

ИСКЛЮЧЕНИЕ ТРАДИЦИОННЫХ ОПЕРАЦИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ СЫЧУЖНЫХ СЫРОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОЛНОВОГО (ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО) МЕТОДА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Игорь Тимофеевич Смыков, д-р техн. наук, главный научный сотрудник отдела физико-химических и биохимических исследований молока и молочных продуктов

E-mail: i.smykov@fnscps.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия – филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН, г. Углич

В парадигме современного производства сычужного сыра ключевым моментом является получение молочного сгустка в состоянии покоя молочной смеси. Образовавшийся молочный сгусток необходимо разрезать, тщательно перемешать и сформировать сырное зерно, на что затрачивается значительное время и энергия, и это не устраивает крупных производителей сыра. В исследовании произведена оценка возможности исключения операций разрезки молочного сгустка и его перемешивания при получении сырного зерна и формирования пласта. Альтернативой данных операций рассматривается использование вынужденных гидродинамических колебаний ферментированного молока в процессе коагуляции. Показано, что при правильном выборе частоты вынуждающих колебаний, с учетом размеров и формы резервуара, может быть получено сырное зерно и сырный пласт с необходимыми свойствами, готовый к дальнейшей традиционной обработке. Определено, что при низких частотах колебаний содержание жира в сыворотке может быть снижено до 0,08 %, что значительно меньше существующего характерного значения 0,40 % и вызывает осторожный оптимизм. Но при более высоких частотах, близких к частоте резонанса, массовая доля жира в сыворотке достигает недопустимых 2,00 %, что объясняется излишне интенсивными колебаниями, вызывающими плескание и разрушение структуры. При этом содержание белка в сыворотке в обоих случаях не превышает 0,8 %. Отмечено, что изменение амплитуды волны молока при сычужной коагуляции в условиях вынужденных колебаний имеет отрицательную корреляцию с изменением вязкости при коагуляции молока в условиях покоя. Полученная феноменологическая зависимость позволяет проводить непосредственную оценку происходящего процесса при сычужной коагуляции молока в условиях вынужденных колебаний. Выработанный с использованием волнового метода образец сыра и сыр, выработанный по традиционной технологии, имели близкие рисунок и текстуру. Результаты исследования указывают на потенциал практического использования волнового метода получения сырного зерна за счет уменьшения технологического времени (на 0,5–1,5 ч в зависимости от вида сыра) и снижения отхода молочного жира в сыворотку.

Ключевые слова: молоко, мицеллы казеина, активный гель, механизм гелеобразования, молочный сгусток, сырное зерно, сычужный сыр, гидродинамика

Для цитирования: Смыков, И. Т. Исключение традиционных операций в производстве сычужных сыров при использовании волнового (гидродинамического) метода / И. Т. Смыков // Молочная промышленность. 2026. № 2. С. 55–66. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2026-2-81>

ВВЕДЕНИЕ

Биохимические и биофизические процессы, происходящие при сычужной коагуляции молока и получении сырного зерна в процессе производства сыра, изучены достаточно глубоко и подробно описаны. При традиционном способе производства сычужного сыра молоко после внесения молокосвертывающего фермента находится в покое до момента готовности молочного сгустка к разрезке, затем производится его разрезка, тщательное перемешивание и формирование сырного зерна. При этом предварительные и последующие процедуры производства могут быть самыми разнообразными в зависимости от выбранного вида сыра. В этой парадигме ключевым моментом является коагуляция молока в состоянии покоя и образование молочного сгустка.

Механизм коагуляции молока в молекулярных терминах хорошо описан в работах [1, 2]. В этих работах подробно показано влияние свойств молока, различных действующих факторов и окружающей среды на коагуляцию количественно. В работе [3] показано, что в процессе гелеобразования денатурация мицелл казеина открывает новые реакционные центры и более прочные связи имеют тенденцию заменять более слабые связи в соответствии с иерархическим порядком: гидрофобные взаимодействия < водородные связи < электростатические взаимодействия < кальциевые мостики. Здесь же отмечается, что актуальной темой остается определение того, как отдельные мицеллы казеина трансформируются в микроструктуру молочного геля.

В описаниях механизма гелеобразования предполагается, что молоко в это время находится в состоянии покоя, а взаимодействия между молекулами

сычужного фермента и к-казеином, а также межмицеллярные взаимодействия дестабилизированных мицелл происходят за счет броуновского движения частиц [4]. Дальнейший процесс сычужной коагуляции, который также происходит в условиях относительного покоя молока, включает в себя последующую агрегацию денатурированных мицелл, которая, предположительно, также происходит за счет их броуновского движения. В конечном итоге такая агрегация приводит к образованию и уплотнению молочного сгустка [5, 6]. Однако, как это отмечено в работе [7], при сычужном гелеобразовании в молоке кроме броуновского движения могут существовать и другие виды микротечений, влияющих на процесс гелеобразования. Кроме того, при внесении молокосвертывающего препарата в молоко, производится его интенсивное перемешивание для равномерного распределения фермента по всему объему. При этом остаточные медленно затухающие течения после окончания перемешивания могут иметь достаточно большую интенсивность и продолжаться вплоть до гель-точки. Однако эти явления и их влияние на гелеобразование исследователями никак не учитываются. Количественное влияние фактора спонтанных течений в ферментативной фазе коагуляции молока на свойства образующегося геля остается еще неизученным.

После ферментативного удаления гликомакропептида с поверхности мицелл казеина на ней могут возникать локальные градиенты концентрации ионов (например, кальция, фосфатов) или других молекул. Это создает условия для диффузиофореза, который может ускорять движение мицелл в направлении градиента концентрации, способствуя их сближению и агрегации [8], аналогичный процесс диффузиофореза известен и в других суспензиях. Дополнительное увеличение концентрации ионов кальция (при внесении CaCl_2) также может создавать локальные градиенты вблизи поверхности мицелл, способствующие диффузиофорезу и ускорению агрегации. Это особенно важно на начальных этапах процесса, когда мицеллы только начинают взаимодействовать друг с другом. Если в молоке в ходе ферментативной реакции возникают локальные градиенты температуры или поверхностного натяжения, это может вызывать термокапиллярное движение жидкости. Этот эффект способен создавать дополнительные потоки жидкости, которые способствуют перемешиванию компонентов системы и ускорению агрегации мицелл [9]. На поверхности образующихся агрегатов, при их взаимодействии также могут

возникать капиллярные силы, связанные с изменением поверхностного натяжения. Эти силы способствуют движению агрегатов мицелл и их объединению. Капиллярные силы особенно важны в местах локальных изменений состава среды. В процессе коагуляции молока локально изменяется и pH из-за выделения продуктов ферментативных реакций (например, гликомакропептида). Локальное изменение pH способно модулировать электростатические взаимодействия между денатурированными мицеллами казеина, ускоряя или замедляя их агрегацию.

Таким образом, при внесении ферментного молокосвертывающего препарата и хлористого кальция молоко как изначально термодинамически устойчивая, пассивная биокolloидная система становится активной системой, т. е. системой, в которой коллоидные частицы ее составляющие способны взаимодействовать друг с другом. Такое качественное изменение в молоке, как биокolloидной системе, происходит за счет изменений в мицеллах казеина, в которых начинаются биохимические реакции, и за счет изменений в окружающей среде. Это приводит к возникновению различных физико-химических эффектов, которые влияют на кинетику движения мицелл и образование молочного геля.

В такой активной коллоидной системе при дополнительном поступлении энергии за счет внешних механических, электромагнитных или радиационных воздействий также могут возникать спонтанные флуктуации концентрации, заряда или температуры. Эти флуктуации способны приводить к локальным изменениям скорости движения мицелл, способствуя их агрегации в одних областях и препятствуя ей в других. Движение одних агрегатов, в свою очередь, создает потоки жидкости, которые влияют на движение других агрегатов. В такой ситуации активные мицеллы казеина уже рассматриваются как броуновские частицы с дополнительной вынуждающей силой, которая модулирует их взаимодействие. Уравнение движения для такой частицы в общем случае [10] может быть записано как:

$$m \frac{dv}{dt} = -\gamma v + F_{\text{act}} + F_{\text{rand}} \quad (1)$$

где m – масса частицы, γ – коэффициент трения, v – скорость, F_{act} – активная сила, F_{rand} – случайная сила, модулирующая флуктуации (дополнительные воздействия).

В уравнении (1) общее движение активных мицелл казеина и их агрегатов в процессе коагуляции представлено как сумма броуновского движения, движения под действием вынуждающей силы и дополнительных движений, возникающих как следствие действия вынуждающей силы. Этот подход и ряд имеющихся наблюдений подвигают исследователей к изучению возможностей управления процессом ферментативного гелеобразования в молоке за счет использования разнообразных внешних воздействий. Так, в работах [11–15] после обсуждения теории действия ультразвука на пищевые гидроколлоиды подчеркивается, что его использование имеет значительное влияние на процесс гелеобразования. Вместе с тем следует отметить, что работы по исследованиям влияния акустофореза (acoustophoresis) как эффекта, возникающего при ультразвуковой обработке коллоидных систем, на процесс гелеобразования в молоке нам не встречались.

Кроме использования ультразвука в процессе сычужной коагуляции молока, достаточно много исследовательских работ посвящено обработке молока высоким давлением. В работах [16–18] исследовалось влияние высокого давления при ферментативном гелеобразовании на структуру и стабильность гелей молочного белка. Полученные результаты показали, что исследуемые гели имели прочную, стабильную пространственную структуру.

Исследования влияния различных внешних воздействий на процесс гелеобразования в молоке идут по многим направлениям. Так, в работах [19, 20] обсуждается влияние электрических полей на структуру, агрегационные и гелеобразующие свойства пищевых белков. Однако в этих работах отмечено, что точное влияние пока еще не определено.

Таким образом, все эти и множество других подобных исследований направлены на совершенствование процесса получения сычужного молочного геля, т. е. парадигма современного сыроделия «молоко должно быть в покое» остается непоколебимой. В то же время очевидно, что для сыроделия важен не сам молочный сгусток, а сырное зерно и / или готовый сырный пласт, которые получают из молочного сгустка после его разрезки, перемешивания и удаления сыворотки. При этом получение молочного сгустка и вся его дополнительная обработка являются промежуточными процессами преобразования молока, требующими значительных затрат времени, энергии и труда.

Вместе с тем известен ряд исследований, проведенных в других отраслях науки и техники, которые демонстрируют положительное влияние гидродинамических взаимодействий активных коллоидных частиц при формировании полимерных гелей. Процесс образования геля активных коллоидных частиц был рассмотрен в работах [21–25]. Показано, что гидродинамические взаимодействия активных коллоидных частиц в различных условиях ускоряют или замедляют гелеобразование. В то же время гидродинамические взаимодействия накладывают дополнительные ограничения на относительное перемещение и вращение между соседними частицами, что увеличивает вязкость и модуль упругости гелей. Агрегация и дезагрегация образующихся кластеров взаимодействующих частиц в активном геле под действием потока жидкости изучались с численной и теоретической точек зрения в работе [26]. Однако взаимодействие ближних частиц при гидродинамических воздействиях, приводящих к гелеобразованию, остается плохо изученным.

При образовании гелей в активной коллоидной системе возникают гидродинамические неустойчивости, приводящие к потере целостности пространственной сетки геля. Экспериментальные наблюдения показывают, что потеря целостности этой сетки связана с образованием в ней размытых каналов, так называемых стримеров, через которые протекает жидкость и происходит синерезис геля. Однако механизм синерезиса геля также остается недостаточно изученным. В работе [27] представлена феноменологическая модель, которая динамически описывает радиальный рост стримера из-за эрозии гелевой сетки быстрым обратным потоком жидкости. Это явление еще раз подчеркивает важность учета гидродинамических явлений при гелеобразовании.

Проведенный нами анализ доступных источников информации, предварительные эксперименты и некоторые исследования позволили предположить, что возможно существование процесса непосредственного преобразования молока в сырное зерно и их пласт заданного качества при использовании определенных физико-механических методов, в том числе гидродинамических.

Цель работы заключалась в разработке и изучении волнового (гидродинамического) метода формирования сырного зерна в процессе производства сычужного сыра и возможности исключения традиционных операций получения молочного сгустка, его разрезки, перемешивания и формирования зерна.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили в отделе физико-химических и биохимических исследований и экспериментально-производственном цехе Всероссийского научно-исследовательского института маслodelия и сыроделия (Углич, Россия).

Объекты исследований:

- молоко производства ООО «АгриВолга» (дер. Бурмасово, Угличский район Ярославской области, Россия). Порода коров «Ярославская», содержание жира в сыром молоке 4,00–4,20 %, белка – 3,4–3,7 %;
- заквасочная бактериальная культура БК-4 (*Lactococcus lactis* subsp. *lactis*, *Lactococcus lactis* subsp. *cremoris*, *Lactococcus lactis* subsp. *diacetylactis*, *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *cremoris*) (ФГУП «Экспериментальная биофабрика», Углич, Россия);
- раствор хлористого кальция (CaCl_2) из расчета 35 г на 100 л молока;
- молокосвертывающий препарат «Фермент сычужный 90, Экстра» (химозин – 90 %, пепсин говяжий – 10 %), МСА – 100000 (ООО «Завод эндокринных ферментов», Зеленоград, Москва, Россия).

Определение массовой доли белка в молоке и сыворожке проводили методом Кьельдаля с использованием автоматических установок: Дигестор Digest Stove HYP-320 (HANON, Китай) и Automatic Kjeldahl Distillation Unit K9840 (HANON, Китай). Определение массовой доли жира в молоке проводили кислотным методом Гербера. Определение массовой доли белка и массовой доли жира в молоке проводили перед его нормализацией.

Подготовку молока перед сычужным свертыванием проводили его нагреванием до $40 \pm 1^\circ\text{C}$ и нормализацией путем доведения соотношения казеин/жир до 0,7 при жирности 2,90 %. Пастеризацию молока проводили в резервуаре при температуре $68 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 10 мин. Затем охлаждали молоко до температуры $35 \pm 1^\circ\text{C}$, вносили в него раствор хлористого кальция, бактериальную закваску и молокосвертывающий ферментный препарат из расчета 3000 IMCU/100 кг молока. Товарный сыр Голландской группы жирностью 45 % производился по технологии полутвердых сыров с низкой температурой второго нагревания с формованием из пласта.

Выработку образцов по экспериментальному методу непосредственного получения сырного зерна из ферментированного молока проводили в резервуаре объемом 6,5 л. Экспериментальный резервуар был

размещен на специально разработанном вибрационном столе, частота горизонтальных колебаний которого могла плавно изменяться от 0,5 до 5,0 Гц. Амплитуда колебаний стола составляла 8 мм. В экспериментах использовали готовую молочную смесь, отобранную из контрольной ванны в экспериментально-производственном цехе ВНИИМС сразу же после внесения сычужного фермента. После получения сырного пласта его передавали в производственный цех для дальнейшей обработки. Всего было проведено более 40 экспериментов, а при получении численных значений измеряемых параметров проводили не менее трех повторностей.

Изменение вязкости при образовании молочного сгустка в сыродельной ванне в цехе оценивали по изменению его теплопроводности методом горячей проволоки [28, 29]. При проведении исследований была использована автоматизированная система ин-лайн контроля процесса кинетики гелеобразования в сыродельной ванне, описанная в работе [30]. Определение вязкости молока при гелеобразовании проводили непрерывно, при автоматической регистрации результатов наблюдений с интервалом 2 с.

Для визуализации процесса образования сычужного сырного зерна волновым методом использовали цифровую камеру FinePix S4300, FUJIFILM Corporation, Japan. Анализ отдельных кадров полученных изображений и определение размеров первичных белково-жировых агрегатов в процессе образования сычужного молочного сгустка проводили с использованием программ VSDC Video Editor v9.2.6.576, Flash-Integro LLC и Nexsys ImageExpert Pro 3.7.5.0 (Москва, Россия).

Статистический анализ результатов, полученных при проведении экспериментальных исследований, проводили с использованием программ Origin 8.1 (OriginLab, США) и EXCEL MS Office при уровне значимости 0,05.



РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении экспериментальных исследований был использован прямоугольный прозрачный резервуар, длина – 0,24 м, ширина – 0,16 м, высота молока в резервуаре – 0,1 м. По этим размерам был проведен расчет значений резонансных частот резервуара с молоком для различных мод колебаний и их комбинаций по формулам, приведенным в [31, 32]. Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1. Значения резонансных частот экспериментального резервуара с молоком

Вид колебаний	Мода (m,n)	Частота, Гц
Вдоль длины	(1,0)	2,06
По ширине	(0,1)	3,09
Диагональные	(1,1)	3,72
Вдоль длины	(2,0)	4,12

Из приведенной таблицы 1 видно, что основные резонансы экспериментального резервуара с молоком находятся в области низких частот. Расчет значений амплитуды (A) резонансных колебаний молока в резервуаре в зависимости от частоты вынуждающих колебаний проводили так же по формулам, приведенным в работах [32, 33]. График полученной зависимости представлен на рисунке 1.

Зависимость амплитуды колебаний молока от частоты внешнего воздействия $A(\omega)$ имеет следующие особенности. Наблюдаются резкие увеличения амплитуды колебаний при частотах, близких к собственным частотам колебаний (ω_{mn}) резервуара с молоком. Эти пики соответствуют резонансным частотам, при которых внешнее воздействие синхронизируется с собственными колебаниями системы

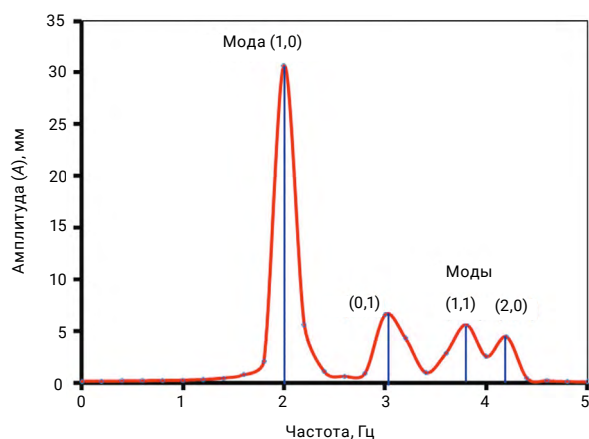


Рисунок 1. Зависимость амплитуды колебаний молока в резервуаре от частоты вынуждающих колебаний

по длине резервуара, его ширине и их комбинациям. Ширина пиков зависит от затухания в системе (вязкости молока) и, очевидно, должна увеличиваться по мере коагуляции молока в резервуаре. Вдали от резонансных частот амплитуда колебаний мала, т. к. внешнее воздействие не синхронизируется с собственными колебаниями резервуара с молоком. Соответственно, движение мицелл казеина и молочных жировых шариков (коллоидных частиц) в молоке в условиях вынужденных колебаний в резервуаре будет зависеть от нескольких факторов: частоты вынуждающих колебаний (резонансные или нерезонансные условия), характера колебаний молока (стоячие волны, пучности, узлы, плескания), размера и плотности коллоидных частиц, вязкости молока (на разных стадиях его коагуляции). Как видно из приведенного графика (рис. 1), максимальная амплитуда колебаний молока в резервуаре соответствует моде (1,0), т. е. колебаниям по длине и, соответственно, частоте 2,06 Гц. Поэтому все дальнейшие экспериментальные исследования проводились в диапазоне частот 0,50–2,50 Гц.

Далее были проведены экспериментальные исследования процесса сычужной коагуляции молока и образования сырного зерна в условиях действия вынуждающих колебаний. При проведении исследований по оценке влияния частоты вынуждающих колебаний

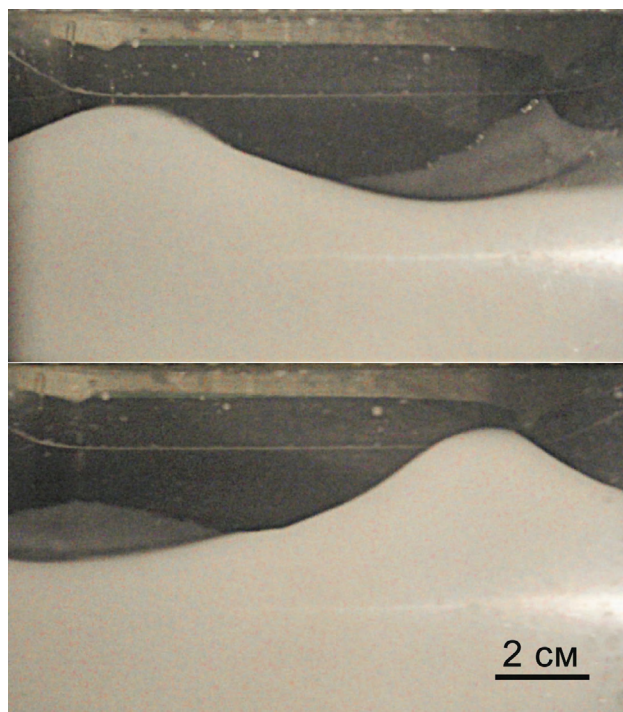


Рисунок 2. Фотографии волн молока, образующейся в резервуаре под действием вынуждающих колебаний

на свойства получаемого молочного сгустка была использована готовая молочная смесь, приготовленная в экспериментально-производственном цехе. Молочную смесь непосредственно после внесения молокосвертывающего препарата заливали в экспериментальный резервуар, сразу же включали вынуждающие колебания определенной частоты. Одновременно проводили фото- и видео-фиксацию в боковой проекции происходящего процесса. На рисунке 2 представлены фотографии двух фаз волны молока в резервуаре, образующейся под действием вынуждающих колебаний в начале процесса.

В начале процесса (не доходя до гипотетической гелевой точки) в молочной смеси образуется множество трудноразличимых очень мелких агрегатов мицелл казеина размерами менее 1 мм. Постепенно размеры агрегатов увеличиваются, они объединяются, и формируется первичное сырное зерно. На рисунке 3 приведена фотография, иллюстрирующая образование сырного зерна на 12 мин обработки.

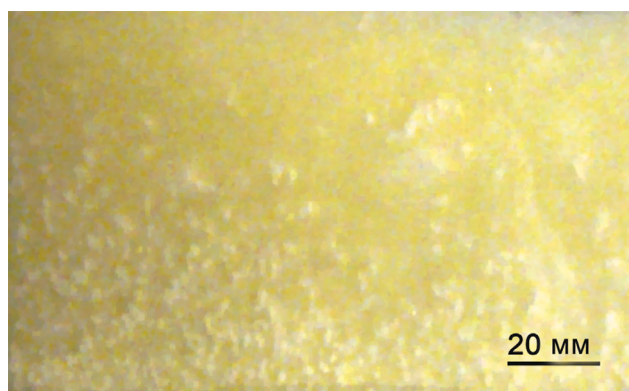


Рисунок 3. Фотография образующегося сырного зерна в сыворотке на начальном этапе



Рисунок 4. Фотография сырного зерна в середине процесса при вынужденных колебаниях

В дальнейшем внешние вынуждающие колебания одновременно стимулируют увеличение размеров зерна и его уплотнение. На рисунке 4 приведена фотография сырного зерна в сыворотке на 20 мин обработки.

Уплотнение сырного зерна и увеличение его размеров обеспечивает седиментацию и оседание сырного зерна на дно резервуара (рис. 5).

После остановки вынуждающих колебаний на дне резервуара начинает образовываться пласт сырного зерна (рис. 6).

В процессе экспериментальных исследований была проведена оценка изменения амплитуды волны молока в резервуаре в процессе его коагуляции (при фиксированной частоте) исходя из предположения, что при увеличении вязкости коагулята амплитуда волны должна уменьшаться. Для этого эксперимента объем готовой молочной смеси (с ферментом) делили на две части. В одной части, находящейся в покое, определяли

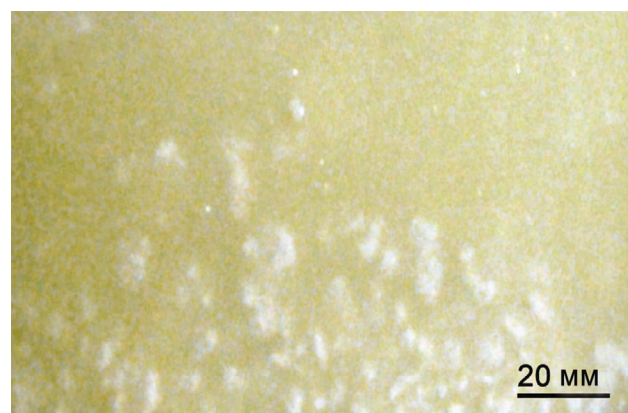


Рисунок 5. Фотография сырного зерна в заключительной части процесса

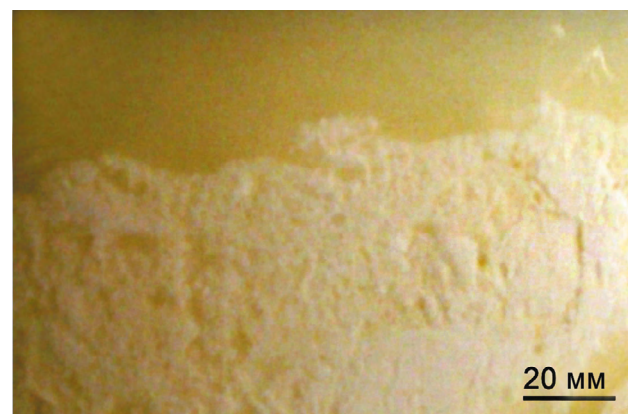


Рисунок 6. Фотография формирования пласта сырного зерна

изменение вязкости в процессе коагуляции методом горячей проволоки. Другую часть смеси помещали в экспериментальный резервуар, подвергали вынуждающим колебательным воздействиям при определенной частоте и определяли изменение амплитуды колебаний молока при его коагуляции. Полученные результаты представлены на рисунке 7.

Определено, что изменение амплитуды волны в резервуаре с молоком во времени при ферментативной коагуляции по полученным данным (рис. 7) может быть описано феноменологической зависимостью

$$A(t) = A_1 + \frac{A_2 - A_1}{1 + 10^{(2(A_2 - A_1) - t) \cdot p}} \quad (2)$$

где $A(t)$ – значение амплитуды волны, мм; t – время от момента внесения фермента, мин; A_2 – значение начальной асимптоты амплитуды волны, мм; A_1 – значение конечной асимптоты амплитуды волны, мм; p – параметр Хилла.

Очевидно, что заметное уменьшение значения амплитуды волны в процессе коагуляции молока после гель-точки вызывается последовательным повышением его вязкости. Однако повышение вязкости молока вызывает и изменение резонансных свойств системы «резервуар-молоко», что также сказывается на изменении амплитуды волны. Полученная зависимость позволяет проводить непосредственную оценку происходящего процесса при сычужной коагуляции молока в условиях вынужденных колебаний. Здесь следует отметить существование отрицательной корреляции между изменениями вяз-

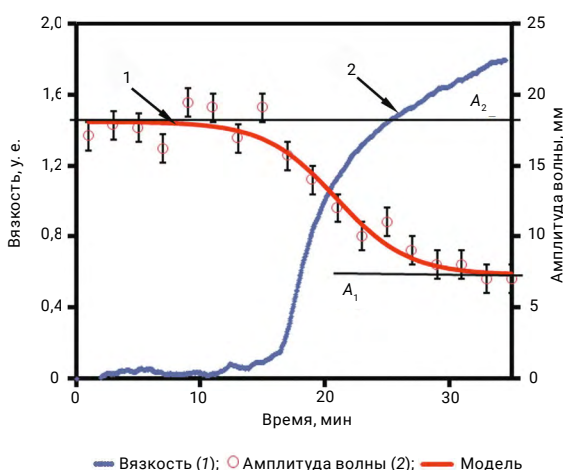


Рисунок 7. Изменение вязкости молока при коагуляции в покое и амплитуды волны молока при сычужной коагуляции в условиях вынужденных колебаний

кости при коагуляции молока в условиях покоя и изменением амплитуды волны при коагуляции молока под действием вынужденных колебаний.

После окончания коагуляции молока в экспериментах и некоторой выдержки сыворотку сливали и проводили анализ сыворотки на содержание белка и жира. Также проводили оценку текстуры полученного пласта сырного зерна. Результаты анализа образцов, полученных после коагуляции молока под действием вынуждающих колебаний различной частоты, представлены в таблице 2.

Результаты, приведенные в таблице 2, показывают, что содержание белка в сыворотке практически не зависит от частоты вынуждающих колебаний и не превышает характерных значений для подсырной сыворотки. В то же время содержание молочного жира в сыворотке очень сильно зависит от частоты колебаний. При низких частотах содержание жира в сыворотке достигает 0,08 %, что значительно ниже характерного для этого вида сыров значения 0,40 % и вызывает осторожный оптимизм. Но при более высоких частотах, близких к частоте резонанса, отход жира в сыворотку достигает недопустимых 2,00 %, что объясняется излишне интенсивными колебаниями, вызывающими плескание, разрушение структуры образующегося сырного зерна и отделение жира. Графики полученных зависимостей представлены на рисунке 8.

Непосредственно после удаления сыворотки поверхность полученного пласта сырного зерна фотографировали. На рисунке 9 показана фотография поверхности молочного сгустка, полученного при частоте колебаний 0,60 Гц. Этот сгусток имеет дряблую структуру, содержит большое количество сыворотки и не пригоден для дальнейшего использования без дополнительной обработки. В то же время содержание жира в его сыворотке минимально.

Таблица 2. Содержание белка и жира в сыворотке, свойства текстуры пласта, полученные при различных частотах колебаний

Частота, Гц	Белок, %	Жир, %	Текстура
0,60	0,78 ± 0,06	0,08 ± 0,03	Дряблый
1,00	0,81 ± 0,06	0,11 ± 0,03	Слабо-упругий
1,40	0,86 ± 0,06	0,16 ± 0,03	Упругий
1,70	0,76 ± 0,06	0,26 ± 0,03	Упруго-зернистый
1,80	0,85 ± 0,06	0,45 ± 0,05	Плотный
1,90	0,82 ± 0,06	1,77 ± 0,07	Грубо-зернистый

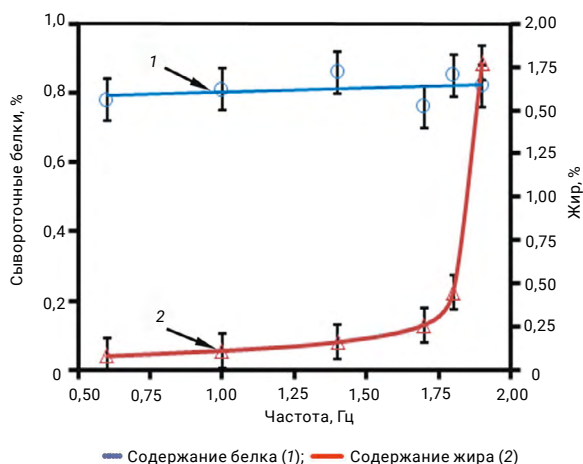


Рисунок 8. Содержание белка и жира в сыворотке в зависимости от частоты колебаний

Рисунок 10 иллюстрирует формирование сырного зерна при частоте колебаний 1,25 Гц. В этом случае сырное зерно хорошо выражено, упругое, имеет размеры в диапазоне 5–10 мм. Содержание молочного жира в сыворотке около 0,15 %.

На рисунке 11 представлена фотография сырного зерна, полученного при частоте колебаний 1,80 Гц. Здесь зерно крупное, плотное, но уже чувствуется зернистость. Содержание молочного жира в сыворотке уже больше нормы – 0,45 %.

Фотография с при меньшим увеличением поверхности пласта сырного зерна, полученного при частоте колебаний 1,25 Гц, после его самопрессования и переворачивания показана на рисунке 12. Этот вариант имеет все признаки готовности пласта к его дальнейшей обработке по общепринятой технологии и выработке товарного сыра.

Таким образом, из существующей парадигмы получения сычужного молочного сгустка были исключены операции получения молочного сгустка, его разрезки, перемешивания и формирования сырного зерна, а процесс получения сырного зерна проходил в условиях вынужденных колебаний молока. Как показали эксперименты, исключение традиционных технологических операций позволило сократить временной цикл производства сыра, в зависимости от его вида, на 0,5–1,5 ч.

В заключительной части экспериментальных исследований из молочной смеси, приготовленной в производственно-экспериментальном цехе, выработан образец полутвердого сыра. Экспериментальный образец сыра был выработан из готового пласта,



Рисунок 9. Фотография поверхности готового сырного сгустка, полученного при частоте колебаний 0,60 Гц, после удаления сыворотки

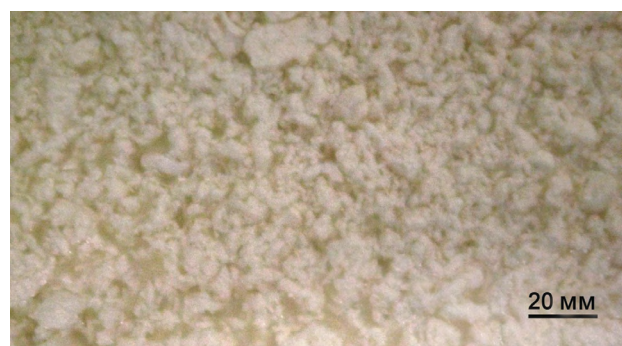


Рисунок 10. Фотография поверхности сырного зерна, полученного при частоте колебаний 1,25 Гц, после удаления сыворотки

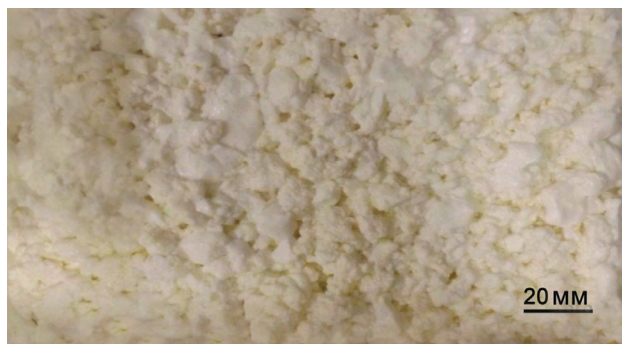


Рисунок 11. Фотография поверхности сырного зерна, полученного при частоте колебаний 1,8 Гц, после удаления сыворотки



Рисунок 12. Фотография поверхности пласта сырного зерна, полученного при частоте колебаний 1,25 Гц

полученного в экспериментальном резервуаре при воздействии вынуждающих колебаний на частоте 1,25 Гц параллельно с выработкой товарного сыра по существующей технологии. Экспериментальный образец сыра прошел созревание в течение 60 суток. На рисунке 13 показана фотография экспериментального образца сыра в разрезе.

На рисунке 14 показана фотография образца товарного сыра в разрезе, выработанного одновременно с экспериментальным образцом из одной и той же молочной смеси.

Как видно из приведенных фотографий, рисунок сыров характеризуется большим количеством глазков мелкого и среднего размеров. Текстура сыров близка к традиционной текстуре этой группы полутвердых сыров и характеризовалась как упруго-эластичная. Вкус и аромат экспериментального образца также близки к традиционным для этой группы сыров. Более подробный и обладающий статистической достоверностью сенсорный анализ не проводился ввиду отсутствия возможности на момент написания статьи выработки достаточного количества экспериментальных образцов. Проведение такой работы и публикация результатов планируются в ближайшем будущем.

Новизна результатов, полученных при экспериментальных исследованиях влияния вынужденных колебаний молочной смеси на процесс сычужной коагуляции, требует их более глубокого осмысления и обсуждения. В условиях вынужденных колебаний мицеллы казеина и молочные жировые шарики в молоке одновременно подвержены броуновскому движению, силам тяжести и Архимеда, гидродинамическим силам, эффектам, связанным с волновыми полями. При определенных колебаниях в резервуаре

образуются стоячие волны. В стоячей волне есть пучности – области с максимальной амплитудой колебаний молока и узлы – области с минимальной амплитудой колебаний. Коллоидные частицы в таких условиях собираются в узлах стоячих волн. Это связано с волновым эффектом – частицы движутся в области с минимальной амплитудой колебаний из-за разницы в радиационном давлении. При этом, в зависимости от моды колебаний, частицы могут собираться в определенных точках, линиях или плоскостях. Размеры и плотности коллоидных частиц также имеют значительное влияние на их поведение в условиях вынужденных колебаний. Мицеллы казеина собираются в узлах стоячих волн медленнее, а жировые шарики быстрее. При этом агрегаты мицелл быстрее оседают, жировые шарики быстрее всплывают.

Вязкость молока после внесения фермента значительно изменяется, что сильно влияет на скорость движения коллоидных частиц. С увеличением вязкости среды частицы движутся медленнее и их сбор в узлах стоячих волн занимает больше времени. Также увеличение вязкости молока сильнее гасит его колебания в резервуаре из-за диссипации энергии и снижает собственные частоты колебаний системы. В условиях действия вынужденных колебаний увеличивается частота столкновения частиц и образования их агрегатов (кластеров) за счет межчастичных взаимодействий (например, Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий, электростатических или химических связей). Образовавшиеся агрегаты движутся иначе, чем отдельные частицы, из-за изменения их эффективного размера и формы. Уменьшается скорость их движения, но усиливается реагирование на движение жидкости.



Рисунок 13. Экспериментальный сыр после 60 суток созревания



Рисунок 14. Товарный сыр после 60 суток созревания



Волновые колебания молока в процессе коагуляции могут как способствовать, так и препятствовать образованию молочного геля. Волновые колебания собирают коллоидные частицы в узлах стоячих волн, увеличивая их локальную концентрацию и вероятность агрегации. Однако сильные волновые колебания могут разрушать уже образовавшиеся агрегаты. Таким образом, низкие частоты и умеренные амплитуды способствуют агрегации, а большие амплитуды вблизи резонанса могут разрушать уже сформированные агрегаты. Как следствие, при низких частотах отход жира в сыворотку маленький, при резонансе – очень большой. В то же время при низких частотах сырное зерно очень слабое или совсем не образуется, а вблизи частоты резонанса сырное зерно слишком грубое. Однако существует интервал частот вынуждающих колебаний, обеспечивающий возможность целевого управления свойствами сырного зерна и, соответственно, сырного пласта. Этот интервал частот зависит и определяется в основном конкретными размерами и формой сыродельной ванны или другого резервуара, где производится коагуляция молока.

Рассматриваемый волновой метод получения сырного сгустка вполне пригоден для масштабирования без больших капитальных затрат. Возбуждение волновых колебаний жидкости в закрытом резервуаре – это задача, которая имеет множество приложений в различных областях, таких как гидродинамика, химическая инженерия, акустика, биология и т. д. Существует несколько методов создания таких колебаний. Механические и гравитационные методы возбуждения колебаний достаточно просты, но их использование в промышленных масштабах не всегда приемлемо. В тоже время они больше всего подходят для проведения экспериментальных исследований поведения коллоидных систем. Возбуждение колебаний возможно также с использованием гибких мембран. Мембрана

может быть выполнена из различных материалов, в том числе из пищевой нержавеющей стали. Частота и амплитуда колебаний мембраны регулируются для достижения нужного эффекта. Выбор метода возбуждения волновых колебаний зависит от целей исследования или применения, характеристик жидкости (вязкость, плотность) и требуемых параметров волн (частота, амплитуда, форма).

Традиционная технология получения сырного зерна предполагает операции разрезки молочного сгустка и последующей постановки зерна при тщательном перемешивании продукта по большой амплитуде. При этом, очевидно, затрачивается определенное количество энергии на перемещение всего объема продукта в течение определенного времени. При использовании гидродинамического способа получения сырного зерна также происходит перемещение всего объема продукта, но с меньшей амплитудой, также затрачивается определенное количество энергии. Фактически затраты энергии для обоих способов мало отличаются при условии получения одинакового продукта.

Наиболее рациональным подходом для реализации гидродинамического (волнового) метода получения сырного зерна является предварительное численное компьютерное моделирование процесса взаимодействия активных коллоидных частиц в резервуаре определенной формы и размеров в условиях вынужденных колебаний определенной частоты и амплитуды. Для этой цели обычно используются программы вычислительной гидродинамики (CFD), однако большинство этих программ может работать только с пассивными коллоидами. В нашем случае коллоидные частицы (дестабилизированные мицеллы казеина) взаимодействуют друг с другом, представляя собой активную систему, что вызывает дополнительные сложности моделирования их поведения в условиях действия вынужденных колебаний.

Выводы

В результате проведенных исследований показана возможность прямого получения сычужного сырного зерна и сырного пласта волновым (гидродинамическим) способом без использования дополнительных операций. Из существующей парадигмы получения сычужного сырного зерна исключены операции формирования молочного сгустка, его резки, перемешивания и формирования. Исключение дополнительных технологических операций позволяет сократить продолжительность цикла производства сыра, в зависимости от его вида, на 0,5–1,5 ч. Массовая доля молочного жира в подсырной сыворотке может быть снижена с существующих 0,40 % до 0,10 % без дополнительного отхода белка в сыворотку.

Гидродинамический способ получения молочного сгустка заключается в возбуждении низкочастотных вынужденных волновых колебаний в емкости с приготовленной молочной смесью. Основными параметрами, определяющими диапазон волновых колебаний, являются частотные характеристики емкости с молоком – ее размеры и форма. Показано, что наблюдаемое в этом эксперименте резкое увеличение амплитуды колебаний волны молока при приближении частоты вынуждающих колебаний к 2,00 Гц соответствует теоретическому расчету частоты резонанса для первой моды (1,0).

Отмечено, что изменение амплитуды волны молока при сычужной коагуляции в условиях вынужденных колебаний имеет отрицательную корреляцию с изменением вязкости при коагуляции молока в условиях покоя. Полученная феноменологическая зависимость позволяет проводить непосредственную

оценку происходящего процесса при сычужной коагуляции молока в условиях вынужденных колебаний.

Определено, что содержание белка в сыворотке практически не зависит от частоты вынуждающих колебаний и не превышает характерных значений для сладкой сыворотки. В то же время содержание молочного жира в сыворотке очень сильно зависит от частоты колебаний. При низких частотах содержание жира в сыворотке достигает 0,08 %, что значительно ниже характерного для этого вида сыров значения 0,40 % и вызывает осторожный оптимизм. Но при более высоких частотах, близких к частоте резонанса, отход жира в сыворотку достигает недопустимых 2,00 %, что объясняется излишне интенсивными колебаниями, вызывающими плескание, разрушение структуры образующегося сырного зерна и отделение жира.

Опытные образцы сыра, выработанные из сгустка, полученного в опытной емкости, созревали параллельно с сыром, производимым по традиционной технологии. Структура сыра в обоих случаях была весьма схожей и характеризовалась большим количеством мелких и средних глазков. Текстура сыров также была схожей и оценивалась как упруго-эластичная.

Предлагаемый волновой (гидродинамический) метод получения сырного зерна и пласта может быть масштабирован на основе компьютерного моделирования вычислительной гидродинамики процесса взаимодействия активных коллоидных частиц в резервуарах определенной формы и размеров в условиях вынужденных колебаний определенной частоты и амплитуды. ■

Поступила в редакцию: 18.11.2025

Принята в печать: 17.03.2026

OPTIMIZING TRADITIONAL PROTOCOL FOR RENNET CHEESE PRODUCTION VIA FORCED HYDRODYNAMIC OSCILLATIONS

Igor T. Smykov

All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking – Branch of V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of RAS, Uglich

Milk coagulation during the mix equilibrium is a critical stage in the traditional rennet cheese production protocol. The resulting milk curd is cut and stirred to form cheese grains. This time-consuming and energy-intensive process is not effective enough for large-scale cheese production. The application of forced hydrodynamic oscillations during coagulation makes it possible to eliminate the stages of cutting and stirring. Optimized oscillation frequency and vessel geometry yield curd and cheese sheet that meet traditional processing standards. In this research, low oscillation frequencies reduced the fat content in whey to 0.08%, which is significantly lower than the standard of 0.40%. However, higher near-resonance frequencies increased the fat mass fraction to an unacceptable 2.00% because excessively intense vibrations triggered splashing and structural instability. The protein content in whey remained below 0.8% in both scenarios. A negative correlation occurred between the change in the amplitude of the milk wave under forced vibrations and the viscosity changes during stationary coagulation. This phenomenological dependence allows for a direct assessment of rennet coagulation under forced vibrations. The cheese samples produced via the wave method were similar in pattern and texture to those obtained by traditional technological protocol. The wave method reduced the processing time by 0.5–1.5 h, depending on the cheese type, and minimized the loss of milk fat into the whey.

Keywords: milk, casein micelles, active gel, gelation mechanism, milk grain, cheese grain, rennet cheese, hydrodynamics

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lucey, J. A.** Rennet-induced coagulation of milk / J. A. Lucey // *Encyclopedia of Dairy Sciences*. Ed. by J. W. Fuquay, P. F. Fox, P. L. H. McSweeney. – Academic Press, 2011. – P. 579–584. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15956-5.00016-6>
2. **Fox, P. F.** *Fundamentals of Cheese Science*. Second Edition / P. F. Fox [et al.]. – Academic Press, 2017. P. 185–229.
3. **Amaro-Hernández, J. C.** Chemical interactions among caseins during rennet coagulation of milk / J. C. Amaro-Hernández [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2022. Vol. 105(2). P. 43–51. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21071>
4. **Wijmans, C. M.** Brownian dynamics simulations of filled particle gels / C. M. Wijmans, E. Dickinson // *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*. 1998. Vol. 94(1). P. 129–137. <https://doi.org/10.1039/A706632E>
5. **Horne, D. S.** Rennet-induced coagulation of milk / D. S. Horne, J. A. Lucey // *Cheese*. Ed. by P. L. H. McSweeney [et al.] – Academic Press, 2017. – P. 115–143. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417012-4.00005-3>
6. **Smykov, I. T.** Kinetics of milk gelation. Part I. Coagulation mechanism / I. T. Smykov // *Rheology: Principles, Applications and Environmental Impacts*. Ed. by Evgeny Karpushkin. – Nova Science Publ, 2015. P. 65–82.
7. **Velegol, D.** Origins of concentration gradients for diffusiophoresis / D. Velegol [et al.] // *Soft Matter*. 2016. Vol. 12(21). P. 4686–4703. <https://doi.org/10.1039/C6SM00052E>
8. **Marangoni, C.** Sull'espansione delle gocce di un liquido galleggianti sulla superficie di altro liquid / C. Marangoni. – Fratelli Fusi, 1865. – 66 p.
9. **Birkhoff, G.** *Hydrodynamics* / G. Birkhoff. – Princeton University Press, 1960. – 632 p. <https://doi.org/10.1515/9781400877775>
10. **Chandrapala, J.** Ultrasound processing of milk and dairy products / J. Chandrapala // *Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry*. Ed by. M Ashokkumar – Springer, 2015. – P. 1–34. https://doi.org/10.1007/978-981-287-470-2_66-1.
11. **Thilakarathna, R. C. N.** Impact of ultra-sonication on gelation process in dairy products incorporated with polysaccharides / R. C. N. Thilakarathna, G. D. M. P. Madhusankha // *Food and Nutrition Sciences*. 2020. Vol. 11(5). Art. no. 115024. <https://doi.org/10.4236/fns.2020.115024>
12. **Bangar, S. P.** Ultrasound-assisted modification of gelation properties of proteins: A review / S. P. Bangar [et al.] // *Journal of Texture Studies*. 2022. Vol. 53(6). P. 763–774. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12674>
13. **Hou, W.** Impact of ultrasonic and heat treatments on the physicochemical properties and rennet-induced coagulation characteristics of milk from various species / W. Hou [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2024. Vol. 111. Art. no. 107084. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.107084>
14. **Hammam, A. R. A.** Effect of ultrasound intensity on the functional characteristics of rennet-coagulated skim milk / A. R. A. Hammam [et al.] // *Journal of Food Process Engineering*. 2021. Vol. 44(9). Art. no. e13800. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13800>
15. **Wang, L.** High-pressure structuring of milk protein concentrate: Effect of pH and calcium / L. Wang, C. I. Moraru // *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104(4). P. 4074–4083. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19483>
16. **Wang, L.** Structure and shelf stability of milk protein gels created by pressure-assisted enzymatic gelation / L. Wang, C. I. Moraru // *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104(4). P. 3970–3979. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19484>
17. **Muñoz, M.** Effect of high hydrostatic pressure processing on the rennet coagulation kinetics and physicochemical properties of sheep milk rennet-induced gels / M. Muñoz. [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2023. Vol. 106(4). P. 2314–2325. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-21879>
18. **Rajeswari, K.** Protein gels influence of moderate electric field on its structure, aggregation, and gelation properties // A recent update / K. Rajeswari, M. T. Anand, R. Mahendran // *ACS Food Science Technology*. 2024. Vol. 4(9). P. 1979–1996. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsfoodscitech.4c00135>
19. **Soltanzadeh, M.** Quality aspects and safety of pulsed electric field (PEF) processing on dairy products: a comprehensive review / M. Soltanzadeh [et al.] // *Food Reviews International*. 2020. Vol. 38(1). P. 96–117. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1849273>
20. **De Graaf, J.** Hydrodynamics strongly affect the dynamics of colloidal gelation but not gel structure / J. De Graaf [et al.] // *Soft Matter*. 2018. Vol. 15. P. 10–16. <https://doi.org/10.1039/C8SM01611A>
21. **Varga, Z.** Normal modes of weak colloidal gels / Z. Varga, J. W. Swan // *Physical Review E*. 2018. Vol. 97. Art. no. 012608. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.012608>
22. **Varga, Z.** The hydrodynamics of colloidal gelation / Z. Varga, G. Wang, J. W. Swan // *Soft Matter*. 2015. Vol. 11(46). P. 9009–9019. <https://doi.org/10.1039/c5sm01414j>
23. **Torre, K. W.** Hydrodynamic lubrication in colloidal gels / K. W. Torre, J. de Graaf // *Soft Matter*. 2023. Vol. 19. P. 7388–7398. <https://doi.org/10.1039/D3SM00784G>
24. **Colombo, G.** Kinetic pathways to gelation and effects of flow-induced structuring in depletion gels / G. Colombo [et al.] // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2025. Vol. 64 Art. no. 4581. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c03873>
25. **Bouthier, L.-V.** Three length-scales colloidal gels: The clusters of clusters versus the interpenetrating clusters approach / L.-V. Bouthier, T. Gibaud // *Journal of Rheology*. 2023. Vol. 67(3). P. 621–633. <https://doi.org/10.1122/8.0000595>
26. **Varga, Z.** Normal modes of weak colloidal gels / Z. Varga, J. W. Swan // *Physical Review E*. 2018. Vol. 97. Art. no. 012608. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.012608>
27. **Hori, T.** Objective measurements of the process of curd formation during rennet treatment of milks by the hot wire method / T. Hori // *Journal of Food Science*. 1985. Vol. 50. P. 911–917. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1985.tb12978.x>
28. **Goncalves, B. J.** Thermal conductivity as influenced by the temperature and apparent viscosity of dairy products / B. J. Goncalves [et al.] // *Journal of Dairy Science*. 2017. Vol. 100. P. 3513–3525. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12051>
29. **Smykov, I. T.** Milk curd cutting time determination in cheesemaking / I. T. Smykov // *Food systems*. 2018. Vol. 1. P. 16–20. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2018-1-2-12-20>
30. **Milne-Thomson, L. M.** *Theoretical Hydrodynamics* / L. M. Milne-Thomson. – Courier Corporation, 1996. – 743 p.
31. **Méhauté, B.** *An introduction to hydrodynamics and water waves* / B. Méhauté. – Springer Berlin, 2013. – 323 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-85567-2>
32. **Ландау, Л. Д.** *Гидродинамика* / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2015. – 728 с.