

Научная статья  
УДК 621.66:637.358

## НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОДБОРА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛАВЛЕННЫХ СЫРОВ: КРАТКИЙ ОБЗОР

О.И. Левичева<sup>1</sup>, В.А. Наумов<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

\* E-mail: [van-old@mail.ru](mailto:van-old@mail.ru)

**Аннотация.** Проведенный анализ показал, что в России производится оборудование для изготовления и транспортирования плавленых сыров (ПС) с достаточно широким диапазоном технических параметров. Это позволяет подобрать оборудование, как для малых предприятий, так и для крупных производств. Однако известные зарубежные компании в своей технической документации размещают результаты исследований о влиянии вязкости ПС на производительность и энергетические затраты. Тогда как в технической (и рекламной) документации российских производителей они отсутствуют. Проведение таких исследований позволит повысить конкурентную способность российского оборудования для производства и транспортирования ПС.

**Ключевые слова:** плавленый сыр; исследование; плавильный котел; кулачковый насос; характеристики; российское производство.

**Для цитирования:** Левичева О.И., Наумов В.А. Некоторые проблемы исследования и подбора оборудования для производства плавленых сыров: краткий обзор // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т.9. №3. С. 27–42.

Original article

## SOME PROBLEMS OF RESEARCH AND SELECTION OF EQUIPMENT FOR THE PRODUCTION OF PROCESSED CHEESES: A BRIEF OVERVIEW

O.I. Levicheva<sup>1</sup>, V.A. Naumov<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

\* E-mail: [van-old@mail.ru](mailto:van-old@mail.ru)

**Abstract.** The analysis showed that equipment for the manufacture and transportation of processed cheeses (PS) with a fairly wide range of technical parameters is produced in Russia. This allows you to select equipment for both small enterprises and large-scale production. However, well-known foreign companies in their technical documentation post the results of studies on the effect of the viscosity of PS on productivity and energy costs. Whereas they are absent in the technical (and advertising) documentation of Russian manufacturers. Conducting such studies will increase the competitive ability of Russian equipment for the production and transportation of PS.

**Keywords:** processed cheese; research; melting pot; lobe pump; characteristics; Russian production.

**For citation:** Levicheva O.I., Naumov V.A. Some problems of research and selection of equipment for the production of processed cheeses: a brief overview. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2023. Vol.9, No. 3, pp. 27–42.

## Введение

Сыр присутствует в рационе человека уже много лет, и литература предполагает, что раннее производство сыра датируется 5200 годом до нашей эры. Плавленый сыр (ПС) как продукт возник в результате преобразования натуральных сыров путем плавления и пастеризации с помощью эмульгирующих солей перед разливкой в формы и упаковкой. ПС имеют более мягкий вкусовой профиль по сравнению с натуральными сырами, что часто привлекает потребителей, впервые сталкивающихся со вкусом сыра. ПС имеют более длительный срок хранения благодаря более строгим протоколам контроля качества, связанным с их пастеризацией, горячим розливом и упаковкой. Кроме того, ПС производятся с различными текстурами, такими как брусочки, ломтики, спреды и соусы для соуса, которые придают вкус и удобство приготовлению пищи.

В настоящее время мировое производство сыра составляет более 35% от общего объема производства молока, которое ежегодно увеличивается в течение последних десятилетий [1]. ПС можно охарактеризовать как сложную многокомпонентную молочную систему, описываемую как стабильная эмульсия масло-в-воде холодного отверждения. ПС производится не непосредственно из цельного молока, обезвоженного или обезжиренного молока, в отличие от натуральных сыров, а из различных комбинаций молочных и/или немолочных ингредиентов. В целом, ПС включает в себя в основном две категории: плавленые сырные продукты и аналоги сырных продуктов.

Недавно изданная монография (Elsevier Inc. Woodhead Publishing) позволяет ознакомиться с состоянием различных направлений исследования производства ПС [1-16]. В [1] обсуждаются определение, классификация, общие принципы производства и ключевые ингредиенты ПС. В двух словах, производственные протоколы предполагают воздействие тепла и механического сдвига на готовую смесь в реакционном контейнере с последующим охлаждением и хранением в холодильнике. Основными ингредиентами являются белки, жиры, соли, сорбиновая и лимонная кислота. Также описывается оборудование для переработки сыра. Далее следует описание свойств сыра и, в заключение, подходы к созданию полезного сыра, а также преимущества и области применения плавленого сыра.

Свойства и роль молочных ингредиентов в рецептуре технологических сырных продуктов рассмотрена в [2] Производители контролируют физико-химические свойства, выбирая ингредиенты и параметры обработки для получения целевых функциональных возможностей. Обезжиренные ингредиенты, такие как концентраты молочного белка (КМБ), используются для сбалансирования гидролизованного казеина, содержащегося в созревшем сыре. Если для достижения целевого содержания сухих веществ требуется больше неструктурного наполнителя, можно выбрать КМБ с меньшим содержанием белка и большим содержанием лактозы. Аналогичным образом, молочный жир для замены сырного жира можно получить из самых разных источников - от сливочного масла до сывороточного сливочного масла. Также рассматриваются экономичные и экологичные варианты. Например, соленая сыворотка из чеддера и сыров по-американски может быть использована для замены соли, влаги и некоторого количества белка и жира.

В [3] описаны основные этапы производства натурального сыра. Кроме того, также описаны конкретные этапы производства отдельных сортов сыра (Эдам, Моцарелла, швейцарский сыр, чеддер и белый соленый сыр соответственно) и их типичные характеристики, поскольку эти сорта являются одними из наиболее применимых видов сыра при производстве плавленых сыров и сопутствующих продуктов. Кроме того, также упоминается влияние степени зрелости натурального сыра (или, другими словами, содержания в нем неповрежденного казеина) на свойства получаемого плавленого сыра (главным образом, текстурные и реологические). В целом, также описано влияние различных сортов сыра на вышеупомянутые свойства плавленого сыра.

В [4] обсуждаются функциональные свойства гидроколлоидов и камедей, крахмалов и белков растительного происхождения, подчеркивая влияние этих ингредиентов на

качественные характеристики плавленых сырных продуктов. Плавленые сырные продукты представляют собой сложную систему жировых шариков, диспергированных в казеиновой гелевой сетке. По соображениям здоровья, экономики и устойчивого развития растет интерес к замене белков и жиров на основе молочных продуктов в плавленых сырных продуктах растительными ингредиентами. Функциональные возможности ингредиентов на молочной и растительной основе действительно различаются, что влияет на текстуру и другие качественные характеристики плавленых сырных продуктов.

В [5] рассматриваются последние литературные данные об основных ингредиентах ПС: натуральные сыры и эмульгирующие соли. Вместе с параметрами обработки они в значительной степени определяют состав и свойства конечного продукта, но ароматизаторы, красители и консерванты также играют значительную роль. Ароматизаторы добавляют и улучшают вкус, что часто снижает себестоимость производства за счет уменьшения необходимого количества зрелого натурального сыра в рецептуре ПС. Наиболее распространенными вкусовыми добавками являются модифицированный ферментами сыр, дистиллят закваски и древесный дым; для придания уникальности продукту также используются различные специи и мясные, фруктовые и овощные заготовки. Консерванты, такие как низин и сорбат калия, добавляются для предотвращения роста плесени и дрожжей.

Цель [6] состояла в том, чтобы объяснить важность эмульгирующих солей при производстве ПС. Описаны принципы действия эмульгирующих солей в модельной системе. В частности, была охарактеризована фаза ионного обмена и высвобождения казеинов и их действие в процессе гидратации воды и эмульгирования жира. Объяснено образование новой белковой матрицы во время так называемой «фазы взбивания». Особое внимание уделено эмульгирующим солям на основе фосфатов и цитратов. Кроме того, была охарактеризована роль используемых фосфатов и натриевых солей. Описаны более сложные системы, состоящие из бинарных и тройных смесей фосфатов и/или цитратов. Приняты во внимание законодательные аспекты использования эмульгирующих солей. Описана возможность замены традиционных эмульгирующих солей и представлены четыре возможных подхода.

В [7] рассмотрены технологические и сенсорные функции натрия и натрийсодержащих плавление солей для плавленых сыров. Рассмотрены технологические проблемы, связанные с уменьшением содержания поваренной соли в рецептуре, заменой ее хлоридом калия, применением не содержащих натрия или плавление солей с низким содержанием натрия и использованием интенсификаторов и/или усилителей вкуса в плавленых сырах. В отдельном разделе представлены параметры снижения содержания натрия в плавленых сырах и пищевых продуктах в целом, установленные некоторыми странами. Представлены результаты исследований ПС с пониженным содержанием натрия и примеры коммерческих продуктов.

В [8] рассмотрены четыре основных этапа производства ПС: измельчение, смешивание, термообработка, упаковка. В зависимости от назначения производятся различные виды ПС - от сыпучих до спредов. Параметры процесса и упаковочное оборудование изменяются в зависимости от формы конечного продукта. Уменьшение размера позволяет получить однородную смесь, которую можно равномерно нагревать. Смесь нагревается в варочной панели с системой отвода потока, которая в первую очередь определяет безопасность и качество за счет применения оптимальной температуры, времени и скорости перемешивания. Система упаковки и материал защищают продукт от загрязнения окружающей средой и продлевают срок его годности. Формирование структуры плавленого сыра с желаемыми функциональными свойствами зависит как от ингредиентов, так и от условий процесса. Поэтому системы управления технологическим процессом, включающие подходящие датчики, имеют решающее значение не только для безопасности, но и для структурной функциональности и сенсорных качеств плавленого сыра.

В [9] описываются технологические аспекты производства ПС, влияющие на свойства, главным образом, на структуру ПС. Приведен анализ влияния выбранного сырья

(натуральные сыры, молочный и немолочный жир, переработка, эмульгирующие соли, гидроколлоиды, эмульгаторы, низкомолекулярные сахараиды, биологически активные вещества, содержание кальция, ароматизаторы), целевых параметров (например, содержание сухого вещества, жира в сухом веществе) и технологических характеристик (плавление, температура, время выдержки, скорость перемешивания, гомогенизация, скорость охлаждения, условия хранения). Последние факторы играют наиболее важную роль в формировании структуры ПС.

В [10] представлен всесторонний обзор различных аспектов производства ПС, включая рецептуру, смешивание и обработку. Это определяет влияние упаковочных материалов на показатели качества ПС. Различия в составе и условиях обработки ПС определяют разнообразие формата и формы упаковки. Кроме того, рассматривается, как скорость охлаждения влияет на физические и реологические свойства, а также на функциональность и микроструктуру конечных плавленых сырных продуктов. Действительно, многие факторы могут способствовать формированию структуры конечного продукта на этапе охлаждения, а именно кристаллизация жира, включение рекомбинантных жировых шариков и взаимодействия белков. Обсуждается срок годности ПС, а также возможные физико-химические, сенсорные и реологические изменения и их актуальность в течение срока хранения ПС.

В [11] рассмотрены специальные плавленые сыры (СПС), которые получают из ПС с применением специальной рецептуры и производственного процесса. Они могут быть изготовлены из молочных и/или немолочных ингредиентов без определенного состава. Основной группой в этой категории являются аналоги или имитационные сыры, которые производятся со структурой и функциональными возможностями, аналогичными структуре определенного сыра. Добавление питательных или функциональных компонентов в плавленый сыр также может привести к получению СПС. В этих функциональных ПС должна быть обеспечена активность добавленного пищевого или функционального компонента. Обычно в этих продуктах используются молочный белок или порошки растительного белка, молочный жир или растительное масло/жиры, крахмал и стабилизаторы. Ингредиенты определяют структуру, функциональность и стабильность продуктов. Поэтому в большинстве исследований проводился поиск подходящих ингредиентов и рецептур для достижения желаемых функциональных свойств и стабильности. В то время как исследования и маркетинг искусственных сыров продвигались медленно, распространение той же концепции на сыры на растительной основе ускорило развитие в этой области. СПС открывают новые возможности, как для производителей, так и для потребителей, поскольку продолжают усилия по эффективному использованию природных ресурсов для устойчивого производства полезных для здоровья продуктов питания.

В [12] описаны основные методы, используемые для определения характеристик ПС. Они были классифицированы и исследованы в следующем порядке: анализ состава, физико-химические измерения, реологические измерения, инструментальная оценка текстуры, микроструктурная оценка, оценка функциональных свойств, микробиологический анализ и сенсорная оценка. Кроме того, были упомянуты наиболее распространенные статистические методы, необходимые для обработки полученных данных.

В [13] рассмотрены аспекты обеспечения и контроля качества ПС. Приведены требования предварительных программ, а также законодательства, спецификации качества сырья и информация, касающаяся отбора проб и контроля качества готовой продукции. Также описывается полный анализ опасности и система критических контрольных точек. Кроме того, проверяются дефекты, обнаруженные в плавленых сырах, а также корректирующие действия для их предотвращения. Соответствие производителей плавленых сыров требованиям систем обеспечения качества может привести к получению готовой продукции с повышенной безопасностью и качеством. Тщательный подбор рецептуры

натурального сыра, а также условий обработки и хранения важен для производства высококачественного ПС.

В [14] рассмотрена разрушающаяся и патогенная микробиота ПС с акцентом на основные аспекты обработки, источники и пути заражения, в дополнение к важному действию солей плавления как ингибиторов разрушающихся микроорганизмов и патогенных микроорганизмов-возбудителей. Во время обработки вегетативные формы патогенов и порчи инактивируются, но споры остаются жизнеспособными. Представлены и обсуждены характеристики основных ассоциированных микроорганизмов, особенно спорообразующих бактерий, с акцентом на роды *Bacillus* и *Clostridium*. Также обсуждаются меры по осуществлению микробиологического контроля ПС, такие как консерванты, биоконсерванты, контроль внешних факторов и прогнозирующая микробиология. Наконец, будут представлены последние результаты, касающиеся использования пробиотиков в ПС.

Стандарты, рекомендации и полезную информацию о гигиенических аспектах и сырье, используемом при производстве ПС, а также научные и политические дискуссии включены в [15]. Молочные продукты, включая ПС, подпадают под действие различных национальных и/или международных норм и законодательств в разных странах в целях обеспечения безопасности и качества продукции для потребителей, а также регулирования молочного рынка для всех участников, включая молочные компании. Они классифицируют продукты в соответствии с их составом или ингредиентами и создают справедливую торговую среду, предотвращая фальсификацию. Рассмотрены требования многих законодательных актов к сортам ПС. Обсуждаются законодательные акты, разработанные в конкретных регионах, включая Европейский союз и страны Персидского залива, а также национальное законодательство, действующее в конкретных странах.

Проблемы расширения спроса на ПС рассмотрены в [16], опираясь на текущие рыночные тенденции в потреблении сыра в США. В существующей литературе были проведены исследования, посвященные обогащению сыра чеддер с пониженным содержанием жира жирными кислотами, ПС, обогащенного эмульсией рыбьего жира, отборных сыров, обогащенных растительными и животными источниками омега-3 жирных кислот, и обогащению плавленого сырного спреда омега-3 жирными кислотами. Но в настоящее время не существует исследований, посвященных экономической целесообразности обогащения ПС. Этот предварительный анализ учитывает смоделированные рыночные условия с помощью кривых спроса и предложения и оценивает процентное увеличение спроса на ПС, необходимое для компенсации дополнительных затрат на обогащение с целью поддержания прибыльности производителя. Методология предполагает использование системы частичного равновесия, часто называемой моделированием равновесного смещения (MPC). Чтобы устранить опасения по поводу неопределенности значений параметров подхода MPC, используются не только различные значения эластичности спроса и предложения по собственной цене, но и диапазон предельных издержек, связанных с процессом обогащения. Таким образом, обеспечена проверка достоверности эмпирических результатов. Итог: при минимальных изменениях спроса на ПС обогащение его омега-3 жирными кислотами может происходить без какой-либо потери прибыли производителя. Этот вывод подтверждает утверждение о том, что обогащение ПС, действительно, экономически целесообразно для производителей. Дополнительными важными побочными продуктами для производителей при этом являются диверсификация их продуктовой линейки и предоставление потребителям более полезных продуктов. Кроме того, потенциальное увеличение спроса на ПС из-за обогащения омега-3 жирными кислотами также выгодно молочным фермерам, розничным торговцам и потребителям.

Анализ результатов исследований ПС в других зарубежных и отечественных публикациях показал, что они находятся в русле проблем, рассмотренных в монографии выше. Например, в [17] было проведено исследование влияния добавления спирулины

максима (*S. maxima*) как источника питательных веществ, антиоксидантов и красителя на свойства плавленого сыра. К аналогам ПС добавляли порошок спирулины максима (1, 2 и 3%). Химические, физические, цветовые и сенсорные свойства аналога плавленого сыра с добавлением *S. maxima* оценивают через 3 месяца хранения в холодильнике. Также была определена антиоксидантная способность обработанных аналогов плавленого сыра *S. maxima*. Аналог ПС с 3%-ным содержанием порошка *S. maxima* содержал больше химических компонентов, за исключением золы, по сравнению с контрольным сыром. Результаты измерения физических свойств показали, что показания пенетрометра при обработке ПС с *S. maxima* были выше, чем у контрольного сыра в течение всего срока хранения, в то время как отделение масла и способность к плавлению были ниже. ПС *S. maxima* были более зелеными (по шкале А) и менее белыми (по шкале L), чем в контроле. Самая высокая активность по удалению свободных радикалов (57,24%) была зафиксирована при обработке аналога плавленого сыра *S. maxima* (3%). Судя по результатам сенсорного анализа, обработка аналогом плавленого сыра *S. maxima* (1 или 2%) была более приемлемой по сравнению с обработкой аналогом плавленого сыра *S. maxima* (3%). Вывод: добавление порошка *S. maxima* (1 или 2%) при производстве аналогов плавленого сыра придает сыру особый цвет (зеленый), высокую питательную ценность, антиоксидантную активность и сенсорные показатели.

В [18] исследованы характеристики используемых в промышленности солей-плавителей. Показано, что процесс плавления творожного сыра отличается от плавления сычужного сыра, что связано с разными формами белковых мицелл сыра. Изучено влияние соли-плавителя, регулятора кислотности и стабилизаторов структуры на способность творожного сыра к плавлению. В качестве молочного сыра использован творог обезжиренный, полученный кислотным способом. По результатам полного четырехфакторного эксперимента на двух уровнях получены уравнения регрессии и построены зависимости активной кислотности и органолептической оценки расплавленной творожной массы от исследуемых факторов. Наиболее существенное влияние на изменение указанных параметров оказали соль-плавитель и регулятор кислотности. Разработанный белково-структурный комплекс авторы рекомендуют для получения пастообразных ПС с нежной мажущейся консистенцией. Использование творога при производстве ПС позволит рационально использовать молочное сырье, снизить затраты на белковое сырье, расширить ассортимент ПС.

В [19] проведено исследование по разработке состава ПС, относящегося к сегменту функциональных пищевых продуктов, с внесением растительного сыра. При замене молочного жира оливковым маслом на 50% достигнуто приближение к показателю эталонного жира, разработанного в НИИ питания. Подобранные соли-плавители триполифосфата натрия в количестве 1,6%, кальция лимоннокислого – 0,4% от общей массы смеси, позволили сформировать высокие органолептические показатели плавленого сырного продукта. По вкусовой сочетаемости ПС, в качестве наполнителя выбраны цикорий и имбирь в соотношении 2:1, вносимых в количестве 0,6% от массы теста, обладающих противовоспалительными и противопаразитарными свойствами. Установлены сроки годности ПС с использованием растительного сыра в течение 60 суток при температуре хранения 2–4°C и относительной влажности воздуха не более 85%.

Статья [20] посвящена разработке методологии контент-анализа инновационных технологий на примере ПС.

Использование продукции речного и морского промысла, в технологии ПС является весьма перспективным направлением. Интересные исследования по научному обоснованию использования гидробионтов в производстве ПС выполнены в Дальрыбвтузе [21], Калининградском государственном техническом университете [22], Алтайском государственном аграрном университете [23]. Повышение пищевой и биологической ценности сыров достигается внесением в молочную смесь фрагментов мяса, икры и молок

рыб. Так в [23] были испытаны дозировки внесения измельченного филе форели радужной (*Oncorhynchus mykiss*) слабосоленой в диапазоне от 2 до 15 % к массе сырья. Мясо рыбы вносили на стадии составления смеси и в период плавления сырной массы. Обоснована дозировка рыбного компонента вводимого в массу на начальном этапе плавления продукта, в количестве 10 %. Анализ микроструктуры произведенных ПС показал, что с повышением температуры плавления и количества вносимой рыбы ткани последней формируют в продукте нитевидную структуру, пронизывающую компоненты ПС. Установлен эффективный температурный режим плавления комбинированной смеси, равный 85°C, который позволяет получить ПС высокого качества. Повышение температуры плавления с 70 до 90°C содействует снижению вязкости на 29% и предела текучести ПС с 82 до 58 Па. Определен срок хранения обогащенного ПС – 50 суток.

В большинстве перечисленных публикаций обращено внимание, как сильно условия производства влияют на конечный продукт. Однако проблемам подбора оборудования для производства ПС уделяется незначительное внимание. Так в [23] приведена технологическая линия производства ПС с добавлением форели. На рис. 1 указан плавильный котел и четыре насоса. Характеристики названных агрегатов и даже их тип не обсуждаются.

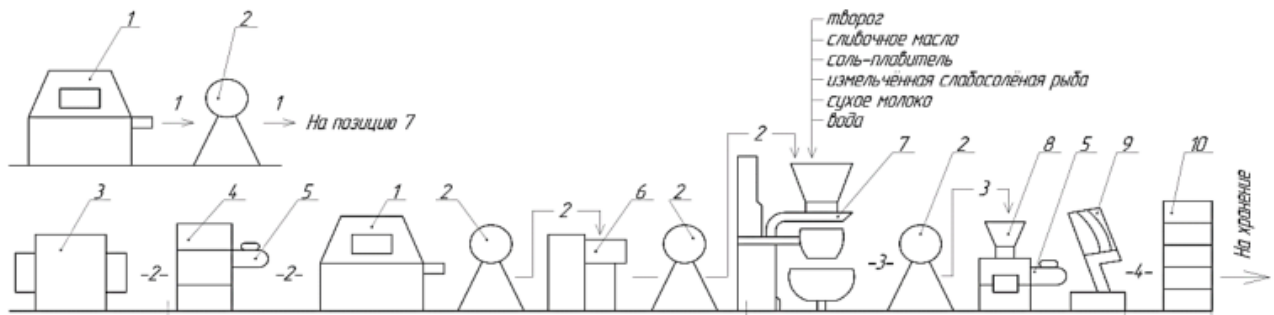


Рисунок 1 – Технологическая линия производства ПС с добавлением форели [23]:

- 1 – волчок; 2 – насос; 3 – машина для снятия парафина; 4 – моечная машина;
- 5 – транспортерная лента; 6 – вальцовка; 7 – плавильный котел;
- 8 – шприц вакуумный; 9 – клипсатор; 10 – стеллаж-тележка

В [24] представлена гидравлическая схема действующего производства ПС из порошка (рис. 2). Все агрегаты на рис. 2 зарубежного производства: плавильный котел Stephan с паровой рубашкой и приводной мешалкой, кулачковый насос Waukesha Cherry-Burrell.

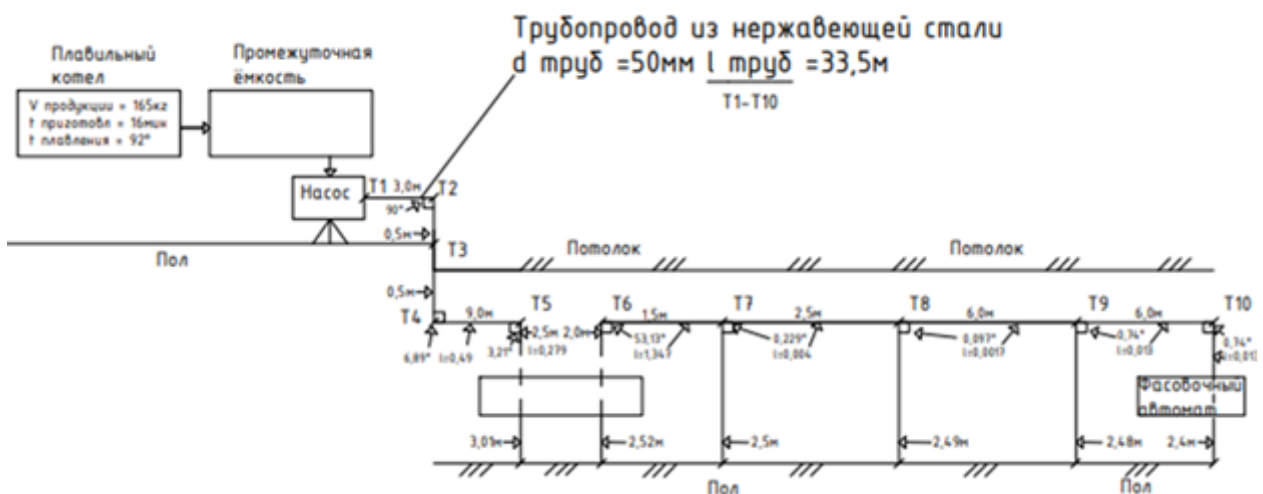


Рисунок 2 – Гидравлическая схема технологического трубопровода ПС [24]

Цель данной статьи – оценить возможность подбора необходимых агрегатов российского производства для изготовления и транспортирования ПС.

### Оборудование российского производства для линии ПС

Плавильный котел для линии ПС (и его аналоги) производится несколькими российскими компаниями. Плавитель сыра вакуумный<sup>1</sup> (ПСВ) производства ООО «ГСВ» предназначен для смешивания компонентов и плавления при производстве ПС. ПСВ имеет конусный корпус, вокруг которого размещена «паровая рубашка», внутри, по оси корпуса, установлено устройство лопастного типа со скребками, обеспечивающее эффективное перемешивание и предотвращающее налипание продукта на стенки. Загрузка компонентов осуществляется через люк сверху корпуса. Люк имеет блокировку, отключающую мотор-редуктор при его открывании. Температура продукта внутри ПСВ измеряется термопарой. Рабочая температура 85°C, время плавления – не менее 15 минут, рабочее давление пара – не более 500 кПа, частота вращения лопастной мешалки 22 об/мин., частота вращения нижнего куттера 700-2200 об/мин. ПСВ выполнен из пищевой нержавеющей стали, имеющей необходимый сертификат.

В табл. 1 представлены технические параметры линейки производимых ПСВ.

Таблица 1 – Технические параметры линейки ПСВ<sup>1</sup>

Параметр	ПСВ-50	ПСВ-100	ПСВ-200	ПСВ-300	ПСВ-500
Объем (геометрический), дм <sup>3</sup>	50	100	200	300	500
Объем (рабочий), дм <sup>3</sup>	40	80	160	240	400
Потребление пара, кг/час	50	100	190	280	420
Установленная мощность, кВт	2	3	5,5	7,5	11
Масса, кг	130	200	280	350	480
Цена (на 01.09.2023), тыс. руб.	1184	1367	1870	2010	2545,6

ООО «Биопищемаш» производит гидродинамический измельчитель-диспергатор<sup>2</sup> (ГИД). Особенность аппарата ГИД заключается в возможности в ходе выработки продукта совместно или раздельно использовать измельчающее устройство (куттерные ножи или диспергатор) и перемешивающее устройство в виде шнековой мешалки, снабженное скребками. При необходимости производства продуктов без цикла измельчения, для перемешивания используется только тихоходная шнековая мешалка, обеспечивающая равномерное распределение всех компонентов по объему, в том числе крупных кусочков (изюм, курага и др.). При выработке ПС с содержанием крупных фрагментов наполнителя (грибы, мясо, орешки, зелень и т.п.) проводится загрузка основных компонентов, плавление массы с возможностью впрыска острого пара, вакуумирование и, перед подачей на фасовку, внесение добавок необходимого размера. При этом измельчающее устройство в дальнейших технологических операциях (перемешивание, подача на фасовку) уже не используется.

Допускается температура нагрева продукта до 108°C. Параметры греющего пара в теплообменной рубашке следующие: давление до 200 кПа, расход пара не более 50 кг/час, температура пара не более 133°C. Давление охлаждающей воды в теплообменной рубашке

<sup>1</sup> ООО «ГСВ». Плавитель сыра вакуумный [Электронный ресурс]. URL: [https://pasteuriser.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=116&Itemid=147](https://pasteuriser.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=116&Itemid=147) (дата обращения: 01.09.2023).

<sup>2</sup> ООО «Биопищемаш». Гидродинамический измельчитель-диспергатор [Электронный ресурс]. URL: <https://ic-bpm.ru/katalog/gidrodinamicheskie-izmelchiteli-dispergatory-gid/> (дата обращения 31.08.2023).



не более 300 кПа, расход до 1000 кг/час, температура не выше 10 °С. В табл. 2 представлены технические параметры производимой линейки ГИД.

Таблица 2 – Технические параметры линейки ГИД<sup>2</sup>

Параметр		ГИД-70	ГИД-100	ГИД-320
Объем чаши, дм <sup>3</sup>	геометрический	70	100	320
	рабочий	50	80	250
Частота вращения, об/мин	мешалки	48	48	60
	диспергатора	1500-2895	1500-2895	700-3500
Мощность двигателя, кВт	мешалки	1,1	1,1	3,0
	диспергатора	7,5	7,5	7,5
Масса, кг		285	330	510

Компания «Молпромлайн» производит универсальную машину УМТИ-80<sup>3</sup>, предназначенную, в том числе, для производства ПС. Внешний вид показан на рис. 3.



Рисунок 3 – Внешний вид универсальной машины УМТИ-80<sup>3</sup>

УМТИ-80 представляет собой трехслойную вакуумную емкость с рубашкой нагрева, охлаждения, термоизоляцией и облицовкой. Геометрический объем внутренней ванны плавильного котла 120 литров, рабочий объем – от 30 до 80 литров. Крышка и дно емкости торо-сферической формы. Крышка имеет автоматический механизм открывания со стопором. Предусмотрен предохранительный клапан на давление до 2 ат. Рубашка нагрева и охлаждения плавильного котла объемного типа. Допустимое давление пара и охлаждающей жидкости в рубашке не превышает 300 Па. Впрыск острого пара в продукт осуществляется посредством двух клапанов с воздушным управлением.

Вакуумная система оборудована водокольцевым насосом российского производства ВВН-0,75/44,5. Мешалка-скребок имеет дополнительные лопасти для перемешивания ПС. Привод мешалки-скребка - мотор-редуктор с двигателем, мощностью 1,5 кВт. Скорость вращения вала мешалки с плавной регулировкой, посредством преобразователя частоты вращения от 10 до 56 оборотов в минуту. Имеется блок куттерных ножей для приготовления классического ПС. Приводом блока куттерных и кольцевых ножей служит двигатель мощностью 30 кВт. Скорость вращения ротора модуля с плавной регулировкой от 300 до 3000 об/мин. Электродвигатель привода ножей снабжен частотным преобразователем. Подключается станция очистки пара РТ-200 производительностью до 200 кг/час.

<sup>3</sup> Компания «Молпромлайн». Универсальная машина УМТИ-80 [Электронный ресурс]. URL: <https://molpromline.ru/katalog/UMTI-80-filtrpar-kutter-kolco/> (дата обращения 31.08.2023).

НПО «Агромаш»<sup>4</sup> производит аналоги импортных миксеров, миксеров-гомогенизаторов для производства ПС, таких компаний как Stephan, ИКА, Fryma Koruma, Karl Schnell. Линейка оборудования имеет широкий диапазон параметров, позволяет подобрать установку для изготовления ПС, как на малом предприятии, так и на крупном производстве (геометрический объем – до 2 м<sup>3</sup>).

Важной проблемой при производстве ПС является организация межоперационного транспортирования жидкого продукта, который отличается высокой вязкостью (см. рис. 1). Для этого чаще всего используются кулачковые насосы (КН), хотя в отдельных технологических линиях встречаются винтовые насосы. Широкое использование КН для транспортирования ПС обусловлено бережным сохранением структуры перекачиваемой жидкости. Однако стоимостные характеристики КН гораздо выше, например, винтовых насосов. Поэтому очень важен подбор КН, обеспечивающего необходимую производительность при минимально возможных затратах.

Пищевые КН выпускает целый ряд российских предприятий. Технические параметры КН компании ООО «Технология» представлены в табл. 3 ( $V_{100}$  – объем жидкости, перекачиваемый за 100 оборотов ротора;  $D$  – диаметр входного и выходного патрубка). Частота вращения ротора может быть установлена от 200 до 400 об/мин.

Таблица 3 – Технические параметры линейки КНП пищевых кулачковых насосов<sup>5</sup>

Модель	$V_{100}$ , л	$D$ , мм	Подача, м <sup>3</sup> /час	Мощность, кВт
КНП-3	3	25	0,30-0,80	0,55
КНП-6	6	25	0,65-1,6	0,75
КНП-8	8	32	0,85-2,1	1,5
КНП-12	12	38	1,3-3,2	2,2
КНП-20	20	38	2,1-5,4	3,0
КНП-30	30	51	3,2-6,4	4,0
КНП-36	36	51	3,8-7,6	4,0
КНП-52	52	51	5,6-11	5,5
КНП-66	66	63	7,1-14	7,5
КНП-78	78	63	9-18	7,5
КНП-100	100	76	11-22	11
КНП-135	135	89	15-30	15
КНП-160	160	102	17-34	18,5
КНП-200	200	102	21,6-43	22
КНП-300	300	108	32-64	30
КНП-400	400	159	45-90	37

<sup>4</sup> НПО «Агромаш». Вакуумные миксеры-гомогенизаторы [Электронный ресурс]. URL: [https://www.agro-mash.ru/AGROMASH/PISHEVOE/Vakuumnyi\\_mikser.html](https://www.agro-mash.ru/AGROMASH/PISHEVOE/Vakuumnyi_mikser.html) (дата обращения 02.09.2023).

<sup>5</sup> ООО «Технология». Пищевые кулачковые насосы [Электронный ресурс]. URL: <https://newhomogenizer.ru/catalog/kulachkovii-nasos/> (дата обращения 01.09.2023).

В табл. 4 представлены технические параметры части серии КН пищевых кулачковых насосов. Подача КН-830 может достигать 125 м<sup>3</sup>/час, максимальный напор 0,5 МПа (у КН-510 и КН-830 – до 1,2 МПа). Насосы КН по требованию заказчика могут поставляться с рубашкой водяного обогрева, в комплексе с вариатором и электродвигателем. На 01.09.2023 цена КН-006 с электродвигателем была 204 тыс. руб., КН-320 – 1 млн. 160 тыс. руб.

Таблица 4 – Технические параметры серии КН пищевых кулачковых насосов<sup>6</sup>

Модель	$V_{100}$ , л	$D$ , дюйм	Подача, м <sup>3</sup> /час	Мощность, кВт
КН-006-0,37	6	1,0	0,22-1,0	0,37
КН-006-0,75	6	1,0	0,72-2,88	0,75
КН-015-1,5	15	1,0	1,8-4,5	1,5
КН-032-2,2	32	1,5	3,0	2,2
КН-32-3,0	32	2,0	5,0	3,0
КН-032-4,0	32	2,0	7,0	4,0
КН-070-3,0	70	2,5	4,0	3,0
КН-070-4,0	70	2,5	6,0	4,0
КН-070-5,5	70	2,5	11	5,5
КН-070-7,5	70	2,5	15	7,5
КН-170-5,5	170	3,5	15	5,5
КН-170-7,5	170	3,5	20	7,5
КН-170-11	170	3,5	25	11
КН-170-15	170	3,5	30	15
КН-320-11	320	4,0	20	11
КН-320-11	320	4,0	35	15
КН-320-22	320	4,0	60	22

Как видно из приведенных выше таблиц, широкий диапазон параметров производимого оборудования для производства и транспортирования ПС позволяет обеспечить потребности технологических линий. Серьезным недостатком технической документации оборудования перечисленных выше российских предприятий является то, что параметры приводятся без учета влияния вязкости продукта, как правило, для воды.

В [25] было исследование влияние вязкости транспортируемой пищевой жидкости на производительность и энергетические затраты кулачкового насоса. На рис. 4, 5 показано, что при увеличении вязкости жидкости растет и подача (положительный эффект), и затраченная мощность (отрицательный эффект) КН Romac PLP 2-1,5. Причем для жидкостей с большой вязкостью, как ПС, подача изменяется незначительно (рис. 4, линии 3 и 4), а темп роста затраченной мощности, наоборот, увеличивается (рис. 5, линии 3 и 4). При снижении температуры расплавленной сырной массы увеличивается ее вязкость, в результате удельные энергетические затраты на ее перекачивание значительно возрастают.

<sup>6</sup> Компания «Насосы Ампики». Пищевые кулачковые насосы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ampika.ru/oborudovanie.html?razdel=28> (дата обращения 01.09.2023).

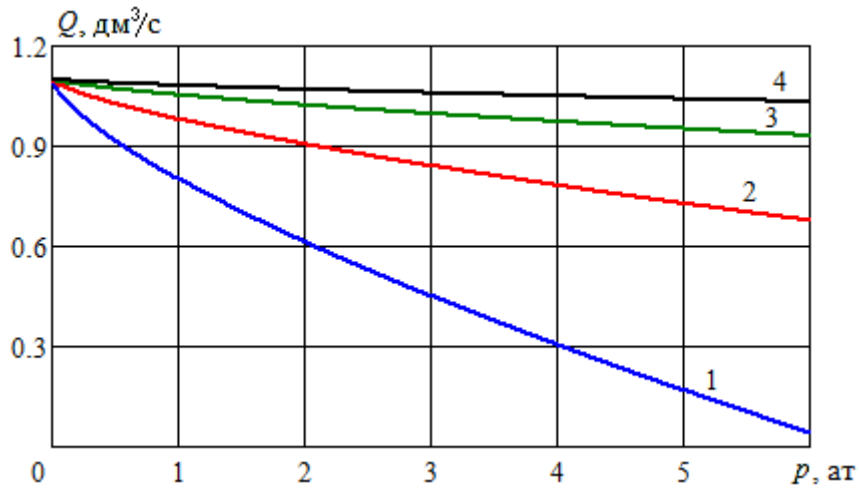


Рисунок 4 – Зависимость подачи Pomac PLP 2-1,5 от давления по данным<sup>7</sup> при различной относительной вязкости ( $n = 5$  об/с): 1 –  $\eta=1$  (вода), 2 –  $\eta=10$ , 3 –  $\eta=100$ , 4 –  $\eta=1000$

Указанные эффекты необходимо учитывать при подборе оборудования для производства и транспортирования ПС. Однако в технической документации российских производителей отсутствуют сведения о влиянии вязкости продукта на производительность и энергетическую эффективность.

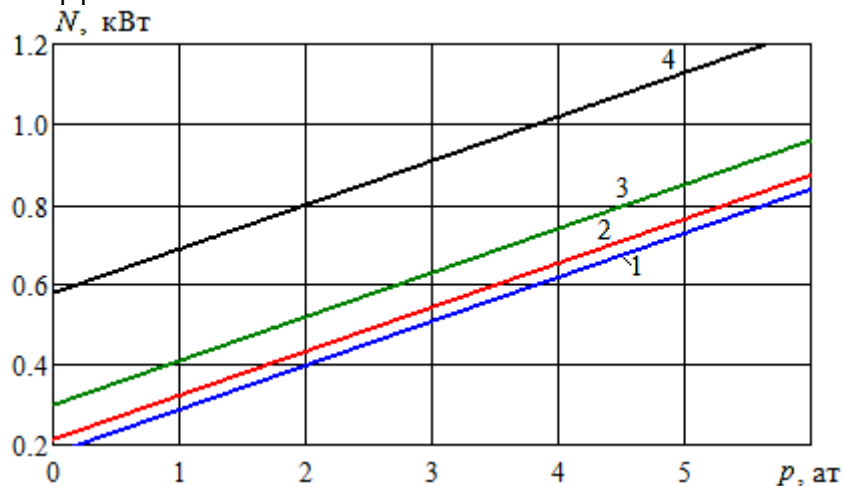


Рисунок 5 – Зависимость затраченной мощности Pomac PLP 2-1,5 от давления по данным<sup>7</sup> при различной относительной вязкости ( $n = 5$  об/с). Обозначения, как на рис. 4

### Заключение

Таким образом, проведенный анализ показал, что в России производится оборудование для изготовления и транспортирования ПС с достаточно широким диапазоном технических параметров. Это позволяет подобрать оборудование, как для малых предприятий, так и для крупных производств. Однако известные зарубежные компании в своей технической документации размещают результаты исследований о влиянии вязкости расплавленного сыра на производительность и энергетические затраты. Тогда как в технической (и рекламной) документации российских производителей такие сведения отсутствуют. Необходимо проведение таких исследований и заводских испытаний. Тогда

<sup>7</sup> Pomac Pumps Co. Lobe Pumps PLP Series [Electronic Resource]. URL: <https://www.pomacpumps.com/en/pharma/lobe-pump-pKH/> (accessed 04.08.2023).

конкурентная способность российского оборудования для производства и транспортирования ПС может быть повышена.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. El-Bakry M., Mehta B.M. Overview of processed cheese and its products. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 1-28.
2. Hill A., Ferrer M.A. Dairy ingredients in processed cheese and cheese spread. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 29-79.
3. Salek R.N., Buňka F., Černíková M. The use of different cheese sources in processed cheese. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 79-113.
4. Boylston T.D. The use of vegetable ingredients in processed cheese. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 113-125.
5. Miočinović J., Miloradović Z. Flavors, colors, and preservatives used in processed cheese. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 125-147.
6. Buňka F., Černíková M., Salek R.N. Functionality of salts used in processed cheese manufacture. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 147-176.
7. Ramos G.L.P.A., Alves A.T.S, Cruz A.G. Low salt and low sodium processed cheeses. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 177-197.
8. Ozturk M., Kilic-Akyilmaz M. Manufacture of processed cheese: Equipments used. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 197-210.
9. Černíková M., Buňka F. Salek R.N. Technological aspects of processed cheese: Properties and structure. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 211-248.
10. Felfoul I., Attia H. Packaging, cooling, and storage of processed cheese. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 249-269.
11. Cumhur O., Kilic-Akyilmaz M. Special processed cheeses, cheese spreads, and analogue. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 269-295.
12. Thomareis A.S., Dimitreli G. Techniques used for processed cheese characterization. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 295-349.
13. Thomareis A.S., Chatziantoniou S.E. Quality and testing of processed cheese: defects, QA, and QC. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 349-426.
14. Ramos G.L.P.A., Alves A.T.S, Cruz A.G. Microbiology of processed cheese. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 427-449.
15. Koca N., Erbay Z., Öztürk M.U. Regulations and legislations on processed cheese. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 449-490.

16. Buhlal Y. Capps O. Processed cheese: applications, challenges, and market trends. Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 491-507.
17. Mohamed A.G., Abd El-Salam B.A., El-Motaal Gafour W.A. Quality characteristics of processed cheese fortified with Spirulina powder // Pak. J. Biological Sciences. 2020. Vol. 23, pp. 533-541.
18. Лупинская С.М., Ганцева А.Н. Изучение процесса плавления творожного сыра при производстве плавленых сыров // Техника и технология пищевых производств. 2017. Т. 46. № 3. С. 43-49.
19. Арсеньева Т. П., Сучкова Е. П., Волкова О. В., Белозерова М. С. Разработка состава плавленого сырного продукта функционального назначения // Вестник Международной академии холода. 2019. № 1. С. 39–45.
20. Евдокимов Н.С. Методология контент-анализа инновационных технологий на примере плавленых сыров и сырных продуктов // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2019. № 3(56). С 81-84.
21. Костенко А. А., Назаренко Н. В., Ким И. Н. Оптимизация изготовления аналога мягкого сыра из молок горбуши // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. 2013. Т. 30, № 1. С. 123–129.
22. Лютова Е. В., Ключко Н. Ю. Реологические свойства плавленого сыра с добавлением икры и молок рыб // Сыроделие и маслоделие. 2015. № 1. С. 30–31.
23. Яшкин А.И., Вьюгова Ю.С. Технологический потенциал использования слабосоленой форели в производстве плавленого сыра // Инновации и продовольственная безопасность. 2019. № 1 (23). С. 95-102.
24. Левичева О.И. Гидравлическая схема технологического трубопровода и характеристики кулачкового насоса для транспортировки плавленого сыра // Материалы X Международного Балтийского морского форума (Калининград, 26.09-01.10.2022) в 7 т. Т. 1. Калининград: Изд-во КГТУ, 2022. С. 143-148.
25. Ahmedova N.R., Levicheva O.I., Naumov V.A. Influence of liquid food products viscosity on lobe pump performance (case of pumping fish oil) // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry. 2022. No. 3, pp. 74-81.

## REFERENCES

1. El-Bakry M., Mehta B.M. Overview of processed cheese and its products. Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 1-28.
2. Hill A., Ferrer M.A. Dairy ingredients in processed cheese and cheese spread. Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 29-79.
3. Salek R.N., Buňka F., Černíková M. The use of different cheese sources in processed cheese. Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 79-113.
4. Boylston T.D. The use of vegetable ingredients in processed cheese. Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 113-125.
5. Miočinović J., Miloradović Z. Flavors, colors, and preservatives used in processed cheese. Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 125-147.
6. Buňka F., Černíková M., Salek R.N. Functionality of salts used in processed cheese manufacture. Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 147-176.

7. Ramos G.L.P.A., Alves A.T.S, Cruz A.G. Low salt and low sodium processed cheeses. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 177-197.
8. Ozturk M., Kilic-Akyilmaz M. Manufacture of processed cheese: Equipments used. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 197-210.
9. Černíková M., Buňka F. Salek R.N. Technological aspects of processed cheese: Properties and structure. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 211-248.
10. Felfoul I., Attia H. Packaging, cooling, and storage of processed cheese. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 249-269.
11. Cumhuri O., Kilic-Akyilmaz M. Special processed cheeses, cheese spreads, and analogue. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 269-295.
12. Thomareis A.S., Dimitreli G. Techniques used for processed cheese characterization. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 295-349.
13. Thomareis A.S., Chatziantoniou S.E. Quality and testing of processed cheese: defects, QA, and QC. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 349-426.
14. Ramos G.L.P.A., Alves A.T.S, Cruz A.G. Microbiology of processed cheese. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 427-449.
15. Koca N., Erbay Z., Öztürk M.U. Regulations and legislations on processed cheese. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 449-490.
16. Bouhlal Y., Capps O. Processed cheese: applications, challenges, and market trends. *Processed cheese science and technology: ingredients, manufacture, functionality, quality, and regulations*. Elsevier Inc. Woodhead Publishing. 2022, pp. 491-507.
17. Mohamed A.G., Abd El-Salam B.A., El-Motaal Gafour W.A. Quality characteristics of processed cheese fortified with Spirulina powder // *Pak. J. Biological Sciences*. 2020. Vol. 23, pp. 533-541.
18. Lupinskaya S.M., Ganceva A.N. *Izuchenie processa plavleniya tvorozhnogo syr'ya pri proizvodstve plavlennyh syrov* [The study of the melting process of cottage cheese raw materials in the production of processed cheeses]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevyh proizvodstv*. 2017. Vol. 46. No. 3, pp. 43-49.
19. Arsen'eva T. P., Suchkova E. P., Volkova O. V., Belozeroва M. S. *Razrabotka sostava plavlennogo syr'nogo produkta funkcional'nogo naznacheniya* [Development of the composition of a processed cheese product of functional purpose]. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2019. No. 1, pp. 39-45.
20. Evdokimov N.S. *Metodologiya kontent-analiza innovacionnyh tekhnologij na primere plavlennyh syrov i syrnyh produktov* [Methodology of content analysis of innovative technologies on the example of processed cheeses and cheese products]. *Tekhnologiya i tovarovedenie innovacionnyh pishchevyh produktov*. 2019. No. 3(56), pp. 81-84.
21. Kostenko A. A., Nazarenko N. V., Kim I. N. *Optimizaciya izgotovleniya analoga myagkogo syra iz molok gorbushi* [Optimization of the manufacture of an analogue of soft cheese from pink salmon milk]. *Nauchnye trudy Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo rybohozyajstvennogo universiteta*. 2013. Nol. 30, No. 1, pp. 123-129.



22. Lyutova E.V., Klyuchko N.Yu. *Reologicheskie svojstva plavlennogo syra s dobavleniem ikry i molok ryb* [Rheological properties of processed cheese with the addition of caviar and fish milk]. *Syrodelie i maslodelie*. 2015. No. 1, pp. 30–31.

23. Yashkin A.I., V'yugova Yu.S. *Tekhnologicheskij potencial ispol'zovaniya slabosolenoj foreli v proizvodstve plavlennogo syra* [Technological potential of using lightly salted trout in the production of processed cheese]. *Innovacii i prodovol'stvennaya bezopasnost'*. 2019. No. 1 (23), pp. 95-102.

24. Levicheva O.I. *Gidravlicheskaya skhema tekhnologicheskogo truboprovoda i harakteristiki kulachkovogo nasosa dlya transportirovki plavlennogo syra* [Hydraulic scheme of the technological pipeline and characteristics of the cam pump for the transportation of processed cheese]. *Materialy X Mezhdunarodnogo Baltijskogo morskogo foruma* (Kaliningrad, 26.09-01.10.2022) v 7 t. T. 1. Kaliningrad: KGTU Publ. 2022, pp. 143-148.

26. Ahmedova N.R., Levicheva O.I., Naumov V.A. Influence of liquid food products viscosity on lobe pump performance (case of pumping fish oil). *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry*. 2022. No. 3, pp. 74-81.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Левичева Оксана Игоревна* – аспирант, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: [o\\_levicheva@bk.ru](mailto:o_levicheva@bk.ru))

*Levicheva Oksana Igorevna* – postgraduate student, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: [o\\_levicheva@bk.ru](mailto:o_levicheva@bk.ru))

*Наумов Владимир Аркадьевич* – доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: [van-old@mail.ru](mailto:van-old@mail.ru))

*Naumov Vladimir Arkad'evich* – Dr.Sci. (Eng.), Prof., Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: [van-old@mail.ru](mailto:van-old@mail.ru))

Статья поступила в редакцию 09.09.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023, принята к публикации 25.09.2023.

The article was submitted 09.09.2023; approved after reviewing 20.09.2023; accepted for publication 25.09.2023.