

<https://doi.org/10.67290/2026.dw.8>

УДК 637.136.5

**Игорь Тимофеевич Смыков**, д-р техн. наук

ВНИИМС – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, г. Углич

## **ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА СЫЧУЖНУЮ КОАГУЛЯЦИЮ МОЛОКА**

*Основой производства сычужного сыра является получение молочного геля из ферментированного молока, находящегося в покое, разрезка геля, перемешивание и получение сырного зерна. В этом процессе ключевым моментом является коагуляция молока в состоянии длительного покоя, сопровождающаяся рядом последующих операций и затратами определённого времени и энергии, что не устраивает крупных производителей сыра. Проведённые исследования показали возможность исключения стадий разрезки геля, перемешивания и получения сырного зерна при производстве сыра за счёт возбуждения низкочастотных колебаний молока в процессе гелеобразования. Показано, что при соответствующем выборе частоты колебаний, с учетом размера и формы сыродельной ванны, можно получить сырное зерно и сырный пласт, пригодные для дальнейшей переработки традиционными методами.*

**Ключевые слова:** молоко, коагуляция, активный гель, гидродинамика, сырное зерно, сычужный сыр

UDC 637.136.5

**Igor' Timofeevich Smykov**, Dr. Sci. (Engineering)

VNIIMS – Branch of Gorbatov Research Center for Food Systems, Uglich

## **INFLUENCE OF LOW FREQUENCY HARMONIC OSCILLATIONS ON CHYMOSIN COAGULATION OF MILK**

*The basis of producing chymosin cheese is the formation of a milk gel from fermented milk at rest, followed by cutting the gel, mixing, and obtaining cheese curd. In this process, a key stage is coagulation of milk in a state of prolonged rest, accompanied by a series of subsequent operations and certain expenditures of time and energy, which is unsatisfactory for large cheese producers. Conducted studies have shown the possibility of eliminating the stages of cutting the gel, mixing, and obtaining cheese curd in cheese production by exciting low frequency oscillations of milk during gel formation. It is shown that with an appropriate choice of oscillation frequency, taking into account the size and shape of the cheesemaking vat, it is possible to obtain cheese curd and cheese mass suitable for further processing by traditional methods.*

**Keywords:** milk, coagulation, active gel, hydrodynamics, cheese curd, chymosin cheese

Изучению процесса коагуляции молока и выявлению способов эффективного управления ферментативным гелеобразованием посвящено большое количество исследований ученых разных стран. Процесс сычужной коагуляции молока по наиболее распространенному в настоящее время мнению может быть разделен на две частично перекрывающиеся основные фазы: первичную (ферментативную), включающую гидролиз  $\kappa$ -казеина мицелл с образованием параказеина и частичную агрегацию дестабилизированных мицелл; вторичную (неферментативную) фазу агрегации, включающую полную агрегацию мицелл в единую пространственную структуру геля и её уплотнение.

В описаниях механизма ферментативной фазы гелеобразования предполагается, что молоко в это время находится в состоянии покоя, а взаимодействия между молекулами сычужного фермента и  $\kappa$ -казеином, а также межмицеллярные взаимодействия дестабилизированных мицелл происходят за счёт броуновского движения частиц [1]. Однако, как это отмечено в работе [2], при сычужном гелеобразовании в молоке кроме броуновского движения могут существовать и другие виды микротечений, влияющих на процесс гелеобразования. После удаления гликомакропептида с поверхности мицелл казеина на ней могут возникать локальные градиенты концентрации ионов (например, кальция, фосфатов) или других молекул. Это создаёт условия для диффузиофореза, который может ускорять движение мицелл в направлении градиента концентрации, способствуя их сближению и агрегации [3, 4]. Дополнительное увеличение концентрации ионов кальция (при внесении  $\text{CaCl}_2$ ) вблизи поверхности мицелл также может создавать локальные градиенты, способствующие диффузиофорезу и ускорению агрегации. Это особенно важно на начальных этапах процесса, когда мицеллы только начинают взаимодействовать друг с другом.

В ходе ферментативных реакций в молоке возникают локальные градиенты температуры или поверхностного натяжения, что может вызывать термокапиллярное движение жидкости. Этот эффект может создавать дополнительные потоки, которые способствуют перемешиванию компонентов системы и ускорению агрегации мицелл. На поверхности образующихся агрегатов при их взаимодействии также могут возникать капиллярные силы, связанные с изменением поверхностного натяжения [5, 6]. Эти силы в свою очередь могут вызывать движение агрегатов и их объединение. Капиллярные силы особенно важны в местах локальных изменений состава среды. В процессе коагуляции молока рН может локально изменяться из-за выделения продуктов ферментативной реакции (например, гликомакропептида). Это также может влиять на заряд мицелл и их взаимодействие.

Таким образом, при внесении ферментного молока свёртывающего препарата и хлористого кальция изначально пассивная биокolloидная система становится активной за счёт изменений как в мицеллах казеина, в которых начинаются биохимические реакции, так и в окружающей среде. Это приводит к возникновению различных физико-химических эффектов, которые влияют на кинетику движения мицелл, их взаимодействия и образование молочного геля.

Такая оценка движения мицелл казеина при коагуляции молока позволила выдвинуть предположение о том, что возбуждение гидродинамических колебаний в молоке при его коагуляции может существенно влиять на образование молочного сгустка.

Был проведён ряд экспериментов по изучению влияния низкочастотных гармонических вынуждающих колебаний на процесс коагуляции молока. В экспериментах по коагуляции использовалась молочная смесь, приготовленная и используемая в производственно-экспериментальном цехе ВНИИМС для текущего производства сыра.

Коагуляцию молока проводили в прямоугольном прозрачном резервуаре ёмкостью 6 литров, установленном на вибрационном столе, совершающем гармонические колебания в плавно изменяющемся диапазоне частот (0,5–5,0) Гц с амплитудой колебаний 8 мм.

Результаты предварительных исследований показали, что вынуждающие колебания существенно влияют на состояние молока находящегося в резервуаре, вызывая ряд эффектов. Если частота вынуждающих колебаний совпадает с одной из собственных частот колебаний молока в резервуаре, это может привести к резонансу. В результате амплитуда колебаний молока резко увеличивается. Если частота внешних воздействий не совпадает с собственными частотами, то вынуждающие колебания могут вызывать демпфирование колебаний молока, т.е. привести к уменьшению амплитуды колебаний. При достаточно сильных внешних колебаниях могут возникать нелинейные эффекты, такие как образование волн или даже турбулентность и плескание молока в резервуаре. Внешние вынуждающие колебания могут также вызывать сложные гидродинамические взаимодействия между коллоидными компонентами молока, что, в свою очередь, может привести к изменению характера колебаний.

При проведении экспериментальных исследований молочную смесь, непосредственно после внесения молокосвёртывающего препарата заливали в экспериментальный резервуар и сразу же включали вынуждающие колебания определённой частоты. Одновременно проводили фото- и видео-фиксацию происходящего процесса в боковой проекции.

Определено, что в начале процесса (не доходя до гипотетической гель-точки) в молочной смеси образуется множество трудноразличимых очень мелких агрегатов мицелл казеина размерами менее одного миллиметра. Постепенно размеры агрегатов увеличиваются, они объединяются, формируя первичное сырное зерно. На рисунке 1 приведена фотография, иллюстрирующая образование сырного зерна на начальном этапе обработки.



Рисунок 1. Образование сырного зерна на начальном этапе коагуляции

В дальнейшем внешние вынуждающие колебания одновременно стимулируют увеличение размеров сырного зерна, его уплотнение и оседание на дно резервуара. После остановки вынуждающих колебаний в заключительной части процесса обработки на дне резервуара начинает образовываться пласт сырного зерна (рисунок 2).



**Рисунок 2.** Начальная стадия формирования пласта сырного зерна

После окончания коагуляции молока в экспериментах и некоторой выдержки сыворотку сливали и проводили ее анализ 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 1.

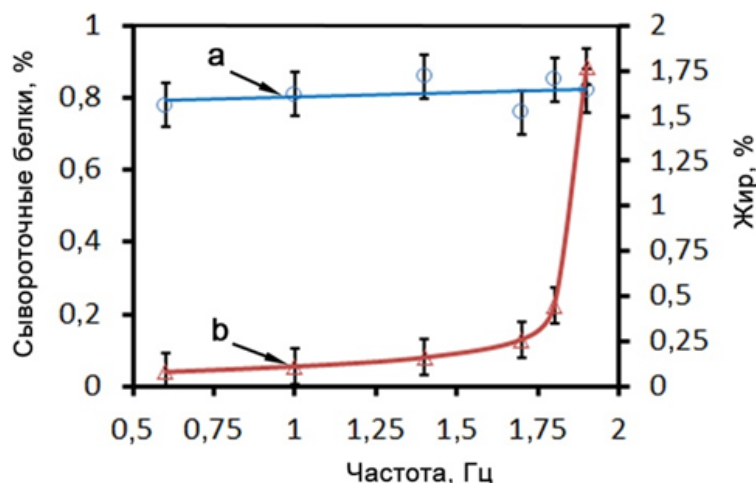
*Таблица 1*

**Содержание белка и жира в сыворотке, свойства текстуры пласта, полученные при различных частотах колебаний**

Частота, Гц	Белок, %	Жир, %	Текстура
0,6	0,78±0,06	0,08±0,03	Дряблый
1,0	0,81±0,06	0,11±0,03	Слабо-упругий
1,4	0,86±0,06	0,16±0,03	Упругий
1,7	0,76±0,06	0,26±0,03	Упруго-зернистый
1,8	0,85±0,06	0,45±0,05	Плотный
1,9	0,82±0,06	1,77±0,07	Грубо-зернистый

Результаты, приведённые в таблице 1, 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 составило 0,08 %, что значительно ниже характерного для этого вида сыров значения 0,4 % и вызывает осторожный оптимизм. Но при более высоких частотах, близких к частоте резонанса, отход жира в сыворотку

достигает недопустимых 2 %, что объясняется излишне интенсивными колебаниями, вызывающими плескание, разрушение структуры образующегося сырного зерна и отделение жира. Графики полученных зависимостей представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3.** Содержание белка (а) и жира (б) в сыворотке в зависимости от частоты колебаний

Сразу после удаления сыворотки поверхность полученного пласта сырного зерна фотографировали. На рисунке 4 показана фотография поверхности молочного сгустка, полученного при частоте колебаний 0,6 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.



**Рисунок 4.** Поверхность сырного сгустка, полученного при частоте колебаний 0,6 Гц, после удаления сыворотки

Рисунок 5 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 %.



**Рисунок 5.** Поверхность готового сырного зерна после удаления сыворотки

На рисунке 6 представлена фотография сырного зерна, полученного при частоте колебаний 1,8 Гц. Здесь зерно крупное, плотное, но уже чувствуется зернистость. Содержание молочного жира в сыворотке уже больше нормы – 0,45 %.



**Рисунок 6.** Поверхность сырного зерна, полученного при частоте 1,8 Гц

При меньшем увеличении фотография поверхности пласта сырного зерна, полученного при частоте 1,25 Гц после его самопрессования и переворачивания, показана на рисунке 7. Этот вариант имеет все признаки готовности пласта к его дальнейшей обработке по общепринятой технологии и выработке товарного сыра.



**Рисунок 7.** Поверхность готового пласта сырного зерна

В заключительной части исследований был выработан экспериментальный образец полутвердого сыра из пласта, полученного в экспериментальном резервуаре при воздействии вынуждающих колебаний на частоте 1,25 Гц. Экспериментальный образец сыра прошёл созревание в течение 60 суток. На рисунке 8 показана его фотография в разрезе.



**Рисунок 8.** Экспериментальный сыр после 60 суток созревания

Таким образом, воздействие низкочастотных гармонических колебаний на молочную смесь в процессе сычужного свертывания позволило исключить операции получения молочного сгустка, его разрезки, перемешивания и формирования сырного зерна.

Как показали эксперименты, исключение традиционных технологических операций при получении сырного зерна в условиях вынужденных колебаний молока сокращает временной цикл производства сыра. Массовая доля молочного жира в подсырной сыворотке была снижена с обычных 0,4% до 0,1% без дополнительного отхода белка в сыворотку.

#### **Список использованной литературы:**

1. **Horne, D.S.** Rennet-Induced Coagulation of Milk / D.S. Horne, J.A. Lucey // In book: Cheese. Elsevier Ltd., 2017. pp.115–143. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417012-4.00005-3>
2. **Smykov, I.T.** Kinetics of milk gelation. Part I. Coagulation mechanism / I.T. Smykov // In book: Rheology: Principles, Applications and Environmental Impacts. New York: Nova Science Publ. 2015, pp. 65–82.
3. **Velegol, D.** Origins of concentration gradients for diffusiophoresis. / D.Velegol, A.Garg, R.Guha, A.Kar, M.Kumar // Soft Matter, 2016. 12(21). P. 4686–4703.
4. **Castellini, S.** Taming the diffusiophoretic convective instability in colloidal suspensions. / S. Castellini, C. Anzivino, C. Marietti, M. Carpineti, Zaccon, A. Vailati, A. // Soft Matter. 2025. 21. P. 2578–2585. <https://doi.org/10.1039/D4SM01432D>
5. **Rongy, L.** Steady Marangoni flow traveling with chemical fronts. / L. Rongy, A. De Wit // Journal of Chemical Physics. 2006. 124(16). P.164705. <https://doi.org/10.1063/1.2186313>
6. **Al-Muzaiqer, M.A.** Transport and assembling microparticles via Marangoni flows in heating and cooling modes. / M.A. Al-Muzaiqer, N.A. Ivanova, V.M. Fliagin, P.V. Lebedev-Stepanov // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2021. 621. P. 126550. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126550>