Научная статья
УДК 532.135:519.673:664

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ ПИЩЕВОЙ СРЕДЕ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ РАВНОВЕСИЯ ЧАСТИЦ

О.В. Агеев[1,*], Ю.И. Шишло[1], И.М. Титова[1]

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

Аннотация. В статье разработана математическая модель статического равновесия сферического твердого включения в вязкопластичной пищевой среде с пределом текучести. Модель описывает условие неподвижности частицы в объёме соуса при действии сил тяжести, Архимеда и сопротивления среды, обусловленного пределом текучести. На основе анализа размерностей и энергетического баланса получено аналитическое выражение, связывающее радиус и плотность включения, плотность жидкой среды и требуемый предел текучести. Введён безразмерный коэффициент, учитывающий распределение касательных напряжений по поверхности сферы. Экспериментальная верификация выполнена на соусе Ткемали (плотность 1212,6 кг/м^3, предел текучести 100±40 Па) и альгинатных сферах (плотность 998 кг/м^3) диаметром 1,5; 4,0; 6,0 мм. Показано, что во всех трех случаях сферы остаются неподвижными, что полностью соответствует расчёту по аналитической модели. Установлено, что реальный предел текучести соуса на два-три порядка превышает теоретический минимум, что является технологически необходимым запасом прочности для компенсации динамических нагрузок, температурных колебаний и тиксотропного разрушения структуры при перемешивании. Предложенная математическая модель позволяет технологам пищевых производств определять минимальный предел текучести среды для заданных характеристик включений, а также сократить объём экспериментальной отработки рецептур. Определены ограничения разработанной модели (сферические включения, статическое условие, отсутствие учёта тиксотропии). Направление дальнейших исследований связано с распространением подхода на включения несферической формы и разработкой кинетической модели осаждения частиц.

Ключевые слова: *математическое моделирование; стабилизация твердых включений; вязкопластичная пищевая среда; предел текучести; реологический критерий; равновесие частиц; агаровые шарики; соусы; седиментация; ротационная реометрия*.

Для цитирования: Агеев О.В., Шишло Ю.И., Титова И.М. Математическое моделирование стабилизации твердых включений в вязкопластичной пищевой среде: определение реологического критерия равновесия частиц // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2026. Т. 12. № 2. С. 7-24.

Original article

MATHEMATICAL MODELING OF SOLID INCLUSION STABILIZATION IN A VISCOPLASTIC FOOD MEDIUM: DETERMINING THE RHEOLOGICAL CRITERION FOR PARTICLE EQUILIBRIUM

O.V. Ageev[1,*], Yu.I. Shishlo[1], I.M. Titova[1]

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

© Агеев О.В., Шишло Ю.И., Титова И.М. 2026

Abstract. A mathematical model of static equilibrium of a spherical solid inclusion in a viscoplastic food medium with yield stress is proposed. The model describes the condition of particle immobility within a sauce volume under the action of gravity, buoyancy, and the resistance force of the medium due to its yield stress. Based on dimensional analysis and energy balance, an analytical expression is derived relating the inclusion radius and density, the density of the liquid medium, and the required yield stress. A dimensionless coefficient accounting for the tangential stress distribution over the sphere surface is introduced. Experimental verification is conducted on Tkemali sauce (density 1212.6 kg/m^3, yield stress 100±40 Pa) and alginate spheres (density 998 kg/m^3) with diameters of 1.5; 4.0; 6.0 mm. In all three cases, the spheres remain immobile, which fully agrees with the analytical model. The actual sauce yield stress is found to be two to three orders of magnitude higher than the theoretical minimum, representing a technologically necessary safety factor to compensate for dynamic loads, temperature fluctuations, and thixotropic breakdown of the structure during mixing. The proposed mathematical model allows food industry technologists to determine the minimum yield stress of the medium for given inclusion characteristics and to reduce the amount of experimental formulation development. The developed model has the following limitations: spherical inclusions, static condition, and neglect of thixotropy. Future research directions include extending the approach to non-spherical inclusions and developing a kinetic sedimentation model.

Keywords: *mathematical modeling; stabilization of solid inclusions; viscoplastic food medium; yield stress; rheological criterion; particle equilibrium; agar spheres; sauces; sedimentation; rotational rheometry.*

For citation: Ageev O.V., Shishlo Yu.I., Titova I.M. Mathematical modeling of solid inclusion stabilization in a viscoplastic food medium: determining the rheological criterion for particle equilibrium. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2026. Vol. 12, No. 2, pp. 7-24.

Введение

Современный рынок пищевых продуктов демонстрирует устойчивый рост спроса на соусы разнообразного состава и назначения - от традиционных томатных и сливочных до авторских гастрономических соусов с оригинальными вкусовыми и текстурными характеристиками [1-3]. Соусы широко применяются в сфере общественного питания, а также при промышленном производстве готовых блюд и полуфабрикатов. Расширение ассортимента соусной продукции, внедрение новых рецептур и усложнение рецептурных композиций требуют углублённого изучения их физико-механических и реологических свойств, поскольку именно эти характеристики определяют консистенцию, стабильность при хранении, удобство дозирования и потребительскую привлекательность продукта [4-6]. В данных пищевых системах решающей реологической характеристикой является предел текучести [7-9]. Таким образом, систематическое исследование физико-механических свойств соусов, особенно их вязкопластичного поведения и предела текучести, представляет собой необходимое условие для создания стабильных, технологичных и качественных соусных продуктов с улучшенными потребительскими свойствами.

В современной гастрономии и индустрии производства соусов все более популярными становятся продукты с текстурными включениями - сферическими шариками на основе агар-агара [10, 11]. Такие включения, имитирующие икру, фруктовые сферы или ароматизированные капсулы, придают блюдам оригинальный внешний вид и создают привлекательные органолептические ощущения. Однако при хранении, транспортировке или даже в процессе подачи блюда агаровые шарики, обладая собственной плотностью, могут оседать на дно, если их плотность превышает плотность соуса, или всплывать на поверхность - в противоположном случае. Это приводит к образованию неоднородного распределения включений, ухудшению товарного вида и снижению потребительских свойств продукта. Агаровые шарики характеризуются высокой сферичностью, упруго-

хрупкой структурой, а их плотность может варьироваться в зависимости от концентрации агар-агара и добавок. Соусы для блюд, такие как сырные, томатные, грибные или сливочные, чаще всего представляют собой вязкопластичные системы с пределом текучести, обусловленным наличием загустителей - крахмалов, камедей, муки [12-14]. Именно предел текучести определяет способность соуса удерживать твердые включения в объеме, не позволяя им перемещаться под действием гравитационных сил.

Анализ показывает, что реологические свойства соусных систем достаточно хорошо изучены в аспекте их течения, стабильности при хранении и влияния температуры [15-17]. Имеются работы, посвященные исследованию неньютоновского поведения соусов, содержащих различные загустители и эмульгаторы [18-20]. Вместе с тем, исследования, направленные на прогнозирование поведения твердых включений в таких средах, носят преимущественно эмпирический характер [21, 22]. Отсутствует расчетная методика, позволяющая для конкретной пары «агаровый шарик - соус» на основе известных характеристик включения и пищевой среды рассчитать необходимые реологические параметры соуса, обеспечивающие статическое равновесие частицы. В то же время в механике вязкопластичных сред известны теоретические подходы к описанию предельного равновесия сферы в среде с пределом текучести. Однако их адаптация к пищевым системам, особенно с учетом специфики агаровых шариков (гидрофильность поверхности, упругость) и соусов (многокомпонентность, тиксотропия), ранее не проводилась.

Целью настоящей работы является разработка математической модели, позволяющей для заданных характеристик агаровых шариков (радиус, плотность) и соусной среды (плотность) определить требуемый предел текучести соуса, обеспечивающий статическое равновесие (неподвижность) шариков в объёме продукта.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи: анализ реологических моделей вязкопластичных пищевых сред и обоснование выбора модели, адекватно описывающей поведение соусов с загустителями при статическом нагружении; разработка математической модели статического равновесия сферического включения в среде с пределом текучести, включающая вывод аналитической зависимости между геометрическими и плотностными характеристиками шарика и требуемым пределом текучести соуса; экспериментальное определение физико-механических характеристик объектов исследования: предела текучести и плотности соуса, а также радиуса, сферичности и плотности агаровых шариков; проведение тестов на стабильность для установления граничных условий перехода от неподвижности частицы к ее осаждению или всплытию в соусах; экспериментальная верификация разработанной математической модели и определение эмпирического коэффициента, учитывающего особенности взаимодействия агаровых шариков с соусной средой; формулирование практических рекомендаций для использования полученных результатов при разработке рецептур соусов с твердыми включениями.

Научная новизна работы заключается в том, что исследуется аналитическая зависимость, позволяющая рассчитать предел текучести вязкопластичного соуса, необходимый для удержания сферических агаровых включений, с последующей экспериментальной верификацией на реальных образцах.

Практическая значимость результатов состоит в возможности сокращения времени технологической отработки рецептур соусов с агаровыми шариками, прогнозирования стабильности продукта при хранении и создании базы для нормирования реологических показателей соусной продукции. Решение данной задачи позволяет перейти от эмпирического подбора стабилизаторов к расчетному определению реологических параметров, что особенно важно при масштабировании производства и обеспечении стабильного качества готовых изделий.

Материалы и методы

В качестве вязкопластичной пищевой среды использовали соус Ткемали, изготовленный на основе сливы сорта *Prunus ceracifera Podarok*. Состав соуса включал сливовое пюре, кавказские травы, красный перец, сахар и соль.

В качестве твердых включений использовались альгинатные сферы, полученные методом капельного гелеобразования. Состав сфер включал водоросли *Fucus vesiculosus*, агар-агар и соевый соус. Массовый состав соуса: слива – 84 %, альгинатные сферы – 15 %, специи – менее 1 %.

Плотность сфер, определенная методом гидростатического взвешивания (метод Архимеда), составила 0,998 г/см^3. Диаметры сфер варьировались и составляли 1,5 мм, 4 мм и 6 мм. Для каждого диаметра были сформированы партии не менее 50 сфер. Контроль сферичности осуществлялся визуально под оптическим микроскопом с цифровой обработкой изображений (увеличение ×10), причем к исследованию допускались частицы с отношением максимального диаметра к минимальному не более 1,05.

Массовую долю сухих веществ в соусе определяли рефрактометрическим методом с использованием лабораторного рефрактометра ИРФ-454 Б2М при температуре 20 °С. Измерения проводили в трех повторностях, после чего вычисляли среднее арифметическое значение.

Плотность соуса определяли ареометрическим методом с использованием стеклянного ареометра с ценой деления 0,001 г/см^3 при температуре 20±0,5 °С. Измерения проводили в трех повторностях. Плотность соуса, определённая указанным методом, составила 1,2126 г/см^3.

Плотность альгинатных сфер определяли методом гидростатического взвешивания (метод Архимеда). Для этого партию из 30 шариков взвешивали на аналитических весах (точность 0,001 г) на воздухе, после чего погружали в дистиллированную воду с известной плотностью и повторяли взвешивание. Расчет плотности выполняли по формуле: $\rho_ш = \frac{m_{возд} \cdot \rho_в}{m_{возд} - m_ж}$, где $m_{возд}$, $m_ж$ – масса сфер на воздухе и в жидкости соответственно; $\rho_в$ – плотность дистиллированной воды при температуре измерения.

Диаметр сфер измеряли с помощью цифрового штангенциркуля (точность 0,01 мм) по выборке не менее 50 шариков из каждой партии. Для оценки однородности партии рассчитывали средний диаметр, стандартное отклонение и коэффициент вариации.

Предел текучести соуса измеряли с использованием автоматизированного ротационного вискозиметра Rheotest RN 4.1 с коаксиальной измерительной системой «цилиндр – цилиндр». Измерения проводили при температуре 20±1 °С, поддерживаемой с помощью встроенного термостата прибора. Указанный параметр определяли методом контролируемого напряжения. Протокол измерений включал следующие этапы: выдержку образца в измерительной ячейке в течение 5 минут для восстановления структуры после загрузки; ступенчатое увеличение приложенного напряжения от 0 до 200 Па с шагом 2 Па и выдержкой на каждой ступени 10 секунд; регистрацию возникающей скорости сдвига. За предел текучести принимали значение напряжения, при котором скорость сдвига впервые превышала 0,01 с$^{-1}$. Измеренный предел текучести соуса составил $\tau_0 = 100 \pm 40$ Па. Каждое измерение проводили не менее трех раз на свежих порциях соуса. Рассчитаны средние арифметические значения и стандартные отклонения.

Органолептическую оценку соуса и сфер проводили по следующим показателям: внешний вид, цвет, консистенция, запах, вкус, а также характер распределения сфер в объеме соуса. Оценку осуществляла дегустационная комиссия из 7 человек, подготовленная в соответствии с требованиями ГОСТ ISO 8586-2015. Оценку проводили по 5-балльной шкале с шагом 0,5 балла. Результаты органолептического анализа использовали для подтверждения потребительской приемлемости продукта после тестов на стабильность.

Для проверки адекватности разработанной математической модели проводили тесты на стабильность. В прозрачные цилиндрические кюветы высотой 100 мм и внутренним диаметром 50 мм заливали соус Ткемали. С помощью пинцета альгинатные сферы заданного диаметра (1,5; 4,0; 6,0 мм) аккуратно помещали на поверхность соуса, избегая захвата воздуха и механического повреждения структуры среды.

Наблюдение за положением сфер проводили в течение 7 дней при температуре 4±1 °C, имитирующей условия холодильного хранения. Для каждого сочетания параметров (диаметр сферы) проводили не менее трех параллельных опытов. Фиксировали следующие исходы: сфера остается неподвижной в толще соуса; сфера всплывает на поверхность; сфера оседает на дно. Граничное состояние (сфера на пределе неподвижности) фиксировали визуально при отсутствии видимого перемещения в течение всего срока наблюдения.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Excel и Statistica. Для каждого измеряемого параметра рассчитывали среднее арифметическое значение ($\bar{x}$), стандартное отклонение (SD) и коэффициент вариации ($CV = SD/\bar{x} \times 100\%$). Результаты считали статистически значимыми при $p < 0{,}05$ по *t*-критерию Стьюдента.

Математическое моделирование процесса стабилизации сферического включения в пищевой среде

Для математического описания поведения соуса при статическом нагружении, создаваемом погруженным агаровым шариком, необходимо выбрать реологическую модель, адекватно отражающую механические свойства данного типа пищевых сред. Соусы, содержащие загустители (крахмалы, камеди, модифицированные целлюлозы и другие), относятся к классу вязкопластичных жидкостей, которые при малых напряжениях ведут себя как твердые тела, а после превышения некоторого порогового напряжения начинают течь. Классическим и наиболее широко используемым в пищевой реологии описанием таких сред является модель Бингама – Шведова, согласно которой напряжение сдвига связано со скоростью сдвига линейной зависимостью, содержащей предел текучести.

Однако в рамках настоящей работы, посвященной определению условия статического равновесия (когда скорость движения агарового шарика равна нулю), принципиальное значение имеет значение предела текучести. Поскольку при стремлении градиента скорости сдвига к нулю ($\dot{\gamma} \to 0$) вязкая составляющая в модели Бингама обращается в нуль, и поведение среды определяется исключительно пределом текучести τ_0. При этом характер течения после срыва структуры не влияет на условие неподвижности. Это позволяет использовать упрощенную идеализацию, а именно - модель жестко-идеальнопластичной среды, в которой материал считается абсолютно жестким при напряжениях ниже предела текучести и начинает неограниченно течь при достижении этого предела. Такая идеализация широко применяется в теории пластичности и при решении задач о предельном равновесии тел в вязкопластичных средах.

При моделировании условия неподвижности агарового шарика в соусе необходимо определить силу, с которой пищевая среда сопротивляется попытке сдвинуть включение. В отличие от ньютоновской жидкости, где сила сопротивления пропорциональна скорости и описывается законом Стокса, в среде с пределом текучести при нулевой скорости возникает конечная сила сопротивления, связанная с преодолением структурных связей внутри материала. Указанная сила не зависит от вязкости, а определяется исключительно пределом текучести и геометрией погруженного тела. Анализ размерностей показывает, что сила сопротивления F_{conp} в пластической среде должна быть пропорциональна пределу текучести τ_0 и характерной площади тела. Для сферы характерной площадью является

ISSN 2413–9858

площадь миделева сечения: $\pi \cdot R^2$. Следовательно, искомая сила может быть представлена в следующем виде:

$$F_{сопр} = C \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot R^2, \quad (1)$$

где C – безразмерный коэффициент, значение которого зависит от распределения напряжений по поверхности сферы и подлежит определению.

Для обоснования выражения (1) и определения искомой связи между коэффициентом C и физическими характеристиками процесса используем энергетический подход, основанный на теореме о предельном состоянии. Рассмотрим бесконечно малое перемещение шарика на расстояние dh в направлении, перпендикулярном миделеву сечению. Работа внешней силы $F_{сопр}$, приложенной к шарику, должна быть равна энергии, диссипированной в окружающей среде вследствие пластических деформаций:

$$dA_{внеш} = F_{сопр} \cdot dh. \quad (2)$$

Согласно энергетическому балансу, эта работа полностью диссипируется в окружающей среде вследствие пластических деформаций. В жестко-идеальнопластической среде диссипация происходит только в зонах сдвига, которые образуются вокруг движущегося тела. Мощность диссипации в единице объема пропорциональна произведению предела текучести τ_0 на интенсивность скоростей деформации (второй инвариант тензора скоростей деформации - градиент поля скоростей) $\dot{\gamma}$:

$$\frac{dE}{dt} = \int_V \tau_0 \cdot \dot{\gamma} \cdot dV. \quad (3)$$

При квазистатическом перемещении на расстояние dh среда деформируется в некотором характерном объеме $V_{деф}$, который для сферы масштабируется как R^3. Интенсивность скоростей деформации имеет порядок $\dot{\gamma} \approx v/R$, где v – скорость перемещения. Время перемещения составляет $dt = dh/v$. Тогда полная диссипированная энергия среды:

$$dE = \int_V \tau_0 \cdot \dot{\gamma} \cdot dV \cdot dt \approx \tau_0 \cdot \frac{v}{R} \cdot R^3 \cdot \frac{dh}{v} = \tau_0 \cdot R^2 \cdot dh. \quad (4)$$

С точностью до безразмерного коэффициента C, зависящего от геометрии зон сдвига и распределения напряжений, получим:

$$dE = C \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot dh, \quad (5)$$

где множитель $\pi \cdot R^2$ – площадь миделева сечения сферы (проекция сферы на плоскость, перпендикулярную движению).

Поскольку внешняя сила совершает работу, и указанная работа переходит в энергию, которая рассеивается в среде, то согласно (2) имеем:

ISSN 2413–9858

$$F_{сопр} \cdot dh = C \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot dh\,, \qquad (6)$$

откуда, сократив dh, получим формулу (1) для силы сопротивления среды с пределом текучести при нулевой скорости – суть силы страгивания агарового шарика в соусе.

В теории пластичности для случая вдавливания сферического штампа в идеальнопластическое полупространство известно, что коэффициент C лежит в интервале от $\sqrt{3} \approx 1{,}73$ (по критерию текучести Мизеса) до 2 (по критерию Треска). Более точное значение зависит от принятой модели пластичности и условий контакта на границе включения с окружающей средой.

На основе выбранной реологической модели жестко-идеальнопластической среды и полученного выражения (1) для силы сопротивления, действующей на сферический шарик со стороны соуса с пределом текучести, необходимо получить уравнение статического равновесия. Рассмотрим состояние покоя, когда агаровый шарик, помещенный в объем соуса, не тонет и не всплывает, а остается неподвижным под действием приложенных сил. В этом состоянии скорость шарика равна нулю, а сумма всех сил, действующих на него, должна обращаться в нуль.

На шарик действуют три силы, направленные вдоль вертикальной оси. Сила тяжести F_g направлена вертикально вниз и определяется массой шарика и ускорением свободного падения. Выталкивающая сила Архимеда F_A направлена вертикально вверх и равна весу соуса в объеме, вытесненном шариком. Сила сопротивления среды $F_{сопр}$, обусловленная пределом текучести, также направлена противоположно направлению возможного движения, то есть вверх, если рассматривать случай, когда шарик стремится опуститься под действием силы тяжести. Для случая, когда плотность шарика превышает плотность соуса, результирующая гравитационной и архимедовой сил направлена вниз, и именно эта движущая сила должна быть уравновешена силой сопротивления, чтобы шарик оставался неподвижным.

Записывая условие равновесия в проекции на вертикальную ось, получим равенство: разность между силой тяжести и выталкивающей силой по модулю равна силе сопротивления среды. Подставляя в указанное равенство развернутые выражения для каждой из сил, получим искомое уравнение равновесия. Сила тяжести выражается как произведение плотности агарового шарика, его объема и ускорения свободного падения:

$$F_g = \rho_ш \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot g\,. \qquad (7)$$

Выталкивающая сила Архимеда в жидкости с плотностью $\rho_ж$ равна:

$$F_A = \rho_ж \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot g\,. \qquad (8)$$

С учетом выражений (1), (7) и (8) условие равновесия записывается в следующем виде:

$$\rho_ш \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot g - \rho_ж \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot g = C \cdot \tau_0 \cdot \pi \cdot R^2\,. \qquad (9)$$

Вынося общие множители в левой части и сокращая $\pi \cdot R^2$, получим выражение, связывающее геометрические и плотностные характеристики шарика с пределом текучести среды:

$$\frac{4}{3} \cdot R \cdot g \cdot (\rho_ш - \rho_ж) = C \cdot \tau_0 . \quad (10)$$

Решая полученное уравнение (10) относительно предела текучести, в результате находим расчетную формулу, определяющую минимальное значение τ_0, необходимое для удержания шарика в неподвижном состоянии:

$$\tau_0 = \frac{4}{3 \cdot C} \cdot R \cdot g \cdot (\rho_ш - \rho_ж). \quad (11)$$

Выражение (11) показывает, что требуемый для стабилизации включения предел текучести соуса прямо пропорционален радиусу шарика и разности плотностей шарика и соуса, а также зависит от безразмерного коэффициента *C*. Если реальный предел текучести соуса, измеренный на реометре, превышает рассчитанное по данной формуле значение, шарик будет оставаться неподвижным. Если же реальный предел текучести ниже расчетного, движущая сила окажется достаточной для преодоления сопротивления среды, и шарик начнет тонуть (или всплывать, в зависимости от знака разности плотностей). При равенстве этих величин реализуется граничное состояние, когда шарик находится на пределе страгивания. Таким образом, разработанная модель (11) позволяет количественно прогнозировать стабильность системы «соус – агаровый шарик» на этапе проектирования рецептуры.

Физический смысл безразмерного коэффициента *C* связан с распределением касательных напряжений по поверхности сферического включения при его взаимодействии с окружающей вязкопластичной средой. Для того чтобы модель могла быть использована в практических расчетах, необходимо определить численное значение этого коэффициента либо на основе теоретических соображений, либо экспериментально.

Различие между значениями *C* в интервале от 1,73 до 2 обусловлено разными гипотезами о механизме перехода материала в пластическое состояние. Критерий Мизеса, основанный на энергии формоизменения, обычно лучше описывает поведение металлов и полимерных материалов, тогда как критерий Треска, основанный на максимальном касательном напряжении, часто применяется для сыпучих и структурно-вязких сред. Для пищевых систем, таких как соусы, содержащие загустители и обладающие сложной пространственной сеткой, наиболее адекватным считается критерий Мизеса, однако окончательный выбор требует экспериментального подтверждения.

Помимо теоретически рассчитанных значений, реальное значение коэффициента *C* для конкретной пары «соус - агаровый шарик» может отклоняться от указанного интервала вследствие ряда факторов, не учтенных в идеализированной модели. К таким факторам относятся, во-первых, адгезионные взаимодействия на границе раздела фаз. Агаровый шарик обладает гидрофильной поверхностью, тогда как соусы, особенно содержащие жировую фазу или белки, могут проявлять различную смачиваемость. При наличии адгезии сила сцепления между шариком и средой возрастает, что эквивалентно увеличению эффективного значения *C*.

Во-вторых, микроструктурные особенности соуса, такие как наличие нерастворенных частиц крахмала, белковых агрегатов или жировых глобул, могут создавать дополнительные механические зацепления, также повышающие сопротивление. В-третьих, возможная неидеальная сферичность агаровых шариков, несмотря на контроль этого параметра, может

приводить к локальной концентрации напряжений и изменению эффективной площади контакта.

В-четвертых, краевые эффекты, связанные с конечными размерами кюветы и близостью стенок или свободной поверхности, могут влиять на распределение напряжений в среде, особенно при малых отношениях диаметра кюветы к диаметру шарика. Учет всех этих факторов в рамках строгой аналитической модели достаточно сложен, поэтому наиболее рациональным подходом является экспериментальное определение эмпирического значения коэффициента C для рассматриваемого класса систем с последующей проверкой его устойчивости в диапазоне варьируемых параметров.

Важным аспектом применения разработанной модели является учет границ ее пригодности. Прежде всего, модель справедлива только для статического условия равновесия, то есть для определения факта - тонет или не тонет шарик. Она не описывает кинетику процесса погружения, для описания которой требуется привлечение вязкостных характеристик среды.

Далее, модель предполагает, что среда является жестко-идеальнопластической, то есть ее поведение при напряжениях ниже предела текучести описывается как абсолютно твердое тело. В реальных соусах, особенно тех, которые содержат структурообразователи с медленной кинетикой восстановления (например, некоторые камеди), при напряжениях ниже предела текучести могут наблюдаться малые обратимые деформации. Это не влияет на условие неподвижности, но может сказываться на точности определения граничных условий.

Наряду с этим, модель не учитывает тиксотропные свойства соусов. Если соус перед погружением шарика был подвергнут интенсивному перемешиванию, его структура может быть частично разрушена, и эффективный предел текучести в первые моменты после перемешивания окажется ниже равновесного значения, измеряемого на реометре после выдержки. Это означает, что при технологическом применении модели необходимо либо дожидаться полного восстановления структуры соуса, либо проводить измерения предела текучести в условиях, соответствующих реальному технологическому процессу.

Кроме того, разработанная модель предполагает, что шарик является абсолютно твердым и недеформируемым. Агаровые шарики, хотя и обладают значительно более высоким модулем упругости по сравнению с соусом, все же могут деформироваться под действием сил тяжести, особенно при больших радиусах и малых концентрациях агар-агара. В большинстве практических случаев эта деформация пренебрежимо мала, но при необходимости может быть учтена введением поправок.

Наконец, модель справедлива для одиночного изолированного шарика в безграничной среде. В реальных продуктах, содержащих множество включений, могут возникать коллективные эффекты (взаимодействие между шариками, стеснение движения), которые не рассматриваются в рамках настоящей работы. Для таких систем разработанная математическая модель может служить базовым приближением, требующим дальнейшего усложнения.

Разработанная выше статическая модель (11) позволяет определить условие, при котором агаровый шарик неподвижен в объеме соуса. Однако на практике возможна ситуация, когда реальный предел текучести соуса оказывается ниже требуемого значения, рассчитанного по формуле (11). В этом случае движущая сила, обусловленная разностью плотностей шарика и соуса, превышает предельную силу сопротивления, и шарик начинает движение. Для полноты математического описания оценим кинетику этого движения, то есть зависимость скорости и глубины погружения шарика от времени. Знание кинетических характеристик позволяет технологу оценить, за какое время произойдет нежелательное осаждение или всплытие включений, и принять решение о допустимости такого продукта для ограниченных сроков хранения.

При движении шарика в вязкопластичной среде с пределом текучести необходимо учитывать два механизма сопротивления. Первый механизм обусловлен пределом текучести

ISSN 2413–9858

и проявляется даже при очень малых скоростях, создавая некоторое постоянное пороговое сопротивление, не зависящее от скорости. Второй механизм связан с вязкостными свойствами среды и проявляется только при наличии течения, причем его величина пропорциональна скорости движения. Таким образом, полная сила сопротивления при движении шарика может быть представлена как сумма статической (пластической) и динамической (вязкой) составляющих. Для случая движения сферы в бингамовской жидкости классическим результатом является обобщенный закон Стокса, учитывающий наличие предела текучести. В безразмерной форме это выражается через число Хедстрема и число Рейнольдса, однако для инженерных оценок можно использовать приближенное выражение для установившейся скорости погружения, пренебрегая инерционными членами, что соответствует движению при малых числах Рейнольдса (*Re* <<1).

Для соусов, механическое поведение которых, строго говоря, не всегда строго следует модели Бингама, а часто описывается степенным законом Гершеля–Балкли, задача кинетики усложняется. В рамках настоящей работы, где основное внимание уделяется статическому условию равновесия, применим приближенное описание кинетики с использованием эффективной вязкости. Предположим, что движущая сила, определяемая разностью силы тяжести и силы Архимеда, расходуется на преодоление двух составляющих: предельного напряжения сдвига τ_0 и вязкого сопротивления, пропорционального скорости и эффективной вязкости $\eta_{эфф}$. В этом приближении уравнение движения шарика в проекции на вертикальную ось (ось *Oz*, направленную вниз) может быть записано в следующем виде:

$$\frac{4}{3}\cdot\pi\cdot R^3\cdot g\cdot\left(\rho_{ш}-\rho_{ж}\right)-C\cdot\tau_0\cdot\pi\cdot R^2=6\cdot\pi\cdot R\cdot\eta_{эфф}\cdot v. \qquad (12)$$

Левая часть уравнения (12) представляет собой избыточную движущую силу после вычитания пластической составляющей сопротивления, которая не зависит от скорости. Правая часть представляет собой вязкую силу сопротивления по закону Стокса, записанную для сферической частицы в ньютоновской жидкости с вязкостью $\eta_{эфф}$. Под скоростью v понимается скорость установившегося движения, которая достигается через некоторое время после начала движения, когда инерционными эффектами можно пренебречь. Это справедливо при малых числах Рейнольдса, характерных для движения включений в вязких соусах. Решая это уравнение относительно скорости, получим выражение для установившейся скорости погружения (или всплытия) шарика:

$$v=\frac{\frac{4}{3}\cdot R^2\cdot g\cdot\left(\rho_{ш}-\rho_{ж}\right)-C\cdot\tau_0\cdot R}{6\cdot\eta_{эфф}}. \qquad (13)$$

Анализ формулы (13) показывает, что при τ_0, равном требуемому значению, числитель обращается в ноль, и скорость становится нулевой, что соответствует условию статического равновесия, полученному выше. При τ_0, меньшем требуемого значения, числитель положителен, и шарик приобретает конечную скорость погружения. При $\tau_0=0$ (отсутствие предела текучести, чисто вязкая жидкость) выражение упрощается до классического закона Стокса: $v=\frac{2}{9}\cdot\frac{R^2\cdot g\cdot\left(\rho_{ш}-\rho_{ж}\right)}{\eta_{эфф}}$, где в данном предельном случае $\eta_{эфф}$ становится обычной динамической вязкостью, что подтверждает корректность перехода.

Следует отметить, что использование эффективной вязкости $\eta_{эфф}$ в выражении (13) является приближением, поскольку вязкость неньютоновских соусов зависит от скорости сдвига, которая, в свою очередь, определяется скоростью движения шарика и его радиусом. Строгое решение требует самосогласованного определения скорости сдвига в окрестности движущейся сферы и соответствующего значения эффективной вязкости, что выходит за рамки настоящей работы. Для практических оценок можно использовать значение эффективной вязкости, измеренной при характерной скорости сдвига $\dot{\gamma} \approx v/R$, что приводит к нелинейному уравнению относительно v. Тем не менее, для инженерных расчетов, особенно при значительном превышении движущей силы над пластической составляющей, можно пренебречь пределом текучести и использовать классический закон Стокса с эффективной вязкостью, определенной при некоторой характерной скорости сдвига.

Время, за которое шарик опустится на расстояние, равное его диаметру или высоте столба соуса, может быть оценено как $t \approx h/v$, где h – характерное расстояние. Эта оценка позволяет определить, будет ли продукт сохранять приемлемый вид в течение заявленного срока годности. Например, если расчетное время осаждения значительно превышает срок хранения продукта, то даже при некотором превышении движущей силы над пластической можно считать систему практически стабильной. При этом под значительным превышением можно понимать превышение расчетного времени хотя бы на порядок, а сама оценка является консервативной, так как не учитывает увеличение сопротивления при приближении частицы к стенке или взаимовлияние соседних включений.

Таким образом, предложенная кинетическая модель, несмотря на ее приближенный характер, дополняет статическую, позволяя не только определить факт возможности движения, но и оценить его временные масштабы, что важно для практических приложений в пищевой технологии. Заметим, что в настоящей работе основное внимание уделяется статическому условию равновесия как наиболее надежному и технологически значимому критерию стабилизации, а кинетические оценки рассмотрены как вспомогательный инструмент для анализа предельных случаев.

Экспериментальная верификация разработанной математической модели

Для проверки адекватности математической модели проведены тесты на стабильность с использованием соуса Ткемали и альгинатных сфер трёх диаметров: 1,5 мм, 4,0 мм и 6,0 мм.

Параметры системы, используемые при верификации модели, следующие:

- плотность соуса (ареометрический метод, 20 °C): $\rho_{ж} = 1212{,}6$ кг/м^3;

- плотность альгинатных сфер (метод гидростатического взвешивания): $\rho_{ш} = 998$ кг/м^3;

- предел текучести соуса (ротационный вискозиметр Rheotest RN 4.1, метод контролируемого напряжения, 20 °C): $\tau_0 = 100 \pm 40$ Па;

- ускорение свободного падения: $g = 9{,}81$ м/с^2.

Поскольку $\rho_{ш} < \rho_{ж}$, движущая сила направлена вверх (сферы стремятся всплыть), поэтому в расчётной формуле (11) использована абсолютная разность плотностей $\rho_{ш} - \rho_{ж} = 214{,}6$ кг/м^3.

Для каждого диаметра сфер рассчитан требуемый предел текучести $\tau_0^{треб}$ по формуле (11) с теоретическим значением коэффициента $C = 2$ (критерий Треска). Результаты расчётов и экспериментальные наблюдения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчётов и экспериментальные наблюдения

Диаметр сферы D, мм	Радиус сферы R, м	$\tau_0^{треб}$ (C = 2), Па	Экспериментальное наблюдение
1,5	0,00075	0,21	Сфера остаётся неподвижной
4,0	0,00200	0,56	Сфера остаётся неподвижной
6,0	0,00300	0,84	Сфера остаётся неподвижной

Как видно из таблицы 1, рассчитанные требуемые пределы текучести (0,21 – 0,84 Па) на два-три порядка ниже экспериментально измеренного предела текучести соуса ($\tau_0 = 100 \pm 40$ Па). Экспериментально наблюдаемая неподвижность сфер всех трёх диаметров полностью соответствует прогнозу модели: поскольку $\tau_0^{реал} >> \tau_0^{треб}$, и движущая сила полностью компенсируется сопротивлением пищевой среды.

Используя экспериментальные данные, представляется возможным оценить нижнюю границу для коэффициента C из условия $\tau_0^{реал} \geq \tau_0^{треб}$. Для сферы диаметром 6,0 мм и минимального значения предела текучести $\tau_0^{реал} = 60$ Па:

$$C \geq \frac{4 \cdot R \cdot g \cdot |\rho_ш - \rho_ж|}{3 \cdot \tau_0^{реал}} = \frac{4 \cdot 0{,}003 \cdot 9{,}81 \cdot 214{,}6}{3 \cdot 60} \approx 0{,}14 . \quad (14)$$

При $\tau_0^{реал} = 140$ Па получим $C \geq 0{,}06$. Полученные значения $C \geq 0{,}06 – 0{,}14$ значительно меньше теоретического диапазона 1,73–2,0. Это подтверждает, что измеренный предел текучести соуса многократно превышает минимально необходимый для статического удержания сфер, и модель остаётся консервативной (безопасной) при использовании теоретических значений C.

Таким образом, разработанная математическая модель успешно прошла экспериментальную верификацию: прогноз модели полностью совпал с наблюдаемым поведением сфер в соусе. Для точного определения эмпирического значения коэффициента C необходимо провести эксперименты с соусом, предел текучести которого близок к рассчитанному минимальному значению (порядка 1 Па), что является задачей дальнейших исследований.

Результаты и их обсуждение

Проведённые экспериментальные исследования подтвердили адекватность разработанной математической модели: во всех трех случаях (диаметры сфер 1,5; 4,0; 6,0 мм) прогноз модели о неподвижности сфер совпал с экспериментальными наблюдениями. Расчёты и испытания показали, что теоретический минимум предела текучести (порядка 0,2-0,8 Па в зависимости от диаметра сферы) на два-три порядка ниже технологически реализованного значения (100 ± 40 Па).

Полученное соотношение реального и требуемого пределов текучести соуса ($\tau_0^{реал} / \tau_0^{треб} \approx 70 – 170$) на первый взгляд может показаться значительным. Однако оно находится в диапазоне, характерном для промышленных пищевых продуктов, проходящих транспортировку и хранение, и полностью соответствует практике технологического проектирования.

Разработанная математическая модель показывает значение нижнего теоретического порога предела текучести – суть минимальное значение, при котором сферическое включение находится на грани страгивания в идеальных условиях: отсутствие вибраций и сотрясений, строго постоянная температура, идеально сферическая форма частицы, отсутствие адгезионных взаимодействий, бесконечный объём среды и изолированное расположение включения. В реальных условиях ни одно из этих допущений не выполняется в полной мере, что делает технологически необходимым введение коэффициента запаса.

Необходимость значительного превышения реального предела текучести над теоретическим минимумом обусловлена следующими факторами:

- динамические нагрузки при транспортировке и хранении (вибрации, сотрясения, толчки) могут вызывать движение включений даже при статически достаточном пределе текучести;

- температурные колебания, неизбежные в условиях складского хранения и логистики, приводят к снижению предела текучести при нагреве (особенно для пектиновых гелей, характерных для фруктовых соусов);

- тиксотропное разрушение структуры при перемешивании перед фасовкой вызывает временное снижение предела текучести; после фасовки структура восстанавливается не мгновенно. В первые часы хранения эффективный предел текучести может быть существенно ниже равновесного значения;

- неидеальная сферичность реальных включений и наличие частиц специй в соусе создают локальные концентрации напряжений, снижающие эффективное сопротивление движению;

- длительное хранение может сопровождаться синерезисом (отделением жидкой фазы) и частичной деградацией гелевой структуры, что требует дополнительного запаса прочности.

Таким образом, полученное соотношение $\tau_0^{реал} \Big/ \tau_0^{треб}$ является количественным выражением технологически необходимого запаса стабильности. Разработанная модель корректно определяет нижнюю границу. При этом выбор конечного значения предела текучести с учётом конкретных условий производства, транспортировки и хранения является задачей технологического проектирования и не входит в противоречие с представленными теоретическими зависимостями.

Для технологов, разрабатывающих соусы со сферическими включениями, целесообразно использовать следующий подход. На первом этапе по формуле (11) при $C = 2$ рассчитывается минимальный предел текучести, необходимый для статического удержания включений. На втором этапе это значение умножается на коэффициент запаса, учитывающий динамические нагрузки при транспортировке и хранении. На основе экспериментальных данных для соусов с включениями можно рекомендовать значение указанного коэффициента запаса в диапазоне 50–200, однако для более точного определения требуются дополнительные исследования с варьированием условий хранения. Для подтверждения эмпирического значения коэффициента C в дальнейшем планируются экспериментальные исследования с соусами, предел текучести которых находится вблизи рассчитанного теоретического минимума (порядка 1 Па).

Следует отметить, что разработанная модель применима только для сферических включений и не учитывает форму реальных включений несферической формы, для которых требуется введение коэффициента формы. Модель является статической и не описывает кинетику движения при недостаточном пределе текучести - для оценки скорости осаждения необходимо привлекать вязкостные характеристики. Кроме того, модель не учитывает тиксотропное восстановление соуса после перемешивания, что требует осторожности при прогнозировании стабильности продукта непосредственно после фасовки. Наконец, модель справедлива для одиночных изолированных включений и не учитывает возможную агрегацию или коалесценцию частиц, которые могут существенно изменить эффективную крупность и скорость осаждения.

Заключение

Разработана математическая модель, описывающая условие статического равновесия (неподвижности) сферического твердого включения в вязкопластичной пищевой среде с пределом текучести. На основе анализа сил, действующих на частицу в состоянии покоя, с использованием реологической модели среды с пределом текучести получено аналитическое выражение, связывающее геометрические и плотностные характеристики включения с требуемым пределом текучести среды. Данное соотношение позволяет для заданных размеров и плотности частицы, а также плотности соусной среды определить минимальное значение предела текучести, необходимое для предотвращения оседания или всплытия включения. В рамках модели введен безразмерный коэффициент, учитывающий распределение касательных напряжений по поверхности сферы. Для случая, когда реальный предел текучести среды недостаточен, предложена приближённая кинетическая модель (12)-(13), позволяющая оценить установившуюся скорость и характерное время осаждения включений.

Экспериментальная верификация разработанной модели проведена на реальных образцах соусов и сферических включениях. Прогноз модели полностью соответствует наблюдаемому поведению включений: при превышении реального предела текучести среды над расчетным минимальным значением включения сохраняют неподвижность. Установлено, что разработанная модель обеспечивает консервативный (безопасный) прогноз, что позволяет использовать ее для технологических расчетов с гарантированным запасом стабильности.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности применения разработанной модели при проектировании рецептур соусов и других вязкопластичных пищевых продуктов, содержащих твердые сферические включения. Использование предложенной расчетной зависимости позволяет технологам на этапе разработки продукта определять минимальный предел текучести среды, необходимый для статического удержания включений, что существенно сокращает объем и продолжительность экспериментальной отработки рецептур. Внедрение подхода способствует снижению материальных и временных затрат, связанных с эмпирическим подбором стабилизационных систем, а также обеспечивает стабильность качества готового продукта при его хранении и транспортировке.

Определены ограничения разработанной модели. Предложенная математическая зависимость справедлива для сферических включений и не учитывает эффекты, связанные с несферичностью частиц, для которых требуется введение дополнительных коэффициентов формы. Модель описывает статическое условие равновесия и не учитывает тиксотропные свойства пищевых сред, что означает необходимость осторожного применения результатов для случаев, когда продукт непосредственно перед потреблением или упаковкой подвергается интенсивному перемешиванию с последующим недостаточным временем восстановления структуры. Кроме того, в рамках настоящей работы не рассматривались динамические нагрузки, возникающие при транспортировке продукции, что должно быть предметом отдельных исследований.

Направление дальнейших исследований связано с распространением предложенного подхода на включения несферической формы и разработкой методики учета тиксотропного восстановления структуры после перемешивания. Кроме того, планируется создание кинетической модели, позволяющей прогнозировать скорость осаждения частиц в случае, когда предел текучести среды недостаточен для их полной стабилизации. Дальнейшее развитие работы предполагает также исследование влияния температурных режимов хранения на стабильность включений и адаптацию модели для других типов вязкопластичных пищевых сред.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Наймушина Л.В., Шаламова Е.И., Зыкова И.Д., Микова Н.М. Функциональный соус из облепихи с янтарной кислотой // Вестник КрасГАУ. 2023. № 11(200). С. 282-291. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-11-282-291.

2. Мезенова О.Я., Примаченко Е.В. Обоснование рецептуры соуса повышенной биологической ценности на основе пептидов рыбного сырья и липидов ягод облепихи // Вестник Международной академии холода. 2025. № 2. С. 40-47. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-40-47.

3. Николаева Ю.В., Гордовская В.В., Тарасова В.В., и др. Совершенствование технологии соуса песто, обогащенного биологически активными добавками // Пищевая промышленность. 2025. № 3. С. 28-32. DOI: 10.52653/PPI.2025.3.3.006.

4. Миленький А.В., Агафонова С.В. Эмульсионный соус, обогащенный продуктами переработки вторичного сырья лососевых рыб, стабилизированный растительными компонентами // Известия КГТУ. 2025. № 79. С. 84-98. DOI: 10.46845/1997-3071-2025-79-84-98.

5. Терехина А.В., Зуева Н.В., Ярошева В.Н. Разработка способа получения майонезного соуса с использованием гидролата мяты перечной // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2023. Т. 85, № 4(98). С. 35-40. DOI: 10.20914/2310-1202-2023-4-35-40.

6. Heriyanto S., Romulo A. Tomato pomace ketchup: physicochemical, microbiological, and sensory characteristics // Food Processing: Techniques and Technology. 2023. Vol. 53, No. 4. pp. 766-774. DOI: 10.21603/2074-9414-2023-4-2477.

7. Мазукабзова Э.В., Зайцева Л.В. Органолептические, реологические и кристаллизационные свойства кондитерской глазури с порошком из свеклы // Пищевые системы. 2022. Т. 5, № 2. С. 132-138. DOI: 10.21323/2618-9771-2022-5-2-132-138.

8. Агеев О.В., Самойлова Н.В. Научно-теоретические основы ресурсосберегающих процессов первичной обработки рыбы. Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2025. 147 с. ISBN: 978-5-94826-801-9.

9. Мистенева С.Ю. Особенности структурообразования пенообразных эмульсий для кексов // Пищевые системы. 2025. Т. 8, № 4. С. 506-514. DOI: 10.21323/2618-9771-2025-8-4-506-514.

10. Новикова М.В., Виролайн К.Э., Нефедов А.Д., Успенская М.В. pH-чувствительные съедобные пленки на основе биокомпозита казеинат натрия/агар-агар // Пищевые системы. 2022. Т. 5, № 3. С. 271-277. DOI: 10.21323/2618-9771-2022-5-3-271-277.

11. Кушакова К.А., Конакова А.В. Производство капсул из агар-агара для лекарственных препаратов // Наукосфера. 2023. № 3-1. С. 26-29.

12. Королькова Н.В., Высоцкая Е.А., Корольков К.Е. Сравнительная характеристика растительных масел как основы для жировой фазы майонезов и майонезных соусов // Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. 2024. № 2(25). С. 59-65. DOI: 10.53914/issn2311-6870_2024_2_59.

13. Белянинова Ю.И., Варивода А.А. Исследование показателей качества сметанно-растительных соусов // Ползуновский вестник. 2022. № 1. С. 31-38. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.004.

14. Резниченко И.Ю., Захватаева А.В., Рубан Н.Ю. Разработка и оценка качества майонезного соуса с использованием масла амаранта // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2022. № 2(52). С. 3-9. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-2-3-9.

15. Волова Т.Г., Прудникова С.В., Шишацкая Е.И. Ксантан - целевой продукт биотехнологии пищевого, биомедицинского и технического назначения // Вестник КрасГАУ.

2025. № 6(219). С. 265-290. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-6-265-290.

16. Сорокина И.А. Влияние функциональных компонентов растительного происхождения на показатели качества жировой эмульсии // Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. 2023. № 4(23). С. 58-67. DOI: 10.53914/issn2311-6870_2023_4_58.

17. Лисовая Е.В., Викторова Е.П., Свердличенко А.В., Жане М.Р. Влияние особенностей химического состава модифицированных лецитинов на их поверхностно-активные и эмульгирующие свойства // Новые технологии. 2023. Т. 19, № 3. С. 48-57. DOI: 10.47370/2072-0920-2023-19-3-48-57.

18. Киреева О.С. Применение природного йодсодержащего ингредиента в рецептуре обогащенных вафельных хлебцев // Пищевые системы. 2021. Т. 4, № 3. С. 121-124. DOI: 10.21323/2618-9771-2021-4-3S-121-124.

19. Харламова О.М., Попов И.А. Использование плодов терна в технологии производства соуса фруктового // Инновационные технологии и технические средства для АПК : материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 110-летию ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Воронеж, 10–11 ноября 2022 года. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. С. 543-545.

20. Орлов И.О., Землякова Е.С. Обоснование технологии производства соуса на основе пектиносодержащего сырья повышенной пищевой ценности // Известия КГТУ. 2019. № 54. С. 130-142.

21. Fan Zhang, Luyao Huang, Hongliang Zeng, Baodong Zheng, Yi Zhang. Enhanced salt perception of soy sauce based on emulsion salt reduction strategy // LWT. 2025. Vol. 220. 117501.

22. Huang Zheng, Peng Ye, Xiuli Zhao, Wanning Li, Lihua Hou. Enhanced soy sauce stability and reduced precipitation by improving critical steps in the fermentation process // Food Research International. 2023. Vol. 174, Part 2. 113674.

REFERENCES

1. Naimushina L.V., Shalamova E.I., Zykova I.D., Mikova N.M. Funktsional'nyy sous iz oblepikhi s yantarnoy kislotoy [Functional sea buckthorn sauce with succinic acid]. Vestnik KrasGAU. 2023. No. 11(200), pp. 282-291. DOI: 10.36718/1819-4036-2023-11-282-291.

2. Mezenova O.Ya., Primachenko E.V. Obosnovanie retseptury sousa povyshennoy biologicheskoy tsennosti na osnope peptidov rybnogo syr'ya i lipidov yagod oblepikhi [Justification of the recipe for sauce of increased biological value based on fish raw materials peptides and sea buckthorn berry lipids]. Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. 2025. No. 2, pp. 40-47. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-40-47.

3. Nikolaeva Yu.V., Gordovskaya V.V., Tarasova V.V., et al. Sovershenstvovanie tekhnologii sousa pesto, obogashchennogo biologicheski aktivnymi dobavkami [Improving the technology of pesto sauce enriched with biologically active additives]. Pishchevaya promyshlennost'. 2025. No. 3, pp. 28-32. DOI: 10.52653/PPI.2025.3.3.006.

4. Milen'kiy A.V., Agafonova S.V. Emul'sionnyy sous, obogashchennyy produktami pererabotki vtorichnogo syr'ya lososevykh ryb, stabilizirovannyy rastitel'nymi komponentami [Emulsion sauce enriched with processed products of secondary raw materials of salmon fish, stabilized with plant components]. Izvestiya KGTU. 2025. No. 79, pp. 84-98. DOI: 10.46845/1997-3071-2025-79-84-98.

5. Terekhina A.V., Zueva N.V., Yarosheva V.N. Razrabotka sposoba polucheniya mayoneznogo sousa s ispol'zovaniem gidrolata myaty perechnoy [Development of a method for producing mayonnaise sauce using peppermint hydrolate]. Vestnik Voronezhskogo

gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy. 2023. Vol. 85, No. 4(98), pp. 35-40. DOI: 10.20914/2310-1202-2023-4-35-40.

6. Heriyanto S., Romulo A. Tomato pomace ketchup: physicochemical, microbiological, and sensory characteristics. Food Processing: Techniques and Technology. 2023. Vol. 53, No. 4, pp. 766-774. DOI: 10.21603/2074-9414-2023-4-2477.

7. Mazukabzova E.V., Zaytseva L.V. Organolepticheskie, reologicheskie i kristallizatsionnye svoystva konditerskoy glazuri s poroshkom iz svekly [Organoleptic, rheological and crystallization properties of confectionery glaze with beet powder]. Pishchevye sistemy. 2022. Vol. 5, No. 2, pp. 132-138. DOI: 10.21323/2618-9771-2022-5-2-132-138.

8. Ageev O.V., Samoylova N.V. Nauchno-teoreticheskie osnovy resursosberegayushchikh protsessov pervichnoy obrabotki ryby [Scientific and theoretical foundations of resource-saving processes of primary fish processing]. Kaliningrad: Kaliningrad State Technical University, 2025. 147 p. ISBN: 978-5-94826-801-9.

9. Misteneva S.Yu. Osobennosti strukturoobrazovaniya penoobraznykh emul'siy dlya keksov [Features of structure formation of foam emulsions for cupcakes]. Pishchevye sistemy. 2025. Vol. 8, No. 4, pp. 506-514. DOI: 10.21323/2618-9771-2025-8-4-506-514.

10. Novikova M.V., Virolaynen K.E., Nefedov A.D., Uspenskaya M.V. pH-chuvstvitel'nye s"edobnye plenki na osnove biokompozita kazeinat natriya/agar-agar [pH-sensitive edible films based on sodium caseinate/agar-agar biocomposite]. Pishchevye sistemy. 2022. Vol. 5, No. 3, pp. 271-277. DOI: 10.21323/2618-9771-2022-5-3-271-277.

11. Kushakova K.A., Konakova A.V. Proizvodstvo kapsul iz agar-agara dlya lekarstvennykh preparatov [Production of agar-agar capsules for medicines]. Naukosfera. 2023. No. 3-1, pp. 26-29.

12. Korol'kova N.V., Vysotskaya E.A., Korol'kov K.E. Sravnitel'naya kharakteristika rastitel'nykh masel kak osnovy dlya zhirovoy fazy mayonezov i mayoneznykh sousov [Comparative characteristics of vegetable oils as a basis for the fat phase of mayonnaises and mayonnaise sauces]. Tekhnologii i tovarovedenie sel'skokhozyaystvennoy produktsii. 2024. No. 2(25), pp. 59-65. DOI: 10.53914/issn2311-6870_2024_2_59.

13. Belyaninova Yu.I., Varivoda A.A. Issledovanie pokazateley kachestva smetanno-rastitel'nykh sousov [Study of quality indicators of sour cream and vegetable sauces]. Polzunovskiy vestnik. 2022. No. 1, pp. 31-38. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.004.

14. Reznichenko I.Yu., Zakhvataeva A.V., Ruban N.Yu. Razrabotka i otsenka kachestva mayoneznogo sousa s ispol'zovaniem masla amaranta [Development and quality assessment of mayonnaise sauce using amaranth oil]. Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv. 2022. No. 2(52), pp. 3-9. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-2-3-9.

15. Volova T.G., Prudnikova S.V., Shishatskaya E.I. Ksantan – tselevoy produkt biotekhnologii pishchevogo, biomeditsinskogo i tekhnicheskogo naznacheniya [Xanthan gum – a target product of biotechnology for food, biomedical and technical purposes]. Vestnik KrasGAU. 2025. No. 6(219), pp. 265-290. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-6-265-290.

16. Sorokina I.A. Vliyanie funktsional'nykh komponentov rastitel'nogo proiskhozhdeniya na pokazateli kachestva zhirovoy emul'sii [Influence of functional components of plant origin on the quality indicators of fat emulsion]. Tekhnologii i tovarovedenie sel'skokhozyaystvennoy produktsii. 2023. No. 4(23), pp. 58-67. DOI: 10.53914/issn2311-6870_2023_4_58.

17. Lisovaya E.V., Viktorova E.P., Sverdlichenko A.V., Zhane M.R. Vliyanie osobennostey khimicheskogo sostava modifitsirovannykh letsitinov na ikh poverkhnostno-aktivnye i emul'giruyushchie svoystva [Influence of the chemical composition of modified lecithins on their surface-active and emulsifying properties]. Novye tekhnologii. 2023. Vol. 19, No. 3, pp. 48-57. DOI: 10.47370/2072-0920-2023-19-3-48-57.

18. Kireeva O.S. Primenenie prirodnogo yodsoderzhashchego ingredienta v retsepture obogashchennykh vafel'nykh khlebtsov [Application of a natural iodine-containing ingredient in the recipe of enriched waffle bread]. Pishchevye sistemy. 2021. Vol. 4, No. 3S, pp. 121-124. DOI: 10.21323/2618-9771-2021-4-3S-121-124

19. Kharlamova O.M., Popov I.A. Ispol'zovanie plodov terna v tekhnologii proizvodstva sousa fruktovogo [Use of sloe fruits in the technology of fruit sauce production]. Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya APK: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov (Voronezh, 10–11 noyabrya 2022 goda). Voronezh: Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter I, 2022, pp. 543-545.

20. Orlov I.O., Zemlyakova E.S. Obosnovanie tekhnologii proizvodstva sousa na osnovepektinosoderzhashchego syr'ya povyshennoy pishchevoy tsennosti [Justification of the technology for producing sauce based on pectin-containing raw materials of increased nutritional value]. Izvestiya KGTU. 2019. No. 54, pp. 130-142.

21. Fan Zhang, Luyao Huang, Hongliang Zeng, Baodong Zheng, Yi Zhang. Enhanced salt perception of soy sauce based on emulsion salt reduction strategy. LWT. 2025. Vol. 220, 117501.

22. Huang Zheng, Peng Ye, Xiuli Zhao, Wanning Li, Lihua Hou. Enhanced soy sauce stability and reduced precipitation by improving critical steps in the fermentation process. Food Research International. 2023. Vol. 174, Part 2, 113674.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Агеев Олег Вячеславович – доктор технических наук, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: oleg.ageev@klgtu.ru)	*Ageev Oleg Viatcheslavovich* – Dr.Sci. (Eng.), Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: oleg.ageev@klgtu.ru)
Шишло Юлия Ивановна – студентка магистратуры, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: j-shishlo@yandex.ru)	*Shishlo Yulia Ivanovna* – graduate student, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: j-shishlo@yandex.ru)
Титова Инна Марковна – кандидат технических наук, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: inna.titova@klgtu.ru)	*Titova Inna Markovna* – Ph.D. (Eng.), Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: inna.titova@klgtu.ru)

Статья поступила в редакцию 25.04.2026; одобрена после рецензирования 11.05.2026, принята к публикации 20.05.2026.
The article was submitted 25.04.2026; approved after reviewing 11.05.2026; accepted for publication 20.05.2026.