

На правах рукописи



**АГЕЕВ ОЛЕГ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**

**НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И РАЗРАБОТКА  
РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ МАШИННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ РЫБЫ**

Специальность 05.18.12 – Процессы и аппараты  
пищевых производств

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Калининград - 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Калининградский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «КГТУ»)

- Научный консультант:** доктор технических наук, профессор  
**Фатыхов Юрий Адгамович**  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
- Официальные оппоненты:** **Пеленко Валерий Викторович**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», профессор  
**Верболоз Елена Игоревна**  
доктор технических наук, профессор  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», профессор  
**Ершов Александр Михайлович**  
доктор технических наук, профессор  
ООО «Айсберг Норд», г. Мурманск, главный научный сотрудник
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань

Защита состоится «16» сентября 2021 г. в 10 часов 00 минут на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 212.035.01 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ФГБОУ ВО «ВГУИТ») по адресу: 394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19, конференц-зал.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах), заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета Д 212.035.01.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «ВГУИТ». Полный текст диссертации размещен в сети «Интернет» на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» [www.vsuet.ru](http://www.vsuet.ru) «24» мая 2021 г.

Автореферат размещен в сети «Интернет» на официальном сайте Министерства науки и высшего образования РФ <https://vak.minobrnauki.gov.ru> и на официальном сайте ФГБОУ ВО «ВГУИТ» [www.vsuet.ru](http://www.vsuet.ru) «15» июня 2021 г.

Автореферат разослан «02» августа 2021 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций  
на соискание ученой степени кандидата технических наук,  
на соискание ученой степени доктора технических наук,  
Д 212.035.01, д.т.н., профессор

 **Л.Н. Фролова**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Согласно Стратегии развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 г., утвержденной 26 ноября 2019 г. распоряжением Правительства № 2798-р рыбоперерабатывающая отрасль является ведущим системообразующим сектором экономики. В рамках Стратегии предусмотрено существенное обновление производственных фондов, уход от сырьевой направленности экспорта путем стимулирования производства продукции с высокой долей добавленной стоимости, а также создание благоприятных условий для ведения бизнеса и привлечения инвестиций в отрасль. Предусматривается расширение научных исследований и разработок, развитие научно-технического потенциала и внедрение инновационных технологий переработки рыбного сырья. Одной из основных задач отрасли является увеличение объемов выпуска продукции, улучшение качества рыбных товаров, более рациональная переработка сырья, снижение энергозатрат.

Рост выпуска, повышение качества готовых изделий и экономия ресурсов достигаются за счет совершенствования процессов первичной обработки рыбы и применения ресурсосберегающих машинных технологий. В связи с этим, имеет первостепенное значение проблема научного обеспечения указанных процессов, а также повышения эффективности технологических машин и оборудования для их осуществления.

Перспективным направлением создания новых технических решений для первичной обработки рыбы, обеспечивающих высокий выход качественного продукта с наиболее полным использованием ценного сырья и экономией энергетических ресурсов является разработка и внедрение в рыбоперерабатывающую отрасль модульной системы машин на основе мехатроники.

Теоретические и практические основы процессов первичной обработки рыбы и других сходных по структуре и свойствам пищевых продуктов, а также машинные технологии для их осуществления отражены в работах отечественных ученых: В.В. Дорменко, В.М. Чупахина, С.Г. Гуревича, Н.И. Жилина, В.Г. Проселкова, В.П. Чивиленко, А.А. Романова, С.В. Крутова, В.М. Томилина, И.З. Уманцева, В.И. Карпова, М.А. Якубова, В.М. Боркунова, А.В. Терентьева, С.И. Бриля, В.Н. Дегтярева, В.В. Пеленко, А.М. Ершова, Е.И. Верболоз, Ю.А. Фатыхова, а также в работах зарубежных исследователей: Т. Atkins, А. Dowgiallo, D. Dutkiewicz, M. Jakubowski, M. Boisly, S. Schuldt, M.G. Kaestner, H. Arnarson, E. Vandenberghe, K. Khodabandehloo и других.

Работа проводилась в рамках государственной программы Российской Федерации «Развитие рыбохозяйственного комплекса», целевой программы Правительства Калининградской области «Развитие прибрежного рыболовства в Калининградской области на 2013-2020 годы», грантов Российского фонда содействия инновациям по государственным контрактам № 4291р/6719 от 27.06.2006 г., № 10442р/18681 от 08.06.2012 г. в соответствии с планом инициативно-поисковых НИР кафедры пищевых и

холодильных машин ФГБОУ ВО «КГТУ» «Энерго- и ресурсосберегающие технологические процессы в отраслях АПК» на 2013-2020 годы, в рамках цикла госбюджетных НИР, выполненных в 2012-2020 годах по тематике Федерального агентства по рыболовству «Разработка мехатронного комплекса первичной обработки рыбы для предприятий малого и среднего бизнеса».

**Цель и задачи диссертационной работы.** Цель работы - развитие научно-теоретических основ процессов первичной обработки рыбы резанием, разработка модульных конструкций, устройств управления и рекомендаций по проектированию высокоэффективных технологических машин, обеспечивающих ресурсосбережение и высокое качество готовых рыбных продуктов.

Для достижения цели решались следующие основные **задачи**:

1. Определение структурно-реологических свойств рыбного сырья как объекта механической обработки и обоснование формализованной модели, описывающей поведение мышечной ткани рыбы при внешнем воздействии.

2. Разработка комплекса математических моделей, описывающих основные зависимости сил нормальных контактных давлений на режущий орган от режимных параметров процесса и конструктивных характеристик ножа при нормальном резании мышечной ткани рыбы.

3. Создание комплекса математических описаний, характеризующих основные зависимости сил вредных сопротивлений при раздвижении гранями ножа мышечной ткани рыбы от режимных и конструктивных параметров режущего приспособления.

4. Разработка аналитического подхода к оптимизации формы профиля режущего органа с целью минимизации сил вредных сопротивлений, определение оптимальных значений угла заточки ножа.

5. Создание комплекса математических моделей, описывающих основные зависимости сил полезных сопротивлений движению режущей кромки при разрушении мышечных волокон мяса рыбы, определение влияния режимов разрушения на качество поверхности среза.

6. Формулировка и обоснование научных принципов повышения эффективности процесса резания рыбы за счет косоугольного и скользящего резания, а также при использовании дискового ножа.

7. Проведение комплексных экспериментальных исследований процесса резания мышечной ткани рыбы при различных режимных параметрах и конструктивных характеристиках режущих органов, определение адекватности аналитических моделей, разработка регрессионных моделей процесса резания рыбного сырья.

8. Формулировка концептуальных подходов к созданию высокоэффективного рыбоперерабатывающего оборудования на основе методов и средств мехатроники, а также технических систем для измерения морфометрических параметров рыбы и автоматической настройки рабочих органов.

9. Системное проектирование модульных конструкций мехатронных машин для обезглавливания, филетирования, потрошения, зачистки, порционирования, ориентирования, сортировки и загрузки рыбного сырья, а также устройств для сбора морфометрической информации и управления исполнительными органами.

10. Осуществление промышленной апробации и коммерциализации разработанных модульных конструкций мехатронных машин для первичной обработки рыбы с технико-экономическим обоснованием эффективности внедрения в рыбоперерабатывающее производство, а также внедрение результатов работы в вузовском учебном и научном процессе.

**Научная концепция работы:** разработка и научное обеспечение подходов и методов ресурсосбережения при первичной обработке рыбы на основе комплексного анализа основных закономерностей процесса резания рыбного сырья с учетом физико-механических свойств материала; разработка концептуального подхода к повышению эффективности и конкурентоспособности рыбоперерабатывающего оборудования на основе мехатроники; разработка перспективных модульных конструкций мехатронных машин для первичной обработки рыбы, обеспечивающих экономию материальных и энергетических ресурсов, а также высокое качество рыбных продуктов.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

– результаты теоретических и экспериментальных исследований структурно-реологических свойств рыбного сырья как объекта первичной обработки;

– комплекс математических моделей сил нормальных контактных давлений на грани режущих органов с различной геометрией, моделей влияния режимных параметров и геометрии ножа на обратную ползучесть материала, моделей сил сопротивления и деформационных сил трения ножей с различной геометрией, модели влияния параметров шероховатости граней режущего органа на силы трения;

– комплекс моделей сил вредных сопротивлений при резании ножами с криволинейными гранями и результаты теоретических исследований по оптимизации геометрии режущего органа в соответствии с критериями минимизации сил вредных сопротивлений;

– комплекс моделей сил полезных сопротивлений и результаты теоретических исследований влияния режимов разрушения волокон мышечной ткани на качество поверхности среза;

– обоснование принципов повышения эффективности процесса резания рыбы за счет применения дисковых ножей и ножей с наклонной кромкой;

– результаты экспериментальных исследований основных закономерностей процесса резания мышечной ткани рыбы струнными и пластинчатыми ножами;

– методологический подход к созданию эффективной модульной системы мехатронных машин для первичной обработки рыбы.

**Научная новизна.** Разработан концептуальный подход в создании высокоэффективного модульного оборудования для первичной обработки различных промысловых видов рыб, направленный на экономное использование сырьевых и энергетических ресурсов, что достигается моделированием процесса резания, оптимизацией режущих органов и разработкой перспективных конструкций мехатронных машин, обеспечивающих повышение качества готовых продуктов.

Выявлены, сформулированы и описаны основные закономерности вязкоупругого поведения рыбного сырья при различных условиях нагружения и деформации с экспериментальным подтверждением трехэлементной реологической модели мышечной ткани рыбы. Экспериментально определены основные реологические константы ряда промысловых видов рыб, предложены математические уравнения, адекватно описывающие вязкоупругие свойства обрабатываемого материала.

Разработан комплекс математических описаний процесса резания рыбы: математические модели сил нормальных контактных давлений на грани режущих органов с различной геометрией; модели влияния режимных параметров и геометрии ножа на обратную ползучесть материала; модели сил сопротивления формы ножей с различной геометрией; модели деформационных сил трения; модели сил вредных сопротивлений, действующих на криволинейные грани лезвия; модели влияния параметров шероховатости граней режущего инструмента на силы трения; модели сил полезных сопротивлений.

Определены основные закономерности процесса резания и раскрыто влияние на указанные силы структурно-реологических свойств мышечной ткани рыбы, скорости резания, углов заточки ножа, формы профиля инструмента, толщины лезвия, остроты режущей кромки. Установлено наличие оптимальных углов заточки ножа по критериям минимальных сил вредных сопротивлений, а также оптимальной минимально допустимой остроты кромки и толщины лезвия, разработаны математические модели для расчета их значений.

Обоснованы принципы повышения эффективности процесса резания рыбы за счет скользящего движения режущей кромки рабочего органа и применения дискового ножа, определены силы вредных и полезных сопротивлений при наклонном резании и резании дисковым ножом. Разработанные аналитические модели сил сопротивлений экспериментально апробированы, получены эмпирические математические модели зависимостей указанных сил от скорости обработки, толщины ножа, температуры мышечной ткани рыбы и угла заточки лезвия, а также получены экспериментальные значения оптимального угла заточки. Установлено влияние на качество поверхности среза реологических свойств материала и режимных параметров обработки. Разработаны математические модели для определения работы объемного разрушения волокон мышечной ткани рыбы.

Научная новизна разработанных технических решений подтверждена 27 патентами Российской Федерации.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Комплекс теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в условиях лабораторий и промышленного производства, результаты математического моделирования, а также анализ технического уровня технологического оборудования для первичной обработки рыбы (свидетельство Роспатента о регистрации базы данных № 2016620836) позволили разработать концептуальный подход к созданию модульной системы конкурентоспособных рыбоперерабатывающих машин на основе мехатроники.

С целью повышения эффективности процесса обезглавливания рыбы разработаны мехатронные устройства для рационального отсекаания голов у рыб (пат. РФ № 2320177, 2487545, 2573362). Спроектированы оригинальные конструкции мехатронных машин для потрошения и зачистки, обеспечивающие экономию мяса рыбы при разделывании (пат. РФ № 2571905, 2599620, 2599623). С целью увеличения выхода готового продукта предложены филетировочные машины с ленточными быстроходными ножами и автоматической настройкой рабочих органов (пат. РФ № 2320178, 2626138).

Развиты положения по ресурсосбережению при резке рыбных продуктов, которые реализованы в оригинальных конструкциях мехатронных машин для порционирования и измельчения (пат. РФ № 2328123, 2453120, 2599622, 2617576, 2635380, 2638536, 2671900, 2729351). Предложены конструкции устройств для снятия чешуи с рыбы и обесшкуривания с целью получения филе высокого качества (пат. РФ № 2328123, 2425572). Расширены возможности ресурсосбережения при первичной обработке рыбы за счет эффективной сортировки, поштучного разделения, ориентирования и загрузки сырья в разделочно-филетировочные машины (пат. РФ № 2363162, 2453120, 2628797, 2645977, 2645979, 2645974, 2649340). С целью сохранения качества продукции и снижения повреждаемости сырья разработана мехатронная машина для мойки рыбы (пат. РФ № 2601596). Разработана система ресурсосберегающего управления рыбоперерабатывающим оборудованием (пат. РФ на полезную модель № 60312), направленная на повышение эффективности процессов первичной обработки.

Созданы опытные образцы мехатронных модулей разделывания, потрошения и филетирования рыбы, прошедшие заводские производственно-технологические испытания в ОАО НПО «Рыбтехцентр» (г. Калининград), ООО «ПК Пищевая инженерия» (г. Пионерский Калининградской области), ООО «Судорыбтехмаш» (г. Калининград), подтвержденные соответствующими актами.

Внедрено в серийном производстве ООО «ПК Пищевая инженерия» (г. Пионерский Калининградской области) следующее технологическое оборудование рыбоперерабатывающей отрасли: машина порционирующая, машина для сортировки рыбы, а также машина для мойки рыбы, что подтверждено соответствующим актом.

Разработан и внедрен в производство промышленный образец видеокomпьютерного модуля, обеспечивающий надежное лазерное измерение

морфометрических параметров промысловых рыб при первичной обработке, что подтверждено соответствующим актом. Разработано программное обеспечение модуля (свидетельство Роспатента о регистрации программы для ЭВМ № 2017611141), обеспечивающее управление указанным модулем, формирование трехмерной модели рыбы и расчет основных морфометрических параметров для ресурсосберегающей обработки сырья.

Проданы лицензии (договоры № РД 0094735 от 14.02.2012 г., № РД 0321989 от 14.01.2020 г., № РД 0338442 от 13.08.2020 г.) на право использования интеллектуальной собственности предприятиям ОАО «Научно-производственное объединение «Рыбтехцентр», ООО «ПК Пищевая инженерия», ООО «Мехатроника» по патентам РФ на изобретение № 2425572, 2638536, 2671900.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» на старших курсах подготовки бакалавров и магистров в качестве материалов для курсового проектирования и выпускных квалификационных работ. Разработанное на основе результатов диссертационной работы учебное пособие в 2019 году удостоено диплома Всероссийского конкурса Российской инженерной академии им. Первопечатника Ивана Федорова.

**Методология и методы научного исследования.** Методологическая база исследования основана на использовании комплекса теоретических методов познания: анализа, синтеза, абстрагирования, формализации, моделирования, подобия и других, а также эмпирических методов: измерение, эксперимент, сравнение, наблюдение. В качестве теоретико-методологической базы выступили труды отечественных и зарубежных исследователей в области реологии, теории вязкоупругости, теории резания, теории разрушения, теории измельчения, прикладной механики, механики сплошной среды, трибологии, теории технологического потока, технологии пищевых производств, теории автоматического управления, теории графов, теории распознавания образов.

**Соответствие темы диссертации паспорту научной специальности.** Диссертационное исследование соответствует п. 1, 2, 3, 4 паспорта научной специальности 05.18.12 - «Процессы и аппараты пищевых производств».

**Степень достоверности работы.** Научные положения, изложенные в диссертационной работе, рекомендации и выводы основываются на фундаментальных физических законах и не противоречат им. Результаты моделирования хорошо сочетаются с известными теоретическими концепциями, принятыми в изучаемой области научного исследования. Достоверность аналитических исследований и эмпирических результатов основана на использовании апробированных методов научного познания. Полученные результаты расчетов по математическим моделям подвергнуты тщательной экспериментальной проверке. Степень достоверности результатов диссертационной работы подтверждается глубокой проработкой литературных данных по теме исследования, обоснованием необходимого количества опытов, применением современных инструментальных методов

анализа, публикацией основных положений диссертации в России и за рубежом.

**Апробация результатов.** Материалы и отдельные результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались на международных, национальных, межрегиональных научных, научно-технических и научно-практических конференциях, симпозиумах, форумах и семинарах: (Ярославль, 2007 г.); (Москва, 2008, 2012, 2015, 2018 г.); (Калининград, 2003-2019 г.); (Волгоград, 2010 г.); (Воронеж, 2011, 2012, 2014-2018, 2020 г.); (Улан-Удэ, 2012, 2018 г.); (Уфа; 2014 г.); (Владивосток; 2014 г.); (Петропавловск-Камчатский, 2015, 2017 г.); (Астрахань, 2018, 2019 г.); (Санкт-Петербург, 2019-2021 г.); (Симферополь, 2019 г.); (Керчь, 2020 г.); (Кошалин, 2012 г.); (Люблин, 2014 г.); (Бяловежа, 2016 г.); (Устроне-Морске, 2018 г.) а также на отчетных научных конференциях ФГБОУ ВО «КГТУ» (Калининград, 2000-2020 г.).

Инновационный проект мехатронного комплекса для порционирования пищевых продуктов, выполненный с использованием результатов диссертационной работы, в 2012 году награжден Премией Калининградской области за достижения в области науки, технологий и инновационной деятельности «Эврика». По результатам инновационной деятельности автор является лауреатом Всероссийского конкурса «Инженер года» Российского союза научных и инженерных общественных объединений в 2016 и 2018 годах в номинации «Пищевая промышленность».

За добросовестное исполнение служебных обязанностей, подготовку квалифицированных специалистов и безупречную профессиональную деятельность автор награжден благодарностью Федерального агентства по рыболовству Российской Федерации. Наряду с этим, автор награжден благодарностью Министерства экономического развития, промышленности и торговли Калининградской области за вклад в инновационное развитие региона.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 198 работ, в том числе 2 монографии (в соавторстве), 6 учебных пособий (в соавторстве), 6 статей в журналах, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, 27 статей в журналах, рекомендованных ВАК России, 27 патентов РФ, 1 свидетельство Роспатента о регистрации программы для ЭВМ, 1 свидетельство Роспатента о регистрации базы данных.

**Структура и объем работы.** Основной текст диссертации изложен на 637 страницах, включающих: введение, 8 глав аналитического и экспериментального материала, заключение, библиографический список из 540 наименований, в том числе 60 - иностранных авторов. Приведено 262 рисунка, 4 таблицы. Приложения к диссертации представлены на 225 страницах и содержат 83 рисунка, 14 таблиц.

**Личное участие автора.** Диссертационная работа является обобщением научных исследований, проведенных в 2008-2020 годах лично автором и при его непосредственном участии в качестве ответственного исполнителя госбюджетных научно-исследовательских работ, а также прикладных

научных исследований и экспериментальных разработок. Автором разработана техническая документация, проведена работа по патентованию разработок, апробации и внедрению разработанных машинных технологий в производство.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** охарактеризовано современное состояние рыбоперерабатывающих производств, обоснованы актуальность и уровень разработанности темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

**В первой главе «Современное состояние техники первичной обработки рыбных ресурсов»** систематизированы литературные данные по современному состоянию техники первичной обработки рыбы. Проанализировано использование сырьевых ресурсов в рыбной промышленности, рассмотрены свойства рыбного сырья как объекта первичной обработки. Выполнен анализ технических систем первичной обработки рыбы с определением решающих недостатков, ограничивающих ресурсосбережение. Показано, что базовым процессом первичной обработки рыбы является резание. На основании проведенного обзора и анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная концепция, представлена программно-целевая модель исследования, раскрывающая последовательность этапов выполнения работы при реализации поставленных цели и задач, определены пути и методы решения научной проблемы.

**Во второй главе «Анализ физико-механических свойств рыбы»** проведена системная оценка рыбного сырья как объекта первичной обработки. Рассмотрены структурные аспекты строения мышечной ткани гидробионтов. Проанализированы способы и устройства для исследования реологических свойств рыб, обоснована инструментальная методика определения физико-механических характеристик сырья с учетом морфометрических зависимостей его внутривидового подобию.

Излагаются результаты исследований зависимости угла прогиба тушек от продолжительности хранения сырья с момента вылова и температурных условий окружающей среды. Проведены экспериментальные испытания мышечной ткани промыслового сырья на прямую ползучесть, релаксацию и обратную ползучесть. Установлено, что мышечная ткань рыбы до разрушения проявляет ограниченное течение под нагрузкой, релаксирует при постоянной нагрузке до равновесного состояния, практически полностью восстанавливается при полной разгрузке. Приводятся новые данные, показывающие, что результатам экспериментов приближенно соответствует трехэлементная реологическая модель Максвелла-Томсона (стандартное вязкоупругое тело). Обсуждаются также результаты идентификации математических моделей, описывающих зависимости напряжения от деформации и кинетику деформации мышечной ткани рыбы, определены значения реологических параметров промысловых рыб.

В третьей главе «Моделирование сил вредных сопротивлений при резании рыбы» проанализирована система сил полезных и вредных сопротивлений, действующих на нож со стороны мышечной ткани при резании рыбы: сил нормальных контактных давлений  $P_2, P_3$ , силы сопротивления формы  $F_1$ , деформационных сил трения  $F_2, F_3$ , силы полезного сопротивления  $P_1$ , движущей силы резания  $Z$  (рис. 1).

Математическое моделирование процесса резания рабочими органами с различной геометрией базируется на дифференциальном уравнении состояния вязкоупругого материала с соответствующими граничными и временными условиями:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_0 + E_1}{\eta} \cdot \sigma = \frac{d\varepsilon}{dt} \cdot E_0 + \frac{E_0 E_1}{\eta} \cdot \varepsilon. \quad (1)$$

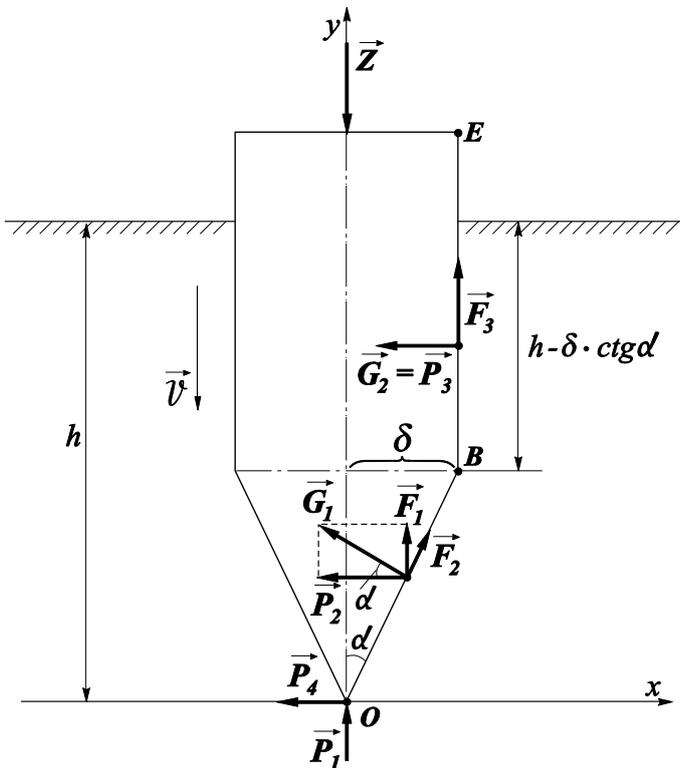


Рис. 1. Система сил полезных и вредных сопротивлений, действующих на нож при резании рыбы

Рассмотрен процесс движения элементарного ножа с одной кромкой в мышечной ткани рыбы, находящейся в условиях стесненного сжатия (рис. 2). На основе решения дифференциальных уравнений состояния материала при различных условиях деформирования разработаны математические модели, описывающие распределения нормальных контактных давлений на передние наклонные и боковые грани однокромочного ножа с прямым обухом, а также на задние наклонные грани двухкромочного (обоюдоострого) режущего органа. Предложен комплекс математических моделей для расчета соответствующих размерных и безразмерных сил нормальных контактных давлений, действующих на ножи.

Исследование указанных сил показало, что при движении ножа в вязкоупругом материале происходят частично необратимые преобразования энергии. При раздвижении материала передними наклонными гранями механическая энергия движения ножа преобразуется в вязкоупругую энергию деформированной мышечной ткани. В процессе релаксации напряжений вязкоупругая энергия превращается в тепловой вид.

Разработаны математические модели, описывающие процесс обратной ползучести материала и образования в материале присоединенной каверны (рис. 2). Получен комплекс математических моделей для расчета размерных и безразмерных сил сопротивления формы ножей с различной геометрией.



с чем затраты на преодоление силы сопротивления формы существенно снижаются. В этом случае выражение для соответствующей силы имеет вид:

$$\hat{F}_1 = \frac{l_k \cdot \xi \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha}{l} \cdot \left\{ \frac{h_m^2}{2} + \frac{\xi \cdot \eta \cdot v}{E_1^2} \cdot \left( h_m + \frac{1 - \exp(k \cdot h_m)}{k} \right) \right\} - \quad (5)$$

$$- \frac{l_k \cdot \xi \cdot \operatorname{tg}^2 \beta}{l} \cdot \left\{ \frac{h_\beta \cdot (\tau - 1) - \frac{e_{01}}{k} + L}{k} \cdot (\exp(k \cdot [y_G - L]) - 1) + \left( h_\beta + \frac{e_{01}}{k} \right) \cdot (y_G - L) - \frac{y_G^2 - L^2}{2} \right\}.$$

Шероховатость граней ножа при определении деформационных сил трения учитывается на микроскопическом масштабном уровне (рис. 3). Это позволило установить основные закономерности изменения суммарной силы вредных сопротивлений от скорости резания, реологии рыбы, геометрии ножей, а также параметров шероховатости граней ножа (высоты, периода, формы неровностей).

Предложены математические модели регулярного микрорельефа поверхности режущего органа неровностей в виде следующих периодических функций с одной, двумя и тремя гармониками соответственно:

$$f_1(x) = A \cdot \cos^2 \left( \frac{\pi \cdot x}{S_0} + \bar{\psi} \right); \quad (6) \quad f_2(x) = A \cdot \cos^4 \left( \frac{\pi \cdot x}{S_0} + \bar{\psi} \right); \quad (7)$$

$$f_3(x) = \frac{A}{2} \cdot \left\{ \cos^2 \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{S_0} + \bar{\psi} \right) + \cos^3 \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot x}{S_0} + \bar{\psi} \right) \right\}. \quad (8)$$

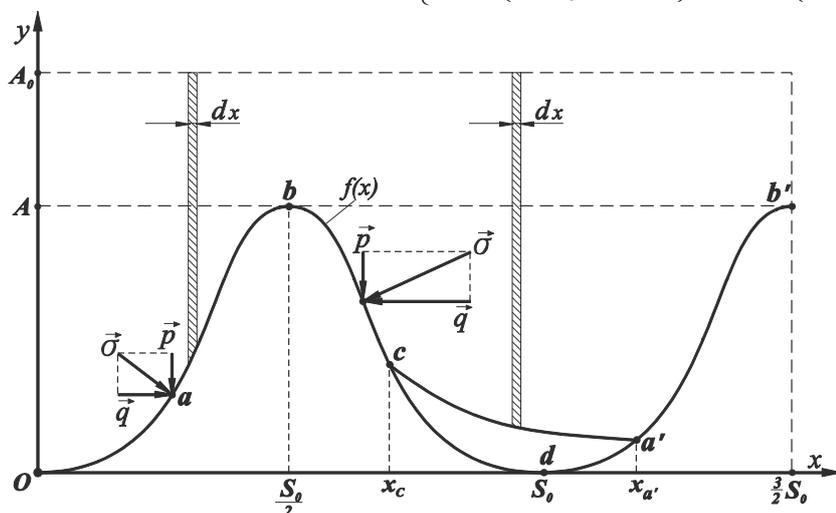


Рис. 3. Схема скольжения микровыступа шероховатой поверхности ножа по мышечной ткани рыбы

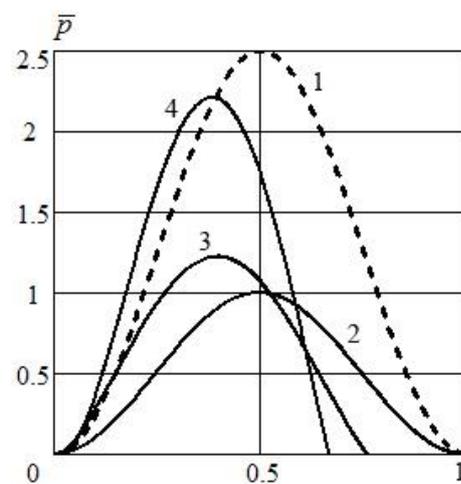


Рис. 4. Распределение безразмерных нормальных контактных давлений над микровыступом:

1 — форма регулярного микрорельефа поверхности грани в безразмерном виде  $f_1(x)$ ; 2 — давление при безразмерной скорости скольжения  $\bar{u} = 0,001$ ; 3 —  $\bar{u} = 0,03$ ; 4 —  $\bar{u} = 0,12$

В поверхностном слое мышечной ткани рыбы высотой  $A_0$  вследствие деформаций материала возникают местные напряжения (рис. 3) и соответствующие распределения встречного контактного давления  $q$ , нормального контактного давления  $p$  при скольжении микровыступов высотой  $A$  (рис. 4).

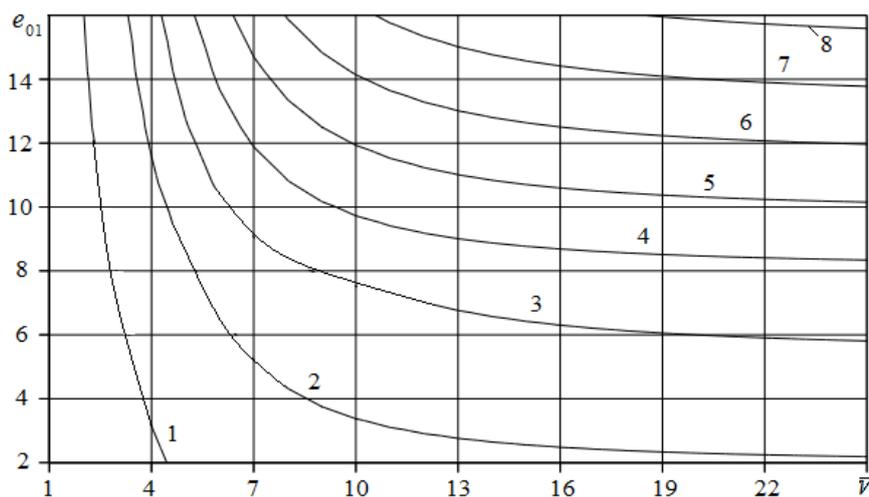


Рис. 5. Зависимости безразмерной силы сопротивления формы однокромочного ножа от безразмерной скорости резания  $\bar{v}$  и меры эластичности мышечной ткани рыбы  $e_{01}$

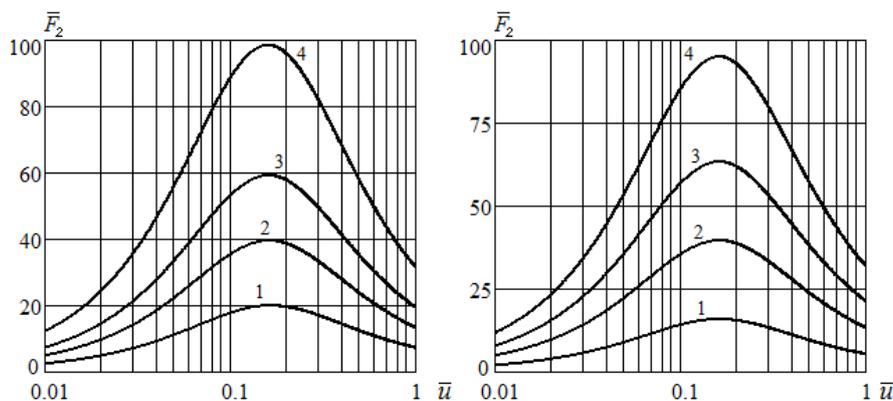


Рис. 6. Зависимости безразмерной силы трения от безразмерной скорости (шкала скорости - логарифмическая):

$a$  – при различных значениях безразмерной длины грани  $\bar{x}_B$

( $e_{01} = 5$ ): 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40;  $b$  – при различных

значениях меры эластичности  $e_{01}$  ( $\bar{x}_B = 20$ ):

1 – 2; 2 – 5; 3 – 8; 4 – 12

вания обосновано, что наиболее рациональным режущим органом является двухкромочный (ромбовидный) нож без боковых граней.

**В четвертой главе «Оптимизация профиля ножа для резания рыбы»** разработана математическая модель криволинейного профиля ножа в виде многочлена третьей степени. Предложенная модель позволяет описывать различные формы профиля режущих органов: выпуклую фаску (линзовидная заточка), вогнутую (бритвенная заточка) и прямую. На основе энергетического подхода, использованного в третьей главе, выполнено математическое моделирование силы сопротивления формы ножа с криволинейным профилем. Установлены зависимости безразмерной силы сопротивления формы от геометрии фаски режущего органа, толщины лезвия, а также скорости резания.

Проведены постановка и решение оптимизационной задачи по определению оптимального угла заточки ножа на основе критерия минимальной безразмерной силы сопротивления формы. Установлены

Зависимости силы сопротивления формы от безразмерной скорости и меры эластичности рыбы показаны на рис. 5.

На основе уравнений состояния вязкоупругого материала получен комплекс математических моделей для определения размерных и безразмерных деформационных сил трения при трех различных видах шероховатости граней  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ ,  $f_3(x)$  (рис. 6).

Определены деформационные составляющие коэффициента трения ножей при различных параметрах процесса резания рыб и конструктивного оформления ножей. В результате моделиро-

основные зависимости указанного оптимального угла от безразмерной скорости резания, угла сопряжения граней, толщины ножа и реологии рыбы.

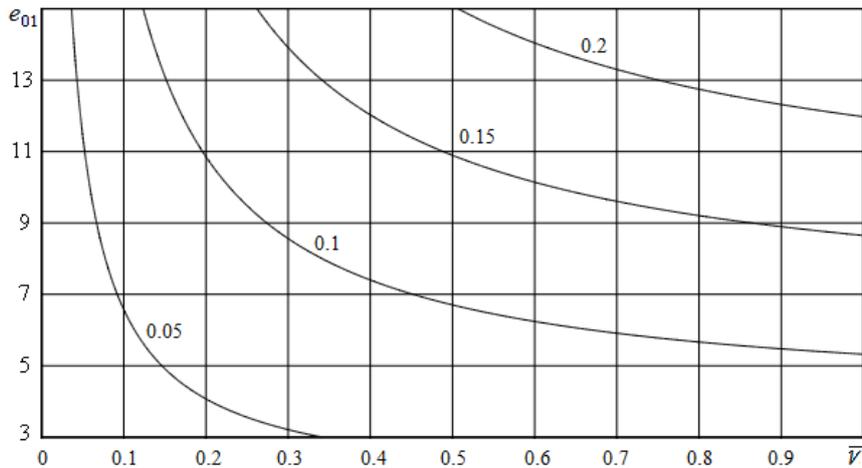


Рис. 7. Зависимости безразмерной силы сопротивления формы криволинейных передних граней от безразмерной скорости ножа  $\bar{v}$  и меры эластичности материала  $e_{01}$

$$(\alpha = 30^\circ; \theta = 10^\circ; \bar{\delta} = 0,2)$$

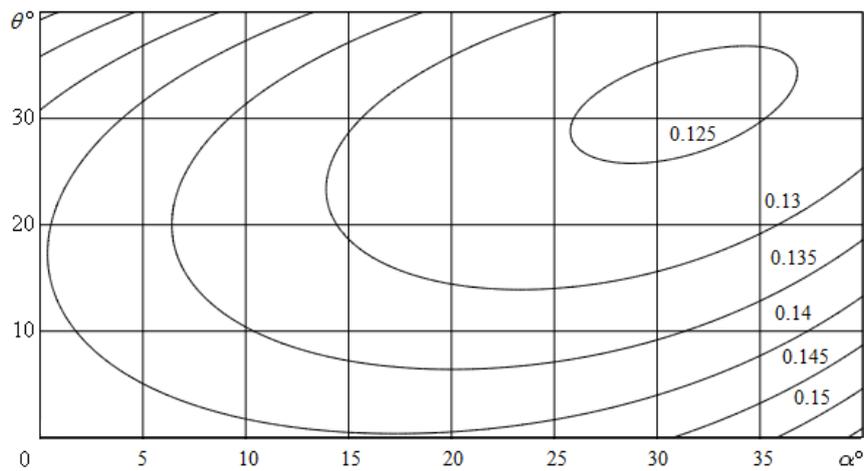


Рис. 8. Зависимости безразмерной силы сопротивления формы криволинейной передней грани от угла заточки ножа  $\alpha$  и угла сопряжения граней  $\theta$  (угла перехода криволинейной фаски в прямую боковую грань) ( $\bar{\delta} = 0,3; \bar{v} = 0,25; e_{01} = 5$ )

Также проведены постановка и решение оптимизационной задачи по определению оптимального угла заточки и оптимальной толщины ножа на основе критерия минимальной безразмерной деформационной силы трения. Установлены основные зависимости указанных конструктивных параметров ножа от безразмерной скорости резания, выбранного угла сопряжения и реологии рыбы. Определены области наилучших значений угла заточки ножа, в которых силы вредных сопротивлений минимизируются: для промысловых рыб это диапазон 17-22°.

**В пятой главе «Моделирование сил полезных сопротивлений при резании рыбы»** проанализирован процесс разрушения мышечной ткани рыбы при резании. Мышечное волокно материала при разрушении интерпретировано как вязкоупругий брус, испытывающий сложные деформации поперечного изгиба и продольного растяжения (рис. 9). Рассмотрена сила полезных сопротивлений и её составляющие, действующие на нож со стороны волокон мышечной ткани при их деформировании и разрушении. В качестве остроты ножа принят радиус скругления режущей кромки лезвия.

Выполнено математическое моделирование деформационной силы трения ножа с криволинейным профилем. Установлены зависимости указанной силы в безразмерном виде от скорости, геометрии ножа и реологии сырья (рис. 7, 8).

На основе дифференциальных уравнений состояния вязкоупругого материала разработан комплекс математических моделей для определения размерной и безразмерной сил полезного сопротивления, возникающих при резании сырья с различными структурно-реологическими свойствами.

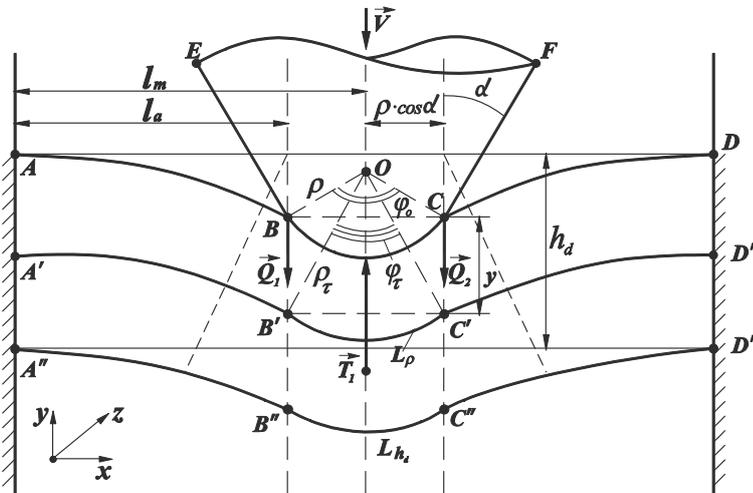


Рис. 9. Схема деформирования вязкоупругого слоя материала режущей кромкой ножа ( $T_1 = Q_1 + Q_2$ )

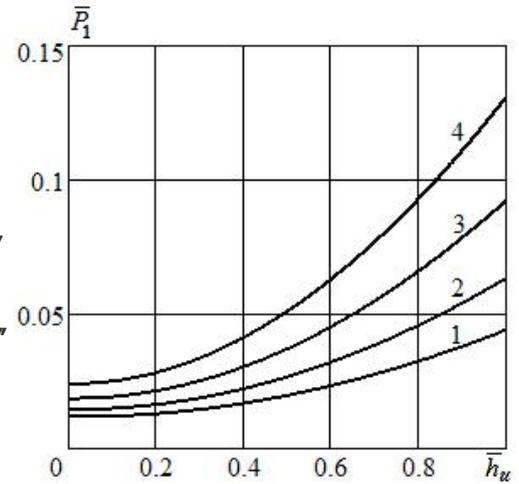


Рис. 10. Зависимости безразмерной силы полезного сопротивления от безразмерной глубины погружения ножа при различных значениях меры эластичности  $e_{01}$ : 1 – 3; 2 – 5; 3 – 8; 4 – 12

Установлены основные закономерности изменения силы полезного сопротивления от скорости резания, реологических характеристик мышечной ткани рыбы, а также геометрии ножа (рис. 10, 11). Показано, что вклад различных составляющих в суммарную силу полезного сопротивления обусловлен структурно-реологическими особенностями сырья и режимами разрушения волокон.

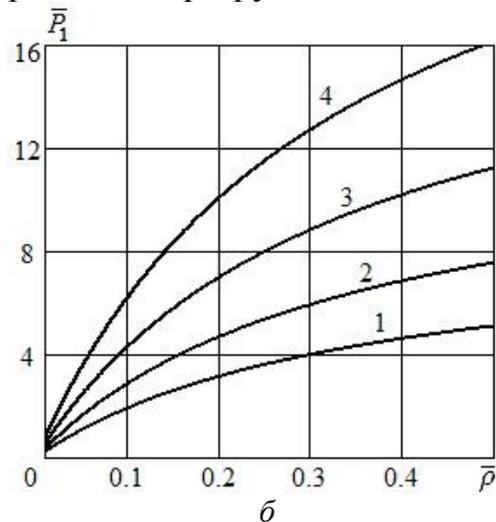
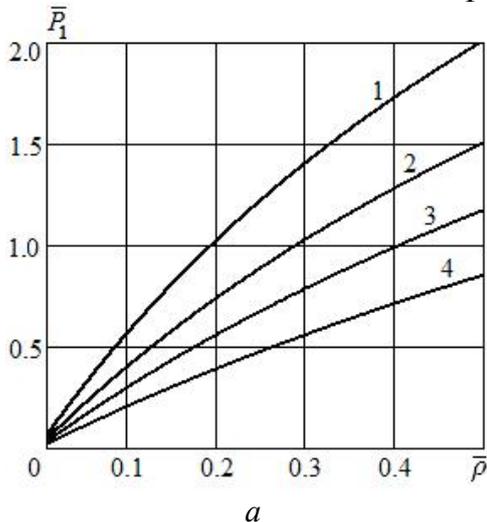


Рис. 11. Зависимости безразмерной силы полезного сопротивления от безразмерной остроты ножа  $\bar{\rho}$ : а – при различных значениях безразмерной ширины деформируемого слоя  $\bar{l}_a$ : 1 – 1; 2 – 1,2; 3 – 1,4; 4 – 1,7; б – при различных значениях меры эластичности материала  $e_{01}$ : 1 – 3; 2 – 5; 3 – 8; 4 – 12

Общая сила полезного сопротивления является векторной суммой составляющих, обусловленных изгибом мышечных волокон под режущей кромкой и за ее пределами, а также растяжением волокон. Показано, что в

зависимости от структурно-реологических свойств материала его разрушение может происходить либо за счет изгиба (поперечный излом), либо за счет растяжения слоев (продольный разрыв), что учитывается в математической модели при определении указанной максимальной силы:

$$\begin{aligned}
 P_1^{\max} = & \frac{\xi \cdot l_k}{2} \cdot \left\langle \frac{h_d^3}{l_a^3} \cdot \left( \frac{e_{01}}{k} \cdot \exp(k \cdot h_{cr}) + h_{cr} - \frac{e_{01}}{k} \right) + \right. \\
 & + \frac{h_d^3}{\rho^3 \cdot \cos^3 \alpha} \cdot \left( \frac{e_{01}}{k} \cdot \exp[k \cdot \rho \cdot (1 - \sin \alpha)] + \rho \cdot (1 - \sin \alpha) - \frac{e_{01}}{k} \right) + \\
 & + \frac{2 \cdot \rho \cdot \cos^2 \alpha}{(l_a + \rho \cdot \alpha_r)} \cdot \left\{ \frac{3}{5 \cdot l_a} \cdot \left( h_{cr}^2 - \frac{2 \cdot e_{01}}{k} \cdot h_{cr} - \frac{2 \cdot e_{01}}{k^2} \right) + \right. \\
 & \left. \left. + \exp(k \cdot h_{cr}) \cdot \left( \rho \cdot \frac{\rho \cdot \alpha_r^2 - 2 \cdot \rho \cdot \alpha_r \cdot \cos \alpha - l_a \cdot \cos \alpha}{(l_a + \rho \cdot \cos \alpha)} + \frac{6 \cdot e_{01}}{5 \cdot l_a \cdot k^2} + \rho \cdot \alpha_r \right) \right\} \right\rangle. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Вычислительные и натурные эксперименты демонстрируют, что силы полезных сопротивлений при резании дефростированного рыбного сырья обусловлены преимущественно деформациями продольного растяжения.

Также разработаны математические модели для определения размерной и безразмерной минимально допустимой остроты лезвия, при которой сохраняется прочность режущей кромки при разрушении структурных волокон продукта. Установлены зависимости безразмерной остроты от структурно-реологических свойств материала, конструктивных и прочностных характеристик ножа, угла боковой подачи и скорости резания.

Проведен анализ зависимости качества поверхности среза от скорости резания и реологических свойств рыбы. Дополнительно рассмотрены два режима разрушения волокна материала, определяющие качество продукта – вязкий разрыв и упругий вырыв. Получен комплекс математических моделей, позволяющих рассчитать интервалы времени наступления вязкого разрыва и упругого вырыва в зависимости от структурно-реологических свойств мышечной ткани и скорости её деформирования режущей кромкой. Разработаны модели для расчета удельной работы разрушения мышечных волокон.

**В шестой главе «Принципы повышения эффективности процесса резания рыбы»** сформулированы основные научные принципы повышения эффективности процесса резания рыбы. Получены выражения для коэффициентов эффективности режущих органов с различной геометрией. Разработаны математические модели сил вредных сопротивлений при косоугольном и скользящем резании. Исследованы зависимости фактического угла резания от угла наклона и скорости скольжения режущей кромки при различных конструктивных углах заточки.

Для режима косоугольного резания установлены зависимости силы сопротивления формы от скорости резания при различных углах наклона режущей кромки и конструктивных углах заточки. Для режима скользящего

резания также установлены зависимости силы сопротивления формы от скорости подачи при различных значениях скорости скольжения и конструктивных углах заточки ножа (рис. 12). Выражение для силы сопротивления формы в случае наклонного резания из (4) приобретает вид:

$$F_1^t = \frac{\xi \cdot l_k}{l} \cdot \left\{ \frac{\left( 1 - \exp \left[ \frac{k \cdot \delta}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \gamma_H} \right] \right) \cdot \xi \cdot \eta \cdot v \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \cos^2 \gamma_H}{k \cdot E_1^2} + \frac{\delta \cdot \xi \cdot \eta \cdot v \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \gamma_H}{E_1^2} + \frac{\delta^2}{2} \right\}. \quad (10)$$

Выражение для силы сопротивления формы в случае скользящего резания представляется в следующем виде:

$$F_1^k = \frac{\xi \cdot l_k}{l} \cdot \left\{ - \left( 1 - \exp \left[ - \frac{(E_0 + E_1) \cdot \delta \cdot \sqrt{v_p^2 + v_o^2}}{\eta \cdot v_p^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right] \right) \cdot \frac{\xi \cdot \eta^2 \cdot v_p^4 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha}{E_1^2 \cdot (E_0 + E_1) \cdot (v_p^2 + v_o^2)} + \frac{\delta \cdot \xi \cdot \eta \cdot v_p^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{E_1^2 \cdot \sqrt{v_p^2 + v_o^2}} + \frac{\delta^2}{2} \right\}. \quad (11)$$

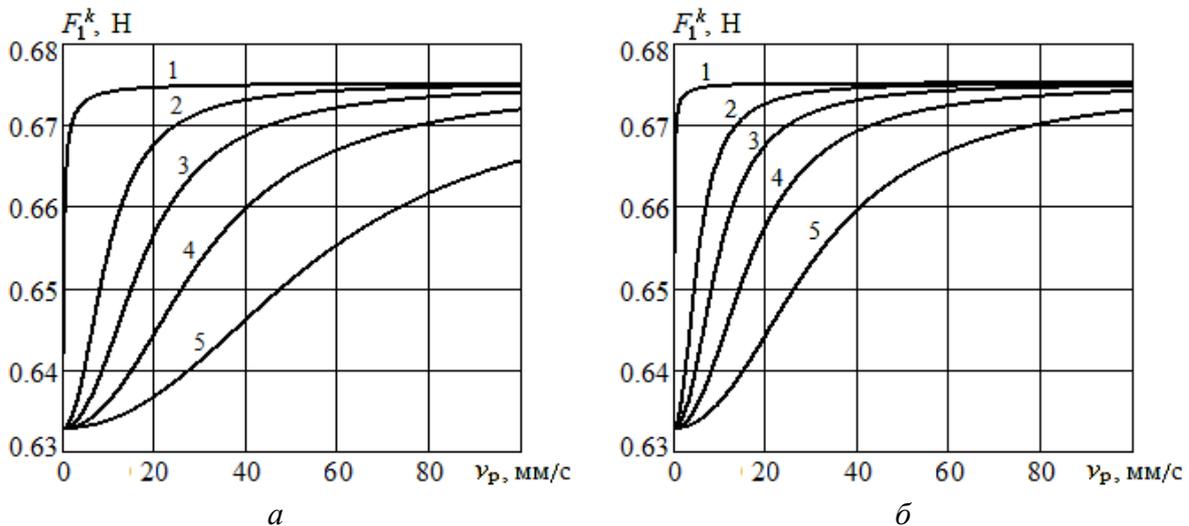


Рис. 12. Зависимости силы сопротивления формы ножа от скорости подачи при различных значениях скорости скольжения ( $E_0 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ;  $e_{01} = 15$ ;  $\delta = 3 \text{ мм}$ ): а – при  $\alpha = 10^\circ$ ; б – при  $\alpha = 30^\circ$ ; 1 –  $v_o = 0$ ; 2 –  $v_o = 0,3 \text{ м/с}$ ; 3 –  $v_o = 1 \text{ м/с}$ ; 4 –  $v_o = 3 \text{ м/с}$ ; 5 –  $v_o = 10 \text{ м/с}$

Численные эксперименты показали, что сила сопротивления формы снижается при повышении угла наклона режущей кромки, а также при увеличении скорости скольжения кромки ножа относительно материала. Однако основной вклад в сокращение энергетических затрат на резание вносится за счет трансформации остроты лезвия и снижения сил полезного сопротивления.

Установлены зависимости трансформированной безразмерной остроты ножа от угла наклона режущей кромки и скорости скольжения при различных значениях конструктивной остроты лезвия. Показано, что сила полезного сопротивления при косоугольном и скользящем резании значительно снижается по сравнению с нормальным рубящим резанием (рис. 13-15).

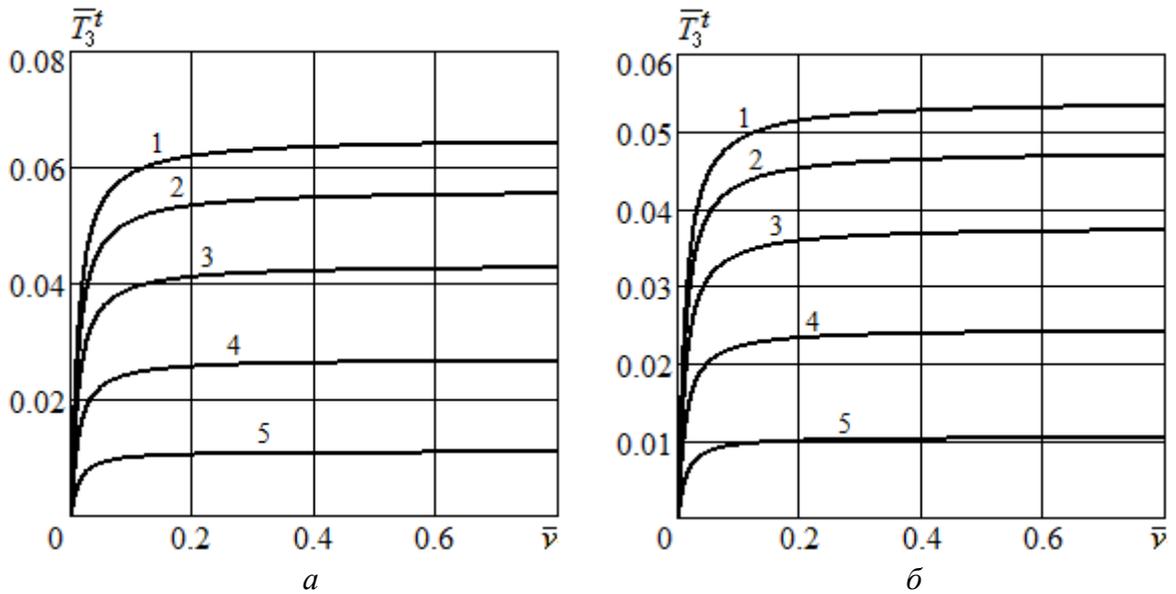


Рис. 13. Зависимости составляющей безразмерной силы полезного сопротивления от безразмерной скорости резания при различных углах наклона режущей кромки

( $\bar{\rho} = 0,2$ ;  $e_{01} = 5$ ): а – при  $\alpha = 5^\circ$ ; б – при  $\alpha = 10^\circ$ ;

1 –  $\gamma_n = 0^\circ$ ; 2 –  $\gamma_n = 20^\circ$ ; 3 –  $\gamma_n = 40^\circ$ ; 4 –  $\gamma_n = 60^\circ$ ; 5 –  $\gamma_n = 70^\circ$

Результаты численных экспериментов подтвердили, что при наклонном и скользящем резании сокращение энергетических затрат происходит преимущественно за счет снижения полезных сопротивлений, действующих на режущую кромку. Существенный рост эффективности ножа и снижение расхода энергии при резании рыбы с трансформацией угла заточки и остроты обосновывает целесообразность использования в рыбоперерабатывающем оборудовании соответствующего рабочего органа, а именно – быстроходного ленточного ножа, установленного под углом к направлению движения сырья.

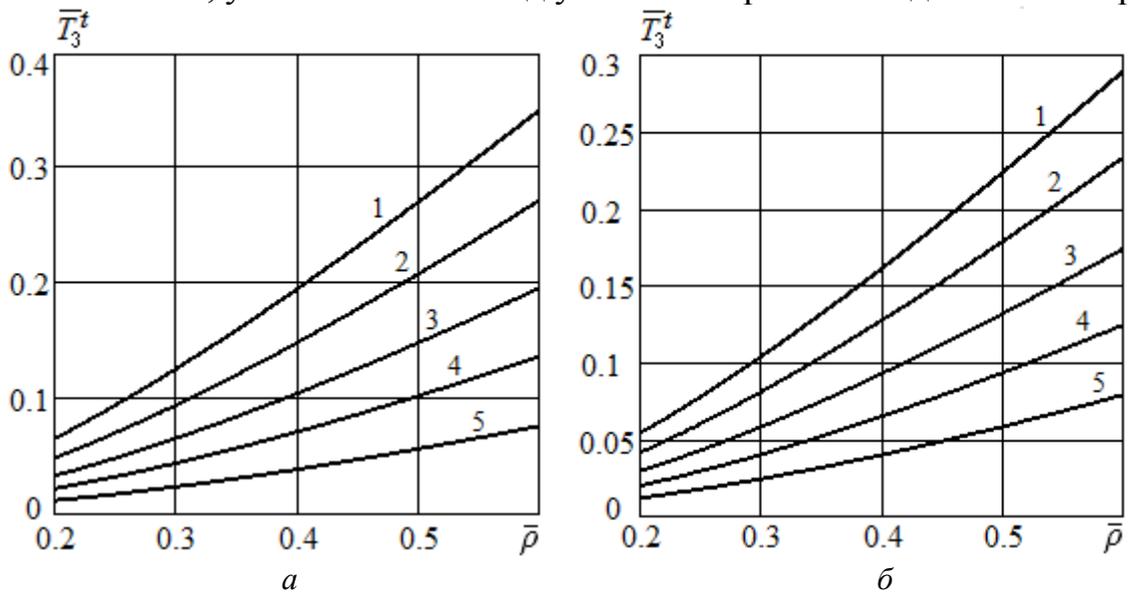


Рис. 14. Зависимости составляющей безразмерной силы полезного сопротивления от безразмерной конструктивной остроты ножа при различных углах наклона режущей кромки ( $\bar{v} = 5$ ;  $e_{01} = 5$ ): а – при  $\alpha = 5^\circ$ ; б – при  $\alpha = 10^\circ$ ; 1 –  $\gamma_n = 0^\circ$ ; 2 –  $\gamma_n = 30^\circ$ ;

3 –  $\gamma_n = 50^\circ$ ; 4 –  $\gamma_n = 60^\circ$ ; 5 –  $\gamma_n = 70^\circ$

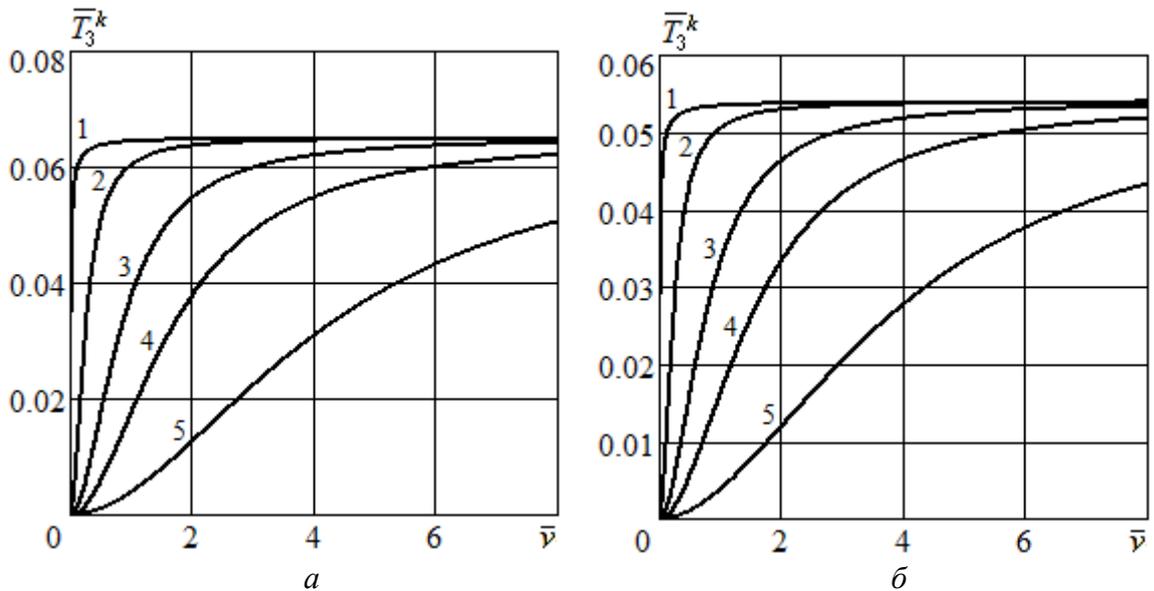


Рис. 15. Зависимости составляющей безразмерной силы полезного сопротивления от безразмерной скорости подачи при различных значениях безразмерной скорости скольжения ( $\bar{\rho} = 0,2$ ;  $e_{01} = 5$ ):  $a$  – при  $\alpha = 5^\circ$ ;  $b$  – при  $\alpha = 10^\circ$ ; 1 –  $\bar{v}_o = 0$ ; 2 –  $\bar{v}_o = 0,3$ ; 3 –  $\bar{v}_o = 1$ ; 4 –  $\bar{v}_o = 2$ ; 5 –  $\bar{v}_o = 5$

Исследован процесс резания рыбы дисковым ножом, сочетающим в себе положительные эффекты одновременной геометрической и кинематической трансформации формы профиля элементарного ножа. Определено дифференциальное уравнение (12) линии погружения элементарного ножа в материал в полярных координатах, получено выражение для коэффициента скольжения (13) и фактического угла резания дискового ножа (14):

$$\tilde{\rho}' = \tilde{\rho} \cdot \frac{\cos \varphi + \left( \frac{\cos ec \varphi}{\lambda} - ctg \varphi \right) \cdot \sin \varphi}{\left( \frac{\cos ec \varphi}{\lambda} - ctg \varphi \right) \cdot \cos \varphi - \sin \varphi}; \quad (12) \quad K_\gamma = tg \left[ arctg \left( \frac{\lambda \cdot \cos \varphi - 1}{\lambda \cdot \sin \varphi} \right) + \varphi \right]; \quad (13)$$

$$\alpha_\varphi = arctg \left( tg \alpha \cdot \cos \left[ arctg \left( \frac{\lambda \cdot \cos \varphi - 1}{\lambda \cdot \sin \varphi} \right) + \varphi \right] \right). \quad (14)$$

Линия погружения элементарного ножа в материал представляет собой плавную кривую линию, которая при больших значениях  $\lambda$  стремится к окружности режущей кромки ножа по мере его продвижения к нижней поверхности материала. Из результатов моделирования следует, что с увеличением параметра  $\lambda$  глубина погружения элементарного ножа в материал возрастает, что приводит к снижению коэффициента эффективности элементарного ножа вследствие роста вредных сопротивлений.

Исследованы скалярные поля изменения фактического угла резания, а также коэффициента скольжения элементарного ножа в зависимости от его угловой координаты (рис. 16, 17). Распределение данных полей позволяет конструктору выбрать месторасположение нарезаемого рыбного продукта в проектируемом устройстве так, чтобы оно наилучшим образом отвечало требованиям ресурсосбережения. На основе выражений для определения линий погружения элементарного ножа в материал разработаны

математические модели для расчета сил вредных сопротивлений, действующих на дисковый нож, а также их моментов относительно оси вращения ножа. Построены эпюры результирующей безразмерной силы сопротивления формы элементарного дискового ножа (рис. 18) и ее безразмерного момента (рис. 19).

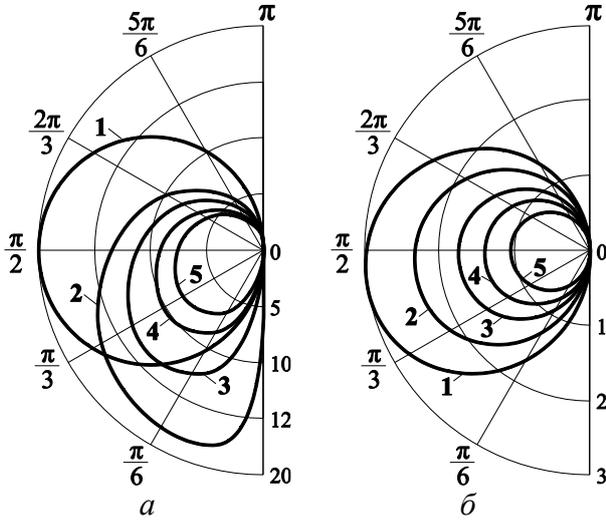


Рис. 16. Скалярное поле изменения фактического угла резания  $\alpha_\phi$  элементарного дискового ножа ( $\alpha = 20^\circ$ ) при различных  $\lambda$  :  
 а: 1 - 0; 2 - 1,1; 3 - 1,5; 4 - 2; 5 - 2,5;  
 б: 1 - 7; 2 - 9; 3 - 12; 4 - 15; 5 - 20

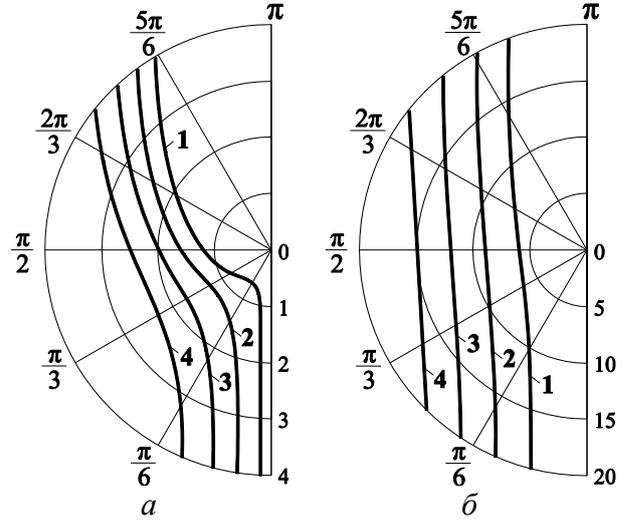


Рис. 17. Скалярное поле изменения коэффициента скольжения элементарного дискового ножа  $K_\gamma = \operatorname{tg} \gamma$  ( $\alpha = 20^\circ$ ) при различных  $\lambda$  :  
 а: 1 - 1,2; 2 - 1,6; 3 - 2; 4 - 2,5;  
 б: 1 - 6; 2 - 9; 3 - 12; 4 - 15

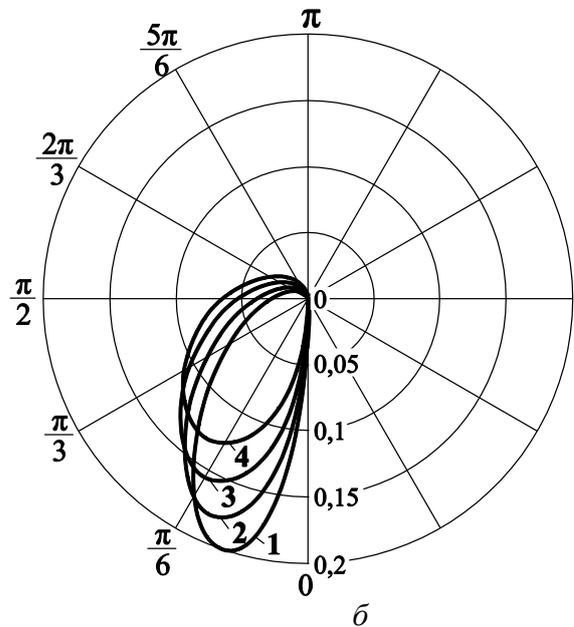
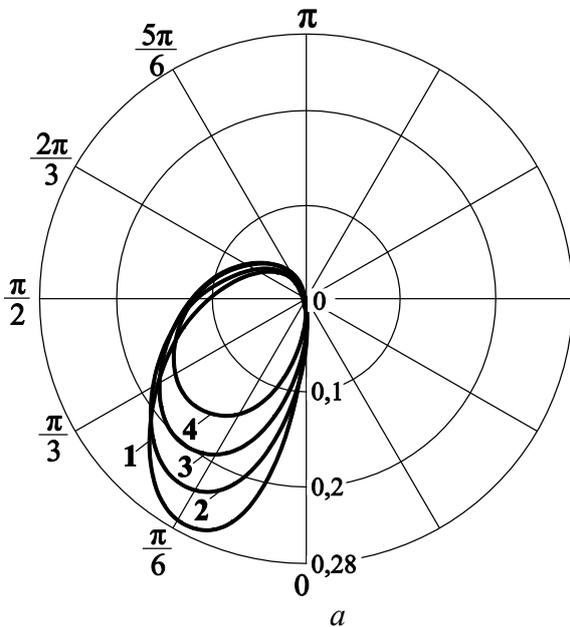


Рис. 18. Эпюры результирующей безразмерной силы сопротивления формы элементарного дискового ножа (а) и ее безразмерного момента (б)  
 ( $t_{\alpha\delta} = 0,12$  ;  $k = -10$  ;  $\varphi_H = 10^\circ$  ;  $e_{01} = 5$ ):  
 1 -  $\lambda = 1,5$  ; 2 -  $\lambda = 1,7$  ; 3 -  $\lambda = 2$  ; 4 -  $\lambda = 2,5$

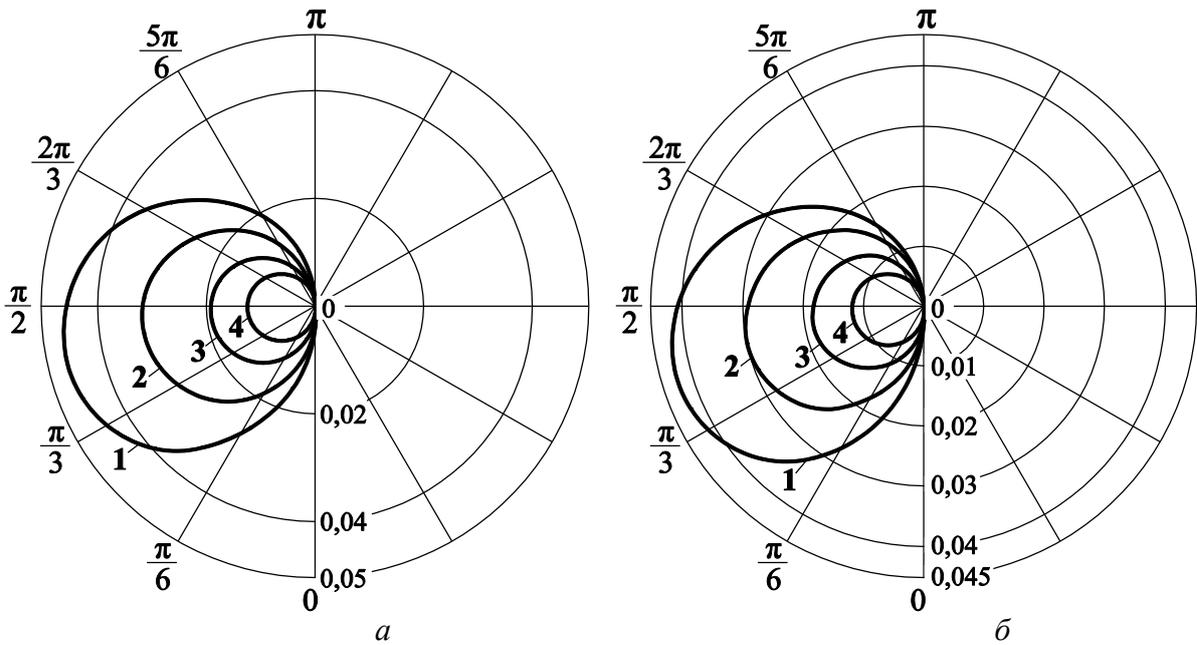


Рис. 19. Эпюры результирующей безразмерной силы сопротивления формы элементарного дискового ножа (а) и её безразмерного момента (б)

$$(t_{\alpha\delta} = 0,12 ; k = -10 ; \varphi_H = 10^\circ ; e_{01} = 5) :$$

$$1 - \lambda = 10 ; 2 - \lambda = 15 ; 3 - \lambda = 25 ; 4 - \lambda = 40$$

Определены диапазоны наиболее энергетически выгодных углов резания, которые были использованы при проектировании режущего приспособления порционирующей машины.

На основе комплекса математических моделей установлены качественные и количественные зависимости эффективности процесса резания рыбы от структурно-реологических свойств сырья, параметров ножа, вида резания и скорости обработки. Установленные закономерности позволяют научно обоснованно определять конструктивное исполнение режущих приспособлений рыбоперерабатывающего оборудования с целью повышения энергоэффективности машин и сокращения потерь.

**В седьмой главе «Экспериментальные исследования процесса резания рыбы»** изложены результаты комплексных экспериментальных исследований процесса резания рыбы. Выполнен краткий обзор известных экспериментальных работ по резанию пищевых продуктов. Разработана методика опытных испытаний на базе автоматизированной установки с различными режущими органами (рис. 20, 21). Проведен анализ точности измерений и обосновано необходимое количество опытов.

Выполнено исследование сил полезных сопротивлений при нормальном резании рыбы струнным ножом. Установлены эмпирические зависимости указанной силы от скорости резания, остроты режущего органа и температуры сырья (рис. 22-24). Также проведено экспериментальное исследование процесса нормального резания рыбы пластинчатым однокромочным и двухкромочными ножами с односторонней заточкой (рис. 24). Установлены эмпирические зависимости сил вредных сопротивлений от скорости резания, толщины режущего органа и температуры сырья.

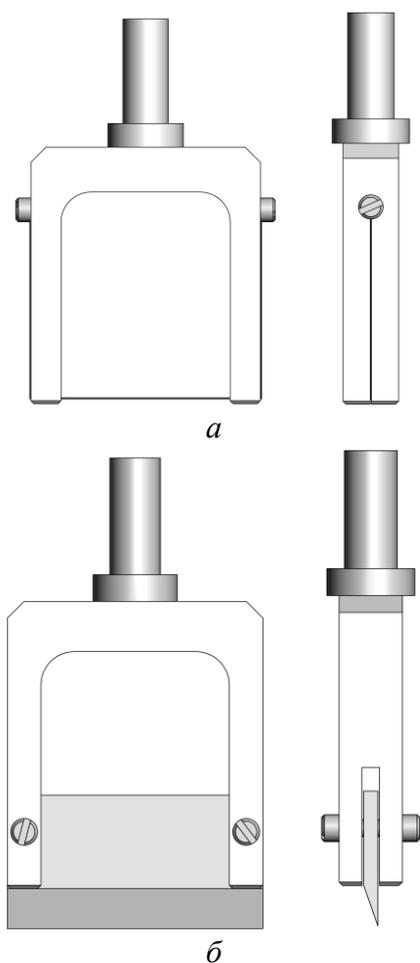


Рис. 20. Схемы струнного (а) и пластинчатого (б) режущих органов

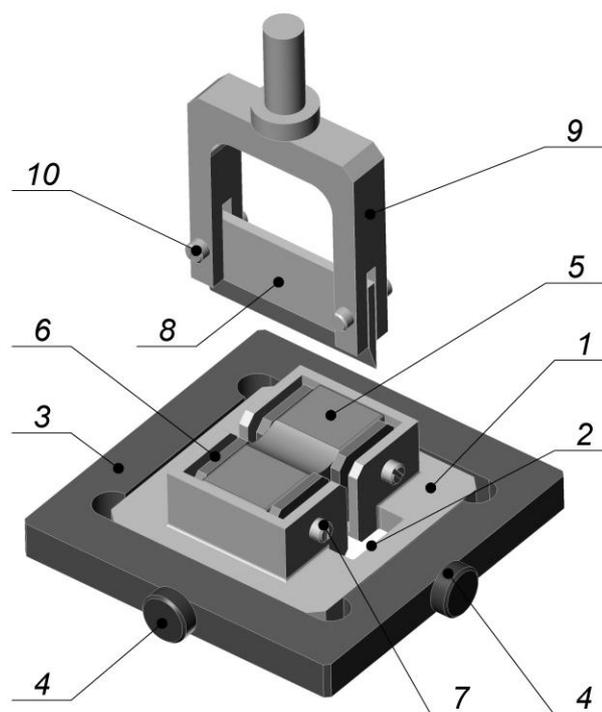


Рис. 21. Схема расположения пластинчатого ножа и кассеты с образцом рыбы.

1 – кассета; 2 – паз для прохождения режущего органа; 3 – испытательная платформа; 4 – винтовой зажим; 5 – образец мышечной ткани; 6 – рифленая накладка; 7 – винт крепления рифленой накладки; 8 – пластинчатый нож; 9 – удерживающее приспособление; 10 – винт крепления ножа

Опытные данные дополнительно обобщали эмпирическими зависимостями, коэффициенты которых рассчитывали на основе метода наименьших квадратов. Подтверждено, что силы сопротивлений в случае использования двухкромочного ножа существенно меньше соответствующих сил при резании однокромочным ножом.

Выполнен экспериментальный анализ влияния угла заточки пластинчатого ножа на силы вредных сопротивлений при нормальном резании мышечной ткани рыбы (рис. 26). Установлено эмпирическое значение оптимального угла заточки ножа, которое хорошо соответствует теоретическому.

Экспериментальные испытания процесса резания подтвердили адекватность математических моделей реальному процессу обработки сырья путем сопоставления опытных данных с результатами теоретических расчетов сил полезных и вредных сопротивлений.

По результатам испытаний видно, что влияние скорости ножа на силы сопротивлений хорошо описывается логарифмическими регрессиями, а влияние геометрических параметров лезвия на усилия резания удовлетворительно описывается квадратичными регрессиями.

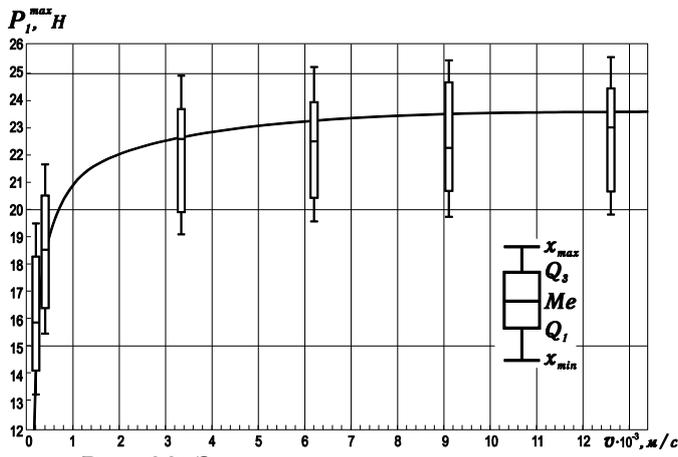


Рис. 22. Зависимость силы полезного сопротивления от скорости резания мышечной ткани рыбы (диаграммы размаха – экспериментальные данные, сплошная линия – результаты расчета по теоретической модели)

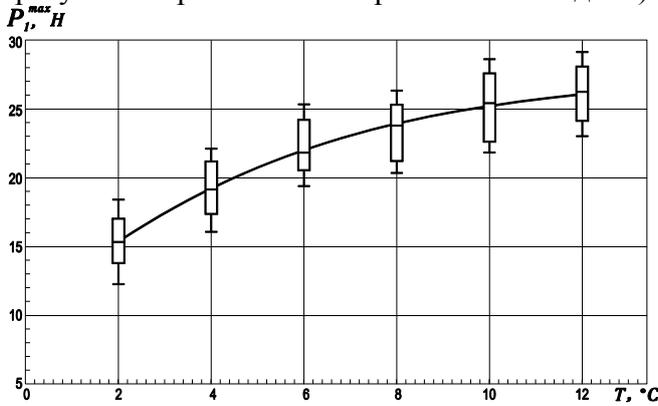


Рис. 24. Зависимость силы полезного сопротивления от температуры мышечной ткани рыбы

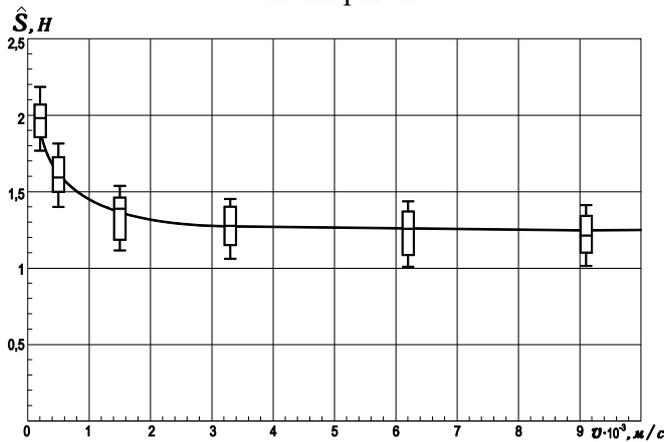


Рис. 25. Зависимость суммарной силы вредного сопротивления двухкромочного ножа от скорости движения

Опытные данные на рис. 22 аппроксимированы эмпирической зависимостью (15), построенной методом наименьших квадратов по шести средним точкам  $\bar{x}_n$  с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9410$ . Данные измерений на рис. 23 аппроксимируются эмпирическим уравнением (16) с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9940$ .

Определяли среднее значение усилия резания  $x_n$ , среднее квадратичное отклонение  $S_n$ , максимальное  $x_{max}$  и минимальное  $x_{min}$  значения, первый квартиль  $Q_1$ , медиану  $Me$  и третий квартиль  $Q_3$ .

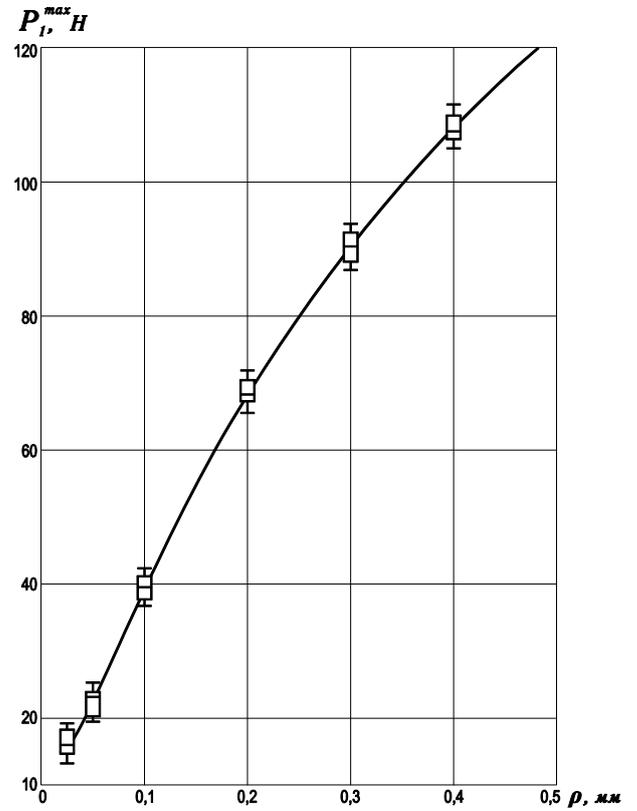


Рис. 23. Зависимость силы полезного сопротивления от остроты струнного ножа

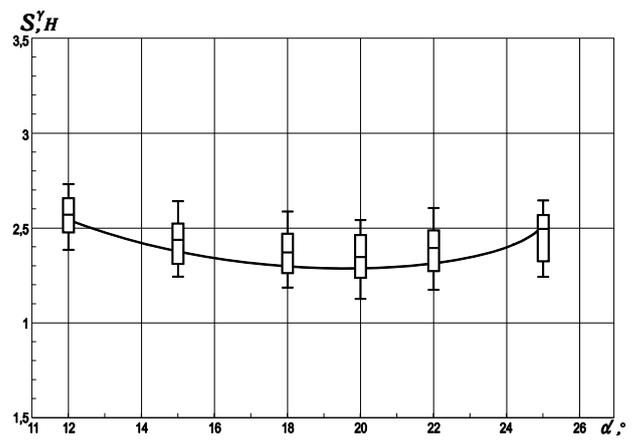


Рис. 26. Зависимость суммарной силы вредного сопротивления однокромочного пластинчатого ножа от угла заточки

$$P_1^{\max} = 30,1381 + 1,5717 \cdot \ln v; \quad (15) \quad P_1^{\max} = 28392,2596 \cdot \rho^{0,7113}. \quad (16)$$

Получены эмпирические зависимости сил полезного сопротивления от температуры согласно рис. 24 и меры эластичности мышечной ткани рыбы:

$$P_1^{\max} = 11,0736 + 6,0716 \cdot \ln T; \quad (17) \quad P_1^{\max} = 2,2099 + 12,3198 \cdot \ln(e_{01}). \quad (18)$$

Опытные данные на рис. 25 аппроксимируются эмпирической зависимостью (19) с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,8925$ , данные на рис. 26 – зависимостью (20) при  $R^2 = 0,9909$ .

$$\hat{S} = 0,2410 - 0,1889 \cdot \ln v; \quad (19) \quad S^{\gamma} = 0,0036 \cdot \alpha^2 - 0,1409 \cdot \alpha + 3,7376. \quad (20)$$

Результаты испытаний показали, что влияние скорости ножа на силы сопротивлений хорошо описывается логарифмическими регрессиями, а влияние геометрических параметров лезвия на усилия резания хорошо описывается квадратичными регрессиями.

**В восьмой главе «Практическая реализация научных и проектных решений на основе модульной системы машин для первичной обработки рыбы»** разработан новый концептуальный подход к созданию мехатронного высокоэффективного технологического оборудования для первичной обработки рыбы на основе модульной системы машин, направленной на ресурсосбережение, повышение качества продуктов и рациональное использование ценного рыбного сырья.

Разработана оригинальная модульная конструкция машины для филетирования рыбы (патент РФ № 2626138) (рис. 27-30).

Разработана программа для ЭВМ (свидетельство Роспатента о регистрации № 2017611141), предназначенная для построения трехмерных цифровых моделей рыб и определения основных морфометрических параметров сырья, а также система управления универсальной рыборазделочной машиной (патент РФ № 60312).

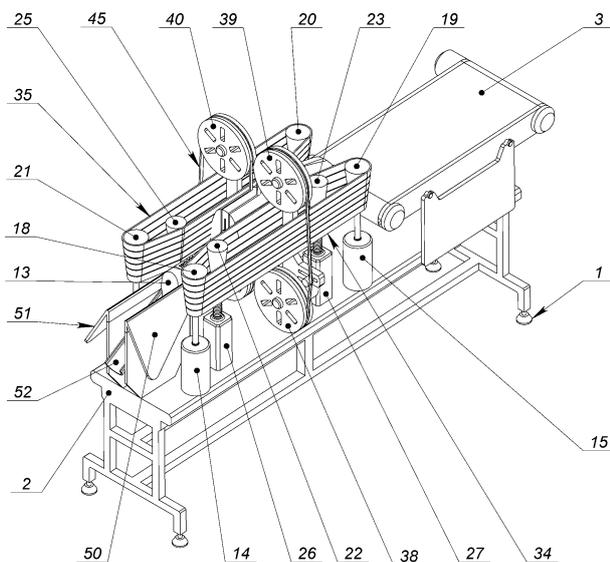


Рис. 27. Машина для филетирования рыбы.  
Общий вид

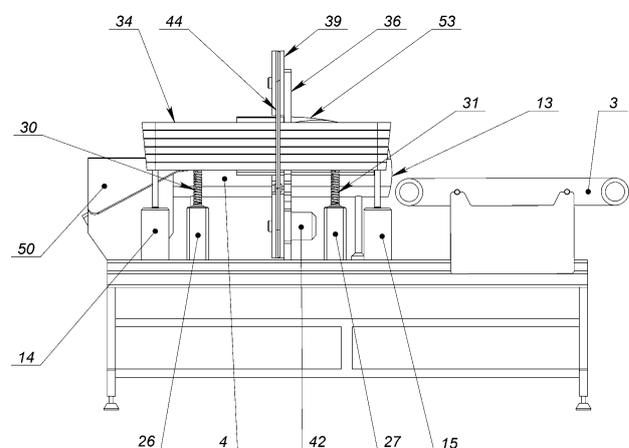


Рис. 28. Машина для филетирования рыбы.  
Вид слева

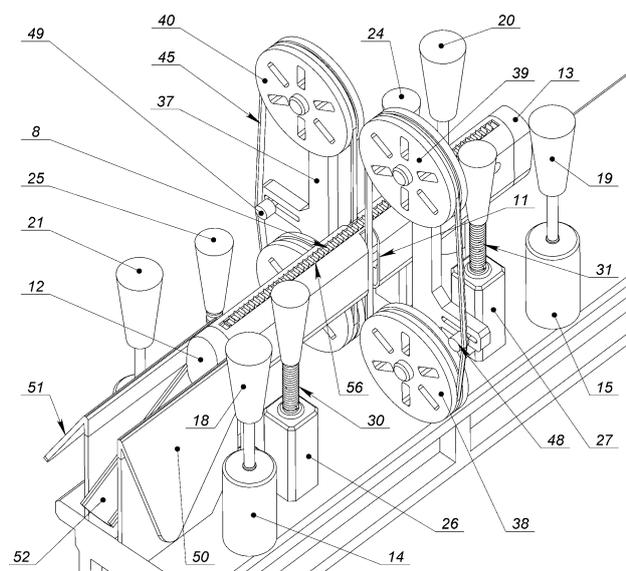


Рис. 29. Машина для филетирования рыбы.

Вид со снятыми транспортерными лентами

1 – опора; 2 – опорная рама; 3 – подающий конвейер; 4 – корпус опорного приспособления для тушки рыбы; 5 и 6 – ведущий и ведомый шкивы замкнутого гибкого зубчатого элемента опорного приспособления для тушки рыбы; 7 – электродвигатель привода замкнутого гибкого зубчатого элемента опорного приспособления для тушки рыбы; 8 – замкнутый гибкий зубчатый элемент опорного приспособления для тушки рыбы; 9 – зуб замкнутого гибкого зубчатого элемента опорного приспособления для тушки рыбы; 10, 11 – паз под ленточный нож на корпусе опорного приспособления для тушки рыбы; 12, 13 – крышка опорного приспособления для тушки рыбы; 14, 15, 16, 17 – электродвигатель; 18, 19, 21, 24 – приводной конусный ролик для боковых транспортерных лент; 22, 23, 20, 25 – ведомый конусный ролик для боковых транспортерных лент; 26, 27, 28, 29 – опора ведомого конусного ролика для боковых транспортерных лент; 30, 31, 32, 33 – пружина; 34, 35 – боковая транспортёрная лента; 36, 37 – кронштейн; 38, 41 – ведущий шкив ленточного ножа; 39, 40 – ведомый шкив ленточного ножа; 42, 43 – электродвигатель привода ленточного ножа; 44 – замкнутый ленточный нож.

Предложены модульные конструкции машин для резки рыбного филе (рис. 31-38) (патенты РФ № 2335131, 2453120, 2599622, 2617576, 2638536, 2671900, 2729351) (рис. 27-34), машин для обезглавливания рыбы (патенты РФ № 2320177, 2487545, 2573362), машин для потрошения и зачистки рыбы (патенты РФ № 2571905, 2599620, 2599623), машины для снятия чешуи (патент РФ № 2425572), машины для обесшкуривания филе (патент РФ № 2328123).

Разработаны модульные конструкции машины для сортировки рыбы (патент РФ № 2628797), машин для сортировки, поштучного разделения, ориентирования и загрузки рыбы (патенты РФ № 2363162, 2582351, 2645977, 2645979, 2645974, 2649340), а также для мойки рыбы (патент РФ № 2601596) и получения рыбного фарша (патент РФ № 2635380).

Технические решения позволяют повысить эффективность технологического оборудования при переработке рыбы, интенсифицировать процессы порционирования, сортировки и мойки рыбного сырья, обеспечить высокое качество продукта, сократить потери сырья при выполнении технологических операций.

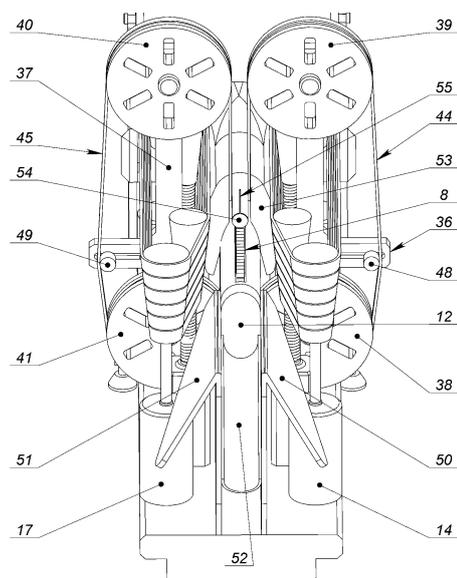


Рис. 30. Машина для филетирования рыбы.

Вид со стороны выхода филе

Фактический экономический эффект от использования разработок достигнут за счет снижения материалоемкости машин, повышения качества продукции, уменьшения потерь ценного сырья, сокращения количества обслуживающего персонала на производстве.

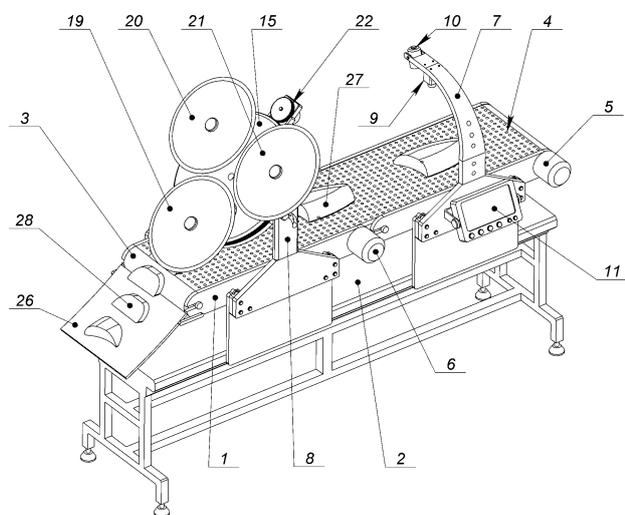


Рис. 31. Машина для резки рыбного филе на ломтики. Общий вид

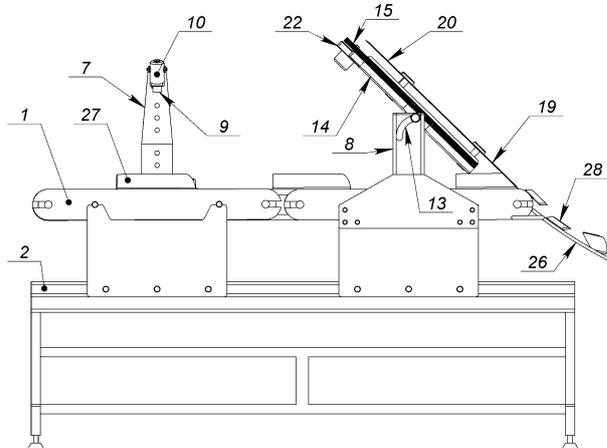


Рис. 32. Машина для резки рыбного филе на ломтики. Вид справа

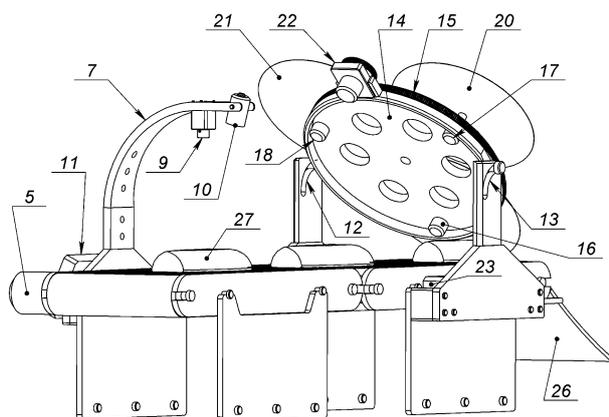


Рис. 33. Машина для резки рыбного филе на ломтики. Общий вид без опорной рамы

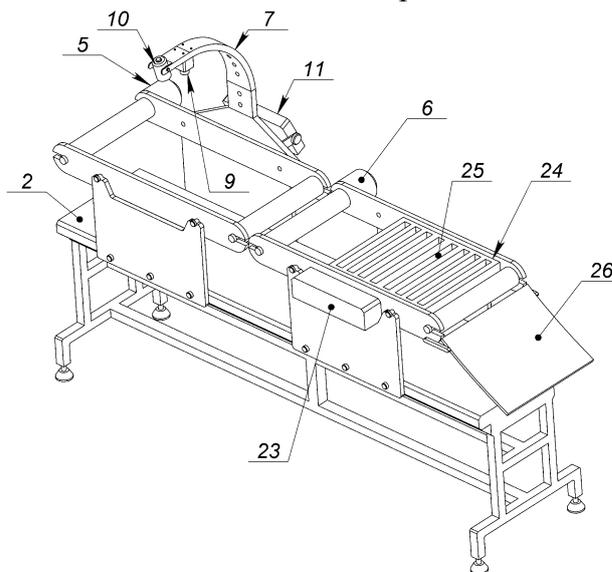


Рис. 34. Машина для резки рыбного филе на ломтики. Вид со снятыми перфорированной лентой конвейера и режущим модулем

1 – конвейер; 2 – опорная рама; 3 – лента конвейера; 4 – отверстие ленты; 5, 6 – привод конвейера; 7, 8 – кронштейн; 9 – прибор для получения видеоизображения; 10 – источник света; 11 – вычислительный блок; 12, 13 – паз кронштейна; 14 – каретка; 15 – ротор; 16, 17, 18 – привод ножа; 19, 20, 21 – дисковый нож; 22 – привод ротора; 23 – вакуумный насос; 24 – вакуумная камера; 25 – полости вакуумной камеры; 26 – лоток; 27 – филе; 28 – ломтик.

В связи с тем, что информация о морфометрических характеристиках рыбы имеет решающее значение при обеспечении качества продуктов и ресурсосбережения, на основе комплексных экспериментальных и теоретических исследований разработаны видеокomпьютерные модули для автоматического измерения параметров сырья. Предложены и экспериментально апробированы математические модели процесса

сканирования морфометрических параметров рыб. На базе опытной экспериментальной видеокomпьютерной установки получены данные по контурам тел промысловых рыб и разработаны соответствующие математические модели.

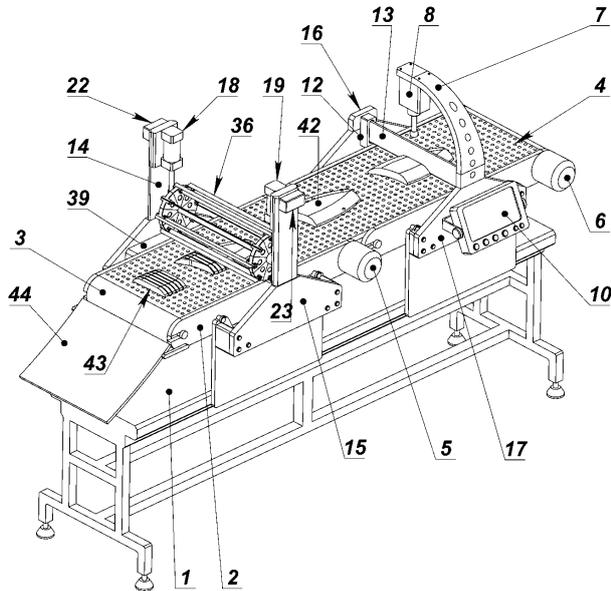


Рис. 35. Машина для резки рыбы на ломтики. Вид слева

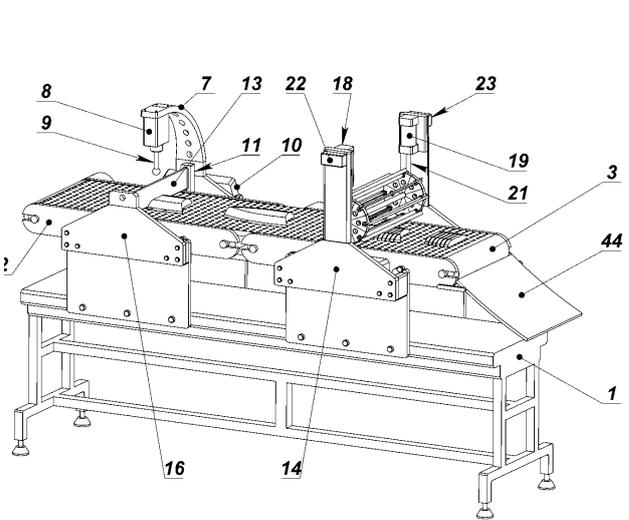


Рис. 36. Машина для резки рыбы на ломтики. Вид справа

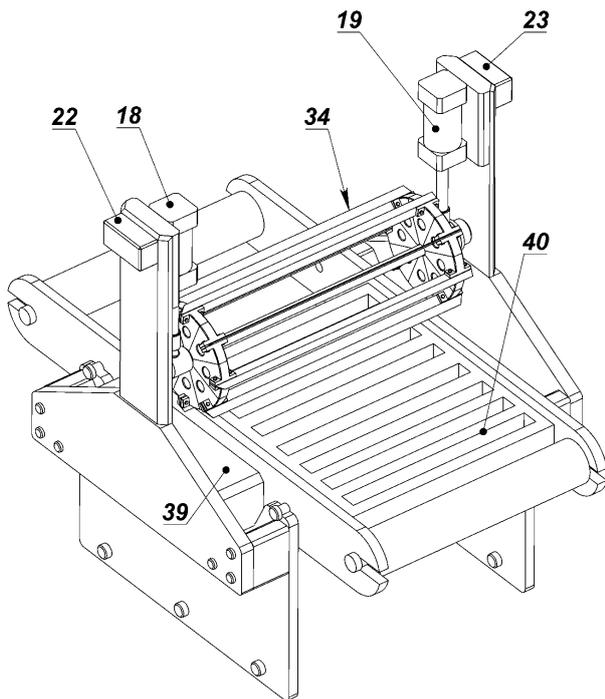


Рис. 37. Машина для резки рыбы на ломтики. Режущий модуль

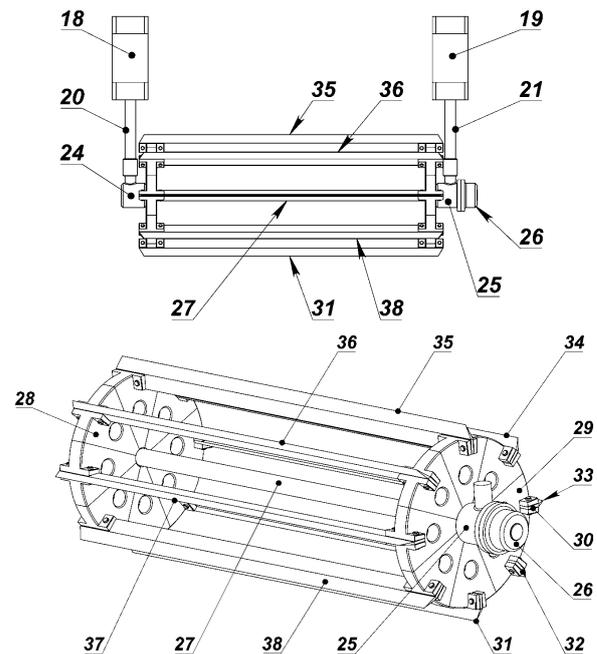


Рис. 38. Машина для резки рыбы на ломтики. Ротор со сменными ножами

1 – рама опорная; 2 – конвейер; 3 – лента конвейера; 4 – отверстие ленты; 5, 6 – привод конвейера; 7 – кронштейн прибора для измерения консистенции филе; 8 – прибор для измерения консистенции филе; 9 – шток прибора для измерения консистенции филе; 10 – блок вычислительный; 11 – источник лазерный; 12 – фотоприемник; 13 – луч лазерный; 14, 15, 16, 17 – кронштейн; 18, 19 – пневмоцилиндр; 20, 21 – шток пневмоцилиндра; 22, 23 – пневмораспределитель; 24, 25 – подшипник опорный; 26 – двигатель шаговый; 27 – вал ротора; 28, 29 – диск ротора; 30 – паз диска; 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38 – режущий орган; 39 – насос вакуумный; 40 – камера вакуумная; 41, 42 – филе; 43 – ломтик; 44 – лоток.

Эффективность внедрения результатов работы представлена ниже.

### Эффективность внедрения результатов работы

Наименование разработки	Место внедрения и испытания	Результативность работы
Пат. № 2638536 Устройство для резки рыбного филе на ломтики	ОАО «НПО «Рыбтехцентр»	Договор № РД 0338442 от 13.08.2020 г.
Пат. № 2671900 Устройство для резки пищевых продуктов	ООО «ПК Пищевая инженерия»	Договор № РД 0321989 от 14.01.2020 г.
Пат. № 2425572 Устройство для снятия чешуи с рыбы	ООО «Мехатроника»	Договор № РД 0094735 от 14.02.2012 г.
Мехатронный модуль разделывания рыбы	ОАО «НПО «Рыбтехцентр»	Акт производственных испытаний
Мехатронный модуль потрошения рыбы	ООО «Судорыбтехмаш»	Акт производственных испытаний
Мехатронный модуль филетирования рыбы	ООО «ПК Пищевая инженерия»	Акт производственных испытаний
Видеокomпьютерный модуль	ООО «ПК Пищевая инженерия»	Акт производственных испытаний
Машина порционирующая ПМ-001	ООО «ПК Пищевая инженерия»	Акт внедрения в серийное производство

В **приложении** представлены протоколы экспериментальных исследований, материалы, подтверждающие практическую значимость, апробацию, внедрение и экономическую эффективность результатов работы.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Проанализированы реологические свойства промысловых видов рыб. Выполнены экспериментальные испытания мышечной ткани ставриды, скумбрии, сардинеллы атлантической, сельди атлантической на прямую ползучесть, релаксацию и обратную ползучесть; по результатам испытаний обосновано дифференциальное уравнение, соответствующее трехэлементной реологической модели Максвелла-Томсона и описывающее физико-механические свойства мышечной ткани рыбы; определены значения реологических констант для балтийской салаки и рыб океанического лова.

2. Проанализирована система полезных и вредных сопротивлений, действующих на режущий орган со стороны мышечной ткани при первичной обработке рыбы: сил нормальных контактных давлений, сил сопротивления формы, деформационных сил трения и сил разрушения материала; разработан комплекс математических моделей для расчета сил нормальных контактных давлений; предложены математические модели процесса обратной ползучести материала и образования присоединенной каверны.

3. Получен комплекс математических моделей для расчета сил сопротивления формы ножей с различной геометрией, деформационных сил трения при различных видах шероховатости граней; установлены основные зависимости сил вредных сопротивлений от скорости резания, реологических характеристик рыбы, геометрии ножей, а также параметров шероховатости граней режущего органа.

4. Предложена математическая модель криволинейного профиля ножа, на основе которой выполнено математическое моделирование силы сопротивления формы ножа и деформационной силы трения; проведены постановка и решение оптимизационной задачи по определению оптимального угла заточки ножа и его основных зависимостей от скорости резания, угла сопряжения, толщины лезвия и реологических свойств рыбы.

5. Проанализирован процесс разрушения мышечной ткани рыбы при первичной обработке и разработан комплекс математических моделей для определения сил полезных сопротивлений; установлены основные зависимости сил полезных сопротивлений от скорости резания, реологических характеристик мышечной ткани рыбы, а также геометрии режущего органа; предложены математические модели для определения минимально допустимой остроты лезвия, при которой сохраняется прочность режущей кромки; предложен аналитический подход к анализу качества поверхности среза.

6. Сформулированы основные научные принципы повышения эффективности процесса резания рыбы с разработкой математических моделей сил сопротивлений при косоугольном и скользящем резании; разработаны математические модели процесса резания рыбы дисковым ножом.

7. Проведены комплексные экспериментальные исследования процесса резания рыбы различными режущими органами; выполнено исследование сил полезных сопротивлений при нормальном резании рыбы струнным ножом с идентификацией эмпирических моделей процесса; проведено экспериментальное исследование процесса нормального резания рыбы пластинчатым однокромочным и двухкромочными ножами с односторонней заточкой; выполнен экспериментальный анализ влияния угла заточки пластинчатого ножа на силы вредных сопротивлений при нормальном резании мышечной ткани рыбы; подтверждена адекватность математических моделей реальному процессу резания рыбы путем сопоставления опытных данных с результатами теоретических расчетов сил полезных и вредных сопротивлений.

8. Разработан новый концептуальный подход к созданию мехатронного высокоэффективного технологического оборудования для первичной обработки рыбы на основе модульной системы машин, направленной на ресурсосбережение, повышение качества продуктов и рациональное использование ценного рыбного сырья.

9. На основе комплексных экспериментальных и теоретических исследований разработаны видеокомпьютерные модули для автоматического

измерения морфометрических параметров сырья при первичной обработке рыбы; предложены и экспериментально апробированы математические модели процесса лазерной локации; на базе опытной экспериментальной видеокомпьютерной установки получены данные по контурам тел промысловых рыб и разработаны соответствующие математические модели; разработан видеокомпьютерный модуль для ориентирования тушек рыб головой в одну сторону; разработана программа для ЭВМ, предназначенная для формирования цифровых моделей рыб.

10. На основе разработанной теории резания и концептуального подхода предложены оригинальные модульные конструкции машин для филетирования рыбы, машин для резки рыбного филе, машин для обезглавливания рыбы, машин для потрошения и зачистки рыбы, машины для снятия чешуи, машины для обесшкуривания филе, машины для сортировки рыбы, машин для поштучного разделения сырья, ориентирования и загрузки рыбы, а также для мойки рыбы и получения рыбного фарша.

11. Проданы лицензии на право использования интеллектуальной собственности предприятиями ОАО «НПО «Рыбтехцентр», ООО «ПК Пищевая инженерия», ООО «Мехатроника» по патентам на изобретения. Внедрены в серийное производство конструкции машины для порционирования рыбы, машины для сортировки рыбы и машины для мойки рыбы.

12. Проведена промышленная апробация в условиях ОАО НПО «Рыбтехцентр», ООО «Судорыбтехмаш», ООО «ПК Пищевая инженерия» опытных образцов мехатронных модулей для разделывания, потрошения и филетирования рыбы, а также видеокомпьютерного модуля для лазерного измерения морфометрических параметров рыбного сырья.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$P_1$  – сила полезного сопротивления при разрушении материала режущей кромкой, Н;  $P_1^{\max}$  – максимальная сила полезного сопротивления;  $P_2$  – сила нормального контактного давления на наклонную грань ножа, Н;  $P_3$  – сила нормального контактного давления на боковую грань ножа, Н;  $P_4$  – сила инерции раздвигаемых слоев материала, Н;  $P_5$  – сила нормального контактного давления на заднюю наклонную грань ножа, Н;  $P_6$  – сила нормального контактного давления на заднюю наклонную грань ножа без боковых граней, Н;  $F_1$  – сила сопротивления формы однокромочного ножа, Н;  $\hat{F}_1$  – сила сопротивления формы двухкромочного ножа, Н;  $F_1^t$  – сила сопротивления формы однокромочного ножа при наклонном резании, Н;  $F_1^k$  – сила сопротивления формы однокромочного ножа при скользящем резании, Н;  $F_2$  – деформационная сила трения передней наклонной грани ножа, Н;  $F_3$  – деформационная сила трения боковой грани ножа, Н;  $F_4$  –

деформационная сила трения задней наклонной грани ножа, Н;  $G_1$  – реактивная вязкоупругая сила вредного сопротивления, действующая на переднюю наклонную грань ножа, Н;  $G_2$  – реактивная вязкоупругая сила вредного сопротивления, действующая на боковую грань ножа, Н;  $S$  – суммарная сила вредного сопротивления ножа с прямыми гранями, Н;  $S^\gamma$  – суммарная сила вредного сопротивления ножа с криволинейными гранями, Н;  $\hat{S}$  – суммарная сила вредного сопротивления двухкромочного ножа, Н;  $Z$  – движущая сила резания рыбы, Н;  $T_1$  – составляющая силы полезного сопротивления, обусловленная поперечным изгибом слоя материала за пределами режущей кромки, Н;  $t$  – время, с;  $T$  – температура мышечной ткани рыбы, °С;  $\sigma$  – механическое напряжение в мышечной ткани рыбы, Н/м<sup>2</sup>;  $p$  – нормальное контактное давление, Н/м<sup>2</sup>;  $q$  – встречное контактное давление, Н/м<sup>2</sup>;  $E_0$  – мгновенный модуль упругости рыбы, Н/м<sup>2</sup>;  $E_1$  – запаздывающий (высокоэластичный) модуль упругости рыбы, Н/м<sup>2</sup>;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости рыбы, Н·с/м<sup>2</sup>;  $\xi$  – длительный модуль упругости, Н/м<sup>2</sup>;  $h$  – глубина погружения режущей кромки в материал, м;  $\delta$  – толщина ножа, м;  $\alpha$  – угол заточки передней наклонной грани ножа, градус;  $\beta$  – угол заточки задней наклонной грани ножа, градус;  $y_G$  – координата крайней точки контакта материала с задней наклонной гранью двухкромочного ножа, м;  $\theta$  – угол сопряжения передней наклонной и боковой граней ножа с криволинейным профилем, градус;  $\bar{\psi}$  – фазовый угол функции шероховатости;  $\alpha_\phi$  – фактический угол резания при трансформации профиля ножа, градус;  $\varphi$  – полярный угол точки на кромке дискового ножа, градус;  $\bar{\rho}$  – полярный радиус точки на кромке дискового ножа, м;  $R_0$  – конструктивный радиус дискового ножа, м;  $\gamma_n$  – угол наклона режущей кромки к направлению движения ножа (угол геометрического подъема плоскости фактического элементарного ножа относительно плоскости конструктивного элементарного ножа), градус;  $h_m$  – высота передней наклонной грани ножа, м;  $h_\beta$  – высота задней наклонной грани ножа, м;  $R$  – длина боковой грани ножа, м;  $L$  – высота ножа с прямым обухом, м;  $l$  – толщина материала в равновесном состоянии, м;  $l_k$  – длина режущей кромки, м;  $v$  – скорость движения ножа, м/с;  $v_p$  – скорость подачи ножа, м/с;  $v_o$  – скорость скольжения ножа, м/с;  $v_u$  – скорость движения режущей кромки при разрушении, м/с;  $u$  – скорость скольжения материала относительно шероховатой грани ножа, м/с;  $V_k$  – мгновенный объем присоединенной каверны, м<sup>3</sup>;  $f(x)$  – функция, определяющая форму микровыступа шероховатой поверхности ножа;  $A$  – максимальная высота микровыступа шероховатой поверхности ножа, м;  $A_0$  – высота малого поверхностного деформируемого слоя материала, м;  $S_0$  – шаг регулярного микрорельефа шероховатой поверхности ножа, м;  $x_B$  – длина шероховатой грани ножа

(площадки контакта), м;  $\rho$  – острота режущей кромки ножа, м;  $h_d$  – толщина деформируемого слоя материала при разрушении, м;  $l_a$  – половинная ширина деформируемого слоя при разрушении, м;  $h_{cr}$  – критическая глубина погружения вершины режущей кромки, на которой происходит разрушение волокон вязкоупругого слоя, м.

*Безразмерные величины.*  $\bar{F}_1$  – безразмерная сила сопротивления формы однокромочного ножа;  $\bar{F}_2$  – безразмерная сила деформационная сила трения передней наклонной грани ножа;  $\bar{T}_3^t$  – составляющая силы полезного сопротивления, обусловленная продольным удлинением волокна материала при наклонном резании;  $\bar{T}_3^k$  – составляющая силы полезного сопротивления, обусловленная продольным удлинением волокна материала при скользящем резании;  $\varepsilon$  – относительная деформация мышечной ткани рыбы;  $\bar{p}$  – безразмерное нормальное контактное давление;  $e_{01}$  – мера эластичности мышечной ткани рыбы;  $\bar{v}$  – безразмерная скорость движения ножа;  $\bar{v}_p$  – безразмерная скорость подачи ножа;  $\bar{v}_o$  – безразмерная скорость скольжения ножа;  $\bar{v}_u$  – безразмерная скорость движения режущей кромки при разрушении;  $\bar{h}_u$  – безразмерная глубина погружения ножа при разрушении волокон;  $\bar{u}$  – безразмерная скорость скольжения материала относительно грани ножа;  $\bar{x}_B$  – безразмерная длина шероховатой грани ножа;  $\bar{\rho}$  – безразмерная острота режущей кромки ножа;  $\lambda$  – отношение скорости линейной подачи к окружной скорости дискового ножа;  $K_\gamma$  – коэффициент скольжения элементарного дискового ножа.

*Безразмерные производные величины:*

$$k = -\frac{E_0 + E_1}{\eta \cdot v}; \quad t_{\alpha\beta} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta}; \quad t_{\alpha\delta} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\delta}; \quad \mu = 1 - \exp\left(\frac{k \cdot \delta}{\operatorname{tg} \alpha}\right); \quad \chi = \frac{\xi \cdot \eta \cdot v \cdot \mu \cdot \operatorname{tg} \alpha}{E_1^2 \cdot \delta};$$

$$\tau = 1 + \chi \cdot \exp\left(k \cdot \left(L - \frac{\delta}{\operatorname{tg} \alpha}\right)\right) = 1 + \chi \cdot \exp(k \cdot R); \quad \alpha_r = \frac{\pi \cdot (90^\circ - \alpha)}{180^\circ}.$$

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

**В изданиях, индексируемых в международных базах цитирования  
SCOPUS и Web of Science:**

1. Ageev O.V., Fatykhov J.A., Jakubowski M. Mathematical simulation of forces of normal contact pressure on the edges of double-edge knife during food materials cutting. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 2018, Vol. 10 (5), pp. 158-169.
2. Jakubowski M., Stachnik M., Sterczyńska M., Matysko R., Piepiórka-Stepuk J., Dowgiałło A., Ageev O.V., Knitter R. CFD analysis of primary and

secondary flows and PIV measurements in whirlpool and whirlpool kettle with pulsatile filling: analysis of the flow in a swirl separator. *Journal of Food Engineering*, 2019, Vol. 258, pp. 27-33.

3. **Агеев, О.В.** Подход к численному расчету коэффициента трения при первичной обработке рыбы в судовых условиях / О.В. Агеев, Ю.А. Фатыхов, М. Якубовский // *Морские интеллектуальные технологии*. – 2019. – Т. 4. – № 4. – С. 171-175.

4. **Ageev O.V.**, Naumov V.A., Fatykhov J.A. Mathematical modeling of the resistance force of the profile of a flat-back knife. *Journal of Friction and Wear*, 2019, Vol. 40, No. 6, pp. 580-587.

5. Fatykhov Y.A, **Ageev O.V.**, Ivanov A.V., Jakubowski M., Dutkiewicz D., Dowgiallo A. Obtaining of Functional Product by Mechanical Processing of Secondary Fish Raw Material. *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 2020, Vol. 22, no. 1, pp. 51-59.

6. **Ageev O.V.**, Jakubowski M., Giurgiulescu L. Mathematical simulation of deformation friction force during food material cutting. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 2020, Vol. 12 (4), pp. 5-11.

### Монографии:

7. Фатыхов, Ю.А. Мехатроника в рыбообделочном оборудовании: научная монография / Ю.А. Фатыхов, **О.В. Агеев**. – Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО “КГТУ”, 2008. – 279 с.

8. **Агеев, О.В.** Совершенствование технологического оборудования для первичной обработки рыбы: опыт, проблематика, системный подход: научная монография / О.В. Агеев, Ю.А. Фатыхов. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО “КГТУ”, 2015. – 261 с.

### В периодических изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ:

9. Фатыхов, Ю.А. Современный подход к разработке ресурсосберегающего разделочно-филетировочного оборудования / Ю.А. Фатыхов, А.В. Шлемин, **О.В. Агеев** // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. – 2007. – № 3 (298). – С. 91-94.

10. Фатыхов, Ю.А. Мехатронный подход к разработке оборудования для филетирования рыбы / Ю.А. Фатыхов, **О.В. Агеев** // *РЫБПРОМ: технологии и оборудование для переработки водных биоресурсов*. – 2009. – № 4/2009. – С. 25-27.

11. Фатыхов, Ю.А. Разработка мехатронного комплекса для обработки рыбного филе / Ю.А. Фатыхов, **О.В. Агеев**, А.З. Мацонко, В.М. Евтропков // *РЫБПРОМ: технологии и оборудование для переработки водных биоресурсов*. – 2010. – № 4/2010. – С. 73-78.

12. Фатыхов, Ю.А. Разработка средств лазерной локации для мехатронного оборудования пищевых производств / Ю.А. Фатыхов, **О.В. Агеев** // Электронный научный журнал Института холода и биотехнологий. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. – №1 (март). – Шифр: Эл № ФС77-33458. – Режим доступа: <http://processes.open-mechanics.com/articles/706.pdf>.

13. Фатыхов, Ю.А. Разработка мехатронного манипулятора для укладки консервной тары / Ю.А. Фатыхов, **О.В. Агеев**, А.З. Мацинко, К.В. Бабарыкин // Рыбное хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 111-113.

14. Фатыхов, Ю.А. Моделирование пневматического привода мехатронного комплекса для порционирования пищевых продуктов / Ю.А. Фатыхов, **О.В. Агеев**, А.З. Мацинко // Вестник ВГУИТ. – № 2. – С. 53-57.

15. Фатыхов, Ю.А. Разработка весоконтрольного модуля для мехатронного комплекса порционирования пищевых продуктов / Ю.А. Фатыхов, **О.В. Агеев** // Электронный научный журнал Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2014. – № 3 (21). – Шифр: Эл № ФС77–55245. – Режим доступа: <http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/10460.pdf>.

16. **Агеев, О.В.** Применение видеокомпьютерной техники для исследования морфо-метрических параметров рыбы (Часть 1. Разработка аппаратного обеспечения видеокомпьютерного устройства) / О.В. Агеев, Ю.А. Фатыхов // Электронный научный журнал Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2015. – № 1 (23). – Шифр: Эл № ФС77–55245. – Режим доступа: <http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/11452.pdf>.

17. **Агеев, О.В.** Применение видеокомпьютерной техники для исследования морфо-метрических параметров рыбы (Часть 2. Разработка программного обеспечения видеокомпьютерного устройства) / О.В. Агеев, Ю.А. Фатыхов // Электронный научный журнал Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2015. – № 2 (24). – Шифр: Эл № ФС77–55245. – Режим доступа: <http://processes.ihbt.ifmo.ru/file/article/13407.pdf>.

18. **Агеев, О.В.** Способ и алгоритм ориентирования рыбы на основе мехатроники / О.В. Агеев [и др.] // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2016. – № 42. – С. 89-103.

19. Наумов, В.А. Моделирование процесса погружения дискового ножа в пищевой материал при резании / В.А. Наумов, **О.В. Агеев**, Ю.А. Фатыхов // Электронный научный журнал Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и

оптики. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств [Электронный ресурс]. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2017. – № 2(32). – Шифр: Эл № ФС77–55245. – Режим доступа: [http://openbooks.ifmo.ru/read\\_processes/16842/16842.pdf](http://openbooks.ifmo.ru/read_processes/16842/16842.pdf).

20. Математическое моделирование сил нормального контактного давления на наклонные грани ножа при резании рыбы / **О.В. Агеев** [и др.] // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2017. – № 47. – С. 80-96.

21. **Агеев, О.В.** Математическое моделирование сил нормального контактного давления на боковые грани ножа при резании пищевых материалов / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов // Научный журнал Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2017. – № 4. – С. 27-42.

22. **Агеев, О.В.** Математическое моделирование силы сопротивления формы двухкромочного ножа при резании охлажденной рыбы / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов // Вестник Международной академии холода. – 2019. – № 2. – С. 62-71.

23. **Агеев, О.В.** Математическое моделирование сил сопротивления формы ножа при резании рыбы / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов // Научный журнал Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2019. – № 1(39). – С. 47-62.

24. **Агеев, О.В.** Математическое моделирование силы сопротивления формы двухкромочного ножа без боковых граней при резании рыбы / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов, Н.В. Самойлова // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2019. – № 53. – С. 75-88.

25. **Агеев, О.В.** Mathematical simulation of knife profile resistance force during fish cutting / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2019. – № 3. – С. 150-158.

26. **Агеев, О.В.** Математическое моделирование деформационной силы трения ножа с различными параметрами шероховатости при резании рыбы / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2019. – № 54. – С. 77-90.

27. **Агеев, О.В.** Математическое моделирование силы трения ножа при резании пищевого материала / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов // Научный журнал Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. – 2019. – № 4(42). – С. 3-17.

28. **Агеев, О.В.** Расчет деформационной составляющей коэффициента трения шероховатой поверхности ножа при резании рыбы / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов, Н.В. Самойлова // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2019. – № 55. – С. 177-189.

29. **Агеев, О.В.** Подход к расчету деформационной силы трения при резании охлажденной рыбы / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов, Н.В. Самойлова // Вестник Международной академии холода. – 2019. – № 4. – С. 49-56.

30. **Агеев, О.В.** Оптимизация формы профиля ножа для ресурсосберегающей первичной обработки рыбы / О.В. Агеев, Ю.А. Фатыхов, Е.Е. Иванова // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2020. – № 1 (373). – С. 77-80.

31. **Агеев, О.В.** Подход к математическому описанию профилей ножей для рыбоперерабатывающего оборудования / О.В. Агеев // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2020. – № 57. – С. 79-88.

32. Фатыхов, Ю.А. Математическое моделирование процесса виброориентирования рыбы / Ю.А. Фатыхов, В.А. Наумов, **О.В. Агеев**, В.Н. Эрлихман, В.С. Шашков // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2020. – № 57. – С. 141-152.

33. **Агеев, О.В.** Подход к оптимизации формы профиля ножа для резания рыбы по критерию минимального трения / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2020. – Т. 9 – № 2(50). – С. 78-83.

34. **Агеев, О.В.** Математическое моделирование сил полезного сопротивления при резании охлажденных пищевых продуктов / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов // Вестник Международной академии холода. – 2020. – № 3. – С. 70-82.

35. **Агеев, О.В.** Математическое моделирование процесса разрушения волокон мышечной ткани при резании рыбы / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов // Известия Калининградского государственного технического университета. – 2021. – № 60. – С. 57-73.

#### **Научно – технические издания:**

36. Фатыхов, Ю.А. Ресурсосберегающее мехатронное управление оборудованием для разделывания и филетирования рыбы: учеб. пособие / Ю.А. Фатыхов, **О.В. Агеев**. – Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО “КГТУ”, 2007. – 158 с.

37. Основы автоматизированного проектирования технических систем в пищевой инженерии: учеб. пособие / Ю.А. Фатыхов, **О.В. Агеев**, В.М. Евтропков, А.З. Мацонко. – Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО “КГТУ”, 2010. – 124 с.

38. **Агеев, О.В.** Системы автоматизированного проектирования: учеб. пособие / О.В. Агеев, Ю.А. Фатыхов. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО “КГТУ”, 2014. – 148 с.

39. **Агеев, О.В.** Системы автоматизированного проектирования. Курсовое проектирование: учеб. пособие / О.В. Агеев, Ю.А. Фатыхов. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО “КГТУ”, 2014. – 237 с.

40. Технологическое оборудование рыбоперерабатывающих производств: в 2 ч.: учеб. пособие / **О.В. Агеев**, Ю.А. Фатыхов, А.Е. Ерыванов, К.В. Бабарыкин, Н.В. Самойлова. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО “КГТУ”, 2017. – Ч. 1: Машины для первичной обработки рыбы. – 200 с.

41. Фатыхов, Ю.А. Технологическое оборудование рыбоперерабатывающих производств: в 2 ч.: учеб. пособие / Ю.А. Фатыхов, **О.В. Агеев**. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО “КГТУ”, 2021. – Ч. 1: Оборудование для первичной обработки рыбы. – 192 с.

### Патенты на изобретения

42. **Устройство для обезглавливания рыбы: пат. 2320177 РФ**, МПК А22 С25/14 / **О.В. Агеев**, А.В. Шлемин; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2006137525; заявл. 23.10.06; опубл. 27.03.08; бюл. № 9.

43. **Устройство для филетирования рыбы: пат. 2320178 РФ**, МПК А22 С25/16 / **О.В. Агеев**, А.В. Шлемин; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2006143884; заявл. 11.12.06; опубл. 27.03.08; бюл. № 9.

44. **Устройство для снятия шкуры с рыбного филе: пат. 2328123 РФ**, МПК А22 С25/17 / **О.В. Агеев**, А.В. Шлемин, Ю.А. Фатыхов; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2007107738; заявл. 01.03.07; опубл. 10.07.08; бюл. № 19.

45. **Устройство для резки рыбного филе: пат. 2335131 РФ**, МПК А22 С25/18 / **О.В. Агеев**, Ю.А. Фатыхов, А.В. Шлемин; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2007119058; заявл. 22.05.07; опубл. 10.10.08; бюл. № 28.

46. **Устройство для ориентирования рыбы головой в одном направлении: пат. 2363162 РФ**, МПК А22 С25/12 / **О.В. Агеев**, Ю.А. Фатыхов; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2008115048; заявл. 16.04.08; опубл. 10.08.09; бюл. № 22.

47. **Устройство для снятия чешуи с рыбы: пат. 2425572 РФ**, МПК А22 С25/02 / **О.В. Агеев**, Ю.А. Фатыхов, А.З. Мацонко, М.А. Вайшвилас, О.П. Федоров; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2010108509; заявл. 09.03.10; опубл. 10.08.11; бюл. № 22.

48. **Устройство для резки рыбного филе: пат. 2453120 РФ**, МПК А22 С25/18 / **О.В. Агеев**, Ю.А. Фатыхов, А.З. Мацонко, В.М. Евтропков; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2010154766; заявл. 30.12.10; опубл. 20.06.12; бюл. № 17.

49. **Устройство для обезглавливания рыбы: пат. 2487545 РФ**, МПК А22 С25/14 / **О.В. Агеев**, Ю.А. Фатыхов, А.З. Мацонко, В.М. Евтропков, Д. Дуткевич; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2012100508; заявл. 10.01.12; опубл. 20.07.13; бюл. № 20.

50. **Устройство для зачистки брюшной полости рыбы: пат. 2571905 РФ**, МПК А22 С25/14 / **О.В. Агеев**, Ю.А. Фатыхов; заявитель и

патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2014144662; заявл. 05.11.14; опубл. 27.12.15; бюл. № 36.

51. **Устройство для сортировки рыбы: пат. 2582351 РФ**, МПК А22 С25/04 / **О.В. Агеев**, Ю.А. Фатыхов, А.Е. Ерыванов; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2014150817; заявл. 15.12.14; опубл. 27.04.16; бюл. № 12.

52. **Устройство для обезглавливания рыбы: пат. 2573362 РФ**, МПК А22 С25/14 / **О.В. Агеев**, Ю.А. Фатыхов; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2014148051; заявл. 27.11.14; опубл. 20.01.16; бюл. № 2.

53. **Устройство для удаления внутренностей у рыбы: пат. 2599620 РФ**, МПК А22 С25/14 / **О.В. Агеев**, Ю.А. Фатыхов; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2015116503; заявл. 29.04.15; опубл. 10.10.16; бюл. № 28.

54. **Устройство для резки рыбного филе: пат. 2599622 РФ**, МПК А22 С25/18 / **О.В. Агеев**, Ю.А. Фатыхов, К.В. Бабарыкин, Ю.Э. Большаков; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2015123433; заявл. 15.06.15; опубл. 10.10.16; бюл. № 28.

55. **Устройство для удаления внутренностей и зачистки брюшной полости рыбы: пат. 2599623 РФ**, МПК А22 С25/14 / **О.В. Агеев**, Ю.А. Фатыхов, А.Е. Ерыванов; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2015121871; заявл. 08.06.15; опубл. 10.10.16; бюл. № 28.

56. **Устройство для мойки рыбы: пат. 2601596 РФ**, МПК А22 С25/02 / **О.В. Агеев**, В.М. Харлов, В.В. Харлов; заявитель и патентообладатель В.М. Харлов. – № 2015127174; заявл. 06.07.15; опубл. 10.11.16; бюл. № 31.

57. **Устройство для филетирования рыбы: пат. 2626138 РФ**, МПК А22 С25/16 / **О.В. Агеев**, А.Е. Ерыванов, Ю.А. Фатыхов; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2015157166; заявл. 29.12.15; опубл. 21.07.17; бюл. № 21.

58. **Устройство для резки рыбного филе на пласт: пат. 2617576 РФ**, МПК А22 С25/18 / **О.В. Агеев**, К.В. Бабарыкин, Ю.А. Фатыхов; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2015148113; заявл. 09.11.15; опубл. 25.04.17; бюл. № 12.

59. **Устройство для сортировки рыбы: пат. 2628797 РФ**, МПК А22 С25/04 / **О.В. Агеев**, В.М. Харлов, В.В. Харлов, А.В. Харлов; заявитель и патентообладатель В.М. Харлов. – № 2016119855; заявл. 20.05.16; опубл. 22.08.17; бюл. № 24.

60. **Устройство для получения рыбного фарша: пат. 2635380 РФ**, МПК А22 С25/20 / **О.В. Агеев**; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2016126366; заявл. 30.06.16; опубл. 13.11.17; бюл. № 32.

61. **Устройство для поштучного разделения и ориентирования рыбы: пат. 2645977 РФ**, МПК А22 С25/08 / **О.В. Агеев**, А.Е. Ерыванов, Ю.А. Фатыхов; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2016114628; заявл. 14.04.16; опубл. 28.02.18; бюл. № 7.

62. **Устройство для загрузки рыбы в рыбообрабатывающие машины:** пат. 2645979 РФ, МПК А22 С25/08 / **О.В. Агеев**, К.В. Бабарыкин, Ю.А. Фатыхов; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2016114629; заявл. 14.04.16; опубл. 28.02.18; бюл. № 7.

63. **Устройство для ориентирования рыбы головой в одну сторону:** пат. 2645974 РФ, МПК А22 С25/08 / **О.В. Агеев**; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2016117677; заявл. 04.05.16; опубл. 28.02.18; бюл. № 7.

64. **Устройство для резки рыбного филе на ломтики:** пат. 2638536 РФ, МПК А22 С25/18 / **О.В. Агеев**; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2017100864; заявл. 10.01.17; опубл. 14.12.17; бюл. № 35.

65. **Устройство для загрузки рыбы в рыбообрабатывающие машины:** пат. 2649340 РФ, МПК А22 С25/12 / **О.В. Агеев**; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2017115910; заявл. 04.05.17; опубл. 02.04.18; бюл. № 10.

66. **Устройство для резки пищевых продуктов:** пат. 2671900 РФ, МПК А22 С25/18 / **О.В. Агеев**, А. Довгялло, Ю.А. Фатыхов, К.В. Бабарыкин, Н.В. Самойлова; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2017140394; заявл. 20.11.17; опубл. 07.11.18; бюл. № 31.

67. **Устройство для резки рыбного филе:** пат. 2729351 РФ, МПК А22 С25/18 / **О.В. Агеев**, А.Е. Савельичев, М. Якубовский, А. Довгялло, Ю.А. Фатыхов, Н.В. Самойлова; заявитель и патентообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2019119060; заявл. 18.06.19; опубл. 06.08.20; бюл. № 22.

#### **Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ и базы данных:**

68. Автоматическое построение трехмерной модели рыбы и определение ее морфометрических параметров: свид-во о регистрации программы для ЭВМ 2017611141 РФ / **О.В. Агеев**, И.А. Медянский, А.Е. Ерыванов, Н.В. Самойлова, Ю.А. Фатыхов; заявитель и правообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2016662857; заявл. 24.11.16; зарегистр. 19.01.17, опубл. 19.01.17.

69. Технологическое оборудование для первичной обработки рыбы: свид-во о регистрации базы данных 2016620836 РФ / **О.В. Агеев**, Ю.А. Фатыхов; заявитель и правообладатель Калининградский гос. техн. ун-т. – № 2016620579; заявл. 04.05.16; зарегистр. 21.06.16, опубл. 20.07.16.

Подписано в печать 15.06.2021 г. Формат 60 x 84 1/16

Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ №

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»  
(ФГБОУ ВО «КГТУ»)

Отдел полиграфии ФГБОУ ВО «КГТУ»

Адрес университета и отдела полиграфии  
236022, г. Калининград, Советский проспект, 1