Научная статья
УДК 664.951.022.39:664.8.022.39

ОБОСНОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФАРШЕВОЙ СИСТЕМЫ ИЗ РЫБНОГО СЫРЬЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭКСТРУДИРОВАННОЙ ПРОДУКЦИИ

О.В. Агеев[1,*]

[1] Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия
[*] E-mail: oleg.ageev@klgtu.ru

Аннотация. Показана актуальность производства экструдированной продукции из рыбного сырья. Отмечается необходимость развития теоретических основ процесса экструдирования для научно обоснованного проектирования экструзионного оборудования и совершенствования рецептур фаршевых систем. Начат цикл научных публикаций, общей целью которого является разработка комплекса математических моделей процесса экструдирования рыбного фарша с наполнителями в объемном рассмотрении с учетом его вязких, упругих и пластических свойств, а также исследование зависимостей основных параметров указанного процесса от реологии рыбного фарша, геометрии рабочих органов экструдера и режимных параметров. Цель настоящей статьи - научное обоснование реологической модели фаршевой системы из рыбного сырья, которая в дальнейшем используется при разработке уравнений течения материала в рабочих зонах экструдера. Проанализированы и обобщены сложные реологические свойства фаршевых систем из рыбного сырья. Установлено, что материал демонстрирует мгновенно-упругую деформацию, пластический сдвиг и вязкоупругое течение, а также обладает тиксотропными свойствами. Фаршевая система является сложной полидисперсной системой, состоящей из жидкой фазы и твердообразной волокнистой сетки, представляющую собой сложную пространственную структуру из волокон, коллоидных образований, частиц наполнителей и обладающую механической прочностью. Теоретически получена реологическая модель, определяющая напряжение сдвига внутри волокнистой структуры фаршевой системы с тиксотропными свойствами в зависимости от градиента скорости потока. Для проверки адекватности полученной математической модели проведены экспериментальные исследования реологических характеристик различных фаршевых систем из минтая с добавлением пшена, гречневой крупы, геркулеса, ржаной муки, сухого обезжиренного молока и костной минеральной добавки. Испытания продемонстрировали, что материал при движении в канале проходит через несколько стадий внутренних преобразований от структурированного потока до диспергированного состояния. Анализ показал, что теоретическая модель с высокой степенью адекватности соответствует экспериментальным зависимостям. Разработанная реологическая модель достаточно полно отражает физическую суть структурообразования в фаршевой системе, и может быть использована для дальнейшего моделирования процесса экструдирования рыбного фарша.

Ключевые слова: *рыбное сырье; рыбный фарш; фаршевая система; экструдирование; экструдер; экструдат; сложноформованный продукт; вязкость; упругость; пластичность; вязкоупругость; вязкоупругопластичность; нормальные напряжения; сдвиговые напряжения; предельное напряжение сдвига; деформация; реология; гидродинамика; неньютоновская жидкость; наполнитель; кривая течения; модель.*

Для цитирования: Агеев О.В. Обоснование реологической модели фаршевой системы из рыбного сырья при производстве экструдированной продукции // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2025. Т. 11. № 3. С. 6–25.

© Агеев О.В. 2025

Original article

SUBSTANTIATION OF A RHEOLOGICAL MODEL FOR A FISH-BASED MINCE SYSTEM IN THE PRODUCTION OF EXTRUDED PRODUCTS

O.V. Ageev[1,*]

[1] Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia
[*] E-mail: oleg.ageev@klgtu.ru

Abstract. The relevance of production of extruded products from fish raw materials is shown. The necessity of development of theoretical bases of extrusion process for scientifically grounded design of extrusion equipment and improvement of recipes of minced systems is noted. The cycle of scientific publications, the general purpose of which is development of complex of mathematical models of process of extrusion of minced fish with fillers in volumetric consideration taking into account its viscous, elastic and plastic properties, as well as study of dependencies of main parameters of the specified process on rheology of minced fish, geometry of working bodies of extruder and mode parameters, is begun. The purpose of the paper is scientific substantiation of rheological model of minced system from fish raw materials which in development of equations of material flow in working zones of extruder is further used. Complex rheological properties of minced systems from fish raw materials are analyzed and generalized. The material demonstrates instantaneous-elastic deformation, plastic shear and viscoelastic flow, and also has thixotropic properties. The minced meat system is a complex polydisperse system consisting of a liquid phase and a solid fibrous network, which is a complex spatial structure of fibers, colloidal formations, filler particles and has mechanical strength. The rheological model that determines the shear stress inside the fibrous structure of the minced meat system with thixotropic properties depending on the flow velocity gradient is theoretically obtained. To check the adequacy of the obtained mathematical model, experimental studies of the rheological characteristics of various minced meat systems from pollock with the addition of millet, buckwheat, rolled oats, rye flour, dry skim milk, bone mineral supplement were carried out. The tests demonstrated that the material, when moving in the channel, passes through several stages of internal transformations from a structured flow to a dispersed state. The theoretical model with a high degree of adequacy corresponds to the experimental dependencies, which the analysis showed. The developed rheological model quite fully reflects the physical essence of structure formation in the minced meat system and can be used for further modeling of the extrusion process of fish mince.

Keywords: *fish raw material; minced fish; minced meat system; extrusion; extruder; extrudate; complex-shaped product; viscosity; elasticity; plasticity; viscoelasticity; viscoelastoplasticity; normal stresses; shear stresses; ultimate shear stress; deformation; rheology; hydrodynamics; non-Newtonian fluid; filler; flow curve; model.*

For citation: Ageev O.V**.** Substantiation of a rheological model for a fish-based mince system in the production of extruded products. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol. 11, No. 3, pp. 6–25.

Введение

Одним из наиболее перспективных направлений производства высококачественных продуктов питания является технология выпуска изделий из рыбного фарша. Фарш можно вырабатывать из широкого перечня промысловых рыб: минтая, хека, путассу, тунца, сайры, ставриды, сельди, трески, а также из различных видов морепродуктов: криля и кальмара [1]. Особое значение указанная технология приобретает при переработке маломерных нежирных рыб, что позволяет использовать таких малоценных гидробионтов для выпуска востребованной пищевой продукции. Основная масса рыбного фарша, вырабатываемого в

настоящее время в мире, изготавливается из рыб семейства тресковых, причем 95 % фарша, производимого в Японии, выпускается из минтая. В частности, в Японии разработано около 900 видов продукции на основе фарша «сурими» из минтая.

Физико-механические и химико-биологические свойства рыбного фарша обусловливают перспективность производства на его основе широкого ассортимента кулинарной, консервной и другой продукции [2, 3]. Данное обстоятельство подтверждается тем, что в России и за рубежом уделяется большое внимание вопросам использования рыбного фарша и расширения ассортимента изделий из него [4]. При этом существенное количество научных работ посвящено улучшению потребительских достоинств готовой продукции за счет применения различных вкусовых добавок и структурообразователей [5-7]. Все активнее предпринимаются попытки создания новых продуктов питания с заданными структурно-механическими показателями, а также расширяются исследования по увеличению качества и сроков хранения готовых изделий [8, 9].

В последние годы значительно возросло производство и потребление продуктов, приготовленных на основе рыбного фарша: котлет, рыбных палочек, колбас, сосисок, гамбургеров, паст, начинок, сушеных снеков и т.д., что обусловлено удобством доведения до конечной готовности, легкому рационированию, мелкой расфасовке, привлекательному внешнему виду [10]. При этом обеспечение вкусовых свойств изделий из фарша в большой степени зависит от условий его приготовления и хранения. В связи с непрерывным ростом стоимости рыбного филе, фаршевое сырье в значительной степени заменяет филе при производстве колбас, котлет, пирожков, рыбных палочек [11]. Следует также отметить и важную роль технологии рыбного фарша при использовании отходов от производства филе из традиционных промысловых видов рыб.

Наряду с вышеизложенным, возрастает объем выпуска и уровень техники для производства рыбного фарша, в частности, мясокостных сепараторов [12]. Следует отметить, что увеличение выхода качественного рыбного фарша предполагает наличие специальных рыборазделочных машин, позволяющих получить полуфабрикат для дальнейшей обработки на сепараторах [13-15]. Качественное удаление у рыбы голов, внутренностей, черной пленки, позвоночника с почкой и плавательным пузырем необходимо для обеспечения требуемого качества фарша, и, прежде всего, его внешнего вида и устойчивости при хранении продукции из него [16-18].

Анализ показывает, что существующая технология производства рыбного фарша предполагает предварительное разделывание рыбы и затем либо приготовление фарша на мясокостных сепараторах, либо получение филе, из которого вырабатывается фарш. За счет этого формируются достаточно высокие затраты на производство рыбного фарша. По этой причине важно выбрать такое направление использования фарша, при котором обеспечиваются и получение высококачественных продуктов питания, и достаточная рентабельность производства. В настоящее время технология получения фарша из различного промыслового сырья достаточно хорошо отработана: научно обоснованы режимы производства, замораживания и холодильного хранения [19]. Вместе с тем, установлено, что рыбный фарш в виде полуфабриката не находит широкого сбыта. Определенный спрос имеется на мороженые блоки фарша, который применяется в качестве облагороженного рыбного сырья при приготовлении различных блюд на предприятиях общественного питания и в домашних условиях [20]. При этом зачастую на упаковках наносятся рецепты блюд, которые возможно приготовить из этого фарша. Чаще всего, в таком виде реализуется стабилизированный фарш с добавками, увеличивающими его водоудерживающую способность и предотвращающими денатурацию белков, а также фарш, промытый водой и отделенный на сепараторе [21].

Более перспективным направлением представляется производство из фарша формованных продуктов. При этом к измельченной ткани добавляют различные наполнители, изменяющие в требуемом направлении реологические свойства, вкус и запах

изделий. В результате получаются такие продукты, как рыбные гамбургеры, крокеты, фрикадельки, тефтели и т.д. Как показывают отраслевые исследования, для производства рыбных колбасных изделий наиболее подходит промытый сырой фарш «сурими» и стабилизированный фарш из рыбы средней жирности, в котором не происходит значительного уменьшения растворимости белков во время хранения в замороженном виде [22]. «Сурими» представляет собой высококонцентрированный миофибриллярный белок, состоящий в основном из актомиозина [23]. При добавлении к «сурими» поваренной соли и перемешивании белок растворяется, формируя золь или пасту, обладающую адгезивными свойствами застывающую далее с образованием геля [24].

Практически все виды фарша хорошо подходят для производства рыбных паст. Применение различных добавок делает этот вид продукции достаточно перспективным с точки зрения разнообразия ассортимента. Например, хорошим спросом пользуются рыбоовощные и охлажденные пасты, пастеризованные пасты, кремы, майонезы и другие. Активно применяется фарш при производстве рыбных макарон, рыбной соломки, рыбо-кукурузных, рыбо-картофельных хлопьев, а также в качестве заменителя мяса при приготовлении различных мясных продуктов: сосисок, котлет, начинки для пирожков. Мясо-рыбные продукты дешевле продуктов из чистого мяса животных, причем не уступают им по вкусу и пищевой ценности. Наряду с этим, совершенствуется технология и возрастает выпуск пасто- и фаршеобразных продуктов из криля: широкую известность получил готовый продукт в виде белковой пасты под названием «Океан», имеющий розово-оранжевый цвет, однородную пастообразную консистенцию, а также приятный сладковатый вкус, напоминающий вкус креветки.

Обобщая вышеизложенное, получаемую из фарша готовую продукцию возможно условно разделить на следующие виды: формованную, структурированную, сложноформованную и эмульгированную. Заметим, что в практике мировой рыбоперерабатывающей промышленности наибольшую рентабельность демонстрируют структурированные и сложноформованные изделия. При этом широко используются волокна, приготовленные из фарша «сурими». Наиболее эффективным способом получения волокон является процесс экструдирования фарша, в ходе которого осуществляется ориентирование смеси в направлении ее движения и придание продукту заданной формы. Кроме того, получение сложного продукта возможно при одновременной подаче различных его компонентов и формирование пространственной структуры из фаршевой системы. В целом, анализ современного состояния производства продукции из рыбного фарша показывает, что изготовление сложноформованных изделий на основе процесса экструдирования во всем мире получает все большее развитие [25]. Особое значение процесс экструдирования пищевых масс приобретает в связи с бурным развитием инновационной технологии производства продуктов питания методом трехмерной печати [26, 27].

Следует понимать, что процесс холодного экструдирования рыбного фарша отличается от процесса термоэкструдирования, который широко применяется при производстве кормовой продукции, пищевых добавок, снеков и готовых закусок. Вместе с тем, процесс экструдирования с одновременной термической обработкой также применяется при производстве изделий из рыбного фарша. Холодное экструдирование — это процесс продавливания (формования) вязкоупругопластичной массы через отверстие матрицы (фильеру) без воздействия высоких температур и давления, достаточных для варки продукта. Основной целью при этом является придание продукту сложной формы, а не изменение структуры белков. Важным преимуществом холодного экструдирования является сохранение нативных свойств рыбного фарша, т.е. белки, витамины, природные пигменты и жиры в фарше не подвергаются денатурации и разрушению от высокой температуры. Это позволяет обеспечить продукту естественный вкус и аромат рыбы, которые не «завариваются» и не маскируются реакцией Майяра. Кроме того, термочувствительные

витамины (в частности, некоторые витамины группы В) и полиненасыщенные жирные кислоты (омега-3) остаются в неизменном виде. Ценным обстоятельством является возможность вносить в фарш при холодном экструдировании свежие и термочувствительные добавки: кусочки овощей, зелень, сыр, специи, ароматические масла, которые сохранят свой вкус, цвет и текстуру в конечном продукте после последующего доведения до готовности.

Развитие экструзионной техники в рыбоперерабатывающей отрасли находится на начальном этапе, а процессы экструдирования в рыбохозяйственном комплексе являются в определенной мере новыми и недостаточно изученными. В связи с этим, требуется проводить научный поиск в области производства из рыбного фарша широкого ассортимента кулинарных, колбасных, снековых, консервированных изделий и других пищевых продуктов. Для использования фарша в качестве полуфабриката при приготовлении новой продукции путем экструдирования имеются широкие возможности, которые подкрепляются растущим спросом на изделия, выпускаемых в удобной для потребителя упаковке и расфасовке. Указанные обстоятельства показывают высокую актуальность работ, направленных на поиски новых видов сложноформованных продуктов и способов их производства из рыбного фарша, а также исследований по совершенствованию технологического оборудования и оснастки для экструдирования. Теоретическое исследование закономерностей процесса экструдирования создает основу для совершенствования, повышения производительности и устранения решающих недостатков существующих конструкций машин, а также для разработки новых формующих рабочих органов с оптимальной геометрией. Это, в свою очередь, позволит увеличить выпуск сложноформованных продуктов высокого качества из рыбного фарша, пользующихся спросом потребителей.

Наряду с вышеперечисленным, высокое качество формования готовых изделий из рыбного фарша определяется равномерностью подачи и распределения материала в процессе экструдирования. Это в значительной мере зависит от эффективности работы экструдера, которая, в свою очередь, зависит от правильности определения геометрии формующих инструментов. Оптимальность конструктивного исполнения машин и эффективность их технологического использования зависит от того, насколько известны движения и внутренние структурные явления в экструдате при различных режимах подачи пищевой массы. Зачастую перемещение материала в экструзионных установках связано с резким расширением или сужением потока, с его поворотами, вызывающих появление отрывных течений в каналах, с резким дросселированием потока в различных приспособлениях. Это создает неблагоприятный фон на основной движущийся поток, вызывая дополнительные динамические нагрузки, а также нестабильный подвод фарша к формующим инструментам. Такие нежелательные явления могут быть сведены к минимуму путем обеспечения оптимальных условий проектирования рабочих зон экструдеров.

Все это наглядно показывает, что требуется расширять теоретические исследования и фундаментальные представления при организации потока вязкоупругопластичного материала в технологическом оборудовании для производства сложноформованных изделий из рыбного фарша. Развитие теории и методов расчета экструдеров является задачей, решение которой обеспечивает оптимальное конструирование их узлов с целью получения готовых продуктов высокого качества. Вместе с тем, теоретические методы расчета реологических и гидродинамических процессов, происходящих в процессе экструдирования рыбного фарша, позволяющие оптимизировать и интенсифицировать работу экструдеров, в научно-технической литературы освещены недостаточно. Следует учитывать, что результаты математического моделирования процесса экструдирования используются при многократной корректировке рецептур фаршевых систем для обеспечения заданного качества продукции и ее основных потребительских показателей. Это создает практическую основу для разработки принципиально новых продуктов из пищевого сырья.

ISSN 2413–9858

С учетом вышеизложенного, начат цикл научных публикаций, общей целью которого является разработка комплекса математических моделей процесса экструдирования рыбного фарша в объемном рассмотрении с учетом его вязких, упругих и пластических свойств, а также исследование зависимостей основных параметров указанного процесса от реологии рыбного фарша, геометрии рабочих органов экструдера и режимных параметров. Первым этапом указанного цикла является настоящая статья, цель которой – научное обоснование реологической модели фаршевой системы из рыбного сырья, которая в дальнейшем используется при разработке уравнений течения вязкоупругопластичной массы в рабочих зонах экструдера.

Анализ реологических свойств фаршевых систем из рыбного сырья при производстве экструдированных изделий

Исследование реологических свойств рыбного фарша в связи с его использованием в качестве материала для производства экструдированных изделий, как показано выше, приобретает высокую прикладную важность. Наиболее полное описание поведения материала можно получить только при учете вязких, упругих, пластичных, адгезионных и теплофизических свойств, которыми обладает рыбный фарш из промысловых видов водного сырья. Рыбный фарш является дисперсионной системой и обладает сложными структурно-механическими свойствами. С точки зрения коллоидной и физической химии данный материал представляет собой гелеобразную систему сложного строения и химического состава. Основу ее составляют преимущественно саркоплазматические белки, среди которых преобладают миоген и миофибриллярные белки актомиозинового комплекса. В образовании геля и его пространственной структуры основную роль играют ионные связи, возникающие за счет наличия в белковой молекуле электрически заряженных функциональных групп – карбоксильных, аминных и других.

Реологические свойства фаршевой системы, таким образом, определяются составом мышечных белков и их строением, содержанием воды, жира, волокон, структурообразователей и наполнителей, а также формой связи влаги с белками и соотношением между количеством прочно и слабо связанной влаги. Обстоятельные экспериментальные исследования различных авторов показывают, что особенностью рыбного фарша при его механической переработке является одновременное возникновение деформации вязкого течения, упругой и высокоэластичной (запаздывающей) деформации. Это говорит о том, что фаршевая система из водного сырья представляет собой сложное вязкоупругопластичное тело, в котором при нагружении развиваются обратимые упругие и высокоэластичные деформации, а также необратимая вязкая деформация, которая является необходимым условием для формования продукта.

В ряде отраслевых работ обстоятельно исследованы и проанализированы реологические свойства рыбного фарша, в результате чего показано что данный материал следует характеризовать целым комплексом характеристик: сдвиговыми, компрессионными, прочностными, фрикционными и адгезионными показателями. Различными авторами установлено, что реологические свойства рыбного фарша в значительной мере определяются видовыми особенностями водного сырья. Исследованием свойств таких материалов занимались И.В. Кизеветтер, М.И. Слепян, М.П. Андреев, Г.В. Маслова, В.Д. Косой, Т.М. Сафронова, В.Д. Богданов, T. Håmmer, J. Jensen, T. Kimura, J.W. Park и многие другие ученые. Деформационное поведение материала при напряжениях, меньших предельного напряжения сдвига, характеризуется кинетическими кривыми деформации, модулями упругости, периодами релаксации напряжений, наибольшей эффективной вязкостью. При напряжениях, превышающих предельное напряжение сдвига, течение рыбного фарша оценивают предельным напряжением сдвига (пределом текучести), а также различными вязкостями – в зависимости от вида выбранной математической модели. Следует отметить, что для моделирования процесса экструдирования эти показатели являются наиболее

существенными, поскольку определяются при сравнительно высоких градиентах скорости и напряжениях сдвига. Отраслевые исследования показывают, что в области лавинного разрушения структуры фарша зависимость эффективной вязкости от градиента скорости степенная. Материал обнаруживает гистерезисные свойства, которые обобщаются криволинейными поверхностями зависимости эффективной вязкости от напряжения сдвига и длительности его приложения. По результатам многочисленных реометрических исследований в рыбной отрасли различными исследователями получена следующая степенная зависимость эффективной вязкости рыбного фарша от градиента скорости сдвига:

$$\eta_{эф} = B_0 \cdot \dot{\gamma}^{-m}, \quad (1)$$

где $\eta_{эф}$ - эффективная вязкость материала; B_0 - эффективная вязкость при единичных значениях градиента скорости и окружной скорости ротационно-цилиндрического вискозиметра; $\dot{\gamma}$ - градиент скорости; $B_0 = 80 \div 800$ Па·с; $m = 0{,}52 \div 0{,}85$.

На сдвиговые характеристики рыбного фарша в значительной мере влияют основные технологические факторы, которые необходимо учитывать при моделировании процесса экструдирования и расчете рабочих органов машин: рецептура фарша; концентрация водородных ионов; температура; время выдержки; влажность; жирность; давление; влагосодержание, вид и степень механической обработки; вибрация. Отмечено, что с возрастанием градиента скорости деформирования вязкость фарша снижается, что обусловлено разрушением внутренних волокнистых структур. При определенных условиях по реологическим характеристикам это позволяет отнести рыбный фарш к неньютоновским вязким средам, а именно – к псевдопластическим жидкостям. Наряду с этим, материал обнаруживает и тиксотропные свойства, т.е. имеет место временное снижение вязкости в результате предшествующей деформации, причем изменение вязкости является обратимым. Ряд авторов обоснованно полагает, что упругие и высокоэластичные свойства рыбному фаршу придает наличие белков группы миозина, а также наличие жира.

Наряду с вышеизложенным, реологические свойства материала существенно зависят от длительности и температуры хранения сырья, из которого вырабатывается рыбный фарш. Отмечается, что фарш, приготовленный из рыбы сразу после разрешения посмертного окоченения, имеет наилучшие реологические и органолептические показатели, а также хорошо удерживает влагу. Температура материала существенно влияет на вязкость фарша, модуль упругости и модуль высокоэластичности. Степень влияния температуры на реологические свойства фарша значительно повышается с увеличением его влажности. Все это дает основания полагать, что в процессе экструдирования изменение температуры и влажности материала оказывает существенное воздействие на процесс течения фарша в рабочих органах оборудования.

Кроме того, определяющее значение для реологических характеристик рыбного фарша имеют способ и степень его измельчения. Интенсивное измельчение путем куттерования сырья способствует улучшению структуры и консистенции фарша, повышает его вязкость и липкость, улучшает органолептические показатели и увеличивает выход готового продукта. Это обусловлено одновременными механическими и химическими изменениями в материале, которые являются причиной связывания воды с белком и способствуют эмульгированию жира. Выделяют три основных периода куттерования рыбного фарша. В первом (подготовительном) периоде размер частиц уменьшается незначительно, добавленная в куттер вода перемешивается с частицами мышечной ткани и образует около них толстые прослойки, облегчающие деформацию. Предельное напряжение сдвига имеет в конце данного периода минимальное значение. Во втором (основном) периоде происходит интенсивное разрезание частиц, общая площадь их поверхности увеличивается, влага из свободной переходит в поверхностно-связанную, происходит

процесс образования новой структуры фарша. К концу основного периода сдвиговые характеристики фарша достигают экстремального значения. В третьем периоде происходит «размочаливание» волокон, предельное напряжение сдвига снижается, имеет место нежелательное «перекуттерование» фарша. Это привело к понятию оптимальной продолжительности куттерования, при которой все показатели рыбного фарша при заданной влажности достигают экстремальных значений, а строение материала является наиболее однородным при компактной укладке частиц.

В процессе куттерования мышечной ткани рыбы происходит освобождение большого количество актомиозина и расщепление его на актин и миозин, молекулы которых лучше поглощают воду и легче переводятся в растворимое состояние по сравнению с комплексом актомиозина. Отмечено, что тонко измельченный фарш имеет более однородную структуру, а также лучше смешивается со структурообразующими и вкусовыми добавками. Вместе с тем, для каждого вида сложноформованного продукта имеется оптимальная степень измельчения, при которой достигаются наилучшие структурно-механические, физико-химические и органолептические показатели качества. Липкость, вязкость, влагоудерживающая способность и другие реологические показатели материала улучшаются до определенной кратности измельчения, после чего могут не изменяться или ухудшаться. Наряду с этим, существенное влияние на реологические свойства рыбного фарша оказывает длительность его хранения после куттерования. Сразу после его приготовления материал имеет наименьшую вязкость и наибольшую пластичность. В процессе хранения при постоянной температуре упругие и высокоэластичные показатели повышаются, а пластичность снижается. Одновременно в процессе выдержки снижается липкость материала. Причем после повторного измельчения, растирания и перемешивания рыбный фарш снова почти восстанавливает первоначальные свойства.

При увеличении давления значения сдвиговых характеристик фарша увеличиваются, что обусловлено перераспределением дисперсионной среды в системе и изменением размера частиц и гидратных оболочек. Приложенное давление вызывает переориентацию частиц, более компактную их упаковку с одновременным деформированием и сокращением объема воздушных полостей. Это приводит к упрочнению связей между частицами, в результате чего для разрушения структуры фаршевой системы требуются более интенсивные внешние воздействия. История нагружения материала гидростатическим давлением оказывает влияние на величины сдвиговых характеристик.

Наряду с этим, экспериментальные исследования компрессионных характеристик продемонстрировали наличие выраженных упругих и высокоэластичных свойств рыбного фарша. Экспериментально подтверждено, что общая деформация сжатия рыбного фарша состоит из трех зон. При напряжениях, меньших предела упругости (в среднем $1 \cdot 10^5$ Па), реализуется зона условно мгновенно-упругих деформаций. Во второй зоне (напряжения в диапазоне $1 \cdot 10^5 \div 3{,}5 \cdot 10^5$ Па) развивается запаздывающая высокоэластичная деформация (упругого последействия). В третьей зоне (напряжения свыше $3{,}5 \cdot 10^5$ Па) проявляются пластические деформации.

В целом следует отметить, что имеющиеся сведения по реологии фаршевых систем из рыбного сырья недостаточно раскрывают суть физических процессов, происходящих при их движении. Наличие явных отличительных особенностей движения рыбного фарша по сравнению с движением ньютоновской жидкости, отмеченное всеми исследователями в отрасли, требует критического отношения к возможности использования сведений из гидродинамики ньютоновских жидкостей для расчета экструзионного оборудования, предназначенного для изготовления сложноформованных изделий.

Вышеизложенное приводит к тому, что для описания сложных реологических свойств фарша требуется комплексная математическая модель, характеризующая различные аспекты физико-механического поведения материала при экструдировании. Для разработки уравнений движения и объемного деформирования вязкоупругопластичного материала

необходимо проанализировать характер физических процессов, происходящих в фаршевой системе из рыбного сырья при различных условиях ее экструдирования.

Материал представляет собой сложную полидисперсную систему, состоящую из жидкой фазы и твердообразной волокнистой сетки, представляющую собой сложную пространственную структуру из волокон, коллоидных образований, частиц наполнителей и обладающую небольшой механической прочностью. Фаршевую систему возможно представить как большое множество взаимопроникающих пространственных сеток различной прочности. Повышение внешней нагрузки в потоке приводит к постепенному разрушению наиболее слабых из них, что означает усиление удельного напряжения на еще неразрушенные сетки. При малых градиентах сдвига рыбный фарш в потоке представляет собой структурированную систему, которая начинает разрушаться с увеличением этого градиента, что приводит к понижению эффективной вязкости. Сопоставление полученных в рыбной отрасли экспериментальных результатов различных авторов показывает, что фаршевая система из измельченного рыбного сырья – это неньютоновская жидкостная система с вязкоупругопластичными и тиксотропными свойствами, о чем свидетельствуют величины гидравлических потерь при течении данного материала, а также его сдвиговые и компрессионные характеристики, определенные на ротационных вискозиметрах и измерителях текстуры.

Из экспериментальных данных следует, что фаршевая система при увеличении скорости движения в канале, начиная от состояния покоя, проходит через несколько стадий внутренних структурных преобразований. В неподвижном состоянии рыбный фарш образует пространственную волокнистую структуру, в которой сцепление между волокнами обеспечивается за счет деформационных и адгезионных сил трения, а также связей биохимического взаимодействия. Связанные волокна образуют внутренний каркас в неподвижной фаршевой системе, которая обладает определенной внутренней прочностью и значительной адгезией к стенкам канала. С увеличением концентрации структурообразователей в рыбном фарше внутренняя структура становится еще более прочной, и требуется значительное усилие, чтобы вызвать сдвиговые явления. Начальное давление для возникновения движения в канале необходимо для преодоления сил трения материала о стенки канала. Силы трения покоя суммируются с внутренней прочностью внутреннего каркаса и его упругостью. При некотором малом начальном давлении рыбный фарш в канале двигаться не будет, а в структуре возникает упругое напряженное состояние.

При движении материала в зависимости от скорости имеется два вида потока: структурированный и диспергированный. При малых скоростях движения волокна и сгустки фарша образуют структурированный слой, который находится в области практически неразрушенных структур. Данный слой сохраняется за счет связей между волокнами, образуя упругую структуру определенной прочности. С увеличением градиента скорости увеличиваются касательные силы внутреннего трения, что приводит к началу разрушения и потере прочности структурированного слоя в результате сдвига между волокнами. Указанный слой претерпевает деформацию и переходит в стадию разрушения структуры, при котором разрываются связи между волокнами. Поток становится диспергированным, в нем исчезают напряжения трения и напряжения, характерные для внутреннего упругого состояния материала. По мере диспергирования потока возрастают силы вязкостного трения, характерные для ньютоновской жидкости. Таким образом, фаршевая система с увеличением скорости сдвига проявляет тиксотропные свойства и превращается в жидкотвердую среду, состоящей их жидкой фазы и диспергированных волокон. Внутренняя структура материала перестраивается в связи с утратой связей между волокнами, которые растягиваются, ориентируются по потоку и двигаются в нем в виде отдельных структурированных образований. Течение по мере роста градиента скорости и достижения предельного разрушения структуры приобретает ньютоновский характер ламинарного движения.

ISSN 2413–9858

Разработка реологического уравнения, описывающего вязкоупругопластичные свойства фаршевой системы из рыбного сырья при экструдировании

Рассмотрим физические причины возникновения различных напряжений в вязкоупругопластичной фаршевой системе. До начала движения потока в рыбном фарше возникают упругие напряжения $\tau_{упр}$, если прилагаемая нагрузка не превышает деформационную и адгезионную составляющие силы трения волокнистой структуры по стенкам канала. В начальный период движения в материале возникает напряжение, являющееся суммой напряжения внешнего трения $\tau_{тр}$ потока о стенки канала, напряжения прочности $\tau_{пр}$ упругой структуры внутри материала и напряжения вязкости $\tau_{в}$ диспергированной фазы: $\tau = \tau_{тр} + \tau_{пр} + \tau_{в}$. Напряжение внешнего трения $\tau_{тр}$ вызывает разрушение волокнистой структуры фаршевой системы в потоке и согласно экспериментальным данным всегда превышает напряжение внутренней прочности $\tau_{пр}$ структуры фаршевой системы: $\tau_{тр} > \tau_{пр}$. Ввиду взаиморазрушающего действия двух указанных напряжений, они должны иметь противоположные знаки: $\tau_{тр} > 0$; $\tau_{пр} < 0$.

Тиксотропные свойства фаршевой системы при экспериментальных испытаниях проявляются в том, что по мере увеличения градиента скорости течения фаршевой системы напряжения внешнего трения о стенки канала и напряжения прочности снижаются в экспоненциальной зависимости от градиента скорости. При достижении определенных значений градиента скорости и предельного разрушения упругой структуры фаршевая система двигается аналогично ньютоновской жидкости, и ее внутренние напряжения характеризуются только вязкостным трением.

Для начала движения рыбного фарша к системе необходимо приложить усилие, превышающее предельное напряжение сдвига, которое является суммой напряжения внешнего трения (деформационной и адгезионной составляющей) волокнистой структуры о стенки канала и напряжения прочности упругой волокнистой сетки. Обозначим напряжение внешнего трения о стенки канала в момент трогания волокнистой структуры T_1 (фрикционный показатель волокнистой структуры фаршевой системы в потоке), а напряжения внутренней прочности в момент трогания соответственно T_2 (прочностной показатель волокнистой структуры в потоке). Тогда предельное напряжение сдвига будет равно: $\tau_0 = T_1 + T_2$.

Поскольку фаршевая система на начальном этапе деформирования обладает явно выраженными вязкоупругими свойствами, то напряжение внешнего трения о стенки канала пропорционально деформации материала. В вязкоупругом материале изменение деформации за малое время пропорционально градиенту скорости. Следовательно, изменение напряжения за этот малый промежуток времени будет пропорционально изменению деформации. Таким образом, если рассмотреть небольшой промежуток времени t_1, то относительное значение напряжения внешнего трения рыбного фарша о стенки канала будет пропорционально изменению градиента скорости потока:

$$\Delta\tau_{тр} / \tau_{тр} = -t_1 \cdot \Delta\dot{\gamma}. \qquad (2)$$

Противоположность знаков в формуле (2) обусловлена разной направленностью составляющих векторов. В дифференциальной форме уравнение (2) имеет следующий вид:

$$d\tau_{тр} / \tau_{тр} = -t_1 \cdot d\dot{\gamma}. \qquad (3)$$

Проинтегрировав обе части формулы (3), получим:

$$\ln \tau_{mp} = -t_1 \cdot \dot{\gamma} + C_1. \quad (4)$$

Постоянную интегрирования C_1 найдем из условия: при $\dot{\gamma} = 0$ напряжение внешнего трения $\tau_{mp} = \mathrm{T}_1$. Из этого следует, что $C_1 = \ln \mathrm{T}_1$. Тогда выражение (4) примет вид:

$$\ln \tau_{mp} = -t_1 \cdot \dot{\gamma} + \ln \mathrm{T}_1. \quad (5)$$

Учитывая, что $\ln\left(\tau_{mp}/\mathrm{T}_1\right) = -t_1 \cdot \dot{\gamma}$, из формулы (5) получим:

$$\tau_{mp} = \mathrm{T}_1 \cdot \exp\left(-t_1 \cdot \dot{\gamma}\right). \quad (6)$$

Согласно уравнению (6) напряжение внешнего трения демонстрирует экспоненциальную зависимость от градиента скорости потока, что согласуется с физическим смыслом. Выше указывалось, что с увеличением градиента скорости волокнистая структура рыбного фарша разрушается со снижением внутренней прочности. Следовательно, если рассмотреть небольшой промежуток времени t_2, то относительное падение внутреннего напряжения в волокнистой структуре также будет пропорционально изменению градиента скорости потока. Придав данному утверждению дифференциальную форму, имеем:

$$d\tau_{np}/\tau_{np} = -t_2 \cdot d\dot{\gamma}. \quad (7)$$

Проинтегрировав обе части уравнения (7) и выполнив преобразования, аналогичные выражениям (4), (5), получим формулу для напряжения внутренней прочности волокнистой структуры фаршевой системы, которая также согласуется с физическим смыслом:

$$\tau_{np} = \mathrm{T}_2 \cdot \exp\left(-t_2 \cdot \dot{\gamma}\right). \quad (8)$$

Принимая во внимание выражения (6) и (8) получим формулу для общего напряжения в потоке фаршевой системы:

$$\tau = \mathrm{T}_1 \cdot \exp\left(-t_1 \cdot \dot{\gamma}\right) + \mathrm{T}_2 \cdot \exp\left(-t_2 \cdot \dot{\gamma}\right) + \tau_в. \quad (9)$$

Поскольку в стадии течения практически разрушенной структуры при высоких градиентах скорости для ньютоновских жидкостей зависимость напряжения сдвига от градиента скорости имеет вид $\tau_в = \mu \cdot \dot{\gamma}$, то выражение (9) принимает следующую форму:

$$\tau = \mathrm{T}_1 \cdot \exp\left(-t_1 \cdot \dot{\gamma}\right) + \mathrm{T}_2 \cdot \exp\left(-t_2 \cdot \dot{\gamma}\right) + \mu \cdot \dot{\gamma}, \quad (10)$$

где μ – коэффициент псевдопластической вязкости диспергированной фазы фаршевой системы; t_1, t_2 - временные факторы, характеризующие разрушение волокнистой структуры фаршевой системы; $t_1 > 0$; $t_2 > 0$; $\mu > 0$; $\mathrm{T}_1 + \mathrm{T}_2 = \tau_0 > 0$.

Полученная формула (10) определяет напряжение сдвига внутри волокнистой структуры фаршевой системы с тиксотропными свойствами в зависимости от градиента скорости потока. При отсутствии движения материала ($\dot{\gamma} = 0$) в фаршевой системе напряжение должно быть меньше или равно предельному напряжению сдвига: $\tau \le \tau_0$. Из формулы (10) следует, что при $\dot{\gamma} = 0$: $\tau = T_1 + T_2 = \tau_0$. При увеличении градиента скорости первые два слагаемых в формуле (10) стремятся к нулю, так как соответствующие им напряжения исчезают по мере разрушения волокнистой структуры фаршевой системы в потоке. Из этого следует, что уравнение (10) должно асимптотически приближаться к прямой линии $\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$. Согласно формуле (10) фаршевая система при малых градиентах скорости сдвига представляет собой твердообразную вязкоупругопластичную волокнистую структуру с напряжениями внешнего трения и внутренней прочности, а при больших градиентах скорости превращается через стадию структурированного потока в диспергированную ньютоновскую жидкость. Реологическая модель материала, соответствующая выражению (10), приведена на рис. 1. Как видим, модель представляет собой комбинацию элементов Гука, Ньютона и Сен-Веннана.

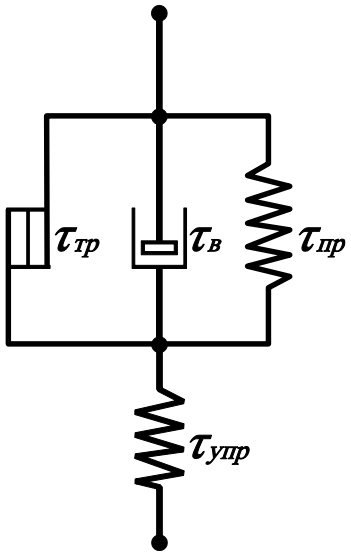


Рисунок 1 - Реологическая модель фаршевой системы из рыбного сырья

Необходимо отметить, что в модели, показанной на рис. 1, отдельные реологические элементы представляют собой условное обозначение более сложных реологических моделей на нижерасположенном масштабном уровне. Для проверки адекватности математической модели (10) реальным физико-механическим свойствам материала провели экспериментальные исследования реологических показателей рыборастительных фаршевых систем различного состава из рыбного сырья. В качестве модельной вязкоупругопластичной среды при испытаниях использовали рыбный фарш из минтая (контроль) и четыре вида рыборастительных масс из указанного фарша с различными гидрофильными наполнителями: пшено, гречневая крупа, геркулес, ржаная мука, сухое обезжиренное молоко, костная минеральная добавка. Образцы готовили с концентрацией 10 % крупы (муки). Измерение касательных напряжений проводили на автоматизированном ротационном вискозиметре Rheotest RN4.1 при температуре исследуемых образцов 10 ± 0,5 ºС. Градиент скорости сдвига изменяли в диапазоне от 1 до 450 $с^{-1}$.

Результаты экспериментальных исследований в виде реограмм течения фаршевой системы представлены на рис. 2. Кривые начинаются в различных начальных точках $\tau_0 = T_1 + T_2$, которые соответствуют предельному напряжению сдвига каждого материала. До достижения этого напряжения фаршевая система ведет себя как твердое тело с обратимой

ISSN 2413–9858

упругой деформацией и отсутствием течения. При этом частицы фарша (белковые волокна, фрагменты клеток, жировые глобулы и пр.) образуют прочную пространственную сетку (матрицу) за счет слабых физико-химических связей (водородных, вандерваальсовых, и гидрофобных взаимодействий). При малой скорости механического нагружения указанная сетка упруго деформируется, но не разрушается. Материал упруго сопротивляется деформации, и для дальнейшего развития деформации требуется прилагать все большее усилие. Упругая энергия прикладываемой нагрузки частично аккумулируется в деформированной структуре фаршевой системы.

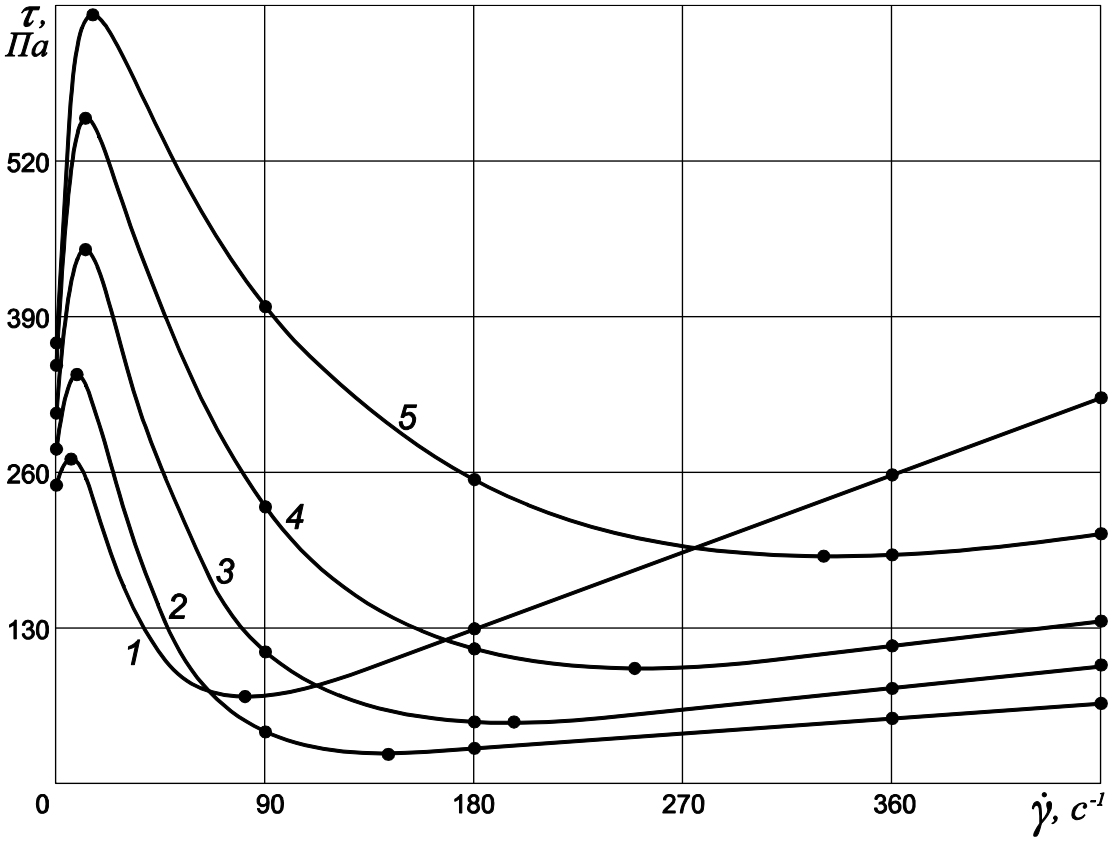


Рисунок 2 - Реограммы течения фаршевой системы из рыбного сырья с различными наполнителями:
1 − рыбный фарш из минтая (контроль); 2 − рыбный фарш с добавлением пшена, сухого обезжиренного молока и костной минеральной добавки; 3 − рыбный фарш с добавлением гречневой крупы, сухого обезжиренного молока и костной минеральной добавки; 4 − рыбный фарш с добавлением геркулеса, сухого обезжиренного молока и костной минеральной добавки; 5 − рыбный фарш с добавлением ржаной муки, сухого обезжиренного молока и костной минеральной добавки

После преодоления предельного напряжения сдвига и страгивания материала значения напряжения на кривых течения резко нелинейно возрастают. Данный этап является участком ползучести материала, на котором происходит вязкоупругая деформация, включающая упругую и высокоэластичную составляющие. Далее напряжение сдвига в материале достигает значения, которое превышает прочность внутренних связей в структурированной сетке фаршевой системы. При явно выраженном на графике максимуме напряжения структура из мышечных волокон и белков не выдерживает нагрузки, и начинается лавинообразное разрушение матрицы фаршевой системы. Максимум на кривой течения соответствует моменту, когда разрушено критическое количество связей, удерживающих структуру. Нисходящие ветви кривых на рис. 2 характеризуют дальнейший лавинообразный процесс разрушения. Пространственная сетка разрушается, при этом

крупные агрегаты распадаются на более мелкие частицы, которые начинают ориентироваться вдоль потока. Сопротивление течению резко падает, поскольку разрушенная структура уже не может оказывать значительного сопротивления внешней нагрузке.

В точках перегиба на кривых течения первоначальная прочная структура фаршевой системы полностью разрушена. Материал представляет собой концентрированную суспензию отдельных частиц (фрагментов волокон, капель жира), ориентированных и упорядоченных в потоке. После полного разрушения фаршевая система начинает вести себя как псевдопластичная жидкость. Дальнейшее увеличение скорости сдвига требует увеличения напряжения для преодоления вязкого трения между уже отдельными, не связанными в сетку частицами. Близкий к линейному характер роста напряжения говорит о том, что новой структура не успевает образовываться, поскольку сразу разрушается сдвигом.

Анализ показывает, что кривые течения имеют следующие характерные особенности. Начало каждой линии проходит через соответствующие точки $Q_1(\tau_{0-1},0)$, $Q_2(\tau_{0-2},0)$, …, $Q_5(\tau_{0-5},0)$ с ординатами $\tau_{0-n}>0$. На начальном участке кривые имеют выпуклость вверх. Угловой коэффициент касательных в точках $Q_n(\tau_{0-n},0)$ принят $\mu_{0-n}>0$. Угловой коэффициент наклонных асимптот принят $\mu_n>0$. Для каждой кривой можно полагать, что $\mu_{0-n}>\mu_n$. Каждая кривая имеет одну точку перегиба, а направление наклонной асимптоты практически исходит из начала координат. Таким образом, каждая из экспериментальных кривых может быть описана теоретическим уравнением (10).

Добавление сухих и гидрофильных наполнителей преобразовало рыбную фаршевую систему из относительно однородной вязкоупругой системы (контрольной) в гетерогенную композитную пасту с высокой концентрацией твердых частиц (образцы 1-4). Такая система на стадии неразрушенной структуры и стадии разрушения структуры обладает более высоким сопротивлением течению (более высоким напряжением сдвига при том же градиенте скорости).

По экспериментальным зависимостям на рис. 2 можно достаточно точно вычислить коэффициенты μ, t_1, t_2, T_1, T_2 для модели (10). Разработана следующая методика для определения значений указанных коэффициентов. Каждая из экспериментальных кривых имеет одну точку перегиба. Обозначим координаты точки перегиба τ^* и $\dot{\gamma}^*$. В этом случае реологическое уравнение (10) принимает следующий вид:

$$\tau^* = \mathrm{T}_1 \cdot \exp\left(-t_1 \cdot \dot{\gamma}^*\right) + \mathrm{T}_2 \cdot \exp\left(-t_2 \cdot \dot{\gamma}^*\right) + \mu \cdot \dot{\gamma}^*. \qquad (11)$$

Для точки перегиба вторая производная функции равна нулю, что означает справедливость выражения: $d^2\tau^*/d\dot{\gamma}^{*2}=0$. В результате получим: $t_1^2 \cdot \mathrm{T}_1 \cdot \exp\left(-t_1 \cdot \dot{\gamma}^*\right) + t_2^2 \cdot \mathrm{T}_2 \cdot \exp\left(-t_2 \cdot \dot{\gamma}^*\right) = 0$.

Поскольку $\mathrm{T}_2 = \tau_0 - \mathrm{T}_1$, то $t_1^2 \cdot \mathrm{T}_1 \cdot \exp\left(-t_1 \cdot \dot{\gamma}^*\right) + t_2^2 \cdot (\tau_0 - \mathrm{T}_1) \cdot \exp\left(-t_2 \cdot \dot{\gamma}^*\right) = 0$, откуда следует:

$$\exp\left(-t_2 \cdot \dot{\gamma}^*\right) = \frac{t_1^2}{t_2^2} \cdot \frac{\mathrm{T}_1}{\mathrm{T}_1 - \tau_0} \cdot \exp\left(-t_1 \cdot \dot{\gamma}^*\right). \qquad (12)$$

Из формул (11) и (12) получим:

ISSN 2413–9858

$$\begin{aligned}\tau^* - \mu\cdot\dot{\gamma}^* &= \mathrm{T}_1\cdot\exp\left(-t_1\cdot\dot{\gamma}^*\right)+\mathrm{T}_2\cdot\exp\left(-t_2\cdot\dot{\gamma}^*\right)= \\ &= \mathrm{T}_1\cdot\exp\left(-t_1\cdot\dot{\gamma}^*\right)+(\tau_0-\mathrm{T}_1)\cdot\frac{t_1^2}{t_2^2}\cdot\frac{\mathrm{T}_1}{\mathrm{T}_1-\tau_0}\cdot\exp\left(-t_1\cdot\dot{\gamma}^*\right)= \\ &= \mathrm{T}_1\cdot\exp\left(-t_1\cdot\dot{\gamma}^*\right)\cdot\left[1-\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^2\right].\end{aligned} \tag{13}$$

Поскольку $\mathrm{T}_1+\mathrm{T}_2=\tau_0\geq 0$ и $t_1\cdot\mathrm{T}_1+t_2\cdot\mathrm{T}_2=\mu-\mu_0$, то

$$t_2=\frac{\mu-\mu_0-t_1\cdot\mathrm{T}_1}{\tau_0-\mathrm{T}_1}. \tag{14}$$

Подставляя (14) в (13), получим:

$$\exp\left(t_1\cdot\dot{\gamma}^*\right)\cdot\left(\tau^*-\mu\cdot\dot{\gamma}^*\right)=\mathrm{T}_1\cdot\left[1-\left(\frac{t_1\cdot(\tau_0-\mathrm{T}_1)}{\mu-\mu_0-t_1\cdot\mathrm{T}_1}\right)^2\right]. \tag{15}$$

Выполнив преобразования, имеем:

$$\begin{aligned}&\exp\left(t_1\cdot\dot{\gamma}^*\right)\cdot\left(\tau^*-\mu\cdot\dot{\gamma}^*\right)\cdot(\mu-\mu_0-t_1\cdot\mathrm{T}_1)^2= \\ &=\mathrm{T}_1\cdot\left((\mu-\mu_0)^2-t_1^2\cdot\tau_0^2\right)-2\cdot t_1\cdot T_1\cdot(\mu-\mu_0-t_1\cdot\tau_0)\Big).\end{aligned} \tag{16}$$

Уравнение (16) содержит два неизвестных: t_1 и T_1. Принимая положительное значение t_1, определяем корень уравнения T_1. Далее значения t_2 и T_2 рассчитываются по формулам: $\mathrm{T}_2=\tau_0-\mathrm{T}_1$; $t_2=\dfrac{\mu-\mu_0-t_1\cdot\mathrm{T}_1}{\tau_0-\mathrm{T}_1}$.

По вышеописанной методике из экспериментальных кривых рис. 2 определены значения коэффициентов уравнения (10), в результате чего на рис. 3 построено семейство теоретических зависимостей общего напряжения в потоке фаршевой системы от градиента скорости. Указанные теоретические зависимости для пяти различных образцов фаршевых систем (рис. 2) построены по следующим реологическим уравнениям:

$$\tau_1=570\cdot\exp(-0{,}045\cdot\dot{\gamma})-320\cdot\exp(-0{,}108\cdot\dot{\gamma})+0{,}724\cdot\dot{\gamma};\ \ \tau_0=250\ \text{Па}; \tag{17}$$

$$\tau_2=615\cdot\exp(-0{,}034\cdot\dot{\gamma})-335\cdot\exp(-0{,}122\cdot\dot{\gamma})+0{,}153\cdot\dot{\gamma};\ \tau_0=280\ \text{Па}; \tag{18}$$

$$\tau_3=658\cdot\exp(-0{,}022\cdot\dot{\gamma})-348\cdot\exp(-0{,}144\cdot\dot{\gamma})+0{,}227\cdot\dot{\gamma};\ \tau_0=310\ \text{Па}; \tag{19}$$

$$\tau_4=717\cdot\exp(-0{,}014\cdot\dot{\gamma})-367\cdot\exp(-0{,}163\cdot\dot{\gamma})+0{,}309\cdot\dot{\gamma};\ \tau_0=350\ \text{Па}; \tag{20}$$

$$\tau_5=745\cdot\exp(-0{,}008\cdot\dot{\gamma})-375\cdot\exp(-0{,}187\cdot\dot{\gamma})+0{,}425\cdot\dot{\gamma};\ \tau_0=370\ \text{Па}. \tag{21}$$

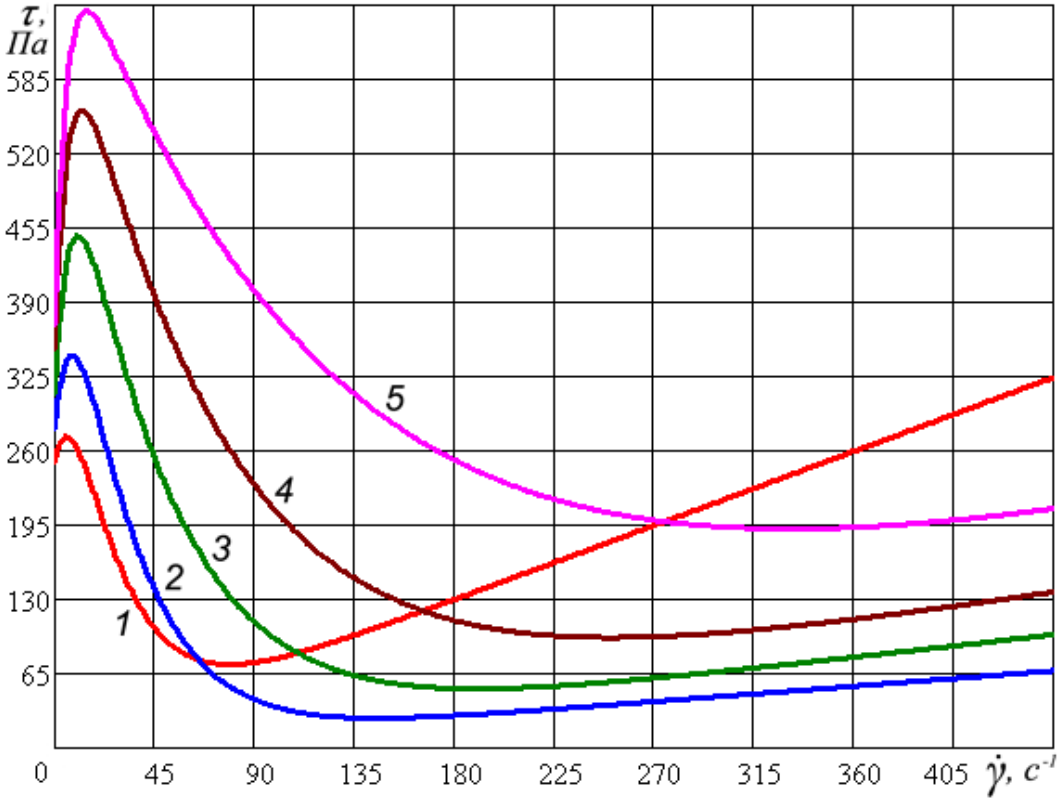


Рисунок 3 - Теоретические кривые течения фаршевых систем из рыбного сырья по моделям (17)-(21):

1 – $\tau_0 = 250$ Па, $T_1 = 570$ Па, $T_2 = 320$ Па, $t_1 = 0{,}045$ с, $t_2 = 0{,}108$ с, $\mu = 0{,}724$ Па·с;

2 – $\tau_0 = 280$ Па, $T_1 = 615$ Па, $T_2 = 335$ Па, $t_1 = 0{,}034$ с, $t_2 = 0{,}122$ с, $\mu = 0{,}153$ Па·с;

3 – $\tau_0 = 310$ Па, $T_1 = 658$ Па, $T_2 = 348$ Па, $t_1 = 0{,}022$ с, $t_2 = 0{,}144$ с, $\mu = 0{,}227$ Па·с;

4 – $\tau_0 = 350$ Па, $T_1 = 717$ Па, $T_2 = 367$ Па, $t_1 = 0{,}014$ с, $t_2 = 0{,}163$ с, $\mu = 0{,}309$ Па·с;

5 – $\tau_0 = 370$ Па, $T_1 = 745$ Па, $T_2 = 375$ Па, $t_1 = 0{,}008$ с, $t_2 = 0{,}187$ с, $\mu = 0{,}425$ Па·с

Заключение

Как показывает анализ, теоретические кривые на рис. 3 с высокой степенью адекватности соответствуют экспериментальным зависимостям, приведенным на рис 2. Таким образом, предложенная реологическая модель (10) достаточно полно отражает физическую суть структурообразования в фаршевой системе. Поскольку расчетные данные дают хорошую сходимость с экспериментальными, разработанное математическое описание может быть использовано для последующего численного моделирования процесса экструдирования рыбного фарша. Направлением дальнейших исследований является разработка уравнения движения вязкоупругопластичной фаршевой системы в процессе экструдирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Андреев, М.П. Антарктический криль *(Euphausia superba)* - прошлое, настоящее и будущее развитие технологии переработки / М.П. Андреев // Вопросы рыболовства. – 2021. – Т. 22, № 1. – С. 5-15.

2. Yong Yu, Mi Tang, Weijie Hu, Liang Ma, Xin Feng, Yuhao Zhang, Investigations on the

forming mechanism of high-moisture extruded fish noodles based on computational fluid dynamics simulation. Journal of Food Engineering. Vol. 366. 2024. 111856.

3. Bingru Liu, Yuxuan Mao, Chi Wang, Yuanhui Zhao, Kang Liu, Xinxing Xu, Fangfang Yu, Yilin Zhao, The effects of twin-screw extrusion conditions on the flavor quality of sturgeon mince: Lipid metabolic pathways. Food Chemistry. Vol. 491. 2025. 145237.

4. Альшевский, Д.Л. Совершенствование технологии рыбных тестовых полуфабрикатов с пониженным содержанием глютена / Д.Л. Альшевский, Д.О. Смирнова, М.Н. Альшевская // Известия КГТУ. – 2024. – № 73. – С. 53-66.

5. Петрова, Л.Д. Рыбный фарш с белоксодержащими растительными добавками / Л.Д. Петрова, В.Д. Богданов // Современная наука и инновации. – 2019. – № 1(25). – С. 130-135.

6. Владимцева, Т.М. Влияние нетрадиционного наполнителя рыбного фарша на качество рубленых полуфабрикатов / Т.М. Владимцева, Е.А. Козина // Вестник КрасГАУ. – 2024. – № 4(205). – С. 201-208.

7. Бойцова, Т.М. Влияние компонентов рецептуры на структурно-механические характеристики фаршевой системы / Т.М. Бойцова, Н.В. Дементьева // Индустрия питания. – 2024. – Т. 9, № 4. – С. 13-21.

8. Использование ферментированного рыбного фарша с пробиотиками в рецептуре сыровяленых колбасных изделий / А.Ю. Глухарев, С.И. Барабашина, В.И. Волченко [и др.] // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 207-222.

9. Некоторые аспекты технологии рыбного фарша "Сурими" при глубокой переработке минтая / Е.С. Чупикова, Т.А. Саяпина, А.Н. Баштовой, Е.В. Якуш // Рыбное хозяйство. – 2023. – № 3. – С. 109-115.

10. Сыромятников, И.А. Совершенствование способов подготовки рыбного фарша для производства пищеконцентратов / И.А. Сыромятников, Е.Е. Иванова, Н.В. Чибич // Вестник КрасГАУ. – 2024. – № 2(203). – С. 222-228.

11. Забегалова, Г.Н. Разработка технологии кулинарного рыбного полуфабриката с высоким содержанием белка / Г.Н. Забегалова, А.Л. Новокшанова, Т.Ю. Бурмагина // Молочнохозяйственный вестник. – 2023. – № 4(52). – С. 166-179.

12. Патент № 2635380 C1 Российская Федерация, МПК A22C 25/20. Устройство для получения рыбного фарша: № 2016126366: заявл. 30.06.2016: опубл. 13.11.2017 / О.В. Агеев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Калининградский государственный технический университет".

13. Агеев, О.В. Математическое моделирование и экспериментальное исследование процесса порционирования рыбы ножом с прямой наклонной кромкой / О.В. Агеев, Н.В. Самойлова // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2024. – Т. 10, № 3. – С. 6-19.

14. Самойлова, Н.В. Оптимизация геометрии кромки фигурного ножа для порционирования пищевых продуктов / Н.В. Самойлова, О.В. Агеев // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2024. – Т. 10, № 1. – С. 16-28.

15. Qing Li, Xinyi Wen, Shijie Liang, Xiaoyue Sun, Huawei Ma, Yihan Zhang, Yuqing Tan, Hui Hong, Yongkang Luo, Enhancing bighead carp cutting: Chilled storage insights and machine vision-based segmentation algorithm development. Food Chemistry. Vol. 450. 2024. 139280.

16. Агеев, О.В. Математическое моделирование процесса ротационного резания пищевого материала / О.В. Агеев, Н.В. Самойлова // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2024. – Т. 10, № 2. – С. 7-23.

17. Агеев, О.В. Математическое моделирование процесса разрушения волокон мышечной ткани при резании рыбы / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов // Известия КГТУ. – 2021. – № 60. – С. 57-73.

18. Агеев, О.В. Анализ эффективности роторных инструментов в виде логарифмической и архимедовой спиралей при резании пищевых материалов / О.В. Агеев // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2025. – Т. 11, № 2. – С. 17-30.

19. Богданов, В.Д. Влияние криопротекторов на изменение состава и свойств рыбного фарша при его холодильной обработке / В.Д. Богданов, А.В. Панкина, А.А. Симдянкин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2023. – № 4. – С. 118-126.

20. Определение теплофизических характеристик и вязкостных свойств фаршевого сырья из прудового карпа / И.Ю. Алексанян, А.Х.Х. Нугманов, Н.В. Ярцева, Ю.С. Феклунова // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2020. – Т. 23, № 3. – С. 237-249.

21. Альшевский, Д.Л. Исследование качественных характеристик формованных изделий из фарша кальмара с добавлением структурированных наполнителей / Д.Л. Альшевский, М.Э. Мошарова, М.Н. Альшевская // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2025. – Т. 11, № 2. – С. 6-16

22. Проскура, Д.Ю. Устройство для изготовления крабового салатного мяса из фарша "Сурими" / Д.Ю. Проскура, Е.В. Шамрай-Лемешко, Е.Д. Киселева // Научный альманах Центрального Черноземья. – 2022. – № 1-10. – С. 151-161.

23. Белецкий, А. А. Анализ мирового рынка сурими, а также ресурсные ограничения производства в России / А. А. Белецкий // Экономика промышленности. – 2019. – Т. 12, № 1. – С. 107-119.

24. Харенко, Е.Н. Современные тенденции использования минтая для производства фарша сурими / Е.Н. Харенко, Н.Н. Яричевская // Труды ВНИРО. – 2022. – Т. 189. – С. 222-227.

25. Создание энергоэффективного оборудования для соэкструзии биополимеров / В.Н. Василенко, Л.Н. Фролова, И.В. Драган [и др.] // Вестник машиностроения. – 2023. – Т. 102, № 5. – С. 433-435.

26. Энергоэффективный экструдер для производства термолабильных биополимеров / В.Н. Василенко, Л.Н. Фролова, И.Ю. Кочкин, И.Д. Еремин // Вестник машиностроения. – 2025. – Т. 104, № 1. – С. 58-59.

27. Разработка технологической линии комбикормов для ценных пород рыб с применением мультиэнзимных комплексов / В.Н. Василенко, Л.Н. Фролова, Р.В. Дорохин [и др.] // Кормопроизводство. – 2024. – № 7. – С. 33-38.

REFERENCES

1. Andreev M.P. Antarkticheskij kril' *(Euphausia superba)* - proshloe, nastoyashchee i budushchee razvitie tekhnologii pererabotki [Antarctic krill (Euphausia superba) - past, present and future of processing technology development].Voprosy rybolovstva. 2021. Vol. 22, No. 1, pp. 5-15.

2. Yong Yu, Mi Tang, Weijie Hu, Liang Ma, Xin Feng, Yuhao Zhang. Investigations on the forming mechanism of high-moisture extruded fish noodles based on computational fluid dynamics simulation. Journal of Food Engineering. 2024. Vol. 366, 111856.

3. Bingru Liu, Yuxuan Mao, Chi Wang, Yuanhui Zhao, Kang Liu, Xinxing Xu, Fangfang Yu, Yilin Zhao. The effects of twin-screw extrusion conditions on the flavor quality of sturgeon mince: Lipid metabolic pathways. Food Chemistry. 2025. Vol. 491, 145237.

4. Al'shevskij D.L., Smirnova D.O., Al'shevskaya M.N. Sovershenstvovanie tekhnologii rybnykh testovykh polufabrikatov s ponizhennym soderzhaniem glyutena [Improvement of technology for fish dough semi-finished products with reduced gluten content]. Izvestiya KGTU. 2024. No. 73, pp. 53-66.

5. Petrova L.D., Bogdanov V.D. Rybnyj farsh s beloksoderzhashchimi rastitel'nymi dobavkami [Fish mince with protein-containing plant additives]. Sovremennaya nauka i innovacii. 2019. No. 1(25), pp. 130-135.

6. Vladimceva T.M., Kozina E.A. Vliyanie netradicionnogo napolnitelya rybnogo farsha na kachestvo rublenykh polufabrikatov [Influence of non-traditional filler of fish mince on the quality of chopped semi-finished products]. Vestnik KrasGAU. 2024. No. 4(205), pp. 201-208.

7. Bojcova T.M., Dement'eva N.V. Vliyanie komponentov receptury na strukturno-mekhanicheskie kharakteristiki farshevoj sistemy [Influence of recipe components on the structural and mechanical characteristics of the mince system]. Industriya pitaniya. 2024. Vol. 9, No. 4, pp. 13-21.

8. Glukharev A.Yu., Barabashina S.I., Volchenko V.I. [et al.] Ispol'zovanie fermentirovannogo rybnogo farsha s probiotikami v recepture syrovyalenykh kolbasnykh izdelij [The use of fermented fish mince with probiotics in the recipe of raw-dried sausage products]. Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2023. Vol. 26, No. 3, pp. 207-222.

9. Chupikova E.S., Sayapina T.A., Bashtovoj A.N., Yakush E.V. Nekotorye aspekty tekhnologii rybnogo farsha "Surimi" pri glubokoj pererabotke mintaya [Some aspects of the technology of fish mince "Surimi" during deep processing of pollock]. Rybnoe khozyajstvo. 2023. No. 3, pp. 109-115.

10. Syromyatnikov I.A., Ivanova E.E., Chibich N.V. Sovershenstvovanie sposobov podgotovki rybnogo farsha dlya proizvodstva pishchekoncentratov [Improvement of methods for preparing fish mince for the production of food concentrates]. Vestnik KrasGAU. 2024. No. 2(203), pp. 222-228.

11. Zabegalova G.N., Novokshanova A.L., Burmagina T.Yu. Razrabotka tekhnologii kulinarnogo rybnogo polufabrikata s vysokim soderzhaniem belka [Development of technology for a culinary fish semi-finished product with high protein content]. Molochnokhozyajstvennyj vestnik. 2023. No. 4(52), pp. 166-179.

12. Patent No. 2635380 C1 Russian Federation, MPK A22C 25/20. Ustrojstvo dlya polucheniya rybnogo farsha: No. 2016126366: zayavl. 30.06.2016: opubl. 13.11.2017 / O.V. Ageev; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Kaliningradskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet". [Device for producing fish mince].

13. Ageev O.V., Samojlova N.V. Matematicheskoe modelirovanie i eksperimental'noe issledovanie processa porcionirovaniya ryby nozhom s pryamoj naklonnoj kromkoj [Mathematical modeling and experimental study of the process of portioning fish with a straight inclined blade knife]. Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii. 2024. Vol. 10, No. 3, pp. 6-19.

14. Samojlova N.V., Ageev O.V. Optimizaciya geometrii kromki figurnogo nozha dlya porcionirovaniya pishchevykh produktov [Optimization of the blade geometry of a shaped knife for portioning food products]. Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii. 2024. Vol. 10, No. 1, pp. 16-28.

15. Qing Li, Xinyi Wen, Shijie Liang, Xiaoyue Sun, Huawei Ma, Yihan Zhang, Yuqing Tan, Hui Hong, Yongkang Luo. Enhancing bighead carp cutting: Chilled storage insights and machine vision-based segmentation algorithm development. Food Chemistry. 2024. Vol. 450, 139280.

16. Ageev O.V., Samojlova N.V. Matematicheskoe modelirovanie processa rotacionnorezaniya pishchevogo materiala [Mathematical modeling of the process of rotational cutting of food material]. Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii. 2024. Vol. 10, No. 2, pp. 7-23.

17. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A. Matematicheskoe modelirovanie processa razrusheniya volokon myshechnoj tkani pri rezanii ryby [Mathematical modeling of the process of destruction of muscle tissue fibers during fish cutting]. Izvestiya KGTU. 2021. No. 60, pp. 57-73.

18. Ageev O.V. Analiz effektivnosti rotornykh instrumentov v vide logarithmicheskoj i arkhimedovoj spiralej pri rezanii pishchevykh materialov [Efficiency analysis of rotary tools in the form of logarithmic and Archimedean spirals for cutting food materials]. Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii. 2025. Vol. 11, No. 2, pp. 17-30.

19. Bogdanov V.D., Pankina A.V., Simdyankin A.A. Vliyanie krioprotektorov na izmenenie sostava i svojstv rybnogo farsha pri ego kholodil'noj obrabotke [Influence of cryoprotectants on the change in composition and properties of fish mince during its cold storage processing]. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khozyajstvo. 2023. No. 4, pp. 118-126.

20. Aleksanyan I.Yu., Nugmanov A.Kh.Kh., Yarceva N.V., Feklunova Yu.S. Opredelenie teplofizicheskikh kharakteristik i vyazkostnykh svojstv farshevogo syr'ya iz prudovogo karpa [Determination of thermophysical characteristics and viscous properties of mince raw materials from pond carp]. Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2020. Vol. 23, No. 3, pp. 237-249.

21. Al'shevskij D.L., Moshkarova M.E., Al'shevskaya M.N. Issledovanie kachestvennykh kharakteristik formovannykh izdelij iz farsha kal'mara s dobavleniem strukturirovannykh napolnitelej [Study of the quality characteristics of molded products from squid mince with the addition of structured fillers]. Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii. 2025. Vol. 11, No. 2, pp. 6-16.

22. Proskura D.Yu., Shamraj-Lemeshko E.V., Kiseleva E.D. Ustrojstvo dlya izgotovleniya krabovogo salatnogo myasa iz farsha "Surimi" [Device for the production of crab salad meat from Surimi mince]. Nauchnyj al'manakh Central'nogo Chernozem'ya. 2022. No. 1-10, pp. 151-161.

23. Beleckij A.A. Analiz mirovogo rynka surimi, a takzhe resursnye ogranicheniya proizvodstva v Rossii [Analysis of the global surimi market and resource constraints of production in Russia]. Èkonomika promyšlennosti. 2019. Vol. 12, No. 1, pp. 107-119.

24. Kharenko E.N., Yarichevskaya N.N. Sovremennye tendencii ispol'zovaniya mintaya dlya proizvodstva farsha surimi [Modern trends in the use of pollock for the production of surimi mince]. Trudy VNIRO. 2022. Vol. 189, pp. 222-227.

25. Vasilenko V.N., Frolova L.N., Dragan I.V. [i dr.] Sozdanie energoeffektivnogo oborudovaniya dlya soehkstruzii biopolimerov [Creation of energy-efficient equipment for co-extrusion of biopolymers]. Vestnik mashinostroeniya. 2023. Vol. 102, No. 5, pp. 433-435.

26. Vasilenko V.N., Frolova L.N., Kochkin I.Yu., Eremin I.D. Energoeffektivnyj ehkstruder dlya proizvodstva termolabil'nykh biopolimerov [Energy-efficient extruder for the production of thermolabile biopolymers]. Vestnik mashinostroeniya. 2025. Vol. 104, No. 1, pp. 58-59.

27. Vasilenko V.N., Frolova L.N., Dorokhin R.V. [i dr.] Razrabotka tekhnologicheskoj linii kombikormov dlya cennykh porod ryb s primeneniem mul'tienzimnykh kompleksov [Development of a technological line for compound feeds for valuable fish species using multi-enzyme complexes]. Kormoproizvodstvo. 2024. No. 7, pp. 33-38.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Агеев Олег Вячеславович – доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: oleg.ageev@klgtu.ru)	*Ageev Oleg Viatcheslavovich* – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: oleg.ageev@klgtu.ru)

Статья поступила в редакцию 10.09.2025; одобрена после рецензирования 18.09.2025, принята к публикации 25.09.2025.
The article was submitted 10.09.2025; approved after reviewing 18.09.2025; accepted for publication 25.09.2025.