условия получения верхней подборой наибольшей жесткости найдена ее форма после сбегания невода к центру замета, которую можно описать уравнением свернутой по окружности эллиптической синусоиды.

Для найденной формы подборы в работе получены зависимости для подсчета числа складок на подборе и их амплитуды. Зависимости учитывают жесткость и плавучесть верхней подборы,

посадочный коэффициент, высоту стенки невода в жгутах и другие факторы.

В процессе стягивания нижней подборы невод представлялся в виде сетной оболочки вращения, нагруженной силами плавучести верхней подборы, силами загрузки нижней подборы, гидродинамическими силами и силами от выборки стяжного троса. Расчет велся в предположении, что до начала стягивания колец прекратилось сбежание невода к центру замата и он представляет собой складчатую сетную трубу. Гидродинамические силы по высоте стенки невода предполагались распределенными соответственно скорости перемещения различных точек невода.

Для принятых выше допущений получены кривые, позволяющие определить габариты и объем невода в процессе стягивания нижней подборы.

Проведенные исследования традиционных кошельковых неводов дают возможность более обоснованно подходить к назначению расчетной схемы, использовать для расчета неводов приведенные в диссертации графики и формулы и осуществлять оценку целесообразности использования новых сетематериалов с точки зрения получения неводом в рабочем состоянии заданных геометрических параметров.

Для иллюстрации последнего утверждения приведены графики, показанные на рис. 2, которые позволяют определять, например из условия одинакового расхода сетематериалов габариты и объемы неводов, изготовленных из сетеполотен с ромбовидными и шестиугольными ячейками, т.е. выбирать оптимальные конструктивные размеры ячеек. На этих графиках введены следующие обозначения:  $\lambda$  - относительная высота сети в жгутах,  $\lambda = H_{ж} / r$  ( $H_{ж}$  - высота сети невода в жгутах);  $k$  - относительная вы-

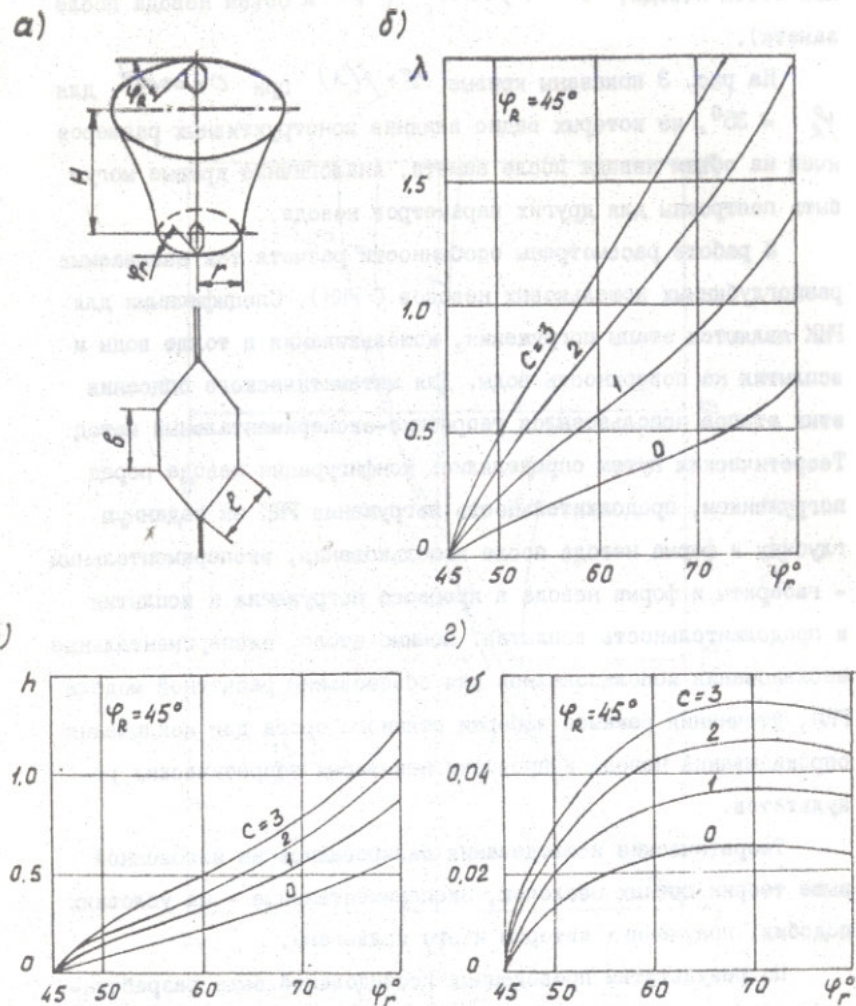


Рис. 2

сота стенки невода,  $h = H/n\ell$  ;  $v$  - относительный объем невода,  $\sigma = V/n^3\ell^3$  ( $V$  - объем невода после замета).

На рис. 3 показаны кривые  $\sigma = f(\lambda)$  при  $c = const$  для  $\varphi_R = 35^\circ$ , из которых видно влияние конструктивных размеров ячей на объем невода после замета. Аналогичные кривые могут быть построены для других параметров невода.

В работе рассмотрены особенности расчета так называемых разноглубинных кошельковых неводов (РКН). Специфичными для РКН являются этапы погружения, кошелькования в толще воды и всплытия на поверхность воды. Для математического описания этих этапов использовался теоретико-экспериментальный метод. Теоретическим путем определялись конфигурация невода перед погружением, продолжительность погружения РКН на заданную глубину и форма невода после кошелькования, экспериментальным - габариты и форма невода в процессе погружения и всплытия и продолжительность всплытия. Помимо этого, экспериментальные исследования использовались для обоснования расчетной модели РКН, уточнения режимов выборки стяжного троса для исключения опрокидывания невода и проверки некоторых теоретических результатов.

Теоретические исследования базировались на изложенной выше теории сетных оболочек, экспериментальные - на условиях подобия, полученных автором и его коллегами.

По результатам проведенных исследований была разработана методика проектирования и расчета разноглубинных кошельковых неводов. Сравнение полученных по методике и натуральных данных показало хорошую их сходимость. Натурные испытания проводились в период с ноября 1976 года по март 1977 года научной

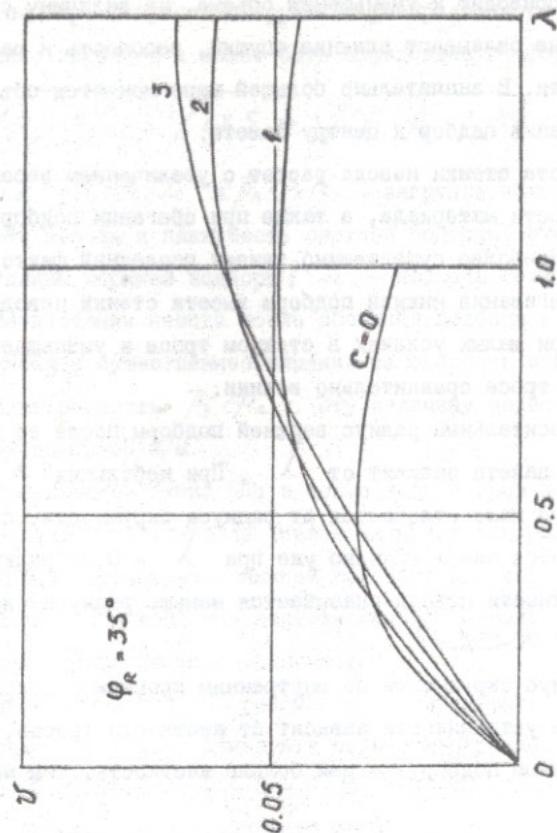


Рис. 3

группой НПО по технике промышленного рыболовства.

Результаты исследований неводов показали следующее. Объем невода после замета имеет наибольшую величину при относительной высоте сети в жгуте  $\lambda = 0,35 + 0,50$ . Дальнейшее увеличение  $\lambda$  приводит к уменьшению объема. На величину объема практически не оказывают влияния опушки, весомость и растяжимость нитей сети. В значительно большей мере меняется объем невода при сбегании подбор к центру замета.

Высота стенки невода растет с увеличением весомости и растяжимости материала, а также при сбегании подбор к центру замета. Наиболее существенно влияет последний фактор. В процессе стягивания нижней подборы высота стенки невода увеличивается при малых усилиях в стяжном тросе и уменьшается, если усилия в тросе сравнительно велики.

Относительный радиус верхней подборы после ее сбегания к центру замета зависит от  $\lambda$ . При небольших  $\lambda$  средний радиус мало отличается от радиуса окружности, по которой производится замет. Однако уже при  $\lambda = 0,25$  радиус средней окружности невода оказывается меньше радиуса окружности замета на 20-25%.

Радиус окружности по внутренним кромкам подборы после потери ее устойчивости зависит от жесткости тросов, составляющих верхнюю подбору, - чем больше жесткость, тем меньше этот радиус.

Процесс погружения РКН протекает в два этапа. На первом сетное полотно расправляется, сетная часть достигает высоты, близкой к расчетной в посадке. Продолжительность расправления сетной стенки можно определить по формулам Н.Н.Андреева, Ф.И. Баранова и др. На скорость расправления наиболее существенно

влияет загрузка нижней подборы невода, причем наиболее заметно скорость возрастает при увеличении загрузки до 60-70 н/м. На втором этапе невод погружается в расправленном состоянии в виде складчатого цилиндра. Погружение протекает без существенного увеличения высоты стенки и сопровождается дальнейшим сбеганием подбор. Скорость погружения расправленного невода не меняется с глубиной и может быть определена по формуле

$$v_n = \sqrt{(p_3 + p_c - p_n) / 18 S} = \sqrt{(\bar{p}_3 + \bar{p}_c - \bar{p}_n) / 18 H_c},$$

где  $\bar{p}_3 = p_3 / L$ ,  $\bar{p}_c = p_c / L$  и  $\bar{p}_n = p_n / L$  - загрузка нижней подборы, вес сети невода и плавучесть верхней подборы, отнесенные к единице длины верхней подборы;  $S$  - площадь сети невода;  $H_c$  - высота стенки невода после сбегания подборы к центру замета. Наиболее существенное влияние на скорость погружения РКН оказывает разность  $\bar{p}_3 - \bar{p}_n$ . Эту величину целесообразно увеличивать до 50-60 н/м.

Процесс кошелькования РКН в толще воды сопровождается дальнейшим погружением невода. Невод начинает всплывать только после полного стягивания нижней подборы. Для обеспечения наибольшей скорости всплытия верхняя подбора невода должна иметь максимально возможную плавучесть.

При проектировании РКН рекомендуется принимать форму сетной части в раскрое, близкую к сегментнообразной;  
 $\mu = 0,45 + 0,70$ ;  $H_n / L = \frac{1}{5} + \frac{1}{8}$ ;  $\bar{p}_3 = 70-90$  н/м;  $\bar{p}_n = 30-50$  н/м, но не меньше суммарного веса сетного полотна с канатно-веревочным каркасом в воде; плавучесть материала неплавов не должна изменяться при погружении на глубину до 100 м.

В главе VII исследована форма и прочность ставных сетей с одной незакрепленной подборой на течении и волнении. Полагалось, что сеть все время остается напряженной, т.е. устойчивости не теряет. В соответствии с рекомендацией Ф.И.Баранова влияние волнения на сеть учитывалось как действие на нее переменного по величине и направлению потока, создаваемого волновым движением частиц жидкости.

Для оценки влияния волнения на прочность и параметры сети волнение принималось косинусоидальным. Расчет велся в квазистатической постановке для положения верхней подборки на вершине, подошве и склоне волны. Оказалось, что максимальные усилия в нитях сети возникают на подошве волны, когда волна перемещается навстречу течению, и на вершине волны, если перемещение волны и течение совпадают по направлению. Наибольшие усилия на волнении в среднем на 25-50% выше, чем на тихой воде. Расчеты сетей показали, что трехгойдальная и косинусоидальная теория волн дают близкие результаты.

Исследования ставных сетей на течении показали следующее. На высоту сети в потоке оказывает весьма существенное влияние плавучесть верхней подборки. Однако увеличение плавучести сверх некоторого значения является нецелесообразным, так как приводит к незначительному росту высоты сети. Заметно влияет на габариты сети скорость потока. Это влияние уменьшается с ростом плавучести верхней подборки.

Растяжимость нитей сети приводит к увеличению габаритов сети в потоке и некоторому снижению усилий в ее нитях. Так, при относительном удлинении нитей 10% габариты сети меняются примерно на 20%. Растяжимость нитей не учитывается при

$$W/tg\varphi > 0,05 \approx$$

Весомость сетематериалов существенно сказывается на размерах сети в потоке и распределении усилий в ее нитях. При  $q_8 \leq 0,25$  разница в определении статико-геометрических параметров сетей с учетом и без учета их весомости не будет составлять более 5%.

С увеличением длины сети в жгуте при заданной скорости потока и плавучести верхней подборки высота сети растет до некоторого максимального значения. Как только высота сети достигнет этого максимального значения, увеличение ее длины в жгуте не приведет к росту перекрываемой сетью высоты потока, поскольку часть сети будет выстилаться по дну водоема.

Для определения наибольшей допустимой длины сети в жгуте, при которой сеть еще не выстилается по дну водоема, может быть рекомендована следующая зависимость:

$$L_{ж\ max} = \frac{6 \bar{W} n}{c_{90} \frac{d_n}{z} \rho v_T^2 tg\varphi}$$

в которой  $n$  - число ячеек в поперечном сечении сети;  $\bar{W}$  - плавучесть верхней подборки, соответствующая  $L_{ж\ max}$

При  $\bar{W}$  и  $L_{ж\ max}$  высота потока, перекрываемого сетью,

$H \approx 0,25 L_{ж\ max}$ . Для подъема сети в потоке необходимо увеличивать плавучесть верхней подборки. Увеличение плавучести сверх  $3\bar{W}$  является нецелесообразным, так как при  $W > 3\bar{W}$  подъем сети практически приостанавливается.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Общие уравнения для расчета растяжимых сетей с ромбовидными ячейками записаны в отличие от работ А.И.Зоннова, В.Л.

Бидриана и Б.Л.Бухина в произвольных криволинейных координатах. Впервые составлены общие уравнения для расчета сетей с шестиугольными ячейками. Проведен анализ уравнений с точки зрения соответствия их числа числу неизвестных.

2. Сформулированы и записаны граничные условия в типичных задачах расчета формы и прочности сетных частей орудий промышленного рыболовства.

3. Выявлено влияние на результаты расчетов рыболовных сетей жесткости их нитей, континуальной расчетной схемы и разброса в шаге ячеек.

4. Получены общие уравнения для расчета сетей в зонах, в которых напряжены нити одного из семейств.

5. Получены необходимые и достаточные условия существования в сетях одноосных (нагружены нити только одного семейства) и двухосных (нагружены нити обоих семейств) напряженных зон.

6. Записаны для произвольной внешней нагрузки условия совпадения линий кривизны поверхности сети с траекториями главных натяжений.

7. Расчетные зависимости для растяжимых сетей вращения и цилиндрических сетей представлены в виде нормальной системы дифференциальных уравнений, которая позволяет сразу же определить параметры сети в конечном состоянии без использования шагового метода и нахождения начальной конфигурации сети.

8. Детально исследовано существование форм сетей вращения, нагруженных различными по характеру внешними силами.

9. Разработаны практические схемы расчета сетей вращения и цилиндрических сетей на нагрузки, присущие орудиям

промышленного рыболовства.

10. Разработана методика расчета раскрытия сетного полотна по заданной конечной форме и заданному напряженному состоянию сети.

11. Записаны уравнения равновесия растяжимых плоских сетей и приведена методика расчета таких сетей для случаев их посадки на жесткие и гибкие контуры.

12. Разработана практическая схема расчета прочности кутков тралов. Расчетная формула учитывает влияние числа ячеек, шага сети, объемного веса рыбы, сил инерции от качки судна и изгиба кутка на усилия в его нитях. Получено условие выбора прочных размеров сетей кутков тралов.

13. Разработаны практические приемы расчета статико-геометрических параметров традиционных неводов после замата по окружности и при кошельковании с учетом опущек, весомости и растяжимости сетематериалов и сбегания подбор к центру замата. Исследование формы невода в процессе стягивания нижней подборы выполнено с учетом гидродинамических сил.

14. Разработана с использованием теоретико-экспериментального метода методика проектирования разноглубинных кошельковых неводов.

15. Разработаны практические методы расчета ставных сетей на течении с учетом волнения инерционных сил, весомости и растяжимости сетематериалов.

16. На основании полученных в работе формул подобия разработана методика представления результатов исследований. Эта методика предусматривает выполнение расчета сетей с помощью элементарных операций.

17. Полученные в работе аналитическим путем безразмерные

критерии подобия дают возможность более грамотно подойти к планированию и проведению модельных испытаний сетей.

18. Спроектированы и изготовлены экспериментальные установки для испытаний моделей кошельковых неводов, устойчивости плавающего троса и изгибной жесткости фалов, веревки и канатов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Кулагин В.Д. Некоторые вопросы общей теории одноосно напряженных мягких оболочек. - Строительная механика и расчет сооружений, 1970, № 3, с. 16-18.
2. Кулагин В.Д., Крамской Л.М. Физико-механические свойства сетных материалов. - Рыбное хозяйство, 1972, № 9, с. 61-62.
3. Кулагин В.Д. К расчету осесимметричных сетчатых оболочек. - Строительная механика и расчет сооружений, 1973, № 4, с. 56-57.
4. Герман Б.И., Кулагин В.Д., Печерский Б.Г. Определение объема обметанного кошельковым неводом с учетом сбегания подбора и траектории замета. - Рыбное хозяйство, 1975, № 3, с. 45-47.
5. Печерский Б.Г., Герман Б.И., Кулагин В.Д. Скорость погружения разноглубинного кошелькового невода. - Рыбное хозяйство, 1976, № 5, с. 52-54.
6. Герман Б.И., Донцов В.А., Кулагин В.Д., Печерский Б.Г., Сатин В.В. Экспериментальная установка для испытаний моделей кошельковых неводов. - Рыбное хозяйство, 1977, № 8, с. 62-63.
7. Кулагин В.Д. Статика сетных полотен под внешней нагрузкой (вопросы общей теории). - Библиограф. указатель депониро-

ванных научных работ. М., ВИНТИ, 1983, № 7 (141), с. 100.

8. Кулагин В.Д. Расчет ставных сетей на течении с учетом весомости и растяжимости сетематериалов. - Библиограф. указатель депонированных научных работ. М., ВИНТИ, 1983, № (142), с. 105.

9. Кулагин В.Д., Печерский Б.Г. Разноглубинные кошельковые невода. М.: Агропромиздат, 1985. - 88 с.

10. Кулагин В.Д. Теория и устройство промысловых судов. - Л.: Судостроение, 1986. - с.

11. Кулагин В.Д. О совпадении линий кривизны с траекториями главных напряжений. - Труды ДВВИМУ, Механика, 1968, вып. 5, с. 20-23.

12. Кулагин В.Д. Свойства траекторий главных напряжений однооснонапряженных мягких конструкций. - Сообщение лаборатории мягких оболочек ДВВИМУ, 1969, вып. 6, с. 63-67.

13. Кулагин В.Д. Определение коэффициентов квадратичных форм поверхности одноосно напряженных мягких оболочек. - Сообщения лаборатории мягких оболочек ДВВИМУ, 1969, вып. 6, с. 68-70.

14. Кулагин В.Д., Крамской Л.М. Расчет сетчатых оболочек вращения. - Сообщения лаборатории мягких оболочек ДВВИМУ, 1970, вып. 11, с. 86-96.

15. Кулагин В.Д., Крамской Л.М. Статика сетчатых оболочек. - Сообщения лаборатории мягких оболочек ДВВИМУ, 1970, вып. 12, с. 70-90.

16. Кулагин В.Д. Расчет раскрыя сетчатой оболочки вращения по заданной конечной форме. - Сообщения лаборатории мягких оболочек, 1972, вып. 15, с. 102-105.

17. Кулагин В.Д. О существовании форм сетчатых оболочек вращения, нагруженных нормальным давлением и осевыми силами. - Сообщение лаборатории мягких оболочек ДВВИМУ, 1972, вып.19, с.52-61.

18. Кулагин В.Д. Учет растяжимости нитей при расчете сетчатых оболочек вращения. - Сообщение лаборатории мягких оболочек ДВВИМУ, 1972, вып.19, с. 62-64.

19. Кулагин В.Д., Крамской Л.М. Оценка погрешности при замене конечных размеров ячеек сети бесконечно малыми. - Сообщения лаборатории мягких оболочек ДВВИМУ, 1972, вып.21, с. 45-49.

20. Кулагин В.Д. Теоретические основы расчета прочности сетных орудий лова. - Труды КТИРПиХ, Промышленное рыболовство, 1973, вып.53, с. 30-46.

21. Кулагин В.Д., Крамской Л.М. Некоторые вопросы определения силовых и геометрических параметров сетных орудий лова. - Труды КТИРПиХ, Промышленное рыболовство, 1973, вып.53, с.47-59.

22. Кулагин В.Д., Крамской Л.М., Стригин А.Г. К расчету кутков тралов при частичном заполнении их рыбой. - Труды КТИРПиХ, Промышленное рыболовство, 1975, вып.57, с.140-145.

23. Кулагин В.Д. Графики для практического расчета сетчатых оболочек вращения, нагруженных осевыми силами. - Сообщения ДВВИМУ по судовым мягким оболочкам, 1973, вып.23, с.34-39.

24. Кулагин В.Д. Графики для практического расчета сетчатых оболочек вращения, нагруженных нормальным давлением и осевыми силами. - Сообщения ДВВИМУ по судовым мягким оболочкам, 1973, вып.24, с.73-78.

25. Печерский Б.Г., Кулагин В.Д. Расчет равнонапряженных

сетчатых оболочек вращения. - Сообщения ДВВИМУ по судовым мягким оболочкам, 1973, вып.24, с. 79-87.

26. Кулагин В.Д. Исследование работы сетчатых оболочек вращения, нити которых направлены по параллелям и меридианам. - Сообщения ДВВИМУ по судовым мягким оболочкам, 1973, вып.25, с.45-49.

27. Кулагин В.Д., Герман Б.И., Донцов В.А. Экспериментальное исследование устойчивости плавающего троса. - Сообщения ДВВИМУ по судовым мягким оболочкам, 1974, вып.29, с.58-67.

28. Кулагин В.Д., Герман Б.И., Донцов В.А. Экспериментальная установка для исследования изгибной жесткости фалов, веревок и канатов. - Сообщения ДВВИМУ по судовым мягким оболочкам, 1974, вып. 29, с. 68-71.

29. Печерский Б.Г., Кулагин В.Д. Расчетные уравнения для определения параметров равнонапряженных сетных оболочек. - Сообщения ДВВИМУ по судовым мягким оболочкам, 1974, вып.29, с. 53-57.

30. Кулагин В.Д. Влияние весомости и растяжимости нитей на работу цилиндрических сетей в плоскопараллельном потоке. - Сообщения ДВВИМУ по судовым мягким оболочкам, 1975, вып.31, с.66-73.

31. Кулагин В.Д., Печерский Б.Г. Особенности расчета некоторых типов сетных оболочек вращения. - Сообщения ДВВИМУ по судовым мягким оболочкам, 1975, вып.32, с.70-76.

32. Кулагин В.Д. Методы расчета сетных конструкций орудий промышленного рыболовства. - Труды КТИРПиХ, Промышленное рыболовство, 1972, вып.62, с.62-68.

33. Герман Б.И., Кулагин В.Д., Печерский Б.Г. Особенности



ти моделирования разноглубинного кошелькового невода. - Труды КТИРПиХ, Теория, проектирование и эксплуатация рыболовных систем, 1978, вып. 79, с. 52-56.

34. Кулагин В.Д. Расчет осесимметричных и цилиндрических растяжимых сетных оболочек. - Труды Николаевского кораблестроительного института, Проектирование, конструкция и устройство судов, 1979, вып. 154, с. 93-98.

35. Кулагин В.Д. Определение усилий в нитях кутка трала в различных условиях его эксплуатации. - Труды КТИРПиХ, Теория, проектирование и эксплуатация систем, 1980, вып. 89, с. 39-43.

36. Кулагин В.Д. Атлас расчетных диаграмм некоторых типов сетных орудий лова. - Труды КТИРПиХ, Теория, проектирование и эксплуатация рыболовных систем, 1980, вып. 89, с. 44-49.

37. Кулагин В.Д. Статика сетных полотен с шестиугольной ячеей. - Седьмая Дальневосточная конференция по мягким оболочкам, Тезисы докладов, 1983, с. 34-37.

38. Кулагин В.Д., Сатин В.В. Расчет кошельковых неводов из сетей с ячейми шестиугольной формы после замата. - Сб. научных трудов ДВВИМУ, Судовые мягкие и гибкие конструкции, 1983, с. 104-106.

39. Трещев А.И., Кулагин В.Д. Использование аналитических методов при проектировании сетных орудий промышленного рыболовства. - Труды ВНИРО, Исследование по технике промышленного рыболовства и поведению рыб, 1983, с. 89-96.

*В.Д. Кулагин*

Л- 40581

Подписано к печати 23/XI-88г.

Объем-3,5 п.л.

Заказ № 570

Формат 60x84 1/16 Тираж 120