ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-3-503-519
УДК 637.136/637.143

Обзорная статья
http://fptt.ru

Методы оценки свертываемости белков молока в системе прогнозирования технологических свойств

Е. Е. Илларионова*, А. Г. Кручинин, С. Н. Туровская, А. В. Бигаева

Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 25.02.2021

Принята после рецензирования: 01.04.2021
Принята в печать: 15.07.2021

**e-mail: e_illarionova@vnimi.org*
© Е. Е. Илларионова, А. Г. Кручинин, С. Н. Туровская, А. В. Бигаева, 2021

Аннотация.
Введение. Значимым этапом комплексного мониторинга качества молочного сырья является всестороннее изучение его технологических свойств. В связи с этим совершенствование методов исследований, характеризующих способность молока к сычужному свертыванию, представляется актуальным направлением. Цель работы – систематизация и анализ базовых критериев и способов оценки молочных систем в аспекте их восприимчивости к образованию сычужно-индуцированных белковых гелей.
Объекты и методы исследования. Научные статьи российских и зарубежных ученых за последние 10 лет, размещенные в базах данных Web of Science, Scopus и Elibrary, а также нормативные документы, регламентирующие методологические подходы по исследуемой теме. В работе использовали методы анализа, систематизации и обобщения тематических публикаций современных баз данных.
Результаты и их обсуждение. Наряду с контролем физико-химических и микробиологических показателей молока для сыроделия как в РФ, так и за рубежом, проводят обязательную проверку его коагуляционных характеристик. Отечественные сыроделы используют различные модификации сычужно-бродильной и сычужной проб, базирующихся на субъективной органолептической оценке. Международные научные тенденции в этой области направлены на разработку и совершенствование инструментальных методов с использованием комплексного показателя MCP, характеризующего параметры сычужного свертывания посредством приборов Formagraph, Lattodinamografo, Optigraph и др. Сенсорные и инструментальные методы имеют свои достоинства и недостатки. Однако для оперативного прогнозирования сыропригодности молока, выхода и качества сыра наиболее значимыми критериями являются скорость выполнения анализа, сопоставимость и воспроизводимость результатов, что позволяет обеспечить современная инструментальная база.
Выводы. Для усовершенствования методик определения сыропригодности молока в нашей стране необходимо использовать международный опыт, предлагающий стандартизованные оценочные критерии в совокупности с применением разнообразных инструментальных подходов к определению данного показателя. Однако наиболее перспективным является не только внедрение в российский исследовательский регламент зарубежных стандартов, но и совершенствование и разработка отечественных инструментальных методов оценки свертываемости белков молока.

Ключевые слова. Молоко, сыропригодность, коагуляция, сычужный сгусток, вязкость, реологические методы, оптические методы, инфрактрасная спектроскопия

Для цитирования: Методы оценки свертываемости белков молока в системе прогнозирования технологических свойств / Е. Е. Илларионова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 3. С. 503–519. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-3-503-519.

Review article

Available online at http://fptt.ru/eng

Methods of Assessing Milk Proteins Coagulation as a Part of the Forecasting System of Technological Properties

Elena E. Illarionova*, Alexandr G. Kruchinin, Svetlana N. Turovskaya, Alana V. Bigaeva

All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia

Received: February 25, 2021

Accepted in revised form: April 01, 2021
Accepted for publication: July 15, 2021

*e-mail: e_illarionova@vnimi.org
© E.E. Illarionova, A.G. Kruchinin, S.N. Turovskaya, A.V. Bigaeva, 2021

Abstract.
Introduction. An integrated monitoring of raw milk's contents, quality, and security is a key factor that guarantees the high-quality dairy production. As a result, new research methods of rennet clotting are a topical and urgent area of study. The research objective was to systemize and analyze the basic criteria and assessment methods of rennet-induced protein gels in milk systems.
Study objects and methods. The authors reviewed the official Russian criteria and methods of raw milk assessment by its rennet coagulation properties. The research also featured the most widespread instrumental approaches used in best practices from around the world.
Results and discussion. In Russian and foreign cheese production, milk is always tested for its physicochemical and microbiological indicators, with a mandatory check of its coagulation characteristics. Russian cheese-makers use different modifications of rennet and rennet-fermenting tests based on subjective sensory evaluation, while international scientific trends in this area aim at developing and improving instrumental methods by using a complex indicator MCP. This indicator characterizes the parameters of rennet coagulation with the help of such devices as Formagraph, Lattodinamografo, Optigraph, etc. Formagraph is a simple instrument for measuring rheological properties of milk clotting. It was popular in the late XX century. The resent years saw the development of other methods of instrumental control, including those based on optical measurements. For instance, Ortigraph is one such instrument that receives unified data on coagulation properties of raw milk by using near-infrared waves. Sensory and instrumental methods have their advantages and disadvantages. However, the most significant criteria for a quick test of cheeseability, yield, and quality are the speed of analysis and the comparability and reproducibility of results.
Conclusion. To improve cheeseability testing, Russian cheese-makers need to use the international experience, which offers standardized evaluation criteria in combination with various instrumental approaches. However, the integration of foreign regulations and methods into Russian studies is not the only option. The improvement and development of national instrumental methods of evaluating milk protein coagulation is also crucial.

Keywords. Milk, cheeseability, coagulation, rennet coagulation, viscosity, rheological methods, optical methods, infrared, infrared spectroscopy

For citation: Illarionova EE, Kruchinin AG, Turovskaya SN, Bigaeva AV. Methods of Assessing Milk Proteins Coagulation as a Part of the Forecasting System of Technological Properties. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(3):503–519. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-3-503-519.

Введение

В мировом научном сообществе неуклонно возрастает интерес к инновационным подходам в технологиях пищевых производств. Они нацелены на повышение конкурентоспособности готовых продуктов, а также на интенсификацию технологических процессов и совершенствование систем контроля.

Расширение ассортимента молочной продукции и увеличение производственных объемов без потери качества возможно осуществить лишь посредством принципиально новых решений, сочетающих внедрение в агропромышленный комплекс актуальных научно-технических разработок и современных методов биотехнологического и молекулярно-генетического анализа [1–3].

Важным фактором, обеспечивающим создание конкурентоспособного молочного ассортимента, является постоянный системный мониторинг состава, квалитативности и безопасности молочного сырья, заключающийся в формировании комплексного подхода к определению уровня соответствия его технологических свойств применяемым оценочным критериям [4, 5].

Качество молока как динамично меняющейся биосистемы напрямую связано не только с обменными, окислительно-восстановительными и ферментативными процессами в организме животного, но и во многом предопределено его (животного) возрастными, породными и генетическими особенностями. Поэтому прижизненное формирование и оценка наиболее значимых сырьевых показателей предполагает широкое использование принципов молекулярно-генетического прогнозирования [6, 7].

Такая концепция обуславливает необходимость всестороннего изучения связи между технологическими параметрами молочного сырья и генетическими особенностями отдельных пород крупного рогатого скота. Неотъемлемой частью исследований, направленных на создание биомолекулярного прогнозирования молочной продуктивности животных, является интеграция математически апробированных алгоритмов формирования критериев оценки соотношения относительных долей аллелей генов молочных белков с составом и технологическими свойствами молочного сырья [8].

Ключевым этапом проведения комплексного мониторинга качественных характеристик молока

должно стать обстоятельное изучение таких его технологических свойств, как термоустойчивость и сычужная свертываемость [9–11].

Термоустойчивость белковых фракций признана определяющим отборочным критерием при высокотемпературной обработке молока, регламентированной в производстве молочных продуктов длительного хранения. Способность к сычужному свертыванию – это важный показатель соответствия сырья, характеризующий его сыропригодность [12, 13].

Под сыропригодностью понимают комплекс качественных и количественных характеристик, технологических и гигиенических свойств молока. Такой комплекс при совокупном воздействии сычужного препарата и молочнокислых бактерий способствует интенсивному протеканию сложных биохимических процессов, сопровождающихся структурно-механическими изменениями белковой фазы (образование геля, синерезис и т. д.). Объективная оценка этой технологической характеристики является значимым этапом в обеспечении отрасли высокотехнологичным и безопасными сырьем для получения конкурентоспособных молочных продуктов.

В связи с этим совершенствование методов исследований, характеризующих способность молока к сычужному свертыванию, представляется актуальным направлением.

Цель работы – систематизация и анализ базовых критериев и способов оценки молочных систем в аспекте их восприимчивости к образованию сычужно-индуцированных белковых гелей.

Задачи исследования: проанализировать достоинства и недостатки российских и международных методов изучения сыропригодности молока; систематизировать данные о практическом использовании инструментальных способов для совершенствования и разработки новых отечественных методов оценки свертываемости белков молока.

Объекты и методы исследования

Выполнен аналитический обзор 55 научных литературных источников на русском и английском языках с систематизацией и обобщением данных по физико-химическим и микробиологическим параметрам, определяющим качество, технологические свойства и сыропригодность молока. Также проведен сравнительный анализ сенсорных и инструментальных методов оценки реологических характеристик сычужного сгустка, применяемых в нашей стране и в мировой практике. Использованы источники, представленные в электронных базах данных Web of Science, Scopus и Elibrary.

Поиск был ограничен рецензируемыми статьями в академических журналах. Он включал исследовательские, концептуальные и обзорные публикации, соответствующие тематике запроса, исключая главы из книг, материалы конференций, сборники трудов и прочие публикации. Поиск в базах данных Web of Science, Scopus и Elibrary был проведен на английском языке с использованием поисковых запросов «raw milk» и «cheese making» для первой ступени поиска и запросов «milk coagulation properties» и «rennet coagulation» для второй ступени. Общие термины, такие как «raw milk» или «cheese making», использованы для более широкого поиска и выявления большего количества статей. Однако, учитывая тему обзора, среди найденных ресурсов для выбора наиболее ревалентных источников проводили поиск с более узкоспециальными запросами. Поиск в базе данных Elibrary осуществляли также и на русском языке с использованием терминов: «сыропригодность», «сычужная свертываемость», «сычужная коагуляция». Поисковые запросы применяли как для названий, так и для ключевых слов публикаций. Глубина поиска составляла 10 лет: с 2011 по 2021. При этом предпочтение было отдано наиболее поздним публикациям.

По общему количеству идентифицированная библиография содержала 112 наименований. В них были проанализированы названия, аннотации и ключевые слова. Для дальнейшей работы выбраны 55 источников, которые рассмотрены и подробно изучены, включая имеющиеся в них ссылки на более ранние публикации, для составления ретроспективной картины по изучаемому вопросу.

Результаты и их обсуждение

Сыропригодными свойствами обладает биологически полноценное молочное сырье, которое содержит определенное количество белковых веществ, аминокислот, пептидов, ферментов, жиров, витаминов и микроэлементов, представляя собой благоприятную среду, стимулирующую развитие микроорганизмов и предопределяющую качественные характеристики вырабатываемой продукции [13]. В то же время недопустимо присутствие компонентов, способных ингибировать развитие полезной молочнокислой флоры и представленных нежелательными бакпрепаратами, антибиотиками, остаточными количествами дезинфектантов и моющих средств. Отмечаемые различия в идентификационных показателях по сычужной свертываемости обусловлены влиянием физико-химических факторов: активной и титруемой кислотностью, СОМО, соотношением сывороточных белков и казеиновых фракций [14–16].

Для оценки сыропригодных свойств молока, помимо регламентированных в Российской Федерации основных требований по качеству и безопасности, учеными института маслоделия и сыроделия (ВНИИМС) создана специализированная техническая документация (ТУ 9811-153-04612009-

2004 и СТО ВНИИМС 019-2019). В ней установлены специфические требования к сырью для сыроделия по физико-химическим и микробиологическим показателям в совокупности с результатами технологических проб. Наряду с контролем органолептических характеристик и параметров безопасности, значения плотности молока-сырья нормированы не ниже 10,27 °А, общего белка – не менее 2,8 %, жира – не менее 3,1 %, а группа чистоты – не ниже I. Величина титруемой кислотности регламентирована в пределах от 16 до 19 °Т, поскольку данный показатель существенно влияет на продолжительность свертывания и реологические свойства получаемого сгустка. Массовая доля сухих веществ молока и состояние белковой фазы, а именно состав и соотношение казеиновых фракций, являются наиболее важными критериями, определяющими эффективность сычужной коагуляции. Увеличение количества казеина в молоке интенсифицирует сычужное свертывание, повышает плотность сгустка и выход продукта [17, 18].

Для оценки сыропригодности важным является мониторинг первичной микробиологической обсемененности. Особенно наличие газообразующих форм, таких как бактерии группы кишечной палочки и маслянокислые бактерии, провоцирующие возникновение пороков сыра в процессе созревания. Поэтому при определении пригодности молока в сыроделии осуществляют контроль показателей, характеризующих микробиологическое состояние сырья [19, 20].

Количественный уровень микрофлоры по редуктазной пробе определяют по степени восстановления резазурина ферментами микроорганизмов молока. Положительная корреляция между содержанием редуктаз и количеством мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) в молоке позволяет производить относительную оценку бактериальной нагрузки. Помимо этого, контроль сырья осуществляют не только по показателям КМАФАнМ, но и по количеству спор мезофильных анаэробных лактатсбраживающих бактерий [21].

Обязательной и наиболее важной комплексной характеристикой сыропригодности молока является содержание соматических клеток. К их числу относят эпителиальные клетки, лимфоциты, гранулоциты, макрофаги и пр. Данный показатель обусловлен как здоровьем животных, так и примесью молозива или стародойного молока в сборном. Превышение нормируемых значений по содержанию соматических клеток связано с наличием патогенной микрофлоры. В совокупности эти показатели оказывают ингибирующее воздействие на заквасочные микроорганизмы, снижая продолжительность коагуляции белков и качество сгустка.

Несмотря на то, что микробиологический контроль является значимой частью комплексной оценки сырого молока для получения качественного сычужного сгустка, на практике определение коагуляционной способности молочного сырья осуществляют по ряду технологических характеристик, фиксируя динамику свертываемости и синерезиса, а также реологические показатели (изменение вязкости, плотности и эластичности) казеинового геля [16, 20].

Сычужную свертываемость определяют посредством давно апробированных бродильной, сычужно-бродильной или сычужной проб [22]. Описание двух последних методик включено в межгосударственный стандарт ГОСТ 32901-2014.

Постановка бродильной пробы позволяет оценивать качество сгустка, полученного в результате развития нативной молочнокислой микрофлоры, в течение 12 и 24 ч при температуре 38 ± 1 °С. Нормальный бактериальный профиль обеспечивает получение ровного и плотного сгустка. Присутствие нежелательной газообразующей флоры приводит к образованию вспученного и хлопьевидного казеинового геля с отделением непрозрачной сыворотки.

Сычужно-бродильная проба характеризует способность сырого молока к коагуляции под действием сычужного фермента и микроорганизмов сырого молока. Пробирки с заданным количеством молока и молокосвертывающего фермента помещают в термостат или водяную баню при температуре 38 ± 1 °С и выдерживают 12 ч. Затем проводят визуальную оценку получившегося сгустка. Сыропригодное молоко образует однородный плотный и гладкий сгусток с отделением прозрачной сыворотки.

Для оценки молока, прошедшего предварительную температурную обработку, используют сычужную пробу, при которой коагуляция проходит под воздействием только сычужного фермента. Пастеризованное молоко с температурой 38 ± 1 °С разливают в 4 пробирки по 30 мл. В две из них вносят по 0,5 мл, а в другие две по 1 мл унифицированного раствора молокосвертывающего фермента и хорошо перемешивают. Качество сгустка оценивают после 60 мин выдержки при температуре 38 ± 1 °С. Упругий и гладкий сгусток без глазков свидетельствует о хорошей сыропригодности молока.

Любой из описанных выше методов предусматривает визуальную оценку способности исследуемого молочного сырья к образованию сычужно-индуцированных гелей с последующим его отнесением к одному из трех или четырех классов, где молоко первых двух классов считается хорошим или удовлетворительным, а третьего или четвертого класса – сычужно-вялым, образующим непрочный сгусток и непригодным для выработки сыра.

Следует также отметить, что сычужная проба, в отличие сычужно-бродильной, считается менее

достоверной и рекомендована для оперативной оценки в производственных условиях.

Помимо стандартизованных методов определения сыропригодности, многие производители сыров используют внутренние методики по оценке входящего сырья. Они основаны на вышеописанных способах с незначительными модификациями, адаптированными под конкретное производство. Такие методики применяют также и для оценки сычужной свертываемости восстановленного молока, которое, учитывая дефицит сырого молока, географическое положение и сезонность в некоторых регионах, используют в производстве творожных и сырных продуктов [23, 24]. Как правило, все разработанные внутренние методики также базируются на визуальных и/или органолептически фиксируемых характеристиках получаемого сгустка.

Несовершенство вышеописанных методов и их различных модификаций обусловлено значительной продолжительностью исполнения и недостаточной унификацией. Они снижают оперативность определения и сопоставимость результатов анализов, поскольку визуальная оценка в этих случаях является субъективным показателем и во многом зависит от опыта специалиста, проводящего исследование [25].

Инструментальные методики измерений. Для усовершенствования существующих приемов выявления способности молока к сычужной коагуляции без потери эффективности и простоты исполнения специалистами ВНИИМС разрабатываются методики с привлечением инструментального контроля по некоторым показателям.

Для унификации продолжительности сычужной коагуляции, а также оперативного определения количества молокосвертывающего препарата и сыропригодности молока в производственных условиях скорость образования сычужно-индуцированных гелей определяют с использованием прибора ВНИИМС, исполненного в форме конусообразного цилиндра емкостью 1 л. Измерение происходит в соответствии с законом сычужного свертывания, где продолжительность коагуляции является обратно пропорциональной величиной количеству добавленного фермента. В прибор помещают анализируемую пробу с заданной температурой и предварительно внесенными заквасочными культурами. Затем по установленной методике вводят молокосвертывающий фермент, перемешивают и открывают ниппель в нижней части цилиндра для свободного вытекания получаемого геля до момента образования плотной структуры. По отметкам шкалы у верхней границы коагулята рассчитывают необходимое количество сычужного фермента для исследуемого молока, обеспечивающего образование сычужного сгустка в течение определенного времени.

С целью установления способности к сычужной коагуляции сухого обезжиренного молока разработан метод (ГОСТ Р 54074-2010), основанный на соотнесении степени разрушения (под воздействием гармонических колебаний определенной частоты) сгустка, полученного из восстановленного молока, с контрольными сгустками из натурального молока, демонстрирующими дифференциацию разрушения при воздействии температур 70 ± 1, 80 ± 1 и 90 ± 1 °С продолжительностью 20 ± 5 с. При соответствии степени разрушения анализируемой пробы первому или второму образцу, сухое обезжиренное молоко признают сыропригодным.

Другой инструментальный метод, регламентированный ГОСТ Р 54074-2010 для сухого обезжиренного молока, основан на измерении оптической плотности бесказеинового фильтрата, полученного в результате осаждения восстановленного молока раствором хлористого натрия, посредством фотоколориметрирования. На основании полученных результатов и с использованием градуировочных графиков устанавливают массу неденатурированных сывороточных белков в восстановленном продукте и/или параметры тепловой обработки молока. Возможность использования исследуемого образца сухого обезжиренного молока в производстве сыра определяют соотнесением массы неденатурированных сывороточных белков и/или температуры тепловой обработки с приведенными таблицами дифференциации.

Изучение динамики синерезиса позволяет судить о структурных и гидрофильных свойствах молочного сгустка. Синеретические свойства определяются количеством сыворотки, выделившейся в заданное время из определенного количества коагулирующего молока.

Величина скорости отделения сыворотки имеет прямую корреляцию с синеретическим давлением, степенью проницаемости сгустка, а также обратную – с вязкостью и длиной прохождения пути сыворотки. Интенсивность синерезиса характеризуют изменением толщины тонкого среза сгустка в общем количестве сыворотки, объемом выделяющейся сыворотки при самопрессовании или путем центрифугирования неразрушенного сгустка. Использование последнего метода рекомендовано для определения окончания синерезиса. Оценка динамики синерезиса может быть представлена различными способами с соблюдением вышеуказанных принципов.

Изменение реологических параметров сычужного сгустка на практике оценивают визуально, руководствуясь описанием качеств получаемого коагулята, приведенных в нормативной и технической документации. Лишь некоторые исследователи используют для этих целей инструментальное определение реологических характеристик.

a b

Рисунок 1. Прибор для исследования процесса коагуляции молока: (a) внешний вид прибора; (b) *1* – лазер; *2* – луч лазера; *3* – стойка; *4* – подвижный штатив для стакана; *5* – стакан со смесью; *6* – видеокамера; *7* – жидкостный термостат; *8* – экран [29]

Figure 1. Device for coagulation testing: (a) appearance; (b) *1* – laser; *2* – laser beam; *3* – stand; *4* – movable stand for the glass; *5* – glass with the mix; *6* – video camera; *7* – liquid thermostat; *8* – screen [29]

Сычужный сгусток имеет вязкоэластичные свойства, показывая текучесть и эластичную деформацию при механическом воздействии. Его сопротивление влиянию сторонних напряжений характеризуется модулем сдвига, соответствующим отношению напряжения к деформации сдвига. Модуль эластичности зависит от количества и типа связей в сгустке при воздействии напряжений. Для характеристики реологических свойств сычужных сгустков применяют такие показатели вязкости, как модуль потерь (G»), модуль запаса (G›) и тангенс потерь (tg = G’/G’’). Деформации, возникающие под действием внешней нагрузки и напряжения в продукте, зависят от состава и структуры экспериментальных объектов, являясь мерой сил их внутреннего взаимодействия [26].

Исследования этих показателей распространены с использованием цилиндрического измерительного устройства ротационного вискозиметра Реотест-2. Результаты измерений позволяют устанавливать эффективную вязкость продукта (Па·с) и её корреляцию с продолжительностью сквашивания пробы [27, 28].

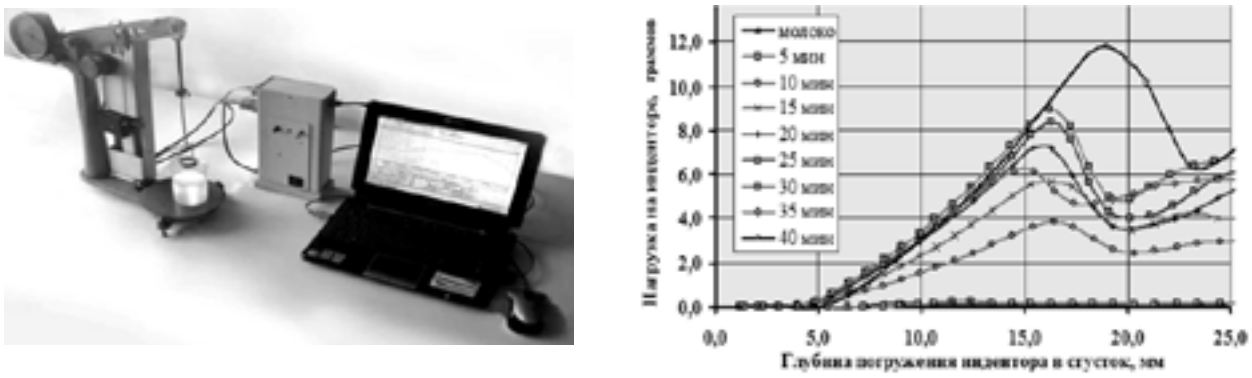
Описаны испытания по определению структурно-механических параметров сычужных сгустков при помощи пенетрометров (типа Koehler K95500). В процессе пенетрации устанавливают сопротивление образцов проникновению индентора (конусообразного, шарообразного или цилиндрического) со строго определенными значениями массы, размеров и материала при заданной температуре за определенный промежуток времени. Расчетным показателем является величина предельного напряжения сдвига, характеризующая прочность структуры исследуемого сгустка.

Также отмечен опыт определения динамической вязкости сычужного сгустка посредством измерения предельного напряжения сдвига на ротационном вискозиметре типа Brookfield DV-III Ultra.

Недостатками подобных исследований являются сложность и отсутствие единой методики измерений. Это практически исключает возможность соотнесения экспериментальных результатов, полученных разными научными группами, и их воспроизводимости.

Следует отметить, что российскими учеными предпринимаются попытки создания приборов по определению сыропригодности с учетом изменения реологических характеристик сгустков. Например, разработан прибор для исследования интенсивности коагуляции, представленный термостатируемой емкостью, в которую помещен цилиндр, заполненный исследуемым молоком до заданного уровня (рис. 1). Установка цилиндра произведена с возможностью осуществления его наклона на заданный угол относительно уровня исследуемой смеси с определенной периодичностью. Цилиндр с пробой молока, нагретой до температуры коагуляции, и с внесенным ферментным препаратом закрепляют в термостате и запускают качающий механизм. На поверхность образца молока направляют луч лазера, который, отражаясь от поверхности, попадает на градуированный экран с нанесенной шкалой. В исходном состоянии положение луча на экране не изменяется. С повышением вязкости пробы перемещение качающегося цилиндра приводит к изменению угла наклона поверхности сгустка. При этом фиксируется смещение отражаемого от поверхности луча. Увеличение плотности коагулята прямо пропорционально величине отклонения луча, динамика которого фиксируется графически. В сформированных сгустках устанавливают реологические показатели [29].

Для измерения прочностных характеристик сычужных гелей разработана и опробована



a b

Рисунок 2. Прибор для измерения предела прочности сгустка: (a) внешний вид прибора; (b) кривые нагрузки, получаемые при измерении предела прочности [29]

Figure 2. Device for measuring the ultimate clot strength: (a) appearance; (b) load curves obtained from tensile strength measurements [29]

установка на базе реовискозиметра Гепплера, где прибор, определяющий прочность, сопряжен с потенциометром (рис. 2a). Принцип действия построен на деструктурировании сгустков различными типами инденторов при создаваемой нагрузке. Результаты измерений отображаются в графической форме на потенциометре (рис. 2b). Основываясь на полученном графике, производят расчет предела прочности сгустка [29].

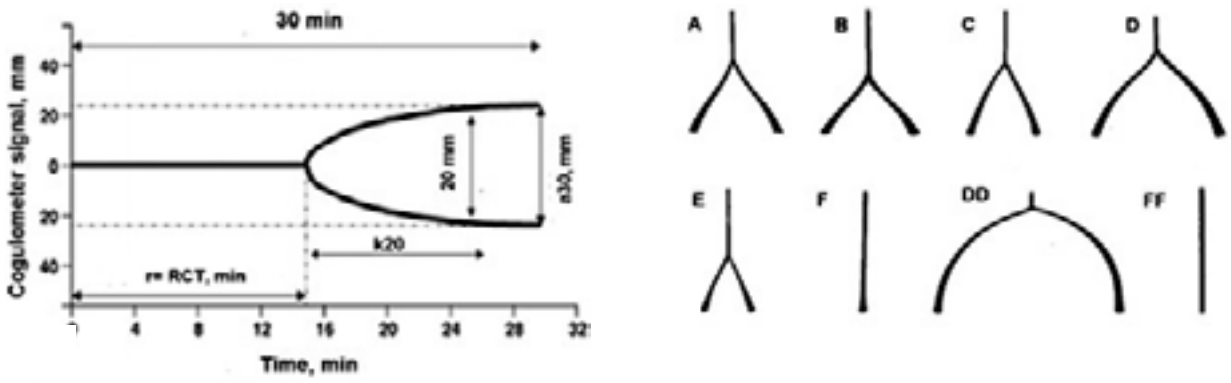
Несмотря на удовлетворительные результаты измерений, данные приборы по определению характеристик процесса коагуляции не нашли широкого применения, оставаясь в единичных стендовых вариантах. Большинство методов оценки сыропригодности, используемых российскими сыроделами, по-прежнему базируется на органолептически определяемых параметрах сычужных сгустков в совокупности с установлением микробиологических показателей молока-сырья. В то время как реологические характеристики, представленные в исследованиях разных авторов, практически не подлежат сравнению ввиду значительных отличий методик и единиц измерения.

Измерение сыропригодности: мировой опыт. В мировой практике для молока, используемого в производстве сыров, наряду с общими требованиями по качеству и безопасности, установленными Codex Alimentarius, существуют и специфические рекомендации по кислотности, количеству соматических клеток, содержанию жира, общего белка и казеиновых фракций. Эти рекомендации могут варьироваться ввиду различий по регионам производства, типам вырабатываемых сыров, породам и видам молочных животных (коровы, козы, овцы, буйволы). Кроме того, для сырого молока, используемого без пастеризации, в Codex Alimentarius регламентированы особые требования по безопасности и гигиене производства. Однако, наряду с этим, в большинстве стран всегда существовала четкая тенденция по развитию инструментальных методов, позволяющих экспрессно получать унифицированные измерительные параметры, описывающие реологические коагуляционные способности молочного сырья.

На ранних этапах изучения сычужной свертываемости использовался прибор по определению динамической вязкости. Блэр и Бернетт (1963 г.) разработали метод «падающего столба», при котором начало коагуляции фиксировалось как замедление скорости потока жидкости, «падающей» через вертикальный капилляр диаметром 0,4 мм. Описанный способ демонстрировал обратную зависимость времени коагуляции с концентрацией сычужного фермента, подтверждая закон сычужного свертывания. Принцип данного метода применен и в приборе ВНИИМС.

Шарма, Хилл, Гофф и Яда (1989 г.), используя датчик вискозиметра крутильных колебаний Nametre при исследовании восстановленного обезжиренного молока, выявили возможность обнаружения ранней стадии его коагуляции до образования видимых сгустков. Крутильные колебания характеризуют одновременно вязкость и плотность продукта. Ученые обнаружили, что совокупность этих параметров уменьшается в течение 10–20 мин (в начальной стадии гидролиза к-казеина), а затем постепенно нарастает, позволяя оценивать скорость коагуляции [26].

Термический онлайн-метод, использующий датчик с нагретой проволокой, погруженный в молоко с внесенным сычужным ферментом, показал хорошую



a b

Рисунок 3. Диаграмма сычужного свертывания (a) и типы лактодинамических диаграмм (b) [34]

Figure 3. Diagram of rennet coagulation (a) and types of lactodynamic diagrams (b) [34]

эффективность для прогнозирования времени структурообразования. Однако он не приспособлен для характеристики плотности сгустка [30].

Наибольшее распространение во всем мире с 1984 г. получил достаточно простой прибор – Formagraph (Foss Electric, Дания). Он предусматривает непосредственное наблюдение и фиксацию изменений реологических характеристик гелеобразования молока [31, 32]. Formagraph производит регистрацию перемещения петлевидного маятника в кювете с коагулирующей жидкостью, совершающей возвратно-поступательные движения. С увеличением вязкости исследуемого образца возрастает амплитуда колебаний маятника. В течение 30-ти или 60-ти мин исследования амплитуда колебаний записывается, формируя диаграмму сычужного свертывания (рис. 3а).

В результате технической эволюции конструкция приборов типа Formagraph претерпела модернизацию, объединив механический принцип с компьютеризированными измерителями коагуляции в приборах Lattodinamografo (Foss-Italy) и Renneting Meter (Polo Trade, Италия) [33, 34]. Технология компьютеризированных счетчиков (CRM) основана на амплитудных колебаниях маятника под действием электромагнитного поля. В процессе коагуляции молока прибор регистрирует изменения электромагнитного поля и при сохранении основных принципов измерения непрерывно фиксирует результаты в памяти компьютера, формируя традиционную диаграмму стандартизованных показателей (рис. 3а) [35, 36].

Измеряемыми параметрами являются: RCT (r) – время от начала теста до первых признаков фиксируемой коагуляции, мин; k_{20} – время от окончания RCT до получения ширины 20 мм на графике, мин; a_{30}(a_{60}) – ширина графика через 30 или 60 мин, мм [37, 38]. Анализ графических результатов (рис. 3а) предоставляет возможность оценить исследуемое молоко по ряду унифицированных показателей, таких как продолжительность сычужного свертывания, кинетика образования (k_{20}) и плотность сгустка (a_{30}). Такой формат мониторинга процессов сычужной и кислотной коагуляции широко применяется исследователями многих стран, являясь образцовым для интерпретации данных, полученных с использованием и других средств измерения [39, 40].

В мировой практике в последние десятилетия повсеместно применяют комплексный реологический оценочный стандарт для сыропригодного молока – MCP (Milk coagulation properties). Данный параметр, признанный наилучшим общим критерием способности к образованию кислотно- и сычужно-индуцированных гелей, определяют совокупностью трех показателей RCT, k_{20} и a_{30}. На основании этих данных рядом исследователей разработаны модели плотностей сгустка (рис. 3b), представляющие собой сформированные диаграммы, соответствующие разным типам исследуемого молока с определенными характеристиками по сыропригодности (табл. 1) [34]. Помимо этого, полученные данные позволяют рассчитать индекс способности молока к свертыванию (параметры CF_t) посредством специально разработанного математического алгоритма [32].

Благодаря своей простоте и надежности, приборы Formagraph, Lattodinamografo и Renneting Meter широко используют во многих странах, несмотря на появление новых средств измерений, а также применяют в качестве эталонного метода во многих работах [41, 42].

В последние десятилетия отмечен интерес исследователей к принципиально иным подходам

Таблица 1. Характеристика сыропригодности молока по лактодинамической диаграмме [34]

Table 1. Lactodynamic diagram of cheeseability [34]

Тип диаграммы	Характеристика процесса коагуляции	Классификация сыропригодности молока	Возможная причина
A	Наилучшая способность к коагуляции	Отличное	–
B	Замедленная первая фаза коагуляции RCT с хорошей скоростью второй фазы k_{20} и высокой плотностью получаемого сгустка	Хорошее	Поздний период лактации, высокое содержание казеина
C	Быстрая первая фаза коагуляции RCT с замедлением на второй фазе k_{20} и недостаточно плотным сгустком	Хорошее	Ранний период лактации, низкое содержание казеина
D	Очень быстрая коагуляция с высокой плотностью сгустка	Хорошее	Повышенная кислотность и/или высокое содержание казеина в молоке
E	Длительное время RCT и недостаточно плотная консистенция сгустка	С дефектами	Повышенное количество соматических клеток в молоке
F	Очень продолжительное время RCT, слабая консистенция сгустка	С дефектами	Очень высокое содержание соматических клеток, повышенный показатель pH
DD	Более выраженные параметры коагуляции по типу D	С дефектами	Молоко с повышенной кислотностью, стародойное молоко
FF	Молоко, не коагулирующее в течение 30 мин	Некоагулирующее	–

в контроле сычужной коагуляции, основанным на оптических технологиях [43]. Одна из таких работ описывает контроль процесса свертывания молока при помощи компьютерной обработки последовательности цифровых цветных изображений, сделанных посредством оптической микроскопии со скоростью одно изображение в секунду. Оптический микроскоп с проходящим светом (Biolux AL, 20×–1280×, 220–5,5 VS, 200 MA, Meade Instruments Europe, Германия), оснащенный цифровой фотокамерой (разрешение 640×480 пикселей), подключен к компьютеру типа HP для наблюдения за агрегацией молока в процессе коагуляции. Пробу молока с сычужным препаратом в количестве 20 мкл помещают на предметное стекло и закрывают покровным. Затем производят запись последовательности изображений в течение определенного времени при одинаковом увеличении (40×) для каждого образца и анализируют посредством определения пиков цветовых гистограмм с использованием алгоритмов, реализованных в программном обеспечении Matlab 7.7. Использованные алгоритмы успешно продемонстрировали фиксацию изменений оптических свойств при коагуляции молока по серии микроскопических снимков [30].

К оптическим методам контроля относятся также исследования с применением инфракрасного излучения, проводимые по двум направлениям. В первом направлении используют средние инфракрасные спектры (MIRS) для испытаний молока без сычужного свертывания. Средняя инфракрасная спектроскопия – это быстрый (порядка 2,5 мин) и экономически эффективный лабораторный метод, который позволяет косвенно прогнозировать технологические параметры образцов молока, задействуя соответствующие алгоритмы калибровки и без необходимости проводить коагуляцию. Исследования могут быть выполнены с использованием приборов, сканирующих среднюю инфракрасную область от 4000 до 900 см$^{-1}$ и оснащенных интерферометром (MilkoScan FT120, Foss Electric, Дания). Спектры генерируются из полученной интерферограммы посредством быстрых преобразований Фурье и автоматически фиксируются в базе данных. Полученные спектральные данные сохраняются в виде log(1/R), где R – значения коэффициента отражения. Корреляции между показателями, полученными с помощью традиционных методов и MIRS, невысоки. Этот анализ не может быть использован в исследовательских целях. Однако, учитывая его быстроту и экономическую эффективность, MIRS представляет собой надежный инструмент для диагностики популяций животных или массовой оценки проб молока в производственных условиях [44–49].

Суть второго направления инфракрасных методов исследований состоит в том, что детектор, погруженный в неподвижный образец молока в процессе сычужной коагуляции, регистрирует поглощение на одной длине волны ближнего инфракрасного диапазона (NIR) [17]. Этот принцип реализован в приборе Optigraph (OPT, Ysebaert SA, Франция). OPT измеряет затухание оптического

Таблица 2. Методы определения сыропригодности молока

Table 2. Methods for determining the cheeseability of milk

№	Принцип метода	Используемые приборы	Измеряемые параметры	Достоинства	Недостатки
1	Измерение динамической вязкости капиллярным вискозиметром	Прибор Блэра и Бернетта, кружка Маршалла, прибор ВНИИМС	Зависимость скорости потока жидкости от концентрации сычужного фермента	Простота, дешевизна, скорость выполнения	Недостаточная точность, невозможность оценить характеристики сгустка
2	Проведение сычужной коагуляции в пробе сырого или пастеризованного молока [22]	Сычужно-бродильная и сычужная пробы, а также их модификации	Продолжительность коагуляции, мин; органолептическая оценка сгустка	Простота, дешевизна	Недостаточная точность, субъективность оценки, продолжительность, невысокая воспроизводимость и сопоставимость
3	Ротационная вискозиметрия [26–28]	Реотест, Реотест-2, Brookfield, и их аналоги	Эффективная вязкость сгустка, Па·с	Высокая точность, воспроизводимость, сопоставимость	Измерение только одного параметра, сложность выполнения
4	Механическое измерение амплитуды возвратно-поступательных движений маятника [31, 32]	Formagraph	RCT (r), мин; k_{20}, мин; a_{30} (a_{60}), мм	Оценка коагуляции по нескольким параметрам, стандартизация результатов, сопоставимость, воспроизводимость	Относительная сложность и продолжительность выполнения
5	Измерение амплитудных колебаний маятника под действием электромагнитного поля [33–35]	Lattodina-mografo, Renneting Meter	RCT (r), мин; k_{20}, мин; a_{30} (a_{60}), мм	Оценка коагуляции по нескольким параметрам, стандартизация результатов, сопоставимость, воспроизводимость	Относительная сложность и продолжительность выполнения
6	Средняя инфракрасная спектроскопия (MIRS) в области от 4000 до 900 см$^{-1}$ [44–49]	MilkoScan FT120, FT Milko-Scan 6000	Генерирование спектров из интерферограммы посредством быстрых преобразований Фурье; log(1/R), где R – значения коэффициента отражения	Не требует коагуляции молока, простота, высокая скорость выполнения, хорошая сходимость по RCT (r)	Невысокая сходимость по k_{20} и a_{30}, воспроизводимость
7	Ближняя инфракрасная спектроскопия (NIR) в области 820 нм [17, 50–55]	Optigraph	Преобразование изменений оптической плотности в: RCT (r), мин; k_{20}, мин; a_{30} (a_{60}), мм	Оценка коагуляции по нескольким параметрам, стандартизация результатов, сопоставимость	Относительная сложность выполнения, продолжительность, невысокая воспроизводимость

инфракрасного сигнала сквозь образец молока во время свертывания и показывает время коагуляции и плотность сгустка. Измерение оптического сигнала происходит непрерывно в ближней инфракрасной (NIR) области (820 нм). Изменения в оптической плотности, зафиксированные OPT, преобразуются с использованием соответствующего калибровочного уравнения и воспроизводятся в формате традиционного графика (рис. 1а). В процессе испытаний OPT показал хорошую сходимость результатов по показателю RCT (r) и не слишком высокую корреляцию значений k_{20} и a_{30} по сравнению с Formagraph [50–55].

Сравнительная характеристика наиболее широко применяемых методов по оценке динамики процесса коагуляции молока и прочности получаемых сгустков представлена в таблице 2.

Как следует из таблицы 2, недостаток всех описанных выше экспрессных инструментальных методов (1–7) состоит в том, что они характеризуют плотность сгустка посредством эмпирических значений, в то время как наиболее точные показатели

в технических единицах можно получить только непосредственным измерением вязких и упругих свойств при помощи реологических устройств. Например, динамические реометры с низкой амплитудой (3). Однако эти устройства плохо подходят для массовых исследований ввиду сложности их применения, длительности анализа и слабой унифицированности показателей, поэтому используются в качестве эталонных [41, 54]. Сычужно-бродильная и сычужная пробы, связанные с органолептической оценкой сгустка, недостаточно объективны (2), а в совокупности с измерением дополнительных характеристик сыворотки усложняются и также требуют специального оборудования. Наиболее приемлемыми в части скорости, воспроизводимости и сходимости результатов представляются повсеместно применяемые в мировой практике методы оценки сычужных свойств с критериальными характеристиками, адаптированными к показателям Formagraph: продолжительность сычужной коагуляции – RCT (r), кинетика гелеобразования – k_{20}, прочность сгустка через 30 или 60 мин – a_{30} или a_{60} соответственно [28]. По совокупности этих показателей (МСР) уже на этапе лабораторных исследований можно получить отличный прогноз по ферментной обработке молока, выходу и качеству сыра.

Выводы

В России и за рубежом при выборе сырья для производства сыров первоочередное внимание уделяют его физико-химическим и микробиологическим показателям: титруемой и активной кислотности, плотности, массовой доле жировой и белковой фракций, содержанию соматических клеток и микробиологической обсемененности.

В РФ, наряду с регламентированными общими требованиями по качеству и безопасности, разработаны ТУ 9811-153-04612009-2004 и СТО ВНИИМС 019-2019, где по всем вышеуказанным параметрам установлены специальные показатели молока для сыроделия. В зарубежных странах, помимо нормативов Codex Alimentarius на молоко-сырье, устанавливают специальные требования по физико-химическим и микробиологическим показателям в зависимости от региона производства, вида вырабатываемых сыров и типа молочного сырья (молоко коров, коз, овец, буйволов). Однако, наряду с этими показателями, основным стандартом в оценке сыропригодности в мировой практике считают именно способность молока к коагуляции (Milk coagulation properties), отражающую реологические характеристики получаемых кислотно- и сычужно-индуцированных гелей. Качество определения МСР существенно продвинулось в последние десятилетия, благодаря широкому использованию разнообразных инструментальных методов оценки, сокративших время проведения испытаний от нескольких часов до 30 мин, а в ряде случаев и до 2,5 мин без потери достоверности и сходимости результатов. При этом практически повсеместно используют унифицированные показатели коагуляции, позволяющие проводить идентификацию молока по сыропригодности, а также соотнесение результатов работ ученых из исследовательских центров разных стран.

Система оценки коагуляционной способности молочного сырья посредством сычужно-бродильной и сычужной проб, а также их модификаций, широко применяемая на сегодняшний день в нашей стране, базируется на субъективных органолептических показателях, требует значительных временных затрат и имеет недостаточную сопоставимость результатов. Инструментальное определение реологических характеристик с использованием ротационных вискозиметров не получило широкого применения ввиду сложности, отсутствия единых методик измерений и трудностей в воспроизводимости экспериментов.

В условиях ориентированности агропромышленного комплекса на интенсификацию технологических процессов и совершенствование систем контроля состава, качества и безопасности пищевых продуктов необходимо внедрение в российский исследовательский регламент модернизированных инструментальных методов, позволяющих в лабораторных условиях проводить оценку коагуляции по нескольким параметрам с получением стандартизованных и воспроизводимых результатов по обработке молока, выходу и качеству сыра. Приоритетным и наиболее перспективным направлением является не только внедрение в российский исследовательский регламент зарубежных стандартов, но и совершенствование и разработка отечественных инструментальных методов оценки свертываемости белков молока.

Формирование системы биоинформационного прогнозирования комплементарности технологических характеристик молочного сырья невозможно осуществить без современной аналитической базы, способной обеспечить экономическую эффективность, быстроту и надежность исследований, а также интеграцию в международную систему измерений.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All the authors contributed equally involved in the research and design of the manuscript.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Modern approaches to storage and effective processing of agricultural products for obtaining high quality food products / A. G. Galstyan [et al.] // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2019. Vol. 89. № 2. P. 211–213. https://doi.org/10.1134/S1019331619020059.

2. Elements of DNA-technology forming quality and safe raw materials / Kh. Kh. Gilmanov [et al.] // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. 2020. Vol. 5. № 443. P. 54–62.

3. Genes and eating preferences, their roles in personalized nutrition / A. Vesnina [et al.] // Genes. 2020. Vol. 11. № 4. https://doi.org/10.3390/genes11040357.

4. Юрова Е. А., Кобзева Т. В., Фильчакова С. А. Стандартизация методик измерений показателей качества и безопасности молока и продуктов его переработки // Переработка молока. 2019. Т. 241. № 11. С. 6–11.

5. Лисицын А. Б., Чернуха И. М., Никитина М. А. Конструирование многокомпонентных продуктов питания. М.: Московский государственный университет пищевых производств, 2021. 176 с.

6. DNA authentication of brewery products: basic principles and methodological approaches / L. Oganesyants [et al.] // Foods and Raw Materials. 2019. Vol. 7. № 2. P. 364–374. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-2-364-374.

7. Разработка способа определения в сухом молоке соотношения относительных долей аллелей гена к-казеина / Х. Х. Гильманов [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. № 3. С. 525–535. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-525-535.

8. Technological properties of milk of cows with different genotypes of kappa-casein and beta-lactoglobulin / S. V. Tyulkin [et al.] // Foods and Raw Materials. 2018. Vol. 6. № 1. P. 154–162. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-154-162.

9. Regarding the biopolymers heat stability formation / A. G. Kruchinin [et al.] // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. 2020. Vol. 4. № 442. P. 77–85.

10. Renhe I. R. T., Zhao Z., Corredig M. A comparison of the heat stability of fresh milk protein concentrates obtained by microfiltration, ultrafiltration and diafiltration // Journal of Dairy Research. 2019. Vol. 86. № 3. P. 347–353. https://doi.org/10.1017/S0022029919000426.

11. Влияние полиморфных вариантов гена CSN3 на технологические свойства молока / А. В. Бигаева [и др.] // Молочная промышленность. 2020. № 4. С. 54–55. https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-04-54-55.

12. Estimation of composition, technological properties, and factor of allergenicity of cow's, goat's and camel's milk / A. S. Shuvarikov [et al.] // Bulletin of the National academy of sciences of Republic of Kazakhstan. 2019. Vol. 6. № 382. P. 64–74.

13. Мироненко И. М. Функции ионного кальция и нативных протеаз молока в процессе сычужного свертывания // Сыроделие и маслоделие. 2021. № 1. С. 25–28.

14. Юрова Е. А., Жижин Н. А., Денисович Е. Ю. Особенность применения методов контроля показателей качества и безопасности в молочной продукции // Переработка молока. 2019. Т. 235. № 5. С. 6–9. https://doi.org/10.33465/2222-5455-2019-5-6-8.

15. Technical note: Development and validation of a new method for the quantification of soluble and micellar calcium, magnesium, and potassium in milk / M. Franzoi [et al.] // Journal of Dairy Science. 2018. Vol. 101. № 3. P. 1883–1888. https://doi.org/10.3168/jds.2017-13419.

16. Phenotypic analysis of milk coagulation properties and mineral content of Pinzgauer cattle breed / C. L. Manuelian [et al.] // Archives Animal Breeding. 2018. Vol. 61. № 2. P. 215–220. https://doi.org/10.5194/aab-61-215-2018.

17. Effect of physicochemical factors and use of milk powder on milk rennet-coagulation: Process understanding by near infrared spectroscopy and chemometrics / L. Strani [et al.] // Food Control. 2021. Vol. 119. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107494.

18. Юрова Е. А., Фильчакова С. А., Козловцева Д. В. Эффективные приемы обеспечения качества молока-сырья // Молочная промышленность. 2019. № 9. С. 44–47.

19. Свириденко Г. М., Захаров М. Б., Оносовская Н. Н. Система контроля показателей микробиологической безопасности молока и молочной продукции // Переработка молока. 2019. Т. 241. № 11. С. 14–19.

20. Влияние микробиологических и технологических факторов на качество творога / В. Ф. Семенихина [и др.] // Контроль качества продукции. 2018. № 5. С. 53–57.

21. Свириденко Г. М., Захарова М. Б. Система контроля микробиологических показателей безопасности и качества молока и молочных продуктов в соответствии с действующими нормативными документами // Молочная промышленность. 2020. № 4. С. 22–26. https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-04-22-26.

22. Инихов Г. С., Брио Н. П. Методы анализа молока и молочных продуктов. М.: Пищевая промышленность. 1971. 423 с.

23. Indicators of quality of canned milk: Russian and international priorities / A. N. Petrov [et al.] // Foods and Raw Materials. 2017. Vol. 5. № 2. P. 151–161. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2017-2-151-161.

24. Physicochemical properties of whole milk powder derived from cows fed pasture or total mixed ration diets / J. B. Magan [et al.] // Journal of Dairy Science. 2019. Vol. 102. № 11. P. 9611–9621. https://doi.org/10.3168/jds.2019-16415.

25. Monitoring of sensory attributes used in the quality payment system of Trentingrana cheese / G. Bittante [et al.] // Journal of Dairy Science. 2011. Vol. 94. № 11. P. 5699–5709. https://doi.org/10.3168/jds.2011-4319.

26. O'Callaghan D. J., O'Donnell C. P., Payne F. A. A comparison of on-line techniques for determination of curd setting time using cheesemilks under different rates of coagulation // Journal of Food Engineering. 1999. Vol. 41. № 1. P. 43–54. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00072-2.

27. Бобракова Л. А., Мамаев А. В. Исследование реологических параметров при производстве обогащенного зерненого творога // Вестник Орловского государственного аграрного университета. 2013. Т. 40. № 1. С. 172–176.

28. Effect of freezing temperatures and time on mineral balance, particle size, rennet and acid coagulation of casein concentrates produced by microfiltration / S. M. Gaber [et al.] // International Dairy Journal. 2020. Vol. 101. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104563.

29. Майоров А. А., Сиденко Ю. А., Мусина О. Н. Новые наукоемкие приемы оценки реологических свойств в сыроделии: изучение процессов свертывания молока и формирования структуры сгустка // Техника и технология пищевых производств. 2017. Т. 45. № 2. С. 55–61. https://doi.org/10.21179/2074-9414-2017-2-55-61.

30. Measurement of the rennet clotting time of milk by digital image sequences (2D + t) processing / G. Djaowé [et al.] // Journal of Food Engineering. 2013. Vol. 114. № 2. P. 235–241. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.07.024.

31. McMahon D. J., Brown R. J. Evaluation of Formagraph for comparing rennet solutions // Journal of Dairy Science. 1982. Vol. 65. № 8. P. 1639–1642. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(82)82390-4.

32. Milk composition, but not cheese properties, are impaired the day after transhumance to alpine pastures / M. Koczura [et al.] // International Dairy Journal. 2019. Vol. 99. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104540.

33. Variation in caprine milk composition and coagulation as affected by udder health indicators / G. Stocco [et al.] // International Dairy Journal. 2019. Vol. 98. P. 9–16. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.06.005.

34. Milk coagulation properties and methods of detection / S. Beux [et al.] // Ciência Rural. 2017. Vol. 47. № 10. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20161042.

35. Protein composition affects variation in coagulation properties of buffalo milk / V. Bonfatti [et al.] // Journal of Dairy Science. 2013. Vol. 96. № 7. P. 4182–4190. https://doi.org/10.3168/jds.2012-6333.

36. Italian local goat breeds have better milk coagulation properties than cosmopolitan breed / S. Currò [et al.] // Italian Journal of Animal Science. 2020. Vol. 19. № 1. P. 593–601. https://doi.org/10.1080/1828051X.2020.1772130.

37. Genetic relationships of lactose and freezing point with minerals and coagulation traits predicted from milk mid-infrared spectra in Holstein cows / A. Costa [et al.] // Journal of Dairy Science. 2019. Vol. 102. № 8. P. 7217–7225. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15378.

38. Pazzola M. Coagulation traits of sheep and goat milk // Animals. 2019. Vol. 9. № 8. https://doi.org/10.3390/ani9080540.

39. Goat cheese yield and recovery of fat, protein, and total solids in curd are affected by milk coagulation properties / G. M. Vacca [et al.] // Journal of Dairy Science. 2020. Vol. 103. № 2. P. 1352–1365. https://doi.org/10.3168/jds.2019-16424.

40. Genetic analysis of rennet coagulation time, curd-firming rate, and curd firmness assessed over an extended testing period using mechanical and near-infrared instruments / A. Cecchinato [et al.] // Journal of Dairy Science. 2013. Vol. 96. № 1. P. 50–62. https://doi.org/10.3168/jds.2012-5784.

41. Modelling of buffalo milk coagulation kinetics after addition of enzymes at different concentrations by means of mechanical lactodynamography / Y. Karacheviev [et al.] // International Journal of Current Research and Academic Review. 2018. Vol. 6. № 9. P. 1–11.

42. Genetic and non-genetic variation of milk total antioxidant activity predicted from mid-infrared spectra in holstein cows / G. Niero [et al.] // Animals. 2020. Vol. 10. № 12. https://doi.org/10.3390/ani10122372.

43. Cow and environmental factors associated with protein fractions and free amino acids predicted using mid-infrared spectroscopy in bovine milk / A. Mcdermott [et al.] // Journal of Dairy Science. 2017. Vol. 100. № 8. P. 6272–6284. https://doi.org/10.3168/jds.2016-12410.

44. Processing characteristics of dairy cow milk are moderately heritable / G. Visentin [et al.] // Journal of Dairy Science. 2017. Vol. 100. № 8. P. 6343–6355. https://doi.org/10.3168/jds.2017-12642.

45. Effects of somatic cell score on milk yield and mid-infrared predicted composition and technological traits of Brown Swiss, Holstein Friesian, and Simmental cattle breeds / M. Franzoi [et al.] // Journal of Dairy Science. 2020. Vol. 103. № 1. P. 791–804. https://doi.org/10.3168/jds.2019-16916.

46. Variation of detailed protein composition of cow milk predicted from a large database of mid-infrared spectra / M. Franzoi [et al.] // Animals. 2019. Vol. 9. № 4. https://doi.org/10.3390/ani9040176.

47. Prediction of coagulating and noncoagulating milk samples using mid-infrared spectroscopy / M. De Marchi [et al.] // Journal of Dairy Science. 2013. Vol. 96. № 7. P. 4707–4715. https://doi.org/10.3168/jds.2012-6506.

48. Short communication: Prediction of milk coagulation and acidity traits in Mediterranean buffalo milk using Fourier-transform mid-infrared spectroscopy / C. L. Manuelian [et al.] // Journal of Dairy Science. 2017. Vol. 100. № 9. P. 7083–7087. https://doi.org/10.3168/jds.2017-12707.

49. Factors associated with milk processing characteristics predicted by mid-infrared spectroscopy in a large database of dairy cows / G. Visentin [et al.] // Journal of Dairy Science. 2017. Vol. 100. № 4. P. 3293–3304. https://doi.org/10.3168/jds.2016-12028.

50. Comparison between mechanical and near-infrared methods for assessing coagulation properties of bovine milk / C. Cipolat-Gotet [et al.] // Journal of Dairy Science. 2012. Vol. 95. № 11. P. 6806–6819. https://doi.org/10.3168/jds.2012-5551.

51. Rennet coagulation of sheep milk processed by ultrafiltration at low concentration factors / I. Catarino [et al.] // Journal of Food Engineering. 2013. Vol. 114. № 2. P. 249–254. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.08.013.

52. Composition, coagulation characteristics, and cheese making capacity of yak milk / J. Zhang [et al.] // Journal of Dairy Science. 2020. Vol. 103. № 2. P. 1276–1288. https://doi.org/10.3168/jds.2019-17231.

53. Characterization of *Cynara cardunculus* L. flower from Alentejo as a coagulant agent for cheesemaking / S. Gomes [et al.] // International Dairy Journal. 2019. Vol. 91. P. 178–184. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.09.010.

54. Tribo-rheology and kinetics of soymilk gelation with different types of milk proteins / Z. Pang [et al.] // Food Chemistry. 2020. Vol. 311. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125961.

55. Minor acidification of diafiltration water using various acidification agents affects the composition and rennet coagulation properties of the resulting microfiltration casein concentrate / S. M. Gaber [et al.] // Journal of Dairy Science. 2020. Vol. 103. № 9. P. 7927–7938. https://doi.org/10.3168/jds.2020-18237.

References

1. Galstyan AG, Aksyonova LM, Lisitsyn AB, Oganesyants LA, Petrov AN. Modern approaches to storage and effective processing of agricultural products for obtaining high quality food products. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2019;89(2):211–213. https://doi.org/10.1134/S1019331619020059.

2. Gilmanov KhKh, Tyulkin SV, Vafin RR, Galstyan AG, Ryabova AE, Semipyatny VK, et al. Elements of DNA-technology forming quality and safe raw materials / [et al.] // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. 2020. Vol. 5. № 443. P. 54–62.

3. Vesnina A, Prosekov A, Kozlova O, Atuchin V. Genes and eating preferences, their roles in personalized nutrition. Genes. 2020;11(4). https://doi.org/10.3390/genes11040357.

4. Yurova EA, Kobzeva TV, Fil′chakova SA. Standartizatsiya metodik izmereniy pokazateley kachestva i bezopasnosti moloka i produktov ego pererabotki [Standardization of methods for measuring quality and safety indicators of milk and milk processing products]. Milk Processing. 2019;241(11):6–11. (In Russ.).

5. Lisitsyn AB, Chernukha IM, Nikitina MA. Konstruirovanie mnogokomponentnykh produktov pitaniya [Design of multi-component food products]. Moscow: Moscow State Univetsity of Food Production; 2021. 176 p. (In Russ.).

6. Oganesyants LA, Vafin RR, Galstyan AG, Ryabova AE, Khurshudyan SA, Semipyatniy VK. DNA authentication of brewery products: basic principles and methodological approaches. Foods and Raw Materials. 2019;7(2):364–374. http://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-2-364-374.

7. Gilmanov KhKh, Semipyatnyi VK, Bigaeva AV, Vafin RR, Turovskaya SN. New determination method for the ratio of the relative proportions of κ-casein alleles in milk powder. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(3):525–535. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-3-525-535.

8. Tyulkin SV, Vafin RR, Zagidullin LR, Akhmetov TM, Petrov AN, Diel F. Technological properties of milk of cows with different genotypes of kappa-casein and beta-lactoglobulin. Foods and Raw Materials. 2018;6(1):154–162. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-154-162.

9. Kruchinin AG, Vafin RR, Radaeva IA, Illarionova EE, Bigaeva AV, Turovskaya SN, et al. Regarding the biopolymers heat stability formation. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. 2020;4(442):77–85.

10. Renhe IRT, Zhao Z, Corredig M. A comparison of the heat stability of fresh milk protein concentrates obtained by microfiltration, ultrafiltration and diafiltration. Journal of Dairy Research. 2019;86(3):347–353. https://doi.org/10.1017/S0022029919000426.

11. Bigaeva AV, Kruchinin AG, Radaeva IA, Gilmanov KhKh, Illarionova EE. Influence of polymorphic CSN3 gene types on technological traits of milk. Dairy Industry. 2020;(4):54–55. (In Russ.). https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-04-54-55.

12. Shuvarikov AS, Baimukanov DA, Dunin MI, Pastukh ON, Zhukova EV, Yurova EA, et al. Estimation of composition, technological properties, and factor of allergenicity of cow's, goat's and camel's milk. Bulletin of the National academy of sciences of Republic of Kazakhstan. 2019;6(382):64–74.

13. Mironenko IM. Functions of ionic calcium and native milk proteases in the process of rennet clotting. Cheesemaking and Buttermaking. 2021;(1):25–28. (In Russ.).

14. Yurova EA, Zhizhin NA, Denisovich EYu. Osobennost′ primeneniya metodov kontrolya pokazateley kachestva i bezopasnosti v molochnoy produktsii [Control methods for quality and safety of dairy products]. Milk Processing. 2019;235(5):6–9. (In Russ.). https://doi.org/10.33465/2222-5455-2019-5-6-8.

15. Franzoi M, Niero G, Penasa M, Cassandro M, De Marchi M. *Technical note*: Development and validation of a new method for the quantification of soluble and micellar calcium, magnesium, and potassium in milk. Journal of Dairy Science. 2018;101(3):1883–1888. https://doi.org/10.3168/jds.2017-13419.

16. Manuelian CL, Penasa M, Visentin G, Cassandro M, De Marchi M. Phenotypic analysis of milk coagulation properties and mineral content of Pinzgauer cattle breed. Archives Animal Breeding. 2018;61(2):215–220. https://doi.org/10.5194/aab-61-215-2018.

17. Strani L, Grassi S, Alamprese C, Casiraghi E, Ghiglietti R, Locci F, et al. Effect of physicochemical factors and use of milk powder on milk rennet-coagulation: Process understanding by near infrared spectroscopy and chemometrics. Food Control. 2021;119. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107494.

18. Yurova EA. Fil'chakova SA, Kozlovtseva DV. Efficient ways to ensure raw milk quality. Dairy Industry. 2019;(9):44–47. (In Russ.).

19. Sviridenko GM, Zakharov MB, Onosovskaya NN. Sistema kontrolya pokazateley mikrobiologicheskoy bezopasnosti moloka i molochnoy produktsii [Monitoring system of indicators of microbiological safety of milk and dairy products]. Milk Processing. 2019;241(11):14–19. (In Russ.).

20. Semenikhina VF, Rozhkova IV, Begunova AV, Raskosnaya TA, Shirshova TI. Influence of microbiological and technological factors on the quality of cottage cheese. Production Quality Control. 2018;(5):53–57. (In Russ.).

21. Sviridenko GM, Zaharova MB. Microbiological safety indicators monitoring system and quality of milk and dairy products in accordance with current regulatory documents. Dairy Industry. 2020;(4):22–26. (In Russ.). https://doi.org/10.31515/1019-8946-2020-04-22-26.

22. Inikhov GS, Brio NP. Metody analiza moloka i molochnykh produktov [Methods for the analysis of milk and dairy products]. Moscow: Pishchevaya promyshlennost'; 1971. 423 p. (In Russ.).

23. Petrov AN, Galstyan AG, Radaeva IA, Turovskaya SN, Illarionova EE, Semipyatniy VK, et al. Indicators of quality of canned milk: Russian and international priorities. Foods and Raw Materials. 2017;5(2):151–161. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2017-2-151-161.

24. Magan JB, Tobin JT, O'Callaghan TF, Kelly AL, Fenelon MA, Hennessy D, et al. Physicochemical properties of whole milk powder derived from cows fed pasture or total mixed ration diets. Journal of Dairy Science. 2019;102(11):9611–9621. https://doi.org/10.3168/jds.2019-16415.

25. Bittante G, Cologna N, Cecchinato A, De Marchi M, Penasa M, Tiezzi F, et al. Monitoring of sensory attributes used in the quality payment system of Trentingrana cheese. Journal of Dairy Science. 2011;94(11):5699–5709. https://doi.org/10.3168/jds.2011-4319.

26. O'Callaghan DJ, O'Donnell CP, Payne FA. A comparison of on-line techniques for determination of curd setting time using cheesemilks under different rates of coagulation. Journal of Food Engineering. 1999;41(1):43–54. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00072-2.

27. Bobrakova LA, Mamaev AV. Issledovanie reologicheskikh parametrov pri proizvodstve obogashchennogo zernenogo tvoroga [Rheological parameters in the production of fortified cottage cheese]. Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Oryol State Agrarian University]. 2013;40(1):172–176. (In Russ.).

28. Gaber SM, Johansen A-G, Schuller RB, Devold TG, Rukke E-O, Skeie SB. Effect of freezing temperatures and time on mineral balance, particle size, rennet and acid coagulation of casein concentrates produced by microfiltration. International Dairy Journal. 2020;101. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104563.

29. Mayorov AA, Sidenko YuA, Musina ON. New high-tech methods of rheological properties evaluation in cheesemaking: Study of milk coagulation and formation of cheese curd structure. Food Processing: Techniques and Technology. 2017;45(2):55–61. (In Russ.). https://doi.org/10.21179/2074-9414-2017-2-55-61.

30. Djaowé G, Bitjoka L, Boukar O, Libouga DG, Waldogo B. Measurement of the rennet clotting time of milk by digital image sequences (2D + t) processing. Journal of Food Engineering. 2013;114(2):235–241. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.07.024.

31. McMahon DJ, Brown RJ. Evaluation of Formagraph for comparing rennet solutions. Journal of Dairy Science. 1982;65(8):1639–1642. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(82)82390-4.

32. Koczura M, Martin B, Turille G, De Marchi M, Kreuzer M, Berard J. Milk composition, but not cheese properties, are impaired the day after transhumance to alpine pastures. International Dairy Journal. 2019;99. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.104540.

33. Stocco G, Pazzola M, Dettori ML, Cipolat-Gotet C, Summer A, Vacca GM. Variation in caprine milk composition and coagulation as affected by udder health indicators. International Dairy Journal. 2019;98:9–16. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.06.005.

34. Beux S, Waszczynskyj N, Pereira EA, Cassandro M, Nogueira A. Milk coagulation properties and methods of detection. Ciência Rural. 2017;47(10). https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20161042.

35. Bonfatti V, Gervaso M, Rostellato R, Coletta A, Carnier P. Protein composition affects variation in coagulation properties of buffalo milk. Journal of Dairy Science. 2013;96(7):4182–4190. https://doi.org/10.3168/jds.2012-6333.

36. Currò S, Manuelian CL, De Marchi M, Goi A, Claps S, Esposito L, et al. Italian local goat breeds have better milk coagulation properties than cosmopolitan breed. Italian Journal of Animal Science. 2020;19(1):593–601. https://doi.org/10.1080/1828051X.2020.1772130.

37. Costa A, Visentin G, De Marchi M, Cassandro M, Penasa M. Genetic relationships of lactose and freezing point with minerals and coagulation traits predicted from milk mid-infrared spectra in Holstein cows. Journal of Dairy Science. 2019;102(8):7217–7225. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15378.

38. Pazzola M. Coagulation traits of sheep and goat milk. Animals. 2019;9(8). https://doi.org/10.3390/ani9080540.

39. Vacca GM, Stocco G, Dettori ML, Bittante G, Pazzola M. Goat cheese yield and recovery of fat, protein, and total solids in curd are affected by milk coagulation properties. Journal of Dairy Science. 2020;103(2):1352–1365. https://doi.org/10.3168/jds.2019-16424.

40. Cecchinato A, Cipolat-Gotet C, Casellas J, Penasa M, Rossoni A, Bittante G. Genetic analysis of rennet coagulation time, curd-firming rate, and curd firmness assessed over an extended testing period using mechanical and near-infrared instruments. Journal of Dairy Science. 2013;96(1):50–62. https://doi.org/10.3168/jds.2012-5784.

41. Karacheviev Y, Angelova T, Yordanova D, Karabashev V. Modelling of buffalo milk coagulation kinetics after addition of enzymes at different concentrations by means of mechanical lactodynamography. International Journal of Current Research and Academic Review. 2018;6(9):1–11.

42. Niero G, Costa A, Franzoi M, Visentin G, Cassandro M, De Marchi M, et al. Genetic and non-genetic variation of milk total antioxidant activity predicted from mid-infrared spectra in holstein cows. Animals. 2020;10(12). https://doi.org/10.3390/ani10122372.

43. Mcdermott A, De Marchi M, Berry DP, Visentin G, Fenelon MA, Lopez-Villalobos N, et al. Cow and environmental factors associated with protein fractions and free amino acids predicted using mid-infrared spectroscopy in bovine milk. Journal of Dairy Science. 2017;100(8):6272–6284. https://doi.org/10.3168/jds.2016-12410.

44. Visentin G, McParland S, De Marchi M, McDermott A, Fenelon MA, Penasa M. Processing characteristics of dairy cow milk are moderately heritable. Journal of Dairy Science. 2017;100(8):6343–6355. https://doi.org/10.3168/jds.2017-12642.

45. Franzoi M, Manuelian CL, Penasa M, De Marchi M. Effects of somatic cell score on milk yield and mid-infrared predicted composition and technological traits of Brown Swiss, Holstein Friesian, and Simmental cattle breeds. Journal of Dairy Science. 2020;103(1):791–804. https://doi.org/10.3168/jds.2019-16916.

46. Franzoi M, Niero G, Visentin G, Penasa M, Cassandro M, de Marchi M. Variation of detailed protein composition of cow milk predicted from a large database of mid-infrared spectra. Animals. 2019;9(4). https://doi.org/10.3390/ani9040176.

47. De Marchi M, Toffanin V, Cassandro M, Penasa M. Prediction of coagulating and noncoagulating milk samples using mid-infrared spectroscopy. Journal of Dairy Science. 2013;96(7):4707–4715. https://doi.org/10.3168/jds.2012-6506.

48. Manuelian CL, Visentin G, Boselli C, Giangolini G, Cassandro M, De Marchi M. *Short communication*: Prediction of milk coagulation and acidity traits in Mediterranean buffalo milk using Fourier-transform mid-infrared spectroscopy. Journal of Dairy Science. 2017;100(9):7083–7087. https://doi.org/10.3168/jds.2017-12707.

49. Visentin G, De Marchi M, Berry DP, McDermott A, Fenelon MA, Penasa M, et al. Factors associated with milk processing characteristics predicted by mid-infrared spectroscopy in a large database of dairy cows. Journal of Dairy Science. 2017;100(4):3293–3304. https://doi.org/10.3168/jds.2016-12028.

50. Cipolat-Gotet C, Cecchinato A, De Marchi M, Penasa M, Bittante G. Comparison between mechanical and near-infrared methods for assessing coagulation properties of bovine milk. Journal of Dairy Science. 2012;95(11):6806–6819. https://doi.org/10.3168/jds.2012-5551.

51. Catarino I, Martins APL, Duarte E, Prudencio ES, De Pinho MN. Rennet coagulation of sheep milk processed by ultrafiltration at low concentration factors. Journal of Food Engineering. 2013;114(2):249–254. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.08.013.

52. Zhang J, Yang M, Cai D, Hao Y, Zhao X, Zhu Y, et al. Composition, coagulation characteristics, and cheese making capacity of yak milk. Journal of Dairy Science. 2020;103(2):1276–1288. https://doi.org/10.3168/jds.2019-17231.

53. Gomes S, Belo AT, Alvarenga N, Dias J, Lage P, inheiro C, et al. Characterization of *Cynara cardunculus* L. flower from Alentejo as a coagulant agent for cheesemaking. International Dairy Journal. 2019;91:178–184. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.09.010.

54. Pang Z, Xu R, Zhu Y, Bansal N, Liu X. Tribo-rheology and kinetics of soymilk gelation with different types of milk proteins. Food Chemistry. 2020;311. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125961.

55. Gaber SM, Johansen A-G, Devold TG, Rukke E-O, Skeie SB. Minor acidification of diafiltration water using various acidification agents affects the composition and rennet coagulation properties of the resulting microfiltration casein concentrate. Journal of Dairy Science. 2020;103(9):7927–7938. https://doi.org/10.3168/jds.2020-18237.