

Б-ка

На правах рукописи

УДК 639.2.081.001.57

Габрюк Александр Викторович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КРЮЧКОВЫХ РЫБОЛОВНЫХ СИСТЕМ**

Специальность 05.18.17  
«Промышленное рыболовство»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Владивосток 2004

Работа выполнена в Дальневосточном государственном техническом рыбохозяйственном университете (Дальрыбвтуз), г. Владивосток

Научный руководитель кандидат технических наук  
Осипов Е.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Друзь Б.И.  
кандидат технических наук,  
доцент Журавлев Л.В.

Ведущая организация: ФГУП «ТИНРО-центр»

Защита диссертации состоится "9" июля 2004 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 307.006.01 государственного технического рыбохозяйственного университета, 690950, Владивосток, ул. Луговая, 52

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного технического университета

Автореферат разослан "02" июля 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

**Актуальность темы.** В настоящее время в нашей стране на долю крючкового промысла приходится 1–2 % добываемых морепродуктов, хотя в странах с развитым рыболовством (Норвегия, Япония, Мексика, Великобритания, Франция) эта доля составляет 10–16 %. Крючковые снасти дают 12–15 % мировой добычи рыбы.

В дальнейшем крючковый промысел будет развиваться в связи с разработкой автоматизированных ярусных и тролловых рыболовных систем, а также потому, что он имеет ряд преимуществ перед другими видами промысла, такие как:

- универсальность;
- возможность облавливать гидробионты на любых глубинах и при большой балльности моря;
- относительно высокий уровень механизации;
- высокая селективность промысла.

Не будет преувеличением сказать, что над совершенствованием крючкового промысла сейчас работают многие НИИ и университеты рыбного профиля.

Актуальность исследований обусловлена необходимостью повышения рентабельности и эффективности крючкового промысла. Решение этих задач невозможно без разработки математических моделей крючковых рыболовных систем и специальных прикладных программ для их компьютерного моделирования.

В настоящее время эта работа приобретает особую значимость в связи с подрывом запасов гидробионтов тралового промысла, который до последнего времени давал в России до 70 % добычи.

**Цель работы.** Совершенствование методик моделирования и оптимизации крючковых рыболовных систем (ярусов и троллов) с использованием компьютерных технологий для повышения эффективности крючкового промысла.

**Основные задачи исследования:**

- 1) разработка математических моделей всех элементов яруса (рыболовного крючка, хребтины, буя, буйрепа, якоря, якорного линя);
- 2) разработка методики моделирования ярусов при отсутствии течений;
- 3) разработка методики моделирования различных типов ярусов: горизонтальных придонных (тип А, В, С), донного яруса с буйковой оснасткой поводцов и вертикальных ярусов;
- 4) разработка математических моделей всех элементов троллов;
- 5) разработка методики моделирования троллов;
- 6) разработка специальных прикладных программ для компьютерного моделирования крючковых рыболовных систем;
- 7) экспериментальное подтверждение адекватности предложенных математических моделей крючковых рыболовных систем.

ТИНРО  
№ 1/16  
библиотека

**Объектом исследований** является область рыболовства, направленная на разработку математических моделей и программ компьютерного моделирования крючковых рыболовных систем, позволяющих осуществлять моделирование этих систем на стадии проектирования и осуществлять их оптимальную промысловую настройку.

**Предметом исследований** является разработка технологий компьютерного моделирования крючковых рыболовных систем, позволяющих повысить эффективность крючкового промысла.

**Методологические и теоретические основы** данной работы составили труды Л. Эйлера, П. Аппеля, А.Н. Крылова, Н.Е. Кочина, А.П. Минакова, Д.Р. Меркина, Н.И. Алексеева, Ф.И. Баранова, А.Л. Фридмана, М.М. Розенштейна, В.Н. Мельникова, В.И. Габрюка, Е.В. Осипова и др. При исследовании применялись аналитические и численные методы анализа.

В работе использовались данные и сведения из книг, журнальных статей, научных докладов и материалов научных конференций.

Научно-исследовательские работы выполнялись на экспериментальной базе НБАМР и на промысловых судах ООО "Чезар".

**Научная новизна работы.** Разработаны математические модели крючковых рыболовных систем, алгоритмы их расчета и специальные прикладные программы, позволяющие определять технические характеристики ярусов и троллов на стадии проектирования и выполнять их оптимальную промысловую настройку с помощью ПЭВМ.

Впервые разработаны математические модели, алгоритмы и программы моделирования и оптимальной промысловой настройки:

- трех типов придонных горизонтальных ярусов (типы А, В, С), наиболее широко используемых на промысле;
- вертикальных ярусов;
- донных ярусов с буйковой оснасткой поводцов;
- тролловых рыболовных систем.

Экспериментально исследована прочность ротовой полости трески, необходимая для расчета рыболовных крючков на прочность, и получены гидродинамические характеристики системы «наживка—крючок».

Выполнены измерения интегральных характеристик ярусов и троллов, подтверждающие адекватность разработанных математических моделей крючковых рыболовных систем.

**Практическое значение работы.** Разработанное математическое и программное обеспечение крючкового промысла позволяет на стадии проектирования определять технические характеристики горизонтальных и вертикальных ярусов и троллов, а на промысле осуществлять их оптимальную промысловую настройку, добываясь нахождения всех крючков в слое рыбы, тем самым обеспечивая максимальную уловистость крючковых рыболовных систем. Математическое моделирование крючковых рыболовных систем позволяет выбрать оптимальные характеристики их оснастки и вооружения.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на трех международных конференциях: "Наука—техника—технология" (Находка: Институт технологии и бизнеса, 2002); "Marine environment: nature, communication and business" (Pusan: Korea maritime university, 2003); Fifth international young scholars' forum of the Asia-Pacific region countries (Vladivostok, 2003).

**Личный вклад автора.** Автору принадлежит разработка методики моделирования ярусов без учета течений и программы их компьютерного моделирования; разработка обобщенной математической модели хребтины при наличии течений и методики моделирования ярусов на базе этой модели. Автором также разработана методика расчета вертикальных ярусов. В работах, выполненных в соавторстве, автор принимал равное участие в постановке задач, их решении и анализе результатов.

Экспериментальное подтверждение адекватности математических моделей тролловых рыболовных систем осуществлялось по методике, разработанной автором.

**Реализация результатов работы.** Разработанное математическое и программное обеспечение крючкового промысла широко используется в учебном процессе ДВГТРУ, КГТУ, КамчатГТУ и других университетов при чтении лекций и проведении практических занятий по механике и проектированию крючковых рыболовных систем, оно применяется в НИИ: ТИПРО-центр, ВНИРО, ПИПРО, а также в рыболовецких колхозах "Приморец", "Новый мир" и РПК "Посейдон" при оптимальной промысловой настройке ярусов.

Получены свидетельства на программы:

— свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001611049 от 17.04.01 на программу "Компьютерное моделирование канатов для буксировки орудий лова (СМ - ТW)";

— свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001611050 от 17.04.01 на программу "Компьютерное моделирование симметричных траловых рыболовных систем (СМ - STFS)";

— свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003612261 от 15.08.03 на программу "Моделирование тролловых рыболовных систем (СМ - TFS)".

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в одиннадцати печатных работах.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, четырех приложений и списка литературы, включающего 170 наименований. Объем диссертации 154 страницы. Количество рисунков 61, таблиц 3.

### Краткое содержание работы

Во введении формулируется цель работы, обосновывается ее актуальность, указываются решенные задачи и элементы новизны.

В первой главе описываются конструкции крючковых рыболовных систем, к которым относятся удочки, ярусы и троллы. В диссертации исследуются только ярусы и троллы. Конструкции их близки между собой, так как их основными элементами, улавливающими рыбу, являются рыболовные крючки, которые крепятся с помощью поводцов к несущему канату — хребтине. Главное отличие троллов от ярусов заключается в том, что они одним концом связаны с судном и буксируются им со скоростью 6–20 уз.

Для придания ярусу определенной формы он оснащается поплавками и грузами и вооружается якорями. В крючковых орудиях лова широко используются гибкие одномерные тела (нитки, веревки, канаты), которые выполняют следующие функции:

- 1) буксировка орудий лова — ваеры;
- 2) связь между крючками — хребтина;
- 3) связь крючков с хребтиной — поводцы;
- 4) крепление оснастки и вооружения к хребтине:
  - 4.1) буйлины — для крепления бுவ;
  - 4.2) грузовые линии — для крепления грузов;
  - 4.3) якорные линии — для крепления якорей.

Выбор типа крючкового орудия рыболовства определяется расположением гидробионтов у поверхности, в толще воды, у грунта и на грунте.

Если гидробионты располагаются у грунта (например, нерестовая треска образует скопления у грунта высотой 3–10 м), то выбирается ярус типа А. Если объектом лова является нагульная треска, образующая скопления у грунта высотой 30–40 м, выбирается придонный ярус типа В. Если высота скопления рыбы у грунта более 50 м, выбирается придонный ярус типа С или придонный вертикальный ярус. Если скопление гидробионтов находится у поверхности или в толще воды, то выбираются пелагический горизонтальный или вертикальный ярусы либо используются троллы.

В главе 1 также дан анализ работ, посвященных расчету крючковых рыболовных систем.

Основы теории расчета стационарных ярусов заложил основоположник промышленного рыболовства Ф.И. Баранов. Используя классическое решение выдающихся математиков Лейбница, Бернулли, Гюйгенса о форме гтяжелой нити в поле сил тяжести (цепная линия), он составил таблицы характеристик цепной линии и параболы, широко используемые в практике промышленного рыболовства для расчета хребтин ярусов, подбор тралов и других канатных элементов.

Дальнейшее развитие задача расчета ярусов получила в работах В.И. Габрюка и Е.В. Осипова. Используя полученные ранее В.И. Габрюком урав-

нения равновесия буксировочного каната в потоке, они разработали граничные условия для всех элементов ярусной системы и создали программу моделирования ярусов, позволяющую определять форму готового яруса при наличии течений.

Однако задача расчета ярусов при отсутствии течений до последнего времени не имела общего решения, что не позволяло определять характеристики всех элементов яруса (бுவ, грузов, якорей, хребтины) на стадии проектирования, так как проектировщик вначале должен определить характеристики всех элементов яруса при отсутствии течений, а затем выполнить проектный расчет при наличии течения.

Проектирование крючковых орудий рыболовства невозможно без знания биологии и поведения гидробионтов в зоне действия ярусов, которые подробно описаны в фундаментальной монографии Н.В. Кокорина "Лов рыбы ярусами". В этой монографии собран, проанализирован и обобщен мировой опыт ярусного промысла. Поэтому она является настольной книгой каждого инженера, занимающегося ярусным промыслом. В ней дано обоснование выбора рыболовного крючка в зависимости от размеров рыбы и ее поведения, исследована селективность ярусов.

Выбор рыболовных крючков также рассматривается в работах Ф.И. Баранова, А.Л. Фридмана, М.М. Розенштейна и других исследователей. Основной недостаток этих работ заключается в том, что при расчете крючка на прочность по рекомендации Ф.И. Баранова нагрузка, разгибающая крючок, определяется по формуле  $R = nL^2$ . Здесь  $L$  — какой-либо линейный размер крючка,  $n$  — коэффициент, определяемый опытным путем. А.Л. Фридман за характерный линейный размер крючка предложил брать радиус кривизны крючка. Такой выбор неудачен, так как из расчета на прочность необходимо находить диаметр проволоки крючка.

Расчет крючка на прочность подробно исследован в диссертации. Он базируется на основных положениях науки о прочности материалов — сопротивлении материалов. Причем дана сравнительная оценка расчета крючка на прочность по двум методикам: методике прямого и методике кривого бруса. Сравнение показало, что диаметры проволоки крючка, рассчитанные по обоим методикам, различаются менее чем на 2 %. Поэтому в диссертации рекомендуется следующая формула для определения диаметра проволоки крючка, вытекающая из условия прочности прямого бруса на изгиб:

$$\sigma_x^{\max} = M_x / W_x \leq [\sigma] \Rightarrow d \geq \sqrt[3]{10M_x / [\sigma]} = \sqrt[3]{10 \cdot T_n \cdot b / [\sigma]},$$

где  $T_n$  — натяжение поводца;  $b$  — плечо силы натяжения поводца относительно опасного сечения;  $[\sigma]$  — допускаемое напряжение материала крючка.

За расчетную нагрузку для крючка в работе предложено брать усилие, разрывающее ротовую полость рыбы, определяемое по формуле  $T_n = \kappa_p \cdot G_p$ .

Здесь  $\kappa_p$  — коэффициент прочности ротовой полости рыбы;  $G_p$  — вес рыбы в воздухе.

Эксперименты, выполненные на треске с  $l_{\text{рыбы}} = 0,3-0,6$  м, показали, что  $\kappa_p = 1,5 \div 3$ . Большее значение  $\kappa_p$  соответствует треске меньших размеров.

Во второй главе приведены векторные уравнения движения и равновесия гибкой нити в потоке жидкости.

Все задачи на равновесие гибкой нити можно разбить на три класса:

— первый класс составляют задачи на равновесие нити в одном поле — поле сил тяжести;

— второй класс — задачи на равновесие нити в двух полях — поле сил тяжести и поле архимедовых выталкивающих сил;

— третий класс — задачи на равновесие нити в трех полях — поле сил тяжести, поле архимедовых выталкивающих сил и поле гидродинамических сил.

В этих случаях векторное уравнение равновесия гибкой нити имеет вид:

1) в поле сил тяжести (равновесие нити в воздухе)

$$d(T\vec{\tau})/dl + \vec{G} = \vec{0}. \quad (1)$$

Аналитическое решение задачи на равновесие нити в воздухе существует (интегралы Лейбница—Бернулли—Гюйгенса, 1691);

2) в поле сил тяжести и поле архимедовых выталкивающих сил (равновесие нити в покоящейся жидкости)

$$d(T\vec{\tau})/dl + \vec{G} + \vec{A} = d(T\vec{\tau})/dl + \vec{q} = \vec{0}. \quad (2)$$

Аналитическое решение задачи на равновесие нити в покоящейся жидкости существует (обобщенные интегралы Лейбница—Бернулли—Гюйгенса);

3) в поле сил тяжести, поле архимедовых выталкивающих сил и поле гидродинамических сил (равновесие нити в движущейся жидкости);

$$d(T\vec{\tau})/dl + \vec{G} + \vec{A} + \vec{R} = d(T\vec{\tau})/dl + \vec{q} + \vec{R} = \vec{0}. \quad (3)$$

Аналитическое решение задачи на равновесие нити в движущейся жидкости не существует, задача решается численно на ЭВМ по методу Рунге—Кутты.

В диссертации решались задачи, относящиеся ко второму и третьему классам. Проецируя уравнение (2) на оси  $x$  и  $z$  земной системы координат получим следующие дифференциальные уравнения равновесия нити в поле сил тяжести и поле архимедовых выталкивающих сил:

$$d(T\dot{x})/dl = 0, \quad d(T\dot{z})/dl = -q_z, \quad (4)$$

где  $T$  — натяжение нити в текущей точке;  $q_z = k_w mg$  — проекция на ось  $z$  веса в воде 1 м нити;  $k_w$  — коэффициент веса нити в воде;  $m$  — линейная плотность нити.

Базовая система уравнений для моделирования любых нитей без учета течений получена путем интегрирования системы (4).

Полная система первых интегралов уравнений (4) имеет вид:

$$\begin{aligned} x &= p[\operatorname{arsh}((l + C_3)/p) - C_1]; \\ z &= pch(x/p + C_1) - C_2; \\ l &= psh(x/p + C_1) - C_3; \\ T_x &= T\dot{x} = T \cos \alpha = C_4; \\ T_z &= T\dot{z} = -T \sin \alpha = -q_z l + C_5; \\ T &= -q_z z + C_6; \\ T &= T_A - q_z(z_B - z_A) = T_A - q_z h; \\ p &= -T_{Ax}/q_z; \quad q_z = k_w mg; \quad k_w = 1 - m_w/m \end{aligned} \quad (5)$$

где  $x, z, l$  — декартовы и дуговые координаты текущей точки нити;  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  — константы интегрирования.

Решение (5) записано в декартовой системе координат ( $xz$ ), ось  $z$  которой направлена по отвесу, т.е.  $z \downarrow \vec{g}$ .

Систему (5) в дальнейшем будем называть обобщенными интегралами Лейбница—Бернулли—Гюйгенса, так как интегралы Лейбница—Бернулли—Гюйгенса были получены для поля сил тяжести и обобщены на случай двух полей — поля сил тяжести и поля архимедовых выталкивающих сил.

Отличительной особенностью системы (5) является то, что классические уравнения записаны в форме, позволяющей рассчитывать характеристики гибких нитей, выполненных из любых материалов, как тяжелее воды ( $q_z > 0$ , например, капрон  $k_w = 0,1$ ), так и легче воды ( $q_z < 0$ , например, полипропилен  $k_w = -0,126$ ). При  $q_z = 0$ , т.е. когда нить в воде является невесомой, система (5) вырождается. Но при  $T \neq 0$  система (4) имеет единственное решение  $z = C_7 x + C_8$ , т.е. невесомая в воде нить является прямолинейной.

В диссертации получены формулы для определения констант интегрирования  $C_1, C_2, C_3$ , входящих в систему (5):

$$C_1 = \operatorname{arsh}(T_{Az}/T_{Ax}); \quad C_2 = -\frac{T_{Ax}}{q_z} \operatorname{ch} c_1; \quad C_3 = -\frac{T_{Ax}}{q_z} \operatorname{sh} c_1. \quad (6)$$

Проекция натяжения нити в точке  $A$  на оси  $x$  и  $z$ , входящие в (6), определяются по следующим, полученным из условия равновесия всей нити и ее отрезков формулам:

$$T_{Ax} = T_0 = -q_z(l_2^2 - h_2^2)/2h_2 = -q_z(l_1^2 - h_1^2)/2h_1;$$

$$T_{AZ} = 0,5q_z \left( l_H \pm h \sqrt{1 + 4p^2 / (l_H^2 - h^2)} \right). \quad (7)$$

В формулах (7) величины  $T_{AX}$  и  $T_{AZ}$  выражены через параметры нити  $(l_n, h_1, h_2, h)$ , что позволяет находить константы  $C_1, C_2, C_3$  для любых нитей, в том числе и симметричных. Причем значения  $T_{AX}$  и  $T_{AZ}$ , определяемые из формул (7), также используются для нахождения массы якорей и подъякорников.

В диссертации уравнения (5–7) положены в основу моделирования стационарных ярусов любых типов в покоящейся жидкости. На их базе разработаны методы моделирования трех типов горизонтальных придонных ярусов (тип А, тип В, тип С) и горизонтальных пелагических ярусов без учета течений.

В третьей главе излагаются математические модели (ММ) всех элементов яруса: якоря, якорного линия, буя, буйлиния, рыболовного крючка, хребтины. Ранее математические модели этих элементов рассматривались в работах В.И. Габрюка и Е.В. Осипова. Отличительная особенность математических моделей, предложенных в диссертации, заключается в следующем.

**ММ якоря.** Предложено условие опрокидывания якоря вокруг его пятки, из которого определяется минимально допустимая длина якорного линия. Кроме того, предложена ММ якоря с подъякорником, которая используется для вооружения придонных ярусов.

**ММ хребтины.** Согласно ранее существовавшей методике, которую использовали вышеуказанные авторы, хребтина точками соединения крючковых поводцов разбивается на  $n_{kp} + 1$  отрезков. Расчет характеристик хребтины на каждом отрезке осуществляется путем решения задачи Коши для дифференциальных уравнений равновесия каната в потоке. Начальные данные определяются в каждой точке, где поводец крепится к хребтине. Если на участке 1000 крючков, то 1000 раз необходимо находить начальные данные. Так как расстояние между поводцами мало и натяжения поводцов также малы, то мы имеем дело с малыми величинами, поэтому при расчетах быстро накапливается ошибка.

В диссертации предложена другая методика расчета хребтин ярусов, при которой натяжения от поводцов равномерно распределяются по длине хребтины и включаются в разряд гидродинамических сил. В диссертации получены следующие обобщенные дифференциальные уравнения равновесия хребтины в потоке:

$$\begin{aligned} \dot{T} &= q_z^{xp} \sin \alpha \cos \varphi - r_{x_v}^z \cos \alpha + r_{z_v}^z \sin \alpha, \\ \dot{\alpha} &= (q_z^{xp} \cos \alpha \cos \varphi + r_{y_v}^z \sin \alpha + r_{z_v}^z \cos \alpha) / T, \\ \dot{\varphi} &= -(q_z^{xp} \sin \varphi + r_{y_v}^z) / T \sin \alpha, \\ \dot{x} &= \cos \alpha; \quad \dot{y} = \sin \alpha \sin \varphi; \quad \dot{z} = -\sin \alpha \cos \varphi, \end{aligned} \quad (8)$$

$$q_z^{xp} = k_w^{xp} m_{xp} g; \quad r_{x_v}^z = C_{x_v}^z \cdot (0,5 \rho v^2) \cdot d, \quad (x_v, y_v, z_v),$$

$$C_{x_v}^z = (C_{x_v}^t + C_{x_v}),$$

$$C_{x_v} = -(c_{11} \sin^2 \alpha + c_{12} \sin^4 \alpha + c_{13} \cos^2 \alpha), \quad C_{x_v}^t = C_{x_v}^t,$$

$$C_{y_v} = \pm (c_{21} \sin \alpha \cos \alpha + c_{22} \sin^3 \alpha \cos \alpha), \quad C_{y_v}^t = C_{y_v}^t \cos \varphi + C_{z_v}^t \sin \varphi,$$

$$C_{z_v} = -(c_{31} \sin \alpha \cos \alpha + c_{32} \sin^3 \alpha \cos \alpha), \quad C_{z_v}^t = -C_{y_v}^t \sin \varphi + C_{z_v}^t \cos \varphi,$$

где  $\alpha$  — угол атаки хребтины;  $\varphi$  — угол крена плоскости потока хребтины.

Для системы (8) решается задача Коши. Начальные данные для каждого участка хребтины находятся в одной точке — начале участка. Путем решения системы (8) находят координаты точек крепления поводцов к хребтине  $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ . Координаты крючков  $(x_{ij}^{kp}, y_{ij}^{kp}, z_{ij}^{kp})$  определяются по следующим формулам:

$$x_{ij}^{kp} = x_{ij} - \cos \alpha_n l_n; \quad y_{ij}^{kp} = y_{ij} - \sin \alpha_n \sin \varphi_n l_n; \quad z_{ij}^{kp} = z_{ij} + \sin \alpha_n \cos \varphi_n l_n,$$

полученным путем интегрирования системы:

$$\frac{dx}{dl} = \cos \alpha_n; \quad \frac{dy}{dl} = \sin \alpha_n \sin \varphi_n; \quad \frac{dz}{dl} = \sin \alpha_n \cos \varphi_n.$$

Особенность данной методики заключается в том, что какое бы ни было количество крючков на участке, начальные данные для участка определяются только один раз в начальной точке хребтины.

Предложенная в диссертации методика упростила моделирование хребтин ярусов, а значит и ярусных порядков всех типов, так как свела расчет хребтины с крючками к расчету "голой" хребтины. Порядок расчета ярусов при этом следующий: в начале путем расчета системы "наживка—крючок—поводец" определяются коэффициенты  $C_x^t, C_y^t, C_z^t$  натяжения поводцов по формулам:

$$C_x^t = \frac{n_{kp} (R_x^n + R_x^H)}{0,5 \rho v^2 d_{xp} l_{xp}}, \quad C_y^t = \frac{n_{kp} (R_y^n + R_y^H)}{0,5 \rho v^2 d_{xp} l_{xp}}, \quad C_z^t = \frac{n_{kp} (R_z^n + R_z^H + Q_z^n + Q_z^H)}{0,5 \rho v^2 d_{xp} l_{xp}},$$

где  $R_{x,y,z}^H, R_{x,y,z}^n$  — проекции гидродинамической силы, действующей на наживку и поводец на оси земной системы координат.

Гидродинамическое сопротивление поводца определяется по формуле

$$R_x^n = C_x^n (\alpha_n) \frac{\rho v^2}{2} l_n \cdot d_n; \quad C_x^n = -(c_{11} \sin^2 \alpha_n + c_{12} \sin^4 \alpha_n + c_{13} \cos^2 \alpha_n).$$

Угол атаки поводца  $\alpha_n$  находится из условия равновесия системы "наживка—крючок—поводец" по формуле:

$$\operatorname{tg} \alpha_n = -(R_z^n + R_z^H + Q_z^n + Q_z^H) / (R_x^n + R_x^H).$$

После чего, используя систему (8), хребтина моделируется как "голый" канат в потоке.

В четвертой главе подробно рассмотрена методика моделирования ярусных рыболовных систем. Причем моделирование выполнено по обеим методикам. Их сравнение показало, что характеристики хребтины в обоих случаях расчета практически одинаковы.

Алгоритм расчета яруса типа В по второй методике следующий: вначале определяются характеристики якорного линия путем решения задачи Коши для системы (8), в которой принимается  $Q_z^{xp} = Q_z^{мин} = k_w^n m_n g$ , а  $C_{xy}^i = C_{zy}^i = 0$ .

Начальные данные  $(\alpha_A^n; \varphi_A^n; T_A^n)$  в первом приближении берутся такими, как и при  $V_{st} = 0$ . Найдя  $\alpha_A^n; \varphi_A^n; T_A^n$ , определяют начальные данные для хребтины в точке  $B_1$  по формулам:

$$T_{B1} = T_0 = \sqrt{(T_B \sin \alpha_B - R_{1X}^6)^2 + (T_B \sin \alpha_B + R_{1Z}^6 + Q_0^6)^2},$$

$$tg \alpha_{B1} = tg \alpha_0 = (T_B \sin \alpha_B + R_{1Z}^6 + Q_0^6) / (T_B \cos \alpha_B - R_{1X}^6).$$

Путем вариации начальных данных добиваются того, чтобы первый участок хребтины проходил через заданную точку  $A_1$ , где находится первый груз. При решении задачи Коши на втором участке  $A_2B_2$  начальные данные в точке  $A_2 (T_{A2}; \alpha_{A2}; \varphi_{A2})$  берут такими, как и при  $V_{st} = 0$ . Определив путем решения системы (8) величины  $(T_{B2}; \alpha_{B2}; \varphi_{B2})$ , находят начальные данные в точке  $B_3$  для третьего участка хребтины и решают задачу Коши для системы (8) для этого участка.

Путем вариаций величин  $(T_{A2}; \alpha_{A2}; \varphi_{A2})$  добиваются, чтобы третий участок проходил через заданную точку  $A_3$ , где находится второй груз.

После этого проверяют выполнение условий:

$$|T_{A1Z} + T_{A2Z}| < Q_1^{sp}; \quad |T_{A1X} + T_{A2X}| < f(Q_1^{sp} + T_{A1Z} + T_{A2Z}),$$

которые требуют, чтобы первый груз не отрывался от грунта и не скользил по нему. Подобные условия проверяются и для второго груза.

В четвертой главе также рассмотрены вопросы моделирования донных ярусов с буйковой оснасткой поводцов. Основной недостаток используемых в настоящее время донных ярусов заключается в том, что при работе ярусами на илистых грунтах рыболовные крючки заиливаются, а при работе на каменных — попадают в расщелины между камнями и становятся недоступными для рыбы. Более того, в случае заиливания наживки резко снижаются размеры ее запаховых полей, привлекающих к крючкам рыб. Для устранения этих недостатков предложено поводцы оснащать плавучестью (рис. 1). Эксперименты, выполненные во ВНИРО Н.В. Кокориным (2002), показали, что уловистость плавающих крючков выше уловистости крючков, лежащих на грунте: по треске на 10 %, а по скату — на 23 %.

Предлагаемая в диссертации математическая модель позволяет определять расстояние от крючка до грунта  $h$  в зависимости от величины плова и скорости течения. Результаты моделирования донного яруса с буйковой оснасткой поводцов приведены на рис. 2.

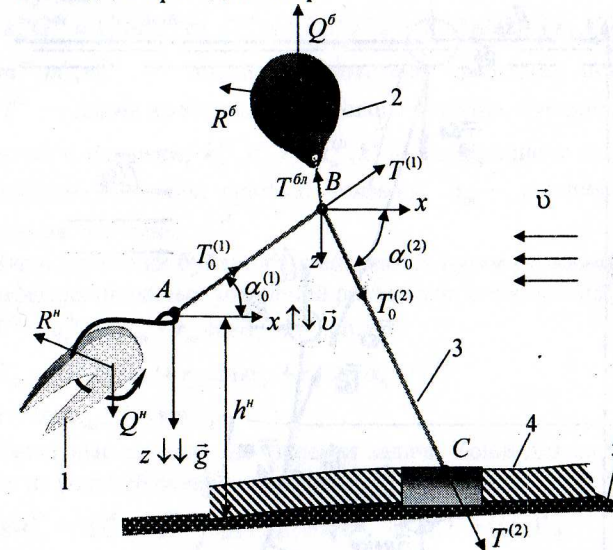


Рис. 1. Донный ярус с буйковой оснасткой поводцов: 1 – крючок с наживкой; 2 – буй; 3 – поводец; 4 – хребтина; 5 – грунт

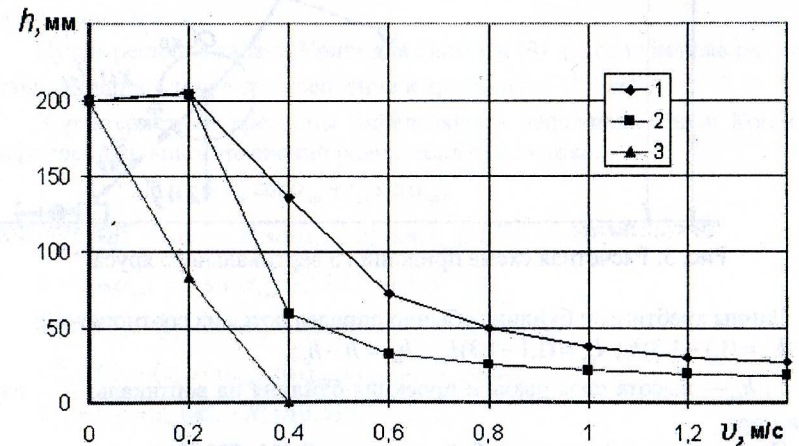


Рис. 2. Расстояние от наживки до грунта при различных значениях скорости течения и разной буйковой оснастке поводца: 1 – пенный полистирол  $D = 35$  мм; 2 – полый полипропилен  $D = 40$  мм; 3 – полый полипропилен  $D = 60$  мм

В главе 4 дана методика моделирования вертикальных ярусов. Расчетная схема придонного вертикального яруса показана на рис. 3.

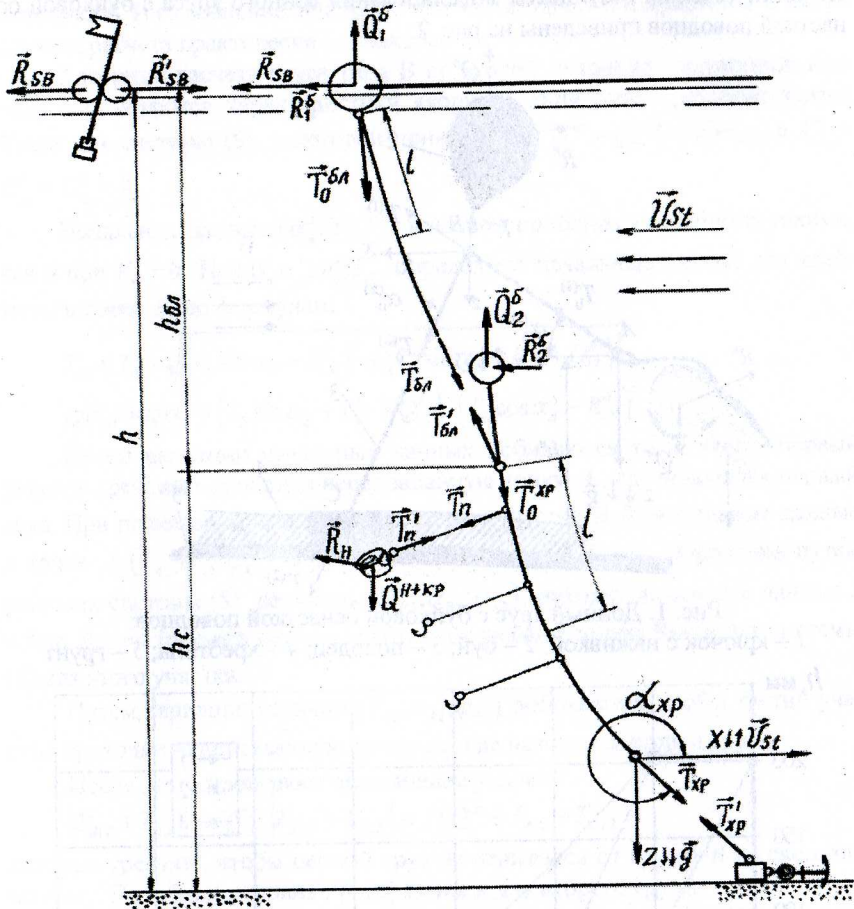


Рис. 3. Расчетная схема придонного вертикального яруса

Длины хребтины и буйлиня обычно определяются из соотношений:  
 $l_{xp} = (1,1-1,3)h_c$ ;  $l_{6n} = (1,1-1,3)h_{6n}$ ;  $h_{6n} = h - h_c$ ;

где  $h_c, h_{6n}$  — высота слоя рыбы и проекция буйлиня на вертикаль;  $h$  — глубина моря.

На практике используются буйлини длиной 600, 700, 800 м и более.

Вес в воде первого и второго буюв выбирается из условия

$$Q_{1z}^6 + Q_{2z}^6 = -k_m(Q_z^{6n} + Q_{z\Sigma}^{xp}),$$

где  $k_m$  — коэффициент запаса плавучести ( $k_m = 1,1-1,5$ );  $Q_z^{6n}, Q_{z\Sigma}^{xp}$  — вес в воде буйлиня и хребтины с крючками, поводцами и наживкой, определяемый по формулам:

$$Q_z^{6n} = k_w^{6n} G^{6n} = k_w^{6n} m^{6n} l^{6n} g; \quad Q_{z\Sigma}^{xp} = k_w^{xp} m^{xp} l^{xp} g + n_{kp} k_w^n m^n l^n g + n_{kp} k_w^{kp} M_{kp} g + n_{kp} k_w^n M_n g,$$

где  $m^{xp}, m^n, m^{6n}$  — линейная плотность хребтины, поводца, буйлиня;  $l^{xp}, l^n, l^{6n}$  — длина хребтины, крючкового поводца, буйлиня;  $M_{kp}, M_n$  — масса крючка и наживки;  $k_w^{xp}, k_w^n, k_w^{6n}, k_w^{kp}, k_w^n$  — коэффициент веса в воде хребтины, поводца, буйлиня, крючка, наживки;  $n_{kp}$  — количество рыболовных крючков на хребтине.

Характеристики буйлиня определяются путем решения задачи Коши для дифференциальных уравнений равновесия его в потоке:

$$\begin{aligned} T^{6n} &= q_z^{6n} \sin \alpha_{6n} - r_{xv} \cos \alpha_{6n} + r_{zv} \sin \alpha_{6n}; \\ \dot{\alpha}_{6n} &= (q_z^{6n} \cos \alpha_{6n} + r_{xv} \sin \alpha_{6n} + r_{zv} \cos \alpha_{6n}) / T^{6n}; \\ \dot{x} &= \cos \alpha_{6n}; \quad \dot{z} = \sin \alpha_{6n}. \end{aligned} \quad (9)$$

Начальные данные для решения задачи Коши для системы (9) определяются из условий равновесия первого буйа в потоке:

$$\operatorname{tg} \alpha_0^{6n} = -Q_1^6 / (R_x^{SB} + R_{1x}^6); \quad T_0^{6n} = \sqrt{(R_x^{SB} + R_{1x}^6)^2 + (Q_{1z}^6)^2},$$

где  $R^{SB}, R_1^6$  — гидродинамические силы, действующие на буй-веху и первый буй;  $Q_1^6$  — вес в воде первого буйа;  $T_0^{6n}, \alpha_0^{6n}$  — натяжение и угол атаки буйлиня у первого буйа.

Путем решения задачи Коши для системы (9) находят натяжение и угол атаки буйлиня в точке его крепления к хребтине —  $T^{6n}, \alpha^{6n}$ .

Характеристики хребтины определяются решением задачи Коши для дифференциальных уравнений равновесия ее в потоке:

$$\begin{aligned} T^{xp} &= q_z^{xp} \sin \alpha_{xp} - r_{xv}^\Sigma \cos \alpha_{xp} + r_{zv}^\Sigma \sin \alpha_{xp}; \\ \dot{\alpha}_{xp} &= (q_z^{xp} \cos \alpha_{xp} - r_{xv}^\Sigma \sin \alpha_{xp} + r_{zv}^\Sigma \cos \alpha_{xp}) / T^{xp}; \\ \dot{x} &= \cos \alpha_{xp}; \quad \dot{z} = \sin \alpha_{xp}; \quad r_{xv}^\Sigma = C_{xv}^\Sigma (0,5 \rho V^2) d_{xp}; \\ C_{xv}^\Sigma &= C_{xv}^t - (c_{11} \sin^2 \alpha_{xp} + c_{12} \sin^4 \alpha_{xp} + c_{13} \cos^2 \alpha_{xp}); \\ C_{zv}^\Sigma &= C_{zv}^t - (c_{31} \sin \alpha_{xp} \cos \alpha_{xp} + c_{32} \sin^3 \alpha_{xp} \cos \alpha_{xp}); \\ C_{xv}^t &= C_x^t = n_{kp} (R_x^n + R_x^n) / (0,5 \rho V^2 d_{xp} l_{xp}); \\ C_{zv}^t &= C_z^t = n_{kp} (R_z^n + R_z^n + Q_z^n + Q_z^{n+kp}) / (0,5 \rho V^2 d_{xp} l_{xp}), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $R_x^n, R_z^n, R_x^n, R_z^n$  — проекции на оси  $x$  и  $z$  гидродинамических сил, действующих на поводца и наживку;  $Q_z^n, Q_z^{n+kp}$  — вес в воде поводца и наживки с крючком:



$$R_x^n = C_x^n(\alpha_n)(0,5 \rho V^2) d_n l_n; R_z^n = C_z^n(\alpha_n)(0,5 \rho V^2) S_n;$$

$$C_x^n(\alpha_n) = -(c_{11} \sin^2 \alpha_n + c_{12} \sin^4 \alpha_n + c_{13} \cos^2 \alpha_n).$$

Начальные условия для решения задачи Коши для системы (10) определяются из условий равновесия узла соединения буйлиния с хребтиной:

$$\operatorname{tg} \alpha_0^{xp} = (Q_2^6 - T_{6n} \sin \alpha_{6n}) / (R_{2x}^6 - T_{6n} \cos \alpha_{6n});$$

$$T_0^{xp} = \sqrt{(R_{2x}^6 - T_{6n} \cos \alpha_{6n})^2 + (Q_2^6 - T_{6n} \sin \alpha_{6n})^2}.$$

Путем решения задачи Коши для системы (10) находят натяжение хребтины и ее угол атаки в точке крепления хребтины к якорю ( $T^{xp}$ ,  $\alpha^{xp}$ ) и проекции на оси  $x$  и  $z$  натяжения хребтины ( $T_x^{xp}$ ,  $T_z^{xp}$ ):

$$T_x^{xp} = T^{xp} \cos \alpha^{xp}; T_z^{xp} = -T^{xp} \sin \alpha^{xp}.$$

После чего находят минимальные массы подъякорника и якоря:

$$M_{na}^{\min} = T_z^{xp} / k_w g; M_a^{\min} = T_x^{xp} / k_s k_w g.$$

Массы подъякорника и якоря:

$$M_{na} = k_s M_{na}^{\min}; M_a = k_s M_a^{\min},$$

где  $k_s$  — коэффициент запаса держащей силы якоря ( $k_s = 1,1-1,5$ ).

В пятой главе излагается методика расчета тролловых рыболовных систем. Приведены математические модели всех элементов тролловой рыболовной системы. Расчет характеристик ваеров тролловой рыболовной системы выполняется по первой методике, при которой канат (ваер), несущий поводцы с крючками, точками соединений поводцов разбивается на  $(n_{xp} + 1)$  участков. Расчет начинается с нижнего конца ваера. Из условия равновесия конечного груза находят начальные данные для расчета первого участка ваера. Затем рассчитывают систему "наживка—поводец—крючок" и находят характеристики поводца в точке его крепления к ваеру ( $T_n, \alpha_n, \varphi_n$ ). Из равновесия каждого узла, где крепится поводец к ваеру, находят начальные данные для следующего участка ваера. Расчетная схема тролла показана на рис. 4. Начальные данные для решения задачи Коши для  $i$ -того участка ваера ( $i = 2, 3, 4 \dots$ ) находятся из условия равновесия  $(i-1)$  узла:

$$\operatorname{tg} \varphi_0^{(i)} = \frac{T_n \sin \alpha_n \sin \varphi_n + T_{i-1}^{zn} \sin \alpha_{i-1}^{zn} \sin \varphi_{i-1}^{zn} + T_{i-1} \sin \alpha_{i-1} \sin \varphi_{i-1}}{T_n \sin \alpha_n \cos \varphi_n + T_{i-1}^{zn} \sin \alpha_{i-1}^{zn} \cos \varphi_{i-1}^{zn} + T_{i-1} \sin \alpha_{i-1} \cos \varphi_{i-1}};$$

$$\operatorname{tg} \alpha_0^{(i)} = \frac{T_n \sin \alpha_n \cos \varphi_n + T_{i-1}^{zn} \sin \alpha_{i-1}^{zn} \cos \varphi_{i-1}^{zn} + T_{i-1} \sin \alpha_{i-1} \cos \varphi_{i-1}}{(T_n \cos \alpha_n + T_{i-1}^{zn} \cos \alpha_{i-1}^{zn} + T_{i-1} \cos \alpha_{i-1}) \cos \varphi_0^{(i)}}; \quad (11)$$

$$T_0^{(i)} = \sqrt{(T_{0x}^{(i)})^2 + (T_{0y}^{(i)})^2 + (T_{0z}^{(i)})^2},$$

где  $T_{0x}^{(i)} = T_n \cos \alpha_n + T_{i-1}^{zn} \cos \alpha_{i-1}^{zn} + T_{i-1} \cos \alpha_{i-1};$

$$T_{0y}^{(i)} = T_n \sin \alpha_n \sin \varphi_n + T_{i-1}^{zn} \sin \alpha_{i-1}^{zn} \sin \varphi_{i-1}^{zn} + T_{i-1} \sin \alpha_{i-1} \sin \varphi_{i-1};$$

$$T_{0z}^{(i)} = -(T_n \sin \alpha_n \cos \varphi_n + T_{i-1}^{zn} \sin \alpha_{i-1}^{zn} \cos \varphi_{i-1}^{zn} + T_{i-1} \sin \alpha_{i-1} \cos \varphi_{i-1}).$$

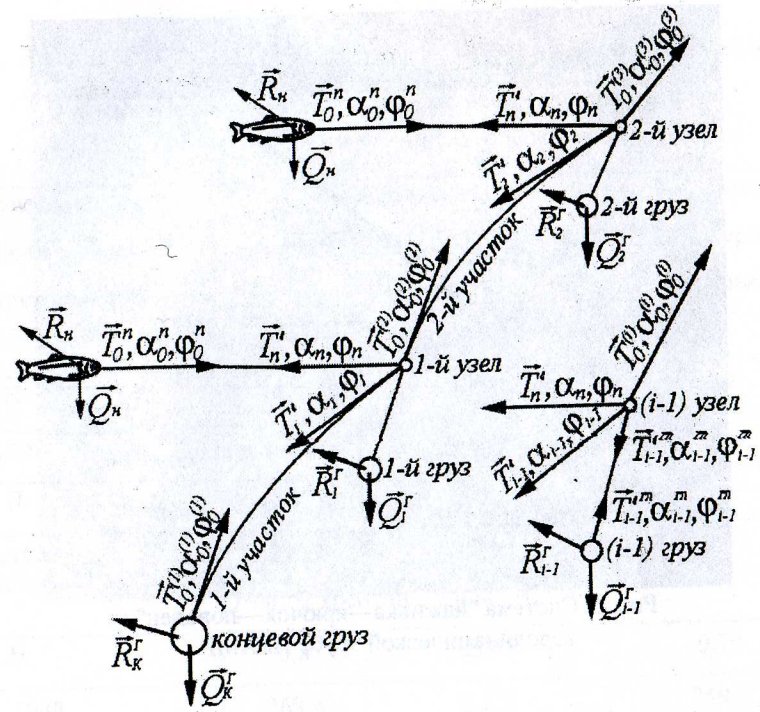


Рис. 4. Характеристики тролловой системы

В шестой главе изложены результаты экспериментальной проверки адекватности математических моделей крючковых рыболовных систем. Экспериментальное исследование ярусов выполнялось в аэродинамической трубе НБАМР. Испытывались отрезки хребтины фирмы "Мустанд" с одним крючком (рис. 5). Сравнение результатов продувок и моделирования показано на рис. 6, 7 и данные сведены в табл. 1.

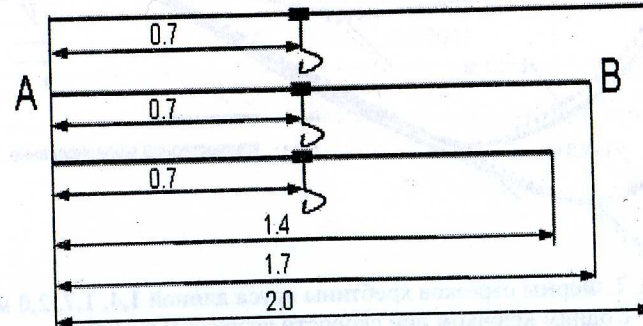


Рис. 5. Отрезки хребтины с рыболовным крючком

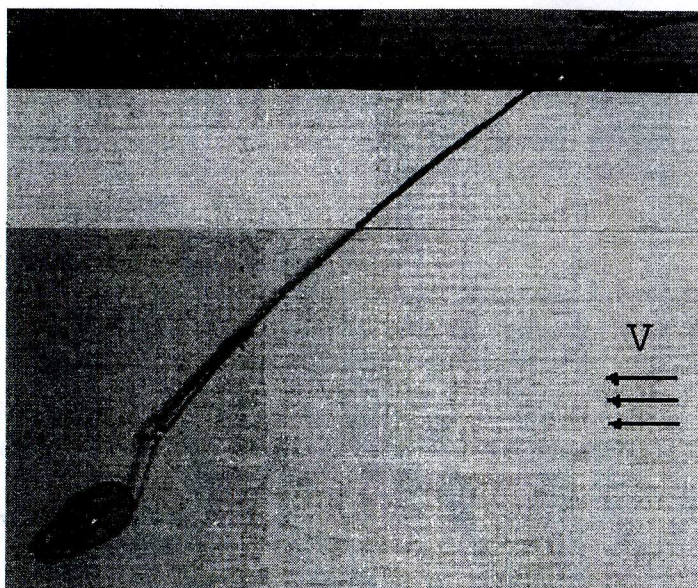


Рис. 6. Система "наживка—крючок—поводец" в аэродинамической трубе НБАМР

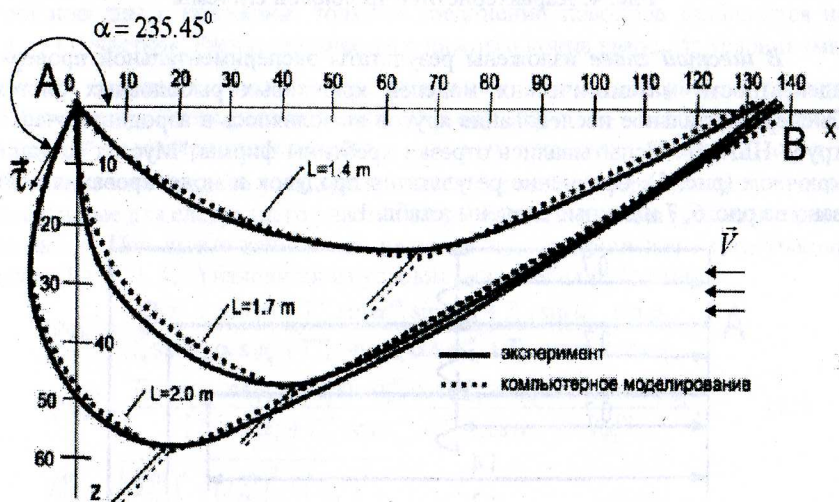


Рис. 7. Формы отрезков хребтины яруса длиной 1,4, 1,7, 2,0 м с одним крючком при скорости воздуха  $V = 18,8$  м/с

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные параметры хребтины яруса

Характеристика хребтины в начальной и конечной точках	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение	Результат компьютерного моделирования
Отрезок хребтины длиной 1,4 м			
$T_A$ , Н	0,9	0,001	0,89
$\alpha_A$ , град	317,2	1,4	317,6
$T_B$ , Н	1,48	0,003	1,47
$\alpha_B$ , град	24,9	2,4	24
Отрезок хребтины длиной 1,7 м			
$T_A$ , Н	0,8	0,001	0,79
$\alpha_A$ , град	269,4	2,225	269,5
$T_B$ , Н	1,38	0,002	1,39
$\alpha_B$ , град	25,2	1,084	25,6
Отрезок хребтины длиной 2,0 м			
$T_A$ , Н	0,79	0,00109	0,79
$\alpha_A$ , град	235	1,725	235,5
$T_B$ , Н	1,37	0,00041	1,37
$\alpha_B$ , град	25,2	1,125	25,8

Экспериментальное исследование троллов выполнялось в морских условиях. Исследовалась троллевая система, показанная на рис. 8. Результаты экспериментов приведены на рис. 9 и сведены в табл. 2.

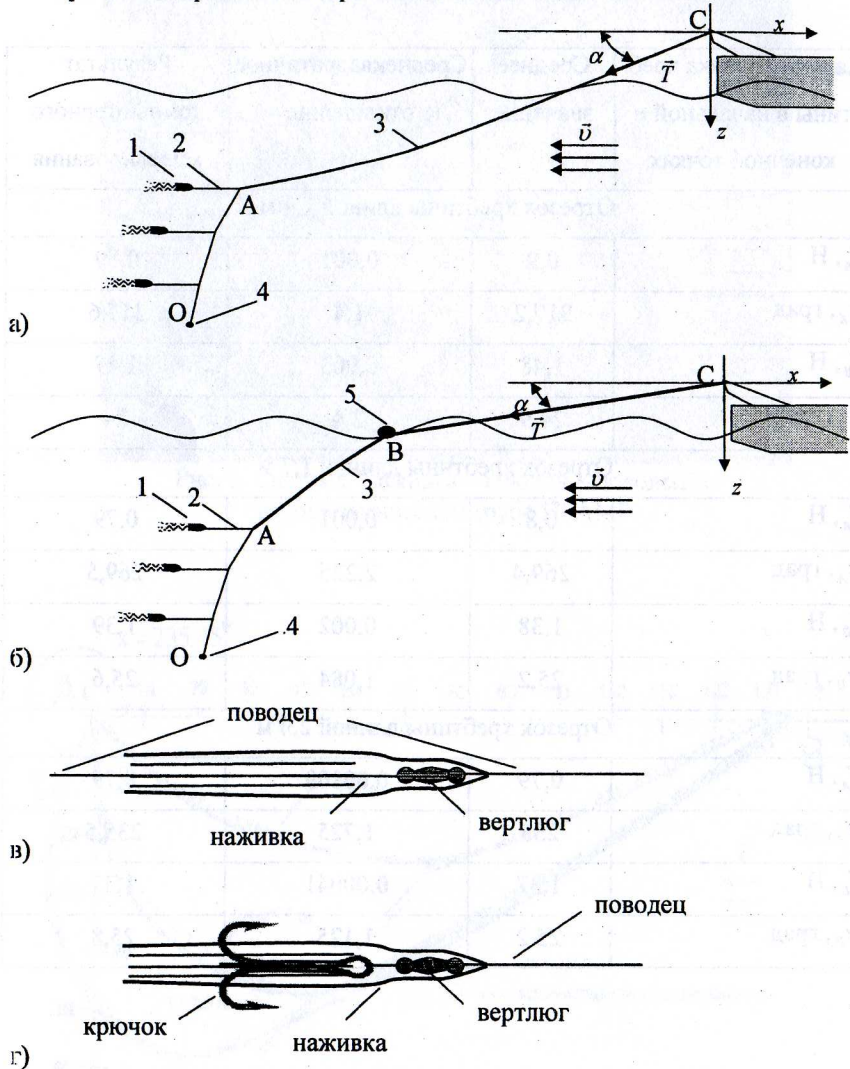


Рис. 8. Конструкции исследованных троллов и их элементов:  
 а – тролл без буя; б – тролл с буюм (1 – наживка с крючком, 2 – поводец, 3 – ваер, 4 – груз, 5 – буй); в – искусственная наживка; г – наживка с крючком

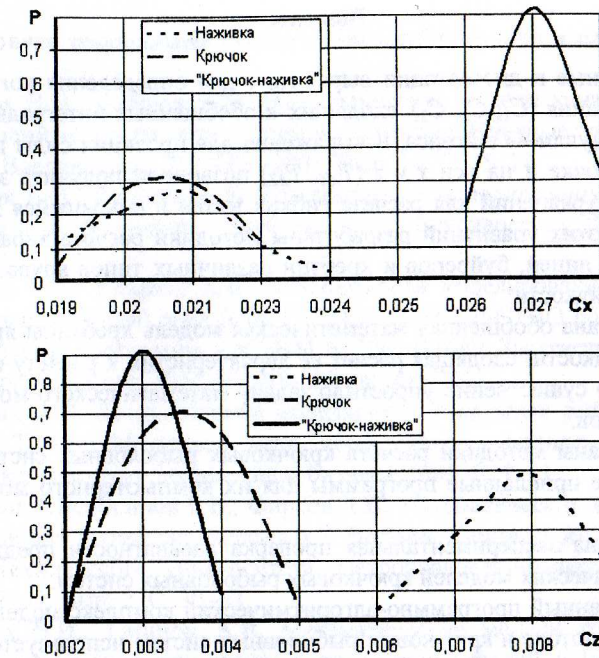


Рис. 9. Плотность распределения значений коэффициентов  $C_x$  и  $C_z$  для наживки, крючка и системы "крючок—наживка"

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные параметры троллов

Характеристика ваера у судна	Среднее значение	Среднеквадратичное отклонение	Результат компьютерного моделирования
Тролл без буя			
$T_c$ , Н	87,5	0,379	9,0
$\alpha_c$ , град	3,4	0,775	2,3
Тролл с буюм			
$T_c$ , Н	95	0,345	93,0
$\alpha_c$ , град	3,5	0,85	3,3

## Выводы

1. Полученные в диссертации выражения для определения констант интегрирования ( $C_1, C_2, C_3$ ), входящих в обобщенные интегралы Лейбница—Бернулли—Гюйгенса, и выражения для проекции силы натяжения нити в точке  $A$  на оси  $x$  и  $z$  ( $T_{Ax}, T_{Az}$ ) позволили получить замкнутую систему уравнений для расчета гибких нитей в покоящейся жидкости. На базе этих уравнений разработаны методики расчета характеристик якорных линий, буйрепов и хребтин различных типов ярусов в покоящейся жидкости.
2. Разработана обобщенная математическая модель хребтины яруса в потоке жидкости, сводящая расчет ее характеристик к расчету голого каната, что существенно упростило задачу математического моделирования ярусов.
3. Разработаны методики расчета крючковых рыболовных систем и специальные прикладные программы для их компьютерного моделирования.
4. Выполнена экспериментальная проверка адекватности предложенных математических моделей крючковых рыболовных систем.
5. Разработанный программно-алгоритмический комплекс моделирования каната в потоке и крючковых рыболовных систем используется в учебном процессе университетов ДВГТРУ, КГТУ, КамчатГТУ; в НИИ — ТИПРО-центр, ВНИРО, ПИПРО; в рыболовецких колхозах "Приморец", "Новый мир" и РПК "Посейдон".

## Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Габрюк В.И., Габрюк А.В. Математические модели канатов в потоке, необходимые для расчета орудий рыболовства: Научные труды Дальрыбвтуза. Владивосток: ДВГТРУ, 2001. Вып. 14. С. 15–18.
2. Габрюк В.И., Габрюк А.В. Компьютерное моделирование рыболовных систем и их элементов: Учеб. пособие. Владивосток: ДВГТРУ, 2001. 114 с.
3. Габрюк В.И., Габрюк А.В. Компьютерное моделирование канатов для буксировки орудий лова (СМ-TW): СВИДЕТЕЛЬСТВО об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001611049. Зарегистрирован в реестре программ для ЭВМ. Москва, 20 августа 2001.
4. Габрюк А.В. Компьютерное моделирование ярусных рыболовных систем // Тр. 4-й Междунар. науч. конф. "Наука—техника—технология". Находка: Институт технологии и бизнеса, 2002. С. 9–11.
5. Габрюк А.В., Осипов Е.В., Фирсов А.В. Математическое моделирование троллов для промысла лососевых // Вестник Камчатского Государственного технического университета. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2003. Вып. 2. С. 30–33.
6. Габрюк В.И., Габрюк А.В. Математические модели горизонтальных придонных ярусов при застое и отсутствии течений // Научные труды Дальрыбвтуза. Владивосток: ДВГТРУ, 2003. Вып. 15. С. 66–70.
7. Габрюк В.И., Габрюк А.В., Осипов Е.В. Моделирование крючковых рыболовных систем: Монография. Владивосток: ТИПРО-Центр, 2003. 105 с.
8. Габрюк В.И., Габрюк А.В., Осипов Е.В. Моделирование крючковых рыболовных систем: Монография. 2-е изд., испр. и доп. Владивосток: ТИПРО-Центр, 2004. 120 с.
9. Осипов Е.В., Габрюк А.В. Моделирование тролловых систем: СВИДЕТЕЛЬСТВО об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003612261. Зарегистрирован в реестре программ для ЭВМ. Москва, 2 октября 2003.
10. Osipov E.V., Gabruk A.V. Modeling of trolling systems for tuna fishery // International conference "Marine environment: nature, communication and business". Pusan: Korea maritime university, 2003. P. 25–27.
11. Gabruk A.V. Modeling of trolling system // Fifth international young scholars' forum of the Asia-Pacific region countries. Vladivostok, 2003. P. 305–307.