

УДК/UDC 637.5.02

DOI: 10.21323/2618-9771-2018-1-2-12-20

Оригинальная научная статья

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ГОТОВНОСТИ МОЛОЧНОГО СГУСТКА К РАЗРЕЗКЕ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СЫРОВ

СМЫКОВ И.Т.

Всероссийский научно-исследовательский институт маслоседеления и сыроделия — филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, Углич, Ярославская область, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

молоко, гель-точка, молочный сгусток, момент разрезки, сыр.

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты производственно-экспериментальных исследований использования метода горячей проволоки, реализованного на стандартных элементах средств автоматизации, для он-лайн определения готовности молочного сгустка к разрезке при производстве сыров. Определены значения модуля упругости в момент готовности молочного сгустка к разрезке для различных видов сыров. Проведена статистическая обработка результатов экспериментальных исследований. Показано, что среднее значение модуля упругости в этот момент составляет 1,68 усл. ед., а стандартное отклонение составляет 0,017 усл. ед. Выполнены исследования для оценки влияния вида ферментного препарата на свойства молочного сгустка и точность определения момента готовности к разрезке молочного сгустка, полученного с их использованием. Установлено, что значение модуля упругости, характерное для момента готовности молочного сгустка к разрезке, для каждого вида ферментного препарата будет разным. Среднее значение модуля упругости сгустка в момент готовности к разрезке при применении различных видов ферментных препаратов может изменяться от 1,5 до 1,95 усл. ед., но является постоянным значением для каждого из них. Исследования показали, что метод горячей проволоки может быть использован для механизации и автоматизации промышленного производственного процесса.

The Original Scientific Article

MILK CURD CUTTING TIME DETERMINATION IN CHEESEMAKING

Igor T. Smykov

All-Russian Scientific Research Institute of Butter-and Cheese-making — Branch of V. M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of RAS, Uglich, Yaroslavl Region, Russia

KEY WORDS:

milk, gel-point, milk curd, cutting point, cheese.

ABSTRACT

The article presents the results of manufacture and experimental studies of the use of hot wire method, implemented on standard elements of automation equipment, for online determination of milk curd readiness to cutting in the cheesemaking process. The values of the elastic modulus for different types of cheeses at the moment of milk curd readiness to cutting are determined. The statistical processing of the results of experimental studies was carried out. It is shown that the average value of the elastic modulus at this moment is 1.68 c.u., and the standard deviation is 0.017 c.u. The investigations have been performed to evaluate the effect of the type of enzyme preparation on the milk curd properties and the accuracy of determining the moment of milk curd readiness to cutting, obtained with their use. It is established that the value of the elastic modulus, specific for the moment of milk curd readiness to cutting, will be different for each type of enzyme preparation. The average value of the elastic modulus of the curd at the moment of its readiness to cutting with the use of different types of enzyme preparations can vary from 1.5 to 1.95 c.u., but it is a constant value for each of them. The researches showed that the hot wire method could be used for mechanization and automatization of the industrial manufacture process.

1. Введение

Одним из ключевых моментов при производстве сыров является определение момента готовности молочного сгустка к разрезке. Точное определение этого момента обеспечивает не только заданные качественные показатели готового сыра, но и максимальное использование компонентов молока, повышающее выход готовой продукции.

К настоящему времени известно большое количество самых разнообразных физических методов контроля реологических свойств молока, к которым, в первую очередь, относятся вязкость, модуль упругости и модуль потерь. Для контроля кинетики этих свойств в процессе гелеобразования в молоке разработан и используется ряд промышленных приборов, принцип действия которых основан на этих методах [1]. Соответственно существует возможность достаточно точного определения момента готовности молочного сгустка к разрезке, однако, на практике, основная масса су-

ществующих приборов непригодна для использования в цеховых условиях. К основным причинам, ограничивающим их применение в он-лайн контроле процесса гелеобразования в сыродельной ванне, является громоздкость, сложности в стерилизации, разрушение сгустка в процессе контроля, высокая стоимость. Поэтому на практике до сих пор широко используется субъективный, органолептический метод определения готовности молочного сгустка к разрезке. Для этого используется нож, шпатель, тарелка или просто пальпация. В любом случае сначала делают разрез сгустка, затем приподнимают его и если сгусток даёт раскол с нерасплывающимися острыми краями, а выделяющаяся прозрачная сыворотка имеет светло-зелёный оттенок, то сгусток готов к разрезке. Если это не так, пробу повторяют через некоторое время. Очевидно, что этот метод весьма субъективен и требует от мастера-сыродела внимания и большого опыта. Вместе с тем если сгусток разрезать раньше времени, то уве-

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Смыков И.Т. Определение момента готовности молочного сгустка к разрезке при производстве сыров. *Пищевые системы*. 2018;1(2):12-20. DOI: 10.21323/2618-9771-2018-1-2-12-20

FOR CITATION: Smykov I.T. Milk curd cutting time determination in cheesemaking. *Food systems*. 2018; 1(2):12-20. (In Russ.). DOI: 10.21323/2618-9771-2018-1-2-12-20

личиваются потери белка и жира с отходящей сывороткой, а если позже, то снижается скорость синерезиса, и ухудшаются условия постановки сырного зерна и качество готового продукта.

Современные и повсеместные механизация, автоматизация и роботизация производственных процессов требуют исключения ручных операций, замены их на точные, надёжные и эффективные устройства. Поэтому многие исследователи и инженеры прилагают значительные усилия для решения этой проблемы [2]. Так принцип действия установки «Gelograph NT», предназначенной для использования в производственных условиях, основан на измерении поглощения и рассеяния света в коагулирующем молоке. Для контроля используется свет в ближнем инфракрасном диапазоне (850 нм), который, в зависимости от состояния структуры, поглощается или рассеивается. Измерения производят в термостатированной с помощью водяной бани ёмкости при 32 °С. В молоко добавляют молокосвёртывающий фермент, хорошо перемешивают и сразу же устанавливают в измерительную систему. Результаты измерений, в режиме он-лайн, передают через интерфейс связи на ПК. Система предусматривает также подключение исполнительных механизмов, включённых в технологический процесс изготовления сыра. Имеется также её версия под названием «Optigraph», отличительной особенностью которой является возможность одновременной работы с 10 каналами. Существенным недостатком этой установки является необходимость отбора проб для анализа. Установка не предполагает вынесения измерительного преобразователя непосредственно в сыродельную ванну. Соответственно, такой метод анализа не даёт полной информации о предполагаемом моменте разрезки сгустка в процессе производства.

Установка «TxPro» предназначена для контроля процесса гелеобразования в молоке в производственных условиях. Принцип её действия так же, как и в предыдущем случае, заключается в измерении интенсивности света, проходящего через исследуемый объект. Но здесь длина световой волны, при которой происходит измерения, лежит в диапазоне излучения 680 нм. Сам датчик безопасен для применения в пищевой промышленности, а его конструктивные особенности предполагают возможность использования при он-лайн мониторинге. Точность имеющихся датчиков этой установки является удовлетворительной только в узком диапазоне. Этот недостаток отчасти проявляется из-за ограниченного полезного диапазона светочувствительных элементов, используемых в датчиках. Корреляция между выходным сигналом светочувствительного элемента и интенсивностью излучения принятого света может ухудшаться, когда превышает уровень насыщения. Соответственно, для интенсивности ниже пороговой чувствительности светочувствительного элемента на сигнал могут накладываться помехи, и таким образом, будет невозможно, или, по меньшей мере, трудно его определить. Таким образом, понятно, что имеющиеся датчики имеют некоторые ограничения.

Устройство «CoAguLite» используется на сыродельных предприятиях для контроля процесса гелеобразования в молоке и также представляет собой оптический датчик с стандартным токовым выходом от 4 до 20 мА. Использование датчика обеспечивает определение момента разрезки молочного сгустка в процессе производства сыра. Оптический датчик «CoAguLite» регистрирует отражённый от частиц молока свет в ближнем инфракрасном диапазоне (длина волны 880 нм) во время ферментативного свертывания молока. Свет от ИК-светодиода, передается в молоко посредством оптического волокна, и свет, отраженный от молока поступает через соседнее волокно на фотоэлектрический детек-

тор. Коэффициент отражения сигнала несет информацию об изменениях физических размеров и свойств мицелл казеина в процессе ферментативной коагуляции. Дальнейший сигнал подвергается сложной математической обработке, что предполагает использование быстродействующих средств обработки сигнала. Точность измерения, определяется через значение дисперсии и, как установлено, составляет от 1,1 до 1,8%. (рассчитывается путем деления стандартного отклонения на среднее значение). Это означает, что можно предсказать момент разрезки со стандартным отклонением около 30 секунд.

Несмотря на то, что оптические методы мониторинга процесса гелеобразования известны и используются уже несколько десятков лет, их совершенствование продолжается. Так в работе [3] предложено достаточно сложное оптическое устройство для ин-лайн контроля процесса образования молочного сгустка в сыродельной ванне. В этом устройстве используется известная корреляция обратного рассеяния ближнего инфракрасного излучения с модулем упругости во время коагуляции молока. Управление режимом работы устройства и обработка полученных данных осуществляется с помощью специализированного программного продукта.

Тем не менее все измерительные устройства, действующие на оптическом методе, обладают общим недостатком — априори необходимо, чтобы поверхности источника излучения и его приемника были максимально чистыми и гладкими, так как оседающие из окружающей среды на их поверхность микрочастицы различной природы могут загрязнять и ослаблять прохождение света в среде и искажать получаемые результаты.

Для он-лайн контроля процесса гелеобразования в производстве используются также устройства, в которых первичным измерительным преобразователем является датчик «Sofraser». Принцип действия датчика «Sofraser» механический и основан на изменении амплитуды колебаний зонда в зависимости от вязкоупругих свойств контактирующей с зондом среды. Вибрационный зонд работает в поперечном, по отношению к плоскости установки, положении и колеблется с постоянной резонансной частотой 280 Гц (модель 6002 MIVI). Амплитуда вибраций чувствительного зонда уменьшается с увеличением вязкости, что позволяет контролировать процесс гелеобразования в молоке. Датчик может использоваться в стандартных и особых санитарно-гигиенических условиях технологического процесса. В корпус датчика интегрирован датчик температуры, компенсирующий её влияние на результаты измерений. Датчик отличается высокой надёжностью, не имеет изнашивающихся частей, а также практически не требует технического обслуживания. Однако его существенным недостатком является частичное механическое разрушение контролируемого продукта в процессе измерения [4] и, соответственно, искажение результатов измерений.

В работе [5] предлагается неразрушающий метод, использующий ультразвуковое импульсное эхо, для мониторинга в реальном времени акустического импеданса, коррелирующего с реологическими свойствами молочного геля. Эволюция акустического импеданса проходит через две фазы: ферментативную фазу и фазу агрегации. Точка перехода между этими двумя фазами определяет время коагуляции молока. Экспериментальные результаты показывают, что предлагаемый метод определяет время коагуляции эффективнее, и более просто по сравнению с известными работами, в которых для определения времени коагуляции молока использовалась фазовая скорость.

Для он-лайн и ин-лайн контроля процесса гелеобразования в сыродельной ванне и точного определения момента

готовности молочного сгустка к разрезке также используются измерительные системы действующие на основе метода горячей проволоки (Hot-Wire method). Это косвенный метод, основанный на измерении теплопроводности молочного геля, которая существенно изменяется в процессе гелеобразования. Этот метод измерения теплопроводности различных объектов известен очень давно, а для контроля гелеобразования в молоке предложен в работе [6] и развит в работах [7,8]. Корреляция между теплопроводностью молочного сгустка, определяемой по разности температур между двумя датчиками, один из которых подогревается, и модулем упругости сгустка была выявлена в работе [6], а в работах [1,9] показана их прямая зависимость. В работе [10] определены численные значения изменения теплопроводности молока при его коагуляции и показана взаимосвязь между теплопроводностью и реологическими свойствами молока.

Метод прост в практической реализации с использованием широко распространенных стандартных компонентов и отвечает всем требованиям, необходимым для автоматизации производственных процессов. Опубликован ряд работ, посвященных исследованиям возможности и целесообразности использования этого метода для определения момента готовности молочного сгустка к разрезке, а также возникающим при этом проблемам и ограничениям. Так в работах [8,9,10] отмечается, что этот метод позволяет определить с высокой точностью положение геле-точки и момента готовности молочного сгустка к разрезке при различных дозах вносимого ферментного препарата.

Целью этой работы является исследование точности определения момента готовности молочного сгустка к разрезке в производственных условиях с использованием устройства, принцип действия которого основан на методе горячей проволоки (Hot Wire method) при коагуляции молока различными видами молокосвертывающих ферментных препаратов.

2. Материалы и методы

Исследования проводили в экспериментально-производственном цехе Всероссийского научно-исследовательского института маслоседеления и сыроделия (ВНИИМС), в сыродельной ванне объемом 300 литров при производстве товарных полутвёрдых сыров «Российский», «Костромской» и «Голландский». Всего было проанализировано 38 выработок.

В исследованиях использовали коровье молоко одного поставщика-производителя — ООО «АгриВолга», Ярославская область, Угличский район, д. Бурмасово.

При производстве сыров применяли жидкие закваски на основе поливидовых бактериальных концентратов «Биоантибут» и «БК-Углич-5А» производства ФГУП «Экспериментальная биофабрика», г. Углич, Россия.

Для исследований использовали технологические вспомогательные средства российского и зарубежного производства:

1. «Фермент сычужный 90», Экстра. (химозин — 90%, пепсин говяжий — 10%), МСА — 100000. Завод эндокринных ферментов, Москва, Зеленоград, Россия;
2. «Fromase 2200 TL Granulate», представляющий собой кислую протеазу, полученную из отборного штамма *Rhizotomicor miehei*. МСА — 325000. Производство DSM Food Specialties Dairy Ingredients. France.
3. «Naturen® Stamix 1150 NB» (химозин — 50%, пепсин — 50%), полученный путем экстракции из четвертого отдела желудка телят и/или взрослых коров, МСА — 163000. Производство Chr. Hansen Holding A/S, Danmark.

Все использованные молокосвертывающие ферментные препараты имеют государственную регистрацию и по каче-

ству и безопасности соответствуют Федеральному закону Российской Федерации № 88-ФЗ «Технический регламент на молоко и молочную продукцию».

Момент готовности молочного сгустка к разрезке определял мастер — сыродел производственного цеха традиционным органолептическим методом по раскалыванию сгустка. Процесс гелеобразования молока в сыродельной ванне и определение момента готовности молочного сгустка к разрезке контролировали он-лайн по изменению его теплопроводности методом горячей проволоки. Контроль гелеобразования проводили непрерывно, при регистрации результатов наблюдений с интервалом 2 сек.

Статистическую обработку полученных результатов проводили в программе EXCEL, при уровне значимости 0,05.

3. Результаты и обсуждение

При подготовке к проведению исследований была разработана и собрана автоматизированная система он-лайн контроля процесса гелеобразования и определения момента готовности молочного сгустка к разрезке. Блок-схема этой измерительной системы представлена на Рис. 1. Основой системы он-лайн контроля процесса гелеобразования является универсальный микропроцессорный двухканальный измеритель-регулятор (4). Подобные измерители-регуляторы выпускаются российскими и зарубежными фирмами и широко используются в промышленности для различных целей. К входу измерителя-регулятора подключены два датчика измерения температуры (2 и 3), в качестве которых использованы термометры сопротивления. Датчик температуры (2) — стандартного типа с использованием одного чувствительного элемента. Датчик температуры (3) содержит два чувствительных элемента. Один из его чувствительных элементов используется по прямому назначению для измерения температуры, а другой — как подогреватель, питаемый напряжением от стандартного блока питания (5). Корпуса датчиков температуры выполнены из пищевой нержавеющей стали и могут быть помещены непосредственно в сыродельную ванну (1). Исполнительное устройство

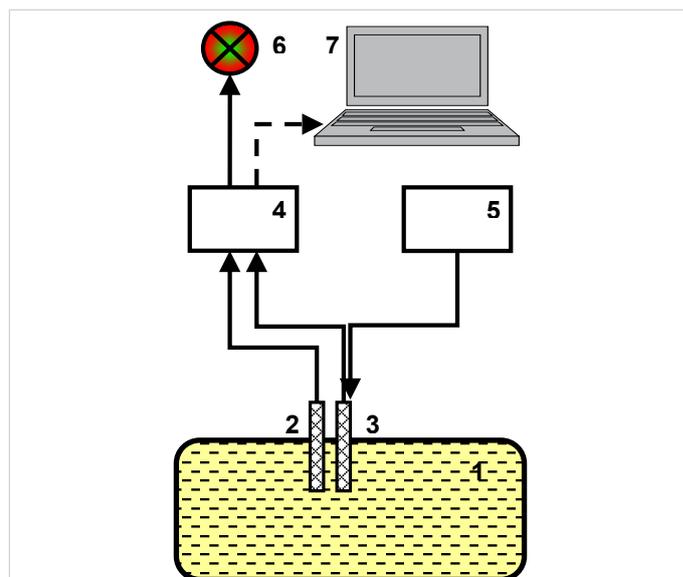


Рис. 1. Блок-схема автоматизированной системы он-лайн контроля процесса гелеобразования: 1 — сыродельная ванна; 2 — контрольный датчик температуры молока в ванне; 3 — подогреваемый датчик температуры молока; 4 — двухканальный измеритель-регулятор; 5 — блок питания нагревательного элемента; 6 — сигнализатор готовности молочного сгустка к разрезке; 7 — компьютер регистрации режимов процесса и управления работой сыродельной ванны

измерителя-регулятора подключено к оптико-акустической сигнализации (6) момента готовности молочного сгустка в сыродельной ванне к разрезке. Информация о разности температур между датчиками, пропорциональная изменению теплопроводности молочного сгустка, коррелирующей с его модулем упругости, в цифровом виде передаётся от измерителя — регулятора по линии связи RS-485 на персональный компьютер.

Монтаж и пуск в эксплуатацию этой автоматизированной системы в экспериментальном цехе отдела сыроделия ВНИИМС позволили зарегистрировать кинетику изменения теплопроводности (модуля упругости) молочного сгустка в процессе гелеобразования в реальных условиях непосредственно в производственных сыродельных ваннах при выработке сыров. Выработку проводили по типовым технологическим процессам производства товарных полутвёрдых сыров «Российский», «Костромской» и «Голландский» с использованием для свёртывания молока одного и того же ферментного препарата «Фермент сычужный 90», Экстра. Для каждой выработки сыра дозу вносимого ферментного препарата рассчитывали индивидуально.

На Рис. 2,3,4 представлены графики изменений модуля упругости молочного сгустка в сыродельной ванне в конечной стадии его формирования до момента разрезки, сгруппированные по видам сыров. Конечные точки графиков соответствуют моментам готовности сгустка к разрезке, определяемым органолептически мастером-сыроделом цеха и в дальнейшем использованы для оценки точностных возможностей измерительной системы.

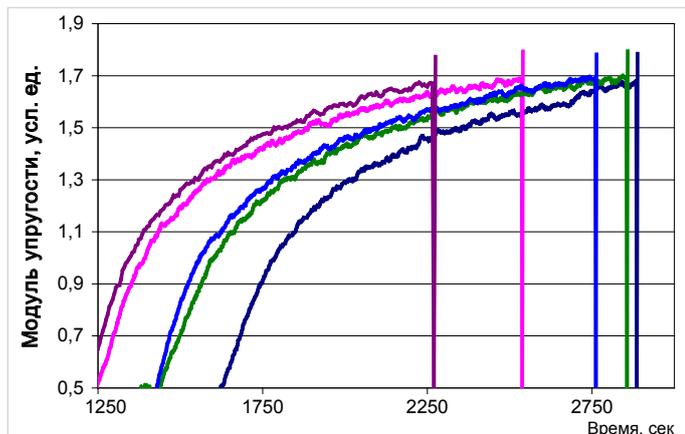


Рис. 2. Изменения модуля упругости молочного сгустка и моменты его разрезки в процессе производства сыра «Голландский»

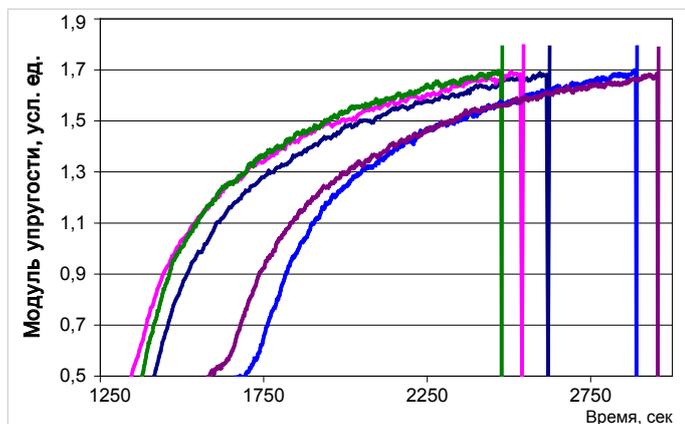


Рис. 3. Изменения модуля упругости молочного сгустка и моменты его разрезки в процессе производства сыра «Российский»

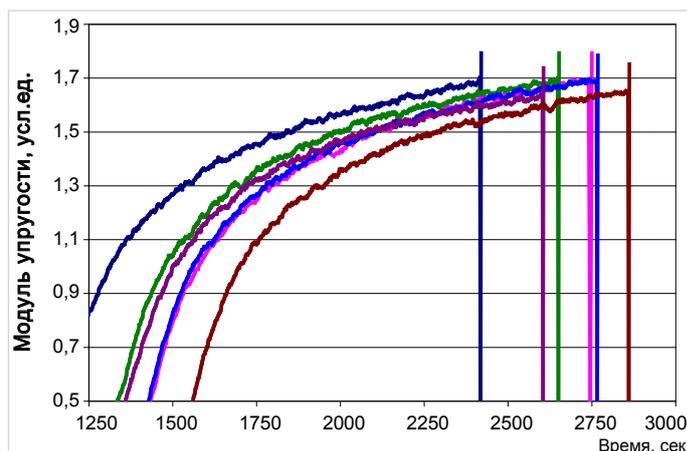


Рис. 4. Изменения модуля упругости молочного сгустка и моменты его разрезки в процессе производства сыра «Костромской»

В связи с тем, что свойства используемого в сыроделии молока, в том числе его способность к образованию сгустка, никогда не остаются постоянными и зависят от многих факторов, доза вносимого ферментного препарата при каждой выработке сыра рассчитывается индивидуально, поэтому время коагуляции молока было различным и эти различия достигали 5–7 минут. Время от момента внесения фермента до момента разрезки также различалось на 10–12 мин, что не позволяет использовать в производственных условиях временные параметры для прогнозирования момента разрезки.

Из полученных экспериментальных данных, а также из графиков Рис. 2,3,4 видно, что значения модуля упругости сгустка в момент его реальной разрезки в производственных условиях близки во всех выработках. Результаты статистического анализа модуля упругости сгустка в момент его разрезки приведены в Табл. 1.

Таблица 1

Статистический анализ значений модуля упругости сгустка при его разрезке

Сыр	«Голландский»	«Российский»	«Костромской»	Среднее по всем выработкам
Ср. значение, у.е.	1,683	1,693	1,677	1,684
Ст. отклонение, у.е.	0,007	0,007	0,026	0,017
Коэф. вариации, %	0,43	0,39	1,53	1,02

Расчёты показали, что в данном случае, для использованной системы, среднее значение модуля упругости составляет 1,684 усл. ед., стандартное отклонение при этом равно 0,017 усл. ед. Полученный результат может быть признан удовлетворительным, т.к. погрешность срабатывания исполнительного устройства использованного измерителя — регулятора, по паспортным данным, составляет 0,01 усл. ед.

Полученные результаты исследований также показали, что доза вносимого в молоко одного и того же ферментного препарата практически не влияет на точность определения готовности молочного сгустка к разрезке.

Модуль упругости молочного геля определяется и непосредственно связан с его микроструктурой [12], а достижение им определенного значения может быть использовано для определения момента разрезки молочного сгустка. Однако микроструктура молочного сгустка зависит от вида

биохимических реакций, происходящих при коагуляции. В свою очередь и теплопроводность молочного сгустка во многом определяется его микроструктурой и при одном и том же значении модуля упругости, но при разной микроструктуре теплопроводность образца может быть существенно различной.

Известно, что в настоящее время в производстве сыров используются для коагуляции молока ферментные препараты различного происхождения, обладающие похожими, но всё-таки различными биохимическими свойствами [13]. Так, например, используются различные натуральные сычужные препараты — телячьи, куриные, верблюжьи и пр; ферментные препараты грибов; препараты бактериального происхождения и ферментные препараты генетически модифицированных организмов. Очевидно, что, несмотря на то, что все они обладают хорошими молокосвёртывающими свойствами, у каждого из них есть свои особенности, влияющие на микроструктуру образующегося молочного сгустка. Соответственно, физико-химические свойства сгустка также будут иметь различия.

Для оценки влияния вида молокосвёртывающего ферментного препарата на свойства молочного сгустка и точности определения готовности молочного сгустка к разрезке, далее нами были проведены исследования с использованием ферментных препаратов «Фермент сычужный 90», «Fromase 2200 TL Granulate» и «Naturen® Stamix 1150 NB». Графические результаты этого исследования приведены на Рис. 5.

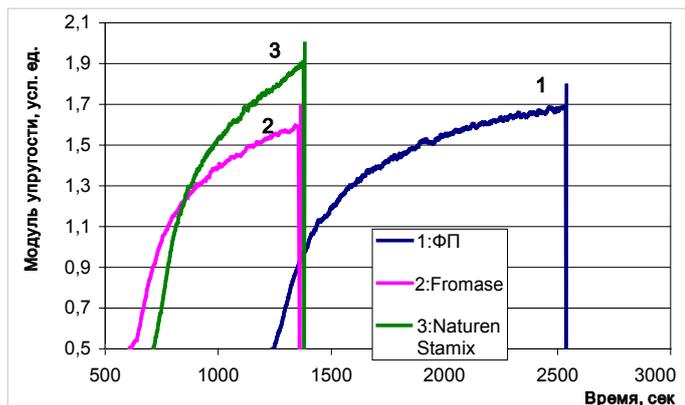


Рис. 5. Изменения модуля упругости молочного сгустка и моменты его разрезки при использовании различных ферментных препаратов в процессе производства сыра

Из полученных данных отчетливо видно, как влияет вид ферментного препарата на физическое свойство молочного сгустка — теплопроводность. Во всех экспериментах с использованием одного и того же ферментного препарата, но в разных дозах, в момент разрезки сгустка значение

его теплопроводности, коррелирующей с модулем упругости, было практически одним и тем же. При использовании ферментных препаратов других видов, внесённых в эквивалентных дозах, значения теплопроводности сгустка к моменту его разрезки отличаются на 10–15% в ту или другую сторону, что является неприемлемым с точки зрения автоматизированного определения момента готовности сгустка к разрезке. Однако, как показали дальнейшие эксперименты, различия во влиянии ферментных препаратов различных видов носят систематический характер, т.е. каждому виду препарата присуще определённое специфическое влияние. При этом у всех препаратов своя специфика, а для каждого препарата она одна и та же. Таким образом, значение модуля упругости, характерное для момента готовности молочного сгустка к разрезке, для каждого ферментного препарата будет свое, но коэффициент его вариации будет небольшим, подобно приведенному в Табл. 1, и приемлемым для его автоматического определения.

4. Выводы

Проведенные производственно-экспериментальные исследования показали, что использование метода горячей проволоки, реализованного на стандартных элементах современных средств контроля, для он-лайн определения момента готовности молочного сгустка в сыродельной ванне к разрезке, может быть эффективным решением при механизации и автоматизации производственного процесса производства сыра.

Из полученных результатов исследований можно констатировать, что точность определения готовности молочного сгустка к разрезке с помощью метода горячей проволоки вполне соответствует технологическим требованиям производства и не зависит от дозы вносимого молокосвёртывающего препарата. Вместе с тем, при наладке оборудования (его программировании) необходимо учитывать вид молокосвёртывающего препарата, используемого в производстве сыра.

Результаты проведенных исследований позволяют предположить, что разные виды молокосвёртывающих препаратов, при одной и той же расчётной дозе, коагулируют молоко по-разному, что приводит к образованию молочных сгустков с разной микроструктурой и, соответственно, разными физико-химическими свойствами. Это влияние остаётся до конца не изученным и требует дальнейших исследований.

5. Благодарность

Автор выражает глубокую благодарность опытному мастеру-сыроделу, начальнику экспериментального цеха ВНИИМС Мошкиной Н. А. за неоценимую помощь при проведении данных исследований.

1. Introduction

One of the key moments in the cheese manufacture is the determination of the moment when milk curd is ready to be cut. Precise determination of this point provides not only the specified quality indicators of finished cheese, but also the maximum use of milk components, which increases the yield of finished products.

By now, a large number of the most diverse physical methods of rheological properties of milk, which, in the first place, include viscosity, elastic modulus and loss modulus, are known. To control the kinetics of these properties during the gelation process in milk, a number of industrial devices have been developed and used, the operation principle of which is based on these meth-

ods [1]. Accordingly, there is the possibility of a sufficiently accurate determination of the moment when milk curd is ready to be cut; however, in practice most of the existing instruments are unsuitable for use in shop-floor conditions. The main reasons limiting their use in online monitoring of gelation process in a cheesemaking bath are bulkiness, complications in sterilization, curd disruption in the control process, and high cost. Therefore, in practice the subjective, organoleptic method for determining milk curd readiness to cutting is still widely used. For this purpose, knife, spatula, plate or just a palpation are used. In any case, at first, curd cutting is made, then it is lifted, and if the curd gives a split with non-deliquestent sharp edges, and clear released whey has a light green color, the curd is ready to be cut.

If this is not the case, the sampling is repeated after a while. Obviously, this method is very subjective and requires attention and a lot of experience from a master-cheesemaker. However, if the curd is cut ahead of time, then loss of protein and fat with released whey increases, and if later, the syneresis rate decreases, and the conditions for cheese grain formation and the quality of finished product deteriorate.

Modern and widespread mechanization, automatization and robotization of manufacture processes require the exclusion of manual operations, replacing them with precise, reliable and efficient devices. Therefore, many researchers and engineers are making significant efforts to solve this problem [2]. So, the principle of the «Gelograph NT» installation, intended for use in manufacturing conditions, is based on measuring the absorption and scattering of light in coagulating milk. For monitoring light is used in the near infrared range (850 nm), which, depending on the state of the structure, is absorbed or scattered. The measurements are carried out in a container that is thermostated with a water bath at 32 °C. Milk-clotting enzyme is added to milk, mixed well and immediately put in the measuring system. In the online mode the measurements results are transmitted via communication interface to the PC. The system also provides for the connection of actuators included in the technological process of cheesemaking. There is also a version called the «Optigraph», the distinguishing feature of which is the possibility of simultaneous work with 10 channels. A significant disadvantage of this system is the sampling necessity for analysis. The installation does not involve taking the measuring transducer directly to the cheesemaking bath. Accordingly, this method of analysis does not give complete information about the expected cutting point of curd during manufacture.

The «TxPro» device is designed to control the gelation process in milk under manufacturing conditions. The principle of its operation, as in the previous case, is to measure the intensity of light passing through the object under investigation. However, here the light wavelength, with which the measurement takes place, lies in range of 680 nm. The sensor itself is safe for use in the food industry, and its design features assume the possibility of using for online monitoring. The accuracy of the existing sensors of this installation is satisfactory only in a narrow range. This drawback is partly due to the limited useful range of photosensitive elements used in the sensors. The correlation between the output signal of the photosensitive element and the radiation intensity of the received light can deteriorate, when the saturation level is exceeded. Accordingly, for the intensity below the threshold sensitivity of photosensitive element, noise may be superimposed on the signal, and thus it would be impossible or at least difficult to determine it. Thus, it is understood that the available sensors have some limitations.

The «CoAguLite» device is used in cheesemaking enterprises to control the gelation process in milk and represents an optical sensor with a standard current output of 4 to 20 mA. The sensor usage ensures the cutting point detection of milk curd during the cheesemaking process. The optical sensor «CoAguLite» registers the light reflected from milk particles in the near infrared range (wavelength 880 nm) during the enzymatic coagulation of milk. The light from the IR LED is transmitted to milk through an optical fiber, and the light reflected from the milk flows through the neighboring fiber to the photoelectric detector. The reflection coefficient of the signal contains the information about changes in the physical dimensions and properties of casein micelles during enzymatic coagulation. The further signal is subjected to a complex mathematical processing, which involves the use of high-speed signal processing facilities. The measurement accuracy is determined by the variance value and it is found to be from 1.1 to 1.8% (calculated by dividing the standard deviation

by the mean value). This means that it is possible to predict the cutting point with a standard deviation of about 30 seconds.

Even though the optical methods for monitoring the gelation process are known and have been used for several decades, their improvement continues. So, in work [3] a rather complex optical device for inline monitoring of the process of formation of a milk curd in a cheesemaking bath is proposed. This device uses the known correlation of backscattering of near infrared radiation with the elastic modulus during milk coagulation. Control over the operation mode of the device and processing the received data are carried out with the help of a specialized software product.

However, all measuring devices operating on the optical method have a common drawback — a priori it is necessary that the surfaces of the radiation source and its receiver are maximally clean and smooth, since microparticles of different nature, that settle from the environment onto their surface, can pollute and attenuate the passage of light in the environment and distort the results.

For online monitoring of the gelation process in manufacture, devices, in which the primary sensor is the «Sofraser» sensor, are used as well. The principle of the «Sofraser» sensor is mechanical and based on a change in the amplitude of the probe oscillations depending on the viscoelastic properties of the environment contacting the probe. The vibration probe operates in a transverse position with respect to the installation plane and oscillates with a constant resonant frequency of 280 Hz (model 6002 MIVI). The vibration amplitude of the sensitive probe decreases with increasing viscosity, which makes it possible to control the gelation process in milk. The sensor can be used in standard and special sanitary-hygienic conditions of the technological process. The sensor housing integrates a temperature sensor that compensates for its influence on the measurement results. The sensor is highly reliable, has no wearing parts, and practically does not require maintenance. However, its significant disadvantage is the partial mechanical destruction of controlled product during the measurement [4] and, accordingly, the distortion of measurement results.

A non-destructive method using ultrasonic pulse-echo is proposed in work [5] for real-time monitoring of acoustic impedance correlating with the rheological properties of the milk gel. The evolution of the acoustic impedance passes through two phases: enzymatic phase and aggregation phase. The transition point between these two phases determines the coagulation time of the milk. The experimental results show that the proposed method determines the coagulation time more efficiently and more simply in comparison with the known studies, in which the phase velocity was used to determine the coagulation time of milk.

For online and inline monitoring of gelation process in a cheesemaking bath and accurate determination of the moment of milk curd readiness to cutting, the measuring systems operating on the basis of the hot wire method are used as well. This is an indirect method, based on measuring the thermal conductivity of milk gel, which changes significantly during gel formation. This method of measuring the thermal conductivity of various objects has been known for a long time, and to control gelation in milk it was proposed in [6] and developed in [7,8]. The correlation between the thermal conductivity of the milk curd, determined by the temperature difference between two sensors, one of which is heated, and the elastic modulus of the curd has already revealed it in work [6], and their direct proportionality is shown in works [1,9]. The numerical values of the change in the thermal conductivity of milk during its coagulation were determined in work [10], and the relation between the thermal conductivity and rheological properties of milk was shown.

The method is simple in practical implementation using widely distributed standard components and meets all the requirements necessary for automatization of manufacture processes. A number of works devoted to the research of the feasibility and expediency of using this method for determining the moment of milk curd readiness to cutting, as well as the problems and limitations that arise, were published. Therefore, in works [8,9,10] it is noted that this method allows determining with high accuracy the position of the gel-point and the moment of milk curd readiness to cutting at various doses of the injected enzyme preparation.

The purpose of this work is to investigate the accuracy of determining the moment of milk curd readiness to cutting in manufacturing conditions using a device, which operation method is based on the hot wire method, when milk is coagulated with various kinds of milk-clotting enzyme preparations.

2. Materials and methods

The research was carried out in the experimental production workshop of All-Russian Scientific Research Institute of Butter and Cheesemaking, in a 300-liter cheesemaking bath during the manufacture of semi-hard cheeses «Rossiyskiy», «Kostromskoy» and «Gollandskiy». 38 outputs were analyzed.

The investigations used cow milk from a single supplier-producer – AgriVolga LLC, Yaroslavl oblast, Uglich District, Burmasovo village. In the cheese manufacture, fluid cultures on the basis of poly biochemical concentrates «Bioantibut» and starter «BK-Uglich-5A» produced by the «Experimental biofactory», Uglich, Russia were used.

For the research, technological aids of the Russian and foreign productions were used:

1. «Enzyme rennet 90», Extra (chymosin – 90%, beef pepsin – 10%), MSA-100000. Plant of endocrine enzymes, Moscow, Zelenograd, Russia;
2. «Fromase 2200 TL Granulate», which is an acidic protease obtained from the selected strain of *Rhizomucor miehei*, MSA-325000. Production of DSM Food Specialties Dairy Ingredients, France.
3. «Naturen® Stamix 1150 NB» (chymosin – 50%, pepsin – 50%) obtained by extraction from the fourth ventricle of calves and/or adult cows, MSA-163000. Manufacture Chr. Hansen Holding A/S, Danmark

All used milk-coagulating enzymes preparations have state registration and regarding the quality and safety aspects comply with Federal Law of the Russian Federation No. 88-FZ «Technical regulations for milk and dairy products».

The moment when the milk curd was ready to be cut was determined by the master-cheesemaker of the production department with the traditional organoleptic method for splitting the curd.

The gelation process of milk in the cheesemaking bath and determining the moment of milk curd readiness to cutting were monitored online for changing its thermal conductivity by the hot wire method. Gel-processing control was carried out continuously, with the observation results recorded at an interval of 2 seconds.

Statistical processing of the results was carried out in the EXCEL program, with a significance level of 0.05.

3. Results and discussion

During preparation for the research, an automated system for online monitoring of the gelation process and determining the moment when the milk curd was ready to be cut was developed and assembled. A block diagram of this measuring system is shown in Fig. 1. The basis of the online monitoring system for the gelation process is a universal microprocessor two-channel measuring regulator (4). Such measuring regulators are manufactured by the Russian and foreign companies and widely used

in industry for various purposes. Two temperature measurement sensors (2 and 3), which were used as resistance thermometers, are connected to the input of the measuring regulator. Temperature sensor (2) is a standard type using a single sensitive element. Temperature sensor (3) contains two sensing elements. One of its sensing elements is used for its intended purpose for temperature measurement, and the other is used as a heater, powered by voltage from a standard power supply (5). The temperature sensors bodies are made of food grade stainless steel and can be placed directly in the cheesemaking bath (1). The actuating mechanism of the measuring regulator is connected to the optico-acoustic alarm (6) when the milk curd is ready in the cheesemaking bath to be cut. The information on the temperature difference between the sensors, proportional to the change in the thermal conductivity of the milk curd, correlating with its storage modulus, is digitally transmitted from the regulator via RS-485 communication line to a personal computer.

Installation and placing in service of this automated system in the experimental section of the cheesemaking department of All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking made it possible to register the kinetics of the change in the thermal conductivity (storage modulus) of the milk curd in the gelation process in actual conditions directly in the manufacture cheesemaking baths during cheesemaking process. The manufacture was carried out according to the standard technological processes of the manufacture of semi-hard cheeses «Rossiyskiy», «Kostromskoy» and «Gollandskiy», using the same enzyme preparation «Enzyme rennet 90», Extra for milk coagulation. For each cheese manufacture, the dose of the injected enzyme preparation was calculated individually.

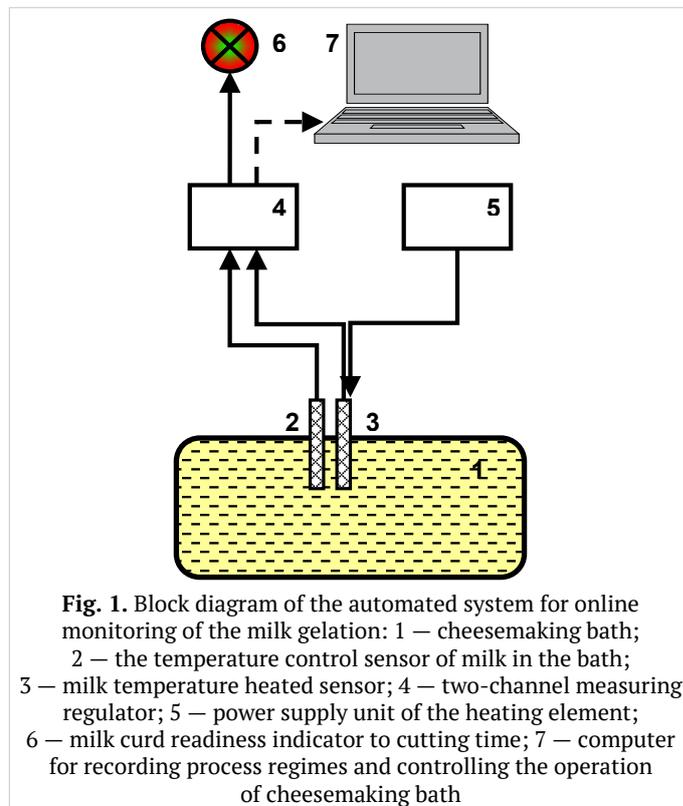


Fig. 2, 3, 4 show the changes in the storage modulus of the milk curd in the cheesemaking bath at the final stage of its formation up to the cutting point, grouped according to the types of cheeses. The end points of the graphs correspond to the moments of curd readiness to cutting, determined organoleptically by the master-cheesemaker, and subsequently used to evaluate the accuracy capabilities of the measuring system.

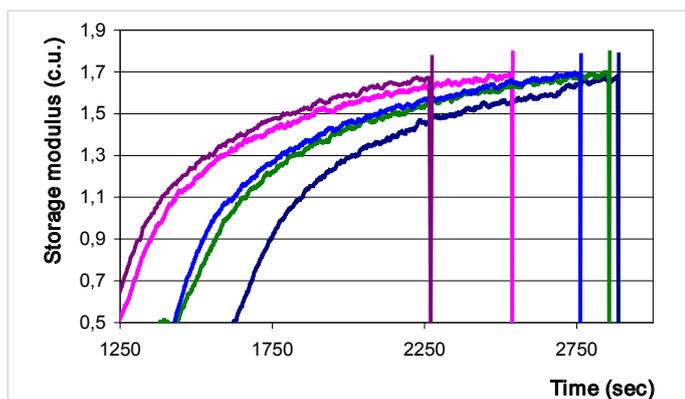


Fig. 2. Changes in the storage modulus of milk curd and in the cutting times in the manufacture process of «Gollandskiy» cheese

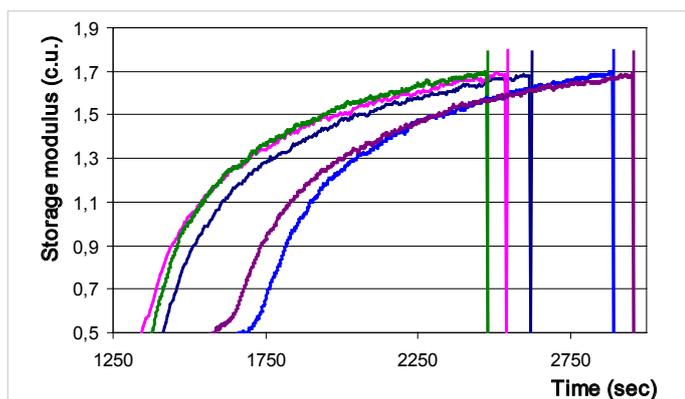


Fig. 3. Changes in the storage modulus of milk curd and in the cutting times in the manufacture process of «Rossiyskiy» cheese

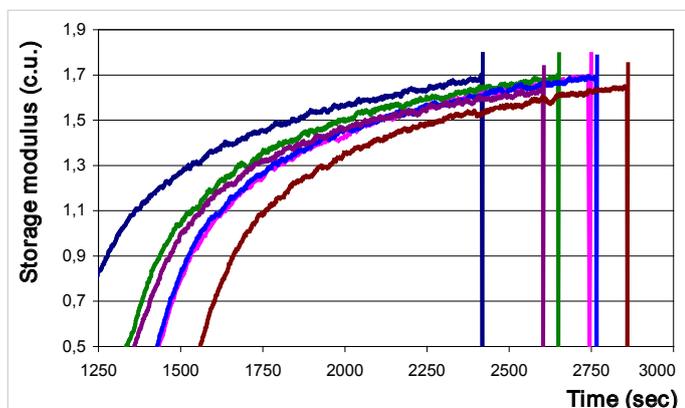


Fig. 4. Changes in the storage modulus of milk curd and in the cutting times in the manufacture process of «Kostromskoy» cheese

As the properties of the milk, used in the chesemaking process, including its ability to form a curd, never remain constant, and depend on many factors, the dose of the enzyme preparation applied at each cheese manufacture is calculated individually, so the milk coagulation time was different, and these differences reached 5–7 minutes. The time from the moment of addition of the enzyme to the cutting point also differed by 10–12 min, which does not allow using time parameters in the manufacturing conditions to predict the cutting point.

From the obtained experimental data, as well as from the graphs of Pic. 2, and 4, it can be seen that the values of the storage modulus of the curd at the moment of its actual cutting under manufacturing conditions are relatively equal in all the outputs. The results of statistical analysis of the storage modulus of the curd at the moment of its cutting are given in Table 1.

Table 1
Statistical analysis of experimental storage modulus volume of the curd at its cutting

Cheese	«Gollandskiy»	«Rossiyskiy»	«Kostromskoy»	The average value of all the outputs
Mean, c.u.	1.683	1.693	1.677	1.684
St. deviation, c.u.	0.007	0.007	0.026	0.017
Deviation coefficient, %	0.43	0.39	1.53	1.02

Calculations showed that in this case, for the used system, the average value of the storage modulus is 1.684 c.u.; the standard deviation is 0.017 c.u. The obtained result can be considered satisfactory, since the inaccuracy of operation of the actuating device of used measuring regulator is 0.01 c.u.

The obtained investigation results also have shown, that the dose of the same enzyme preparation brought in milk practically does not influence on the accuracy of definition of milk curd readiness to cutting.

The storage modulus of the milk gel is defined and directly related to its microstructure [12] and reaching a certain value, and can be used to determine the cutting point of the milk curd. However, the microstructure of the milk curd depends on the type of biochemical reactions that occur during coagulation. In its turn, the thermal conductivity of the milk curd is also largely determined by its microstructure and at the same value of storage modulus, but for different microstructures the thermal conductivity of the sample can be substantially different.

It is known that currently in the cheeses manufacture the enzyme preparations of various origins are used for milk coagulation, having similar, but still different, biochemical properties [13]. So, for example, various natural rennet preparations are used – veal, chicken, camel, etc.; enzyme preparations of fungi; preparations of bacterial origin and enzyme preparations of genetically modified organisms. Obviously, despite the fact that they all have good milk-clotting properties, each of them has its own characteristics that affect the microstructure of the resulting milk curd. Accordingly, the physicochemical properties of the curd will also differ.

To assess the effect of the type of milk-clotting enzyme preparation on the properties of the milk curd and the accuracy of determining the milk curd readiness to cutting, we further conducted studies using enzyme preparations «Enzyme rennet 90», «Fromase 2200 TL Granulate» and «Naturen® Stamix 1150 NB». The graphical results of this study are shown in Fig. 5.

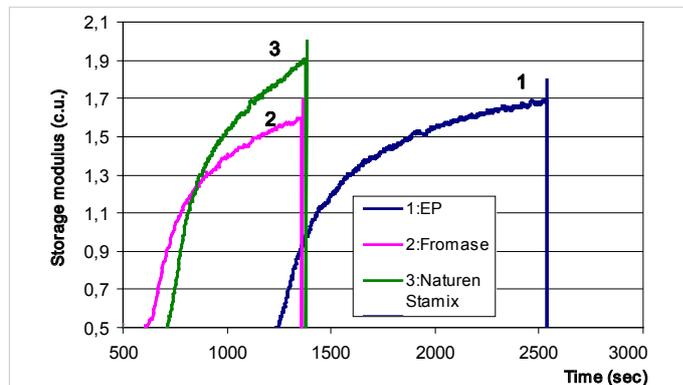


Fig. 5. Changes in the storage modulus of milk curd and in the cutting times, using different enzyme preparations in the cheesemaking process

The obtained data clearly show how the form of the enzyme preparation influences on the physical property of the milk curd — the thermal conductivity. In all the experiments using the same enzyme preparation, but at different doses, at the curd cutting point the value of its thermal conductivity correlating with the storage modulus was practically the same. With the use of enzyme preparations of other species, introduced in equivalent doses, the values of the thermal conductivity of the curd at the time of its cutting differ by 10–15 % in one or the other direction, which is unacceptable from the point of view of the automated determination of the moment when the curd is ready to be cut. However, as shown by further experiments, differences in the effect of enzyme preparations of various types are systematic in nature, i.e. each type of drug has a specific effect. Therefore, all drugs have their own specificity, and for each drug, it is the same. Thus, the storage modulus, characteristic for the moment when the milk curd is ready to be cut, will have its own value for each enzyme preparation, but the coefficient of its deviation will be low, similar to that given in Table 1, and acceptable for its automatic determination.

4. Conclusion

The carried out industrial and experimental studies have shown that the use of the hot wire method, implemented on standard elements of modern monitoring devices, for online

determination of the moment when the milk curd in the cheesemaking bath is ready to be cut, can be an effective solution for mechanization and automatization of the cheesemaking process.

Based on the obtained investigation results it is possible to state, that accuracy of definition of milk curd readiness to cutting by means of the hot wire method quite corresponds to technological requirements of manufacture and does not depend on a dose of the added milk-clotting preparation. At the same time, when setting up the equipment (its programming), it is necessary to take into account the type of milk-clotting preparation used in cheese manufacture.

The results of the conducted studies suggest that different types of milk-clotting preparations, at the same calculated dose, coagulate the milk in different ways, which leads to the formation of milk curds with different microstructures and, accordingly, to different physicochemical properties. This influence is not clearly understood and should be investigated further.

5. Acknowledgment

The author expresses deep gratitude to the experienced master-cheesemaker Natalia A. Moshkina, the head of the experimental workshop of All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking, for her invaluable assistance in carrying out these studies.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК/ REFERENCES

- O’Callaghan, D. J., O’Donnell, C. P., Payne, F. A. (2002). Review of systems for monitoring curd setting during cheesemaking. *International Journal of Dairy Technology*, 55(2), 65–74.
- Castillo, M. (2010). Cutting Time Prediction Methods in Cheese Making // in book: *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering*, eds. Heldman, D. R. and Moraru C. I., — CRC Press.— 762 P.
- Arango, O., Castillo, M. (2018). A method for the inline measurement of milk gel firmness using an optical sensor. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 3910–3917.
- Ozer, B. Destructive (2004). Effects of Classical Viscosimeters on the Microstructure of Yoghurt Gel. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 28(1), 19–23.
- Derra, M., Bakkali F., Amghar A., Sahsah H. (2018). Estimation of coagulation time in cheese manufacture using an ultrasonic pulse-echo technique. *Journal of Food Engineering*, 216(1), 65–71.
- Hori, T. (1985). Objective measurements of the process of curd formation during rennet treatment of milks by the hot wire method. *Journal of Food Science*, 50(4), 911–917.
- Miyawaki, O., Sato, Y., Yano, T., Ito, K., Saeko, Y. (1990). Fundamental aspects of viscosity monitoring by the hot wire technique. *Journal of Food Science*, 55(3), 854–857.
- Osintsev, A. M. (2014). Theoretical and practical aspects of the thermographic method for milk coagulation research. *Foods and Raw Materials*, 2(2), 147–155.
- O’Callaghan, D. J., O’Donnell, C. P., Payne, F. A. (1999). A comparison of on-line techniques for determination of curd setting time using cheesemilks under different rates of coagulation. *Journal of Food Engineering*, 41(1), 43–54.
- O’Callaghan, D. J., O’Donnell, C. P., Payne, F. A. (2000). On-line sensing techniques for coagulum setting in renneted milks. *Journal of Food Engineering*, 43(3), 155–165.
- Gonçalves, B. J., Pereira, C. G., Lago, A. M. T., Gonçalves, C. S., Giarola, T. M. O., Abreu, L. R., Resend, J. V. (2017). Thermal conductivity as influenced by the temperature and apparent viscosity of dairy products. *Journal of Dairy Science*, 100(5), 3513–3525.
- Liu, X. T., Zhang, H., Wang, F., Luo, J., Guo, H. Y., Ren F. Z. (2014). Rheological and structural properties of differently acidified and renneted milk gels. *Journal of Dairy Science*, 97, 3292–3299.
- Rogelj, I., Perko, B., Francky, A., Penca, V., Pungercar, J. (2001). Recombinant Lamb Chymosin as an Alternative Coagulating Enzyme in Cheese Production. *Journal of Dairy Science*, 84(5), 1020–1026.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Принадлежность к организации

Смыков Игорь Тимофеевич — доктор технических наук, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт маслоделия и сыроделия — филиал Федерального научного центра пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН
152613, Ярославская область, г. Углич, Россия, Красноармейский бульвар, 19
Тел.: +7-485-329-81-21
E-mail: i_smykov@mail.ru

Поступила 08.05.2018

AUTHOR INFORMATION

Affiliation

Igor T. Smykov — doctor of technical sciences, chief research scientist, All-Russian Scientific Research Institute of Butter- and Cheesemaking — Branch of V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS
Krasnoarmeysky Boulevard, 19, Uglich, Yaroslavl Region, Russia, 152613
Tel. : + 7-485-329-81-21
E-mail: i_smykov@mail.ru

Received 08.05.2018