

## РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРМЕНТИРОВАННОГО ТЕРМОКИСЛОТНОГО СЫРА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЕГО ПРОЦЕССА ФЕРМЕНТАЦИИ

*Т.И. Шингарёва, В.Л. Титов, М.А. Глушаков*

Предложен способ производства ферментированного термокислотного сыра, основанный на процессе ферментации термокислотного белкового сгустка путём внесения в него сквашенной (ферментированной) сыворотки. Исследовано влияние количества используемой ферментированной сыворотки и продолжительности ферментации термокислотного белкового сгустка на выходные параметры готового продукта и определены оптимальные параметры процесса ферментации. Применительно к исследованному процессу разработана математическая модель и определены её параметры.

### Введение

Классические технологии производства сыров методом термокислотной коагуляции предусматривают использование для выделения молочных белков высоких температур (выше 90°C), обладающих сильным бактерицидным действием. Поэтому при производстве термокислотных сыров внесение заквасочной микрофлоры в нормализованную молочную смесь не позволяет получить ферментированный термокислотный белковый продукт. Обогащение термокислотных сыров заквасочной микрофлорой представляет интерес, так как позволит повысить пищевую ценность сыра, а также расширит диапазон органолептических показателей продукта.

Учитывая актуальность вопроса производства ферментированных термокислотных сыров, работы в данном направлении проводятся многими исследователями. На сегодняшний день предлагаются различные способы получения термокислотных сыров, обогащённых заквасочной микрофлорой: выдержка сформованных сырных головок в ферментированной сыворотке, инъекция заквасочных культур в головки сыров, введение заквасочных культур в белковую массу вместе с наполнителями, содержащими заквасочные культуры, например, сметаной [1–4].

С учётом вышеизложенного предложен альтернативный способ получения ферментированного термокислотного сыра с содержанием заквасочных культур в 1 г готового продукта не менее  $10^7$  КОЕ. Согласно предложенному способу предусмотрено внесение активизированной заквасочной микрофлоры в охлаждённый до температуры ферментации термокислотный белковый сгусток после отделения основной части сыворотки (65–75% от её общей массы), с последующим проведением его ферментации. Проведение ферментации предусмотрено в коагуляторе, что сокращает операционность и снижает риск негативного влияния окружающей среды на качество готового продукта. Использование ферментации термокислотного белкового сгустка (перед этапом формования) по сравнению с ферментацией сформованных головок сыра интенсифицирует диффузионные процессы, благодаря высокой удельной поверхности структуры белкового сгустка. Для ферментации предусмотрено использование заквасочной микрофлоры, находящейся в активной фазе роста, что, в свою очередь, способствует ускоренной ферментации белкового сгустка.

Ферментация термокислотного белкового сгустка, как и любой процесс, длится во времени, при этом её длительность и выходные параметры зависят от ряда факторов, что делает сложным управление данным процессом. Для обеспечения необходимого контроля над процессом ферментации термокислотного белкового сгустка необходимо дифференцирование его основных составляющих, разработка на их основе математической модели, позволяющей с использованием компьютерных технологий проводить мониторинг процесса ферментации, прогнозировать и контролировать его выходные показатели.

В связи с этим представляло интерес разработать ускоренный способ получения ферментированного термокислотного сыра, включающего накопление основного количества заквасочных культур и их метаболитов на стадии подготовки среды ферментации (ферментированной сыворотки), с последующей ферментацией белкового сгустка, дать математическое описание процесса ферментации термокислотного белкового сгустка.

### Результаты исследований и их обсуждение

Для решения поставленной цели требовалось получить ферментированную сыворотку с содержанием заквасочных культур не менее  $10^8$  КОЕ/см<sup>3</sup> и исследовать процесс ферментации белкового сгустка с установлением оптимального количества внесения ферментированной сыворотки в белковый сгусток и продолжительности его ферментации.

С целью получения термокислотного сгустка в работе применялась молочная смесь на основе обезжиренного молока и гомогенизированных сливок с массовой долей жира 22%. Жирность молочной смеси составляла 3,4%, что обеспечивало выработку термокислотного сыра с массовой долей жира в сухом веществе 50%.

Ферментация термокислотного белкового сгустка проводилась использованием ферментированной сыворотки, содержащей заквасочные культуры в количестве  $1-2 \cdot 10^8$  КОЕ/см<sup>3</sup>. При её подготовке использовалась термокислотная сыворотка, ферментированная бактериальным концентратом (БК) молочнокислых лактококков для творога МСт (*Lb. lactis*, *Lb. cremoris*, *Lb. diacetillactis*) активностью 3 Е.А в течение  $8 \pm 1$  ч. Титруемая кислотность готовой ферментированной сыворотки составляла  $85 \pm 3$ °Т.

По окончании процесса ТКК отделялось 70–75% сыворотки, а термокислотный белковый сгусток с оставшейся сывороткой охлаждался до температуры  $28 \pm 1$ °С путём подачи холодной воды в межстенное пространство коагулятора. В охлаждённый термокислотный белковый сгусток вносилась ферментированная молочная сыворотка в следующем процентном отношении от массы нормализованной смеси: опыт 1–2,5%, опыт 2–5%, опыт 3–10%, опыт 4–15%.

Проведение процесса посолки предусмотрено одновременно с ферментацией термокислотного белкового сгустка. Для этого расчётное количество поваренной соли вносилось в ферментированную сыворотку. Как показали ранее проводимые исследования, посолка термокислотного белкового сгустка позволяет добиться быстрого и равномерного просаливания белкового сгустка. Известно, что поваренная соль обеспечивает повышенную водоудерживающую способность белковых сгустков. Последнее препятствует формированию излишне плотной, крошливой консистенции сыра, формирование которой возможно из-за повышения его кислотности.

Продолжительность ферментации термокислотного белкового сгустка составляла 5, 10, 25, 40, 60, 120 мин. По окончании процесса ферментации проводилось формование и пресование термокислотного белкового сгустка при избыточном давлении  $10 \pm 1$  кПа в течение 5 мин в индивидуальных формах.

В исследованиях выходными параметрами выступали количество заквасочных культур микроорганизмов в сыре, активная кислотность сыра и его вкус, а также количественное содержание растворимых форм азотистых веществ. Для установления величин контролируемых параметров использовались стандартные методы анализов. Определение массовой доли общего белка производилось методом Къельдаля. При оценке органолептических показателей сыров (вкус, запах, консистенция) значимым параметром выступал показатель вкуса, который подлежал оценке по условной пятибалльной шкале.

Разработка математической модели процесса ферментации термокислотного белкового сгустка проводилась в программной среде Mathcad.

Для получения работоспособной математической модели процесса ферментации предстояло выделить его движущие факторы, составить уравнения и с помощью экспериментальных данных определить значения констант в данных уравнениях.

В процессе ферментации термокислотного белкового сгустка, то есть накопления в нём

заквасочных культур и их метаболитов, были выделены три основных движущих фактора, определяющих его скорость:

- 1 – диффузионный перенос бактериальных клеток из среды ферментации (ферментированная сыворотка) в белковый сгусток;
- 2 – увеличение количества бактериальных клеток за счёт их деления;
- 3 – уменьшение количества бактериальных клеток в результате накопления их метаболитов.

С учётом вышеперечисленных факторов предложено математическое описание процесса ферментации термокислотного белкового сгустка с помощью системы дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dB}{dt} = \gamma(B^* - B) + \mu \left( \frac{L}{L + \lambda} \right) \left( \frac{T_k - T}{T_k} \right) B - \beta B^2, \quad (1) \\ \frac{dB^*}{dt} = -\gamma(B^* - B) \frac{V}{V^*} + \mu \left( \frac{L^*}{L^* + \lambda} \right) \left( \frac{T_k^* - T^*}{T_k^*} \right) B^* - \beta B^{*2}, \quad (2) \\ \frac{dL}{dt} = -\gamma'(L - L^*) - M_L \frac{\nu}{Na} \left( \frac{L}{L + \lambda} \right) \left( \frac{T_k - T}{T_k} \right) B, \quad (3) \\ \frac{dL^*}{dt} = -\gamma'(L - L^*) \frac{V}{V^*} + M_L \frac{\nu}{Na} \left( \frac{L^*}{L^* + \lambda} \right) \left( \frac{T_k^* - T^*}{T_k^*} \right) B^*, \quad (4) \\ \frac{dT}{dt} = \gamma' \left( T^* - \frac{T}{B\Phi} \right) + \frac{1}{0,00009} M_T \frac{4\nu}{Na} \left( \frac{L}{L + \lambda} \right) \left( \frac{T_k - T}{T_k} \right) B, \quad (5) \\ \frac{dT^*}{dt} = -\gamma' \left( T^* - \frac{T}{B\Phi} \right) \frac{V}{V^*} + \frac{1}{0,00009} M_T \frac{4\nu}{Na} \left( \frac{L^*}{L^* + \lambda} \right) \left( \frac{T_k^* - T^*}{T_k^*} \right) B^*, \quad (6) \end{array} \right.$$

где  $\gamma$  – удельная скорость проникновения бактерий в агломераты белкового сгустка;

$\gamma'$  – удельная скорость проникновения молекул лактозы и молочной кислоты в агломераты белкового сгустка и ферментированную сыворотку;

$\mu$  – максимальная удельная скорость роста популяции микроорганизмов заквасочных культур, количество делений клеток за один час;

$\lambda$  – количество лактозы сыворотки или белкового сгустка, при котором её дефицит начинает оказывать влияние на развитие бактерий (0,5%);

$T_k$  – предел кислотообразования бактерий в термокислотном белковом сгустке, 220 °Т;

$T_k^*$  – предел кислотообразования бактерий в ферментированной сыворотке, 85 °Т;

$\beta$  – коэффициент, определяющий масштаб самоограничения популяции;

$\nu$  – среднее число молекул лактозы, потребляемых одной бактерией в процессе деления ( $2,98 \cdot 10^9$  молекул/ч);

$M_L$  – молекулярная масса лактозы, 342 г/моль;

$M_T$  – молекулярная масса молочной кислоты, 90 г/моль;

$Na$  – число Авогадро ( $6,02 \cdot 10^{23}$ );

$B\Phi$  – коэффициент, определяющий количество связанной с белками молочной кислоты по отношению к её содержанию в водной части [5, 6].

В представленной системе отражены основные процессы, протекающие при ферментации термокислотного белкового сгустка, и касающиеся изменения показателей как в белковом сгустке (уравнения 1, 3, 5), так и в ферментированной сыворотке (уравнения 2, 4, 6).

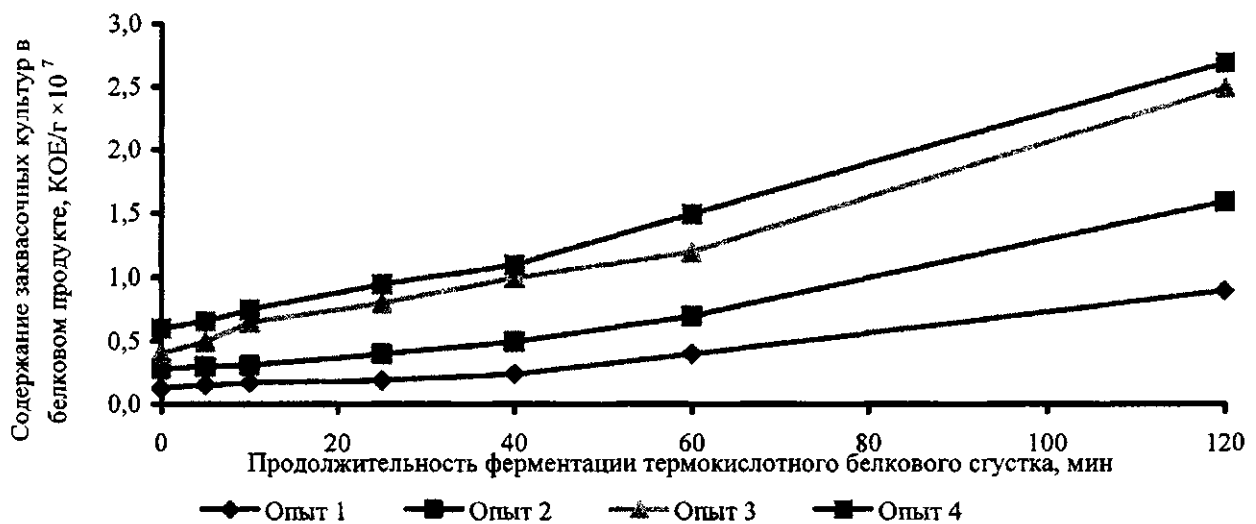
Уравнения (1) и (2) описывают изменение содержания заквасочных культур (КОЕ/г) за единицу времени в водной части термокислотного белкового сгустка  $\frac{dB}{dt}$  и водной части

ферментированной сыворотки  $\frac{dB^*}{dt}$ . Первое слагаемое правой части уравнений (1) и (2) описывает проникновение бактерий из ферментированной сыворотки в агломераты термокислотного сгустка; скорость проникновения бактерий пропорциональна разности их концентраций в ферментированной сыворотке  $B^*$  и в термокислотном белковом сгустке  $B$  (в пересчете на влагу) и обратно пропорциональна объёму водной фазы  $\frac{V}{V^*}$ . Второе слагаемое этих уравнений отвечает за рост популяции бактерий в агломератах белкового сгустка и ферментированной сыворотке в результате размножения. В данном слагаемом учитывается зависимость скорости размножения заквасочных культур от содержания лактозы  $L/(L^*)$  и уровня кислотности  $T/(T^*)$ , соответственно в термокислотном сгустке и сыворотке. Третье слагаемое – ферхюльстовский член самоограничения популяции  $\beta$ , характеризующий подавление активности и снижение численности заквасочных культур в термокислотном белковом сгустке и сыворотке в результате накопления метаболитов (в основном молочной кислоты).

Уравнения (3) и (4) описывают изменение концентрации лактозы в водной фазе термокислотного белкового сгустка  $L$  и сыворотки  $L^*$  в результате её диффузионного переноса и жизнедеятельности бактерий.

Уравнения (5) и (6) описывают изменение титруемой кислотности в термокислотном белковом сгустке ( $T$ ) и сыворотке ( $T^*$ ) в результате её диффузионного переноса, а также накопления при жизнедеятельности бактерий. При оценке диффузии в данных уравнениях используется множитель, учитывающий буферные свойства белкового сгустка (БФ). Известно, что белковые сгустки обладают высокой буферностью и аккумулируют основную часть молочной кислоты, обеспечивая тем самым более высокий предел кислотообразования бактерий.

Для определения значений констант в приведенных уравнениях проводились исследования процесса ферментации термокислотного белкового сгустка. Микробиологический анализ полученных образцов ферментированного термокислотного сыра показал, что содержание заквасочных культур в нём достигает необходимого уровня ( $1 \cdot 10^7$  КОЕ/г) в опыте 4 за 30 мин, в опыте 3 – 40 мин, в опыте 2 – 80 мин. При этом в опыте 1 необходимый уровень содержания заквасочных культур в 1 г сыра достигнут не был, последнее обусловлено малым количеством заквасочных культур, внесённых в данном опыте с ферментированной сывороткой в термокислотный белковый сгусток (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Влияние количества ферментированной сыворотки и продолжительности ферментации термокислотного белкового сгустка на содержание заквасочных культур в белковом продукте**

Важным физико-химическим параметром, высоко коррелирующим с вкусовыми показателями продукта, выступает его активная кислотность. Выражая собой равновесную концен-

трацию свободных протонов водорода, уровень активной кислотности зависит от глубины вызываемых микроорганизмами ферментативных процессов (в основном окисления лактозы) и определяет выраженность кисломолочного вкуса, так как основным источником ионов водорода в молоке и молочных продуктах выступает молочная кислота. Поэтому мы проводили оценку вкуса исследуемых образцов сыра по условной пятибалльной шкале, представленной в таблице 1, в которой также отражены области активной кислотности, соответствующие конкретному вкусовому диапазону.

Образцы сыра высокого качества имели выраженный кисломолочный либо умеренно кисломолочный вкус и оценивались не ниже 5 баллов.

Таблица 1 – Условная шкала для оценки вкуса белковых продуктов

Характеристика вкуса сыра	Оценка вкуса, балл	Активная кислотность, ед. рН
Выраженный кисломолочный	5	5,45–5,70
Кисловатый	4	5,36–5,44
Умеренно кисломолочный	3	5,72–5,83
Кислый	3	5,26–5,35
Слабовыраженный кисломолочный	2	5,84 и выше
Чрезмерно кислый	2	5,25 и ниже

Динамика изменения активной кислотности и вкуса исследуемых сыров в зависимости от продолжительности ферментации представлена на рисунке 2. Анализ полученных данных показывает, что появление «выраженного кисломолочного» вкуса в сыре зависит как от времени ферментации, так и от количества внесённой в белковую массу ферментированной сыворотки и составляет: опыт 4–5 мин, опыт 3–10 мин, опыт 2–60 мин. Сыр в опыте 1 на протяжении всего времени ферментации имел «слабовыраженный кисломолочный» вкус. Последнее обусловлено малым количеством вкусоароматических веществ, внесенных в термокислотный белковый сгусток в опыте 1. Из полученных данных также следует, что в случае использования ферментированной сыворотки в количестве 15% (опыт 4) продолжительность ферментации не должна превышать 23 мин, так как при более длительной ферментации в сыре появляется «кисловатый» вкус, который при ферментации более 50 мин становится «кислым».

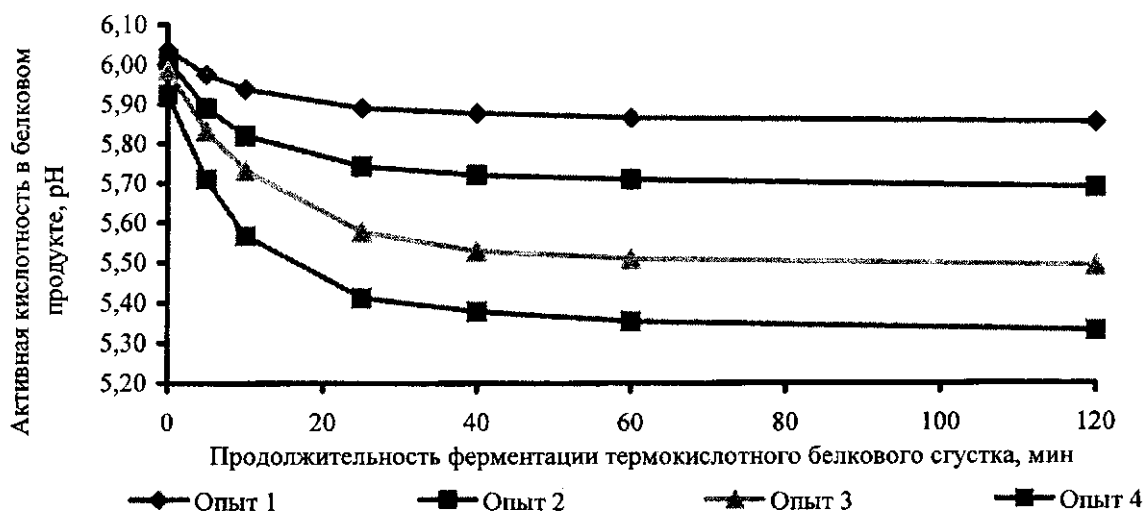


Рисунок 2 – Влияние количества ферментированной сыворотки и продолжительности ферментации термокислотной белковой массы на активную кислотность и вкус сыра

Формирование вкуса ферментированного сыра происходит за счёт диффузии метаболитов ферментированной сыворотки в термокислотный белковый сгусток, а также накопления в нём метаболитов, выделяемых заквасочными культурами на протяжении фермен-

тации термокислотного белкового сгустка. Анализ данных, представленных на рисунке 2, указывает на высокую значимость фактора диффузии, обеспечивающий быстрое (на протяжении первых 10 мин ферментации) насыщение термокислотного белкового сгустка вкусоароматическими веществами.

По результатам проведенных исследований определено оптимальное количество ферментированной сыворотки и продолжительность процесса ферментации, обеспечивающие получение ферментированного термокислотного сыра с высокими вкусовыми показателями и содержанием заквасочных культур в 1 г продукта не менее  $10^7$  КОЕ (таблица 2).

Таблица 2 – Оптимальные режимы процесса ферментации термокислотного белкового сгустка

Количество ферментированной сыворотки, % от массы молока	Продолжительность ферментации термокислотного белкового сгустка, мин
5	90±30
10	65±55
15	14±7

Важным отличием ферментированных белковых продуктов, по сравнению с неферментированными, является повышенное содержание растворимых форм азота, повышающих пищевую ценность продукта и являющихся продуктом жизнедеятельности заквасочных культур. Для оценки пищевой ценности исследовалось количественное содержание азотистых веществ (общий, растворимый белковый, растворимый небелковый азот) в сырах опытов 2, 3, 4 и контроле, в роли которого служил сыр, выработанный без ферментации. Процесс ферментации белковой массы при выработке опытных сыров осуществляли в течение 75 мин. Результаты проведенных исследований представлены в таблице 3.

Установлено, что содержание растворимых белковых азотистых веществ в опытных сырах в 1,5–1,7 раза выше по сравнению с контролем, а растворимых небелковых азотистых веществ больше в 2,8–3,8 раза. Приведенные данные подтверждают целесообразность проведения ферментации термокислотных белковых сгустков, как эффективного способа повышения пищевой ценности готового продукта.

Таблица 3 – Содержание азотистых соединений в термокислотных сырах

Образец	Количество ферментированной сыворотки, % от массы нормализованной смеси	Продолжительность ферментации, мин	Азотистые вещества		
			Общий азот, г/100г	в том числе, % от общего азота	
				Растворимый белковый (высокомолекулярные пептиды)	Небелковый (пептоны, аминокислоты, мочевины, креатин, креатинин, мочевая кислота, пуриновые основания, аммиак)
Контроль	-	-	13,71	1,10	0,25
Опыт 2	5	90	13,66	1,59	0,71
Опыт 3	10	65	13,69	1,85	0,96
Опыт 4	15	14	13,67	1,72	0,88

На основании полученных данных определены рабочие параметры математической модели процесса ферментации термокислотного белкового сгустка:  $\gamma=0,03$   $\gamma'=3,5$ ;  $\mu=15 \text{ ч}^{-1}$ ;  $\beta=9 \cdot 10^{-11}$ ;  $B\Phi=3,5$ . Значения параметров (постоянных членов) в модели устанавливались путём подбора, обеспечивающего максимальное соответствие её выходных параметров с полученными экспериментальными данными. Аппроксимация экспериментальных данных (количество ферментированной сыворотки, внесённой в термокислотный сгусток, составляет 10% от массы молока) с результатами расчётов математической модели представлены на рисунке 3. Из данных, представленных на рисунке 3, следует высокая степень корреляции выходных параметров процесса ферментации термокислотного белкового сгустка, найденных численным методом, с результатами эксперимента.



Рисунок 3 – Влияние продолжительности ферментации термокислотного белкового сгустка на содержание заквасочных культур в белковом продукте

### Заключение

В результате проведенных исследований разработан способ получения ферментированного термокислотного сыра, в основе которого лежит ферментация термокислотного белкового сгустка перед этапом формования и определены оптимальные параметры процесса ферментации. Установлено, что применение ферментации позволяет получить готовый продукт с более высокой пищевой ценностью в сравнении с традиционными термокислотными белковыми продуктами, благодаря повышенному содержанию растворимых азотистых веществ. Для предложенного способа ферментации термокислотного белкового сгустка разработана математическая модель и определены её рабочие параметры. Использование данной модели позволяет с помощью компьютерных технологий контролировать процесс ферментации и прогнозировать его результаты и выходные параметры готового продукта.

### Литература

- 1 Государственный стандарт РБ. СТБ 1744–2007 Молоко и продукты переработки молока. Термины и определения.
- 2 Смирнова, И.А. Совершенствование технологии мягких сыров с термокислотным свертыванием молока / И.А. Смирнова // Сыроделие. – 1999. – №2. – С. 17–18.
- 3 Хамагаева, И.С. Мягкий сыр, обогащенный бифидобактериями / И.С. Хамагаева, М.Б. Данилов, Л.М. Белозерова // Сыроделие. – 1998. – №2. – С.16–17.
- 4 Технологическая инструкция и технические условия по производству сырной массы «Хуторянка». ТУРБ 700036606.050 – 2002.
- 5 Смирнова, И.А. Математическая модель микробиологических процессов при ферментации термокислотных сыров / И.А. Смирнова, А.М. Осинцев, В.И. Брагинский // Маслоделие и сыроделие, 2002. – №6. – С. 45–47.
- 6 Королёв, С.А. Основы технической микробиологии молочного дела / С.А. Королёв. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 344 с.

Поступила в редакцию 16.11.2009