

Математическая оценка изменения углеводного и белкового профилей молока при термической нагрузке



И. А. Барковская^{*}, В. Ю. Ярышев,
В. Г. Блиадзе, С. Н. Туровская, Е. Е. Илларионова,
В. В. Кондратенко, А. Г. Галстян

Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности^{ROR}, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 05.06.2025

*e-mail: i_barkovskaya@vnimi.org

Принята после рецензирования: 07.07.2025

© И. А. Барковская, В. Ю. Ярышев, В. Г. Блиадзе,

Принята к публикации: 05.08.2025

С. Н. Туровская, Е. Е. Илларионова, В. В. Кондратенко,

А. Г. Галстян, 2025



Аннотация.

Вопрос разработки новых методов оценки и прослеживаемости качества пищевой продукции на всех этапах жизненного цикла остается актуальным для агропромышленного комплекса России, в том числе и для молочного сектора. Внедрение математических методов оценки в структуру контроля качества продукции является перспективным направлением для изучения. Цель исследования – разработать математический подход к оценке кинетики образования продуктов изменения белкового и углеводного профилей молока для дальнейшего прогнозирования и практических исследований их накопления в ходе технологического процесса и трансформации во время хранения сухих молочных консервов.

Объект – молоко при разных температурных режимах обработки и продолжительности воздействия. Исследование основано на анализе концентраций соединений-маркеров изменения углеводного и белкового профилей молока при температурной обработке. Для этого проведен подбор научных работ на русском и английском языках за период 1985–2025 гг. с применением ресурсов электронных библиотек eLIBRARY.RU, Google Scholar, CyberLeninka, PubMed и ScienceDirect. Для математической оценки углеводов применяли уравнения псевдонулевого порядка и Аррениуса, для оценки изменения белковой составляющей – уравнение первого порядка. Алгоритм расчета реализован на языке Python.

Установлены зависимости накопления лактулозы, гидроксиметилфурфурола и фурозина от интегральной тепловой нагрузки на молоко. Определены величины энергий активации, позволяющие получить максимальную линейность: 130 кДж/моль (для лактулозы и фурозина) и 85 кДж/моль (для гидроксиметилфурфурола). Выявлено, что предложенная модель расчетов не подходит для оценки накопления продуктов изменения углеводного профиля при длительном температурном воздействии ввиду более глубоких изменений продукта. β -лактоглобулин в большей степени подвержен влиянию температур, чем α -лактальбумин. Рассчитаны значения энергий активации для сывороточных белков: 72,1 и 85,1–85,7 кДж/моль соответственно.

Разработанный подход позволяет количественно оценивать термическую нагрузку на молоко и прогнозировать качество продуктов его переработки. Результаты исследования могут быть использованы в пищевой промышленности для контроля качества пищевых продуктов и коррекции сроков годности, в том числе при производстве сухих молочных консервов.

Ключевые слова. Математическое моделирование, качество молока, сухое молоко, маркеры термообработки

Для цитирования: Барковская И. А., Ярышев В. Ю., Блиадзе В. Г., Туровская С. Н., Илларионова Е. Е. и др. Математическая оценка изменения углеводного и белкового профилей молока при термической нагрузке. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 4. С. 794–806. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2607>

Mathematical Assessment of Carbohydrate and Protein Profiles of Milk under Thermal Stress



Irina A. Barkovskaya^{*}, Vladislav Yu. Yaryshev,
Vladimir G. Bliadze, Svetlana N. Turovskaya,
Elena E. Illarionova, Vladimir V. Kondratenko, Aram G. Galstyan

All-Russian Dairy Research Institute , Moscow, Russia

Received: 05.06.2025

*e-mail: i_barkovskaya@vnimi.org

Revised: 07.07.2025

© I.A. Barkovskaya, V.Yu. Yaryshev, V.G. Bliadze, S.N. Turovskaya,

Accepted: 05.08.2025

E.E. Illarionova, V.V. Kondratenko, A.G. Galstyan, 2025



Abstract.

The dairy industry needs new methods for food quality assessment at all stages of production and storage. Mathematical methods offer efficient tools of product quality control. This article introduces a mathematical approach to assessing the kinetics of protein and carbohydrate profiles of milk powder to predict their transformations throughout production and storage.

The study featured milk at different processing temperatures and exposure times. The analysis focused on the concentrations of compounds that mark the changes in the carbohydrate and protein profiles of milk during heat treatment. The equation of pseudo-zero-order and the Arrhenius equation were applied to carbohydrates while a first-order equation made it possible to assess the changes in proteins. The calculation algorithm was processed in Python.

The lactulose, hydroxymethylfurfural, and furosine accumulations proved to depend on the integral heat load. The activation energies that provided the linearity maximum were as follows: 130 kJ/mol for lactulose and furosine; 85 kJ/mol for hydroxymethylfurfural. The calculation model failed to assess the accumulation of carbohydrate profile products during prolonged thermal exposure due to more profound product changes. β -lactoglobulin appeared to be more susceptible to thermal effects than α -lactalbumin. The activation energies for whey proteins were 72.1 and 85.1–85.7 kJ/mol, respectively.

The new mathematical approach provided a reliable quantitative assessment of thermal stress that can be used for food quality control and shelf-life adjustments, e.g., in milk powder production.

Keywords. Mathematical modeling, milk quality, milk powder, heat treatment markers

For citation: Barkovskaya IA, Yaryshev VYu, Bliadze VG, Turovskaya SN, Illarionova EE, et al. Mathematical Assessment of Carbohydrate and Protein Profiles of Milk under Thermal Stress. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(4): 794–806. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-4-2607>

Введение

Коровье молоко является сложносоставным продуктом, обладающим уникальной композицией важнейших питательных веществ: белка, жира, молочного сахара, минеральных солей, витаминов, ферментов [1, 2]. Их количество и соотношения определяют пищевую ценность молока и обуславливают широкую востребованность потребителями [3, 4]. Еще одним из его преимуществ является возможность преобразования из жидкой формы в концентрированную путем удаления влаги при минимальном изменении нативных характеристик, за счет чего сухое молоко имеет потенциал к длительному хранению [1, 4, 5]. Сухое молоко также является ценным источником макро- и микронутриентов и признано полноценным для удовлетворения потребностей роста, развития детей, улучшения их пищевого статуса, а также для устранения распространенных проблем со здоровьем

среди пожилого населения [2, 6–9]. Кроме того, сухое молоко является сырьевым ингредиентом в производстве различной пищевой продукции [5, 7, 10]. Таким образом, субъекты потребления сухого молока (в повседневном рационе или промышленной переработке) имеют неослабевающий интерес к его качеству, безопасности и свойствам, которые зависят от различных факторов (сырье, технологические операции, условия и сроки хранения) [4, 11].

В производстве сухого молока, как и любой другой молочной продукции, тепловая обработка является важной и обязательной частью технологии, эффективность которой обеспечивает микробиологическую безопасность и инактивацию большей части ферментов (в т. ч. липаз и протеаз) [3, 12, 13]. В промышленной практике тепловую обработку в зависимости от азотного индекса сывороточных белков классифицируют следующим образом: низкая – 75 °C, 15 с;

средняя – >75 °С, 1–2 мин; высокая – 120 °С, 60 с [14]. При низкотемпературной обработке концентрация неденатурированных сывороточных белков составляет более 6,0 мг/г; среднетемпературной – от 1,51 до 5,99 мг/г; высокотемпературой – менее 1,5 мг/г [10, 14, 15]. Класс термообработки обуславливает рациональность использования сухого молока, например, низкого класса – для производства кисломолочной продукции, сыров; среднего – для мороженого; высокого – для выпечки и др. [10, 14, 16–18]. Однако интенсивность и продолжительность воздействия нагревания неизбежно вызывают сложные химические и физические изменения составных частей молочной системы, влияют на хранимоспособность и функционально-технологические свойства (растворимость, диспергируемость, смачиваемость и др.) сухого молока [10, 12, 19, 20].

Тепловая обработка молока может порождать окислительные и деградационные (протеолитические и липолитические) процессы в белковом и жировом профилях, а также протекание реакции Майяра между белками и молочным сахаром, которые не прерываются в процессе дальнейшего хранения сухого молока и часто могут приводить к ухудшению его качества [21, 22].

Реакции окисления белков и липидов оказывают важное влияние на приемлемость использования сухого молока потребителями. Эти процессы сопровождают друг друга и индуцируются свободнорадикальными цепными реакциями [21, 23]. Окисление белков – это ковалентная модификация, которая возникает в результате прямой реакции с индукторами (активными формами кислорода) свободных радикалов или непрямой реакции со вторичными продуктами окисления. В первом случае индукторы свободных радикалов напрямую действуют на остаток основной пептидной цепи и на боковые цепи аминокислот: захватывают и связывают водород, добавляют кислород и расщепляют химические связи, что приводит к разрыву основной белковой цепи или ковалентному сшиванию и окислению аминокислот. При непрямой реакции окисления в результате взаимодействия промежуточных продуктов окисления жиров (основными из которых являются гидропероксиды) с белками по ε-аминогруппе лизина образуются амидные продукты. При этом летучие соединения, образующиеся в результате распада гидропероксидов, такие как альдегиды, кетоны, сложные эфиры, спирты, вызывают пороки вкуса и запаха. Индуцированию окисления белков способствует образующийся при окислении жиров такой реакционноспособный альдегид, как малоновый диальдегид [21]. Park и Drake [24] привели исследование влияния тепловой обработки молока (от 85 до 125 °С) в сочетании с различной продолжительностью выдержки (от 10 до 240 с) при производстве сухого цельного молока в процессе длительного хранения. Так, температурные режимы выше 95 °С с выдержкой более 20 с являлись эффективными для стабилизации окислительной порчи.

Stapelfeldt *et al.* [24] установили наименьшую чувствительность к окислительным изменениям и ферментативному потемнению образцов сухого цельного молока при обработке температурой 88 °С в течение 20 с.

Протеолиз и липолиз – ключевые негативные гидролитические процессы в сухом молоке, вызываемые ферментами, которые вырабатывают психротрофные бактерии. Эти ферменты отличаются термостойкостью и частично сохраняют активность даже после термической обработки, применяемой в молочной промышленности, такой как пастеризация или ультрапастеризация. При хранении (особенно длительном) процесс гидролиза белков и жира под действием ферментов продолжается, что приводит к потере питательных свойств, возникновению органолептических пороков и сокращению сроков годности готовой продукции [21].

Еще одним негативным процессом, протекающим в сухом молоке, является сложная неферментативная реакция (реакция Майяра), инициируемая окислительно-восстановительной реакцией между восстанавливющим дисахаридом (лактозой) и аминокислотами белков во время термической обработки молока и дальнейшего хранения. На начальной стадии происходит лактозилирование белков (образование продуктов Амадори), что приводит к снижению доступности лизина, усвояемости белка и потере пищевой ценности молочной системы. Затем следует окислительная деградация продуктов Амадори с образованием карбонильных соединений. Протекание реакции зависит от pH системы: при pH менее 7,0 продукты перегруппировки Амадори приводят к образованию фурфурола или гидроксиметилфурфурола (ГМФ); при pH более 7,0 – к формированию восстановленных кетонов или в последствии расщепляются на другие специфические соединения. Обладая высокой реакционной способностью, перечисленные соединения продолжают участвовать в последующих стадиях меланоидинообразования. На конечной стадии реакции Майяра протекают сложные процессы: образуются конечные продукты гликирования [12, 21]. В исследовании [25] с применением методов протеомики представлены данные об умеренном увеличении количества лактозилированных лизинов и белков при температурах от 85 до 130 °С и резко возрастающем – при 140 °С. В κ-казине при этой температуре было лактозилировано 6 из 10 остатков лизина, β-лактоглобулине – 9 из 16, α-лактальбумине – 6 из 12, αS1-казине – 5 из 15. Средне- и высокотемпературную тепловую обработку (пастеризацию и ультрапастеризацию) можно идентифицировать по наличию лактозилирования K14 в β-лактоглобулине, а лактозилирование лактотрансферрина свидетельствует об умеренном тепловом воздействии. В исследовании сухого цельного молока [26], подвергнутого различным температурным нагрузкам, в процессе хранения (18 месяцев) определили фурозин, фурфуролы и конечные продукты гликирования. Количество фурозина уве-

личилось в 2,5–3,0 раза при высокотемпературной обработке и в 5,7–8,4 раза – при низкотемпературной. Содержание ГМФ в сухом молоке, выработанном с использованием высоких температур, при хранении было в 1,4–2,4 раза выше, чем в низкотемпературно обработанном молоке. Увеличение количества $\text{N}\varepsilon$ -(карбоксиметил)лизина и $\text{N}\varepsilon$ -(карбоксиэтил)лизина в высокотемпературном молоке было больше, чем в низкотемпературном – в 3,4–4,9 и 3,1–3,4 раза для $\text{N}\varepsilon$ -(карбоксиметил)лизина и в 3,4–4,2 и 2,7–3,0 раза для $\text{N}\varepsilon$ -(карбоксиэтил)лизина. Кроме того, при температурной обработке молока происходит образование лактулозы, что также негативно сказывается на качестве готового продукта. Лактулоза – результатирующее соединение пространственных изменений лактозы – перегруппировки Лобри де Брюйна-Альберта ван Экенштейна [27]. Ее формирование в молочной системе предсказать легче, чем образование продуктов более сложного процесса – реакции меланоидинообразования ввиду нестабильности и большого количества образующихся продуктов изменения углеводного профиля.

Многие исследователи [12, 21] совершили попытки систематизировать механизмы реакций, происходящих при тепловой обработке молока и приводящих к порче молочной продукции, в т. ч. сухого молока, и определить их потенциальные маркеры. Однако следует отметить недостаточное количество исследований, посвященных комплексной оценке потери качества сухого молока в результате изменения белкового, углеводного и жирового профилей при тепловой нагрузке. Таким образом, восполнение данного пробела путем разработки специального инструмента скоринга основных составных частей молочной системы является актуальным.

Цель исследования – разработать математический подход к оценке кинетики образования продуктов изменения белкового и углеводного профилей молока при разной температурной нагрузке для дальнейшего прогнозирования и практических исследований их накопления в ходе технологического процесса и трансформации во время хранения сухих молочных консервов. В перспективе результаты исследования позволят сформулировать перечень маркеров, позволяющий определять сухое молоко с истекающим сроком годности для предотвращения его переработки при производстве других пищевых продуктов.

Объекты и методы исследования

Для достижения поставленной цели осуществлен поиск исследований, освещающих изменение состава белкового и углеводного профилей молока при разных режимах термической нагрузки на систему. Подбор научных работ проводили с применением ресурсов электронных библиотек eLIBRARY.RU, Google Scholar, CyberLeninka, PubMed и ScienceDirect. Анализ включал эмпирические и обзорные научные статьи, а также главы из книг на русском и английском языках

за период 1985–2025 гг. Источники включали информацию о количественном содержании соединений-маркеров тепловой нагрузки в молоке при разных режимах обработки (температура (140 и 90 °C) и продолжительность воздействия). Отбор публикаций реализовывали с использованием ключевых слов и словосочетаний: концентрация фурозина в молоке (furosine in heated milk), формирование лактулозы в молоке (lactulose in heated milk), образование гидроксиметилфурфурола в молоке (hydroxymethylfurfural in heated milk), изменение белков в термообработанном молоке (protein changes in heated milk).

Метод оценки кинетики изменения углеводного профиля молока. Рассмотрим упрощенную реакцию образования продуктов тепловой обработки молока (1):



где A – обобщенный прекурсор; B – обобщенный маркер тепловой обработки (лактулоза, гидроксиметилфурфурол, фурозин). Для большинства продуктов, образующихся при тепловой обработке, выполняется соотношение (2) [28]:

$$[B] \ll [A]_0 \quad (2)$$

где $[A]_0$ – концентрация обобщенного прекурсора в начале тепловой обработки.

Исходя из того, что количество образовавшегося маркера (B) всегда значительно меньше количества прекурсора (A_0), можно считать, что реакция образования маркера тепловой обработки имеет псевдонулевой порядок по прекурсору [28]. Поскольку значимого изменения концентрации A за время реакции не происходило, в любой момент времени при выполнении (2) $[A] \approx [A]_0$. В таком случае для описания кинетики процесса применимо уравнение (3):

$$[B] = [B]_0 + kt \approx kt \quad (3)$$

где $[B]_0$ – концентрация обобщенного маркера в начале тепловой обработки; k – эффективная константа скорости реакции, моль/(л·с); t – время, с.

Константа скорости процесса изменения состава углеводного профиля молока (k) зависит от температуры, согласно уравнению Аррениуса (4):

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (4)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель; E_A – энергия активации, Дж/моль; $R = 8,314$ Дж/(моль·К), универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура, К.

Так как в случае тепловой обработки молока для достижения заданной температуры необходимо время, $T(t')$, выражение (3) можно преобразовать к виду (5), интегрируя зависимость (4) в пределах, соответствующих продолжительности обработки молока:

$$\begin{aligned}[B] &= \int_0^t k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT(t')}\right) dt' = k_0 \int_0^t \exp\left(-\frac{E_A}{RT(t')}\right) dt' = k_0 X_R \\ X_R &= \int_0^t \exp\left(-\frac{E_A}{RT(t')}\right) dt'\end{aligned}\quad (5)$$

где X_R – интеграл, соответствующий степени протекания реакции при заданной температуре и продолжительности обработки.

Из выражения (5) видно, что зависимость $[B] = f(X_R)$ должна являться прямой линией [29].

В настоящей работе предложен алгоритм численного интегрирования, основанный на следующем: кинетика образования маркеров тепловой обработки описывается системой связанных дифференциальных уравнений; параметры реакции могут быть представлены в виде двумерных зависимостей, отражающих функциональную связь между тремя ключевыми показателями процесса (температура, продолжительность термического воздействия и концентрация маркера). Данный подход применен для моделирования кинетики образования лактулозы, гидроксиметилфурфурола (ГМФ) и фурозина. Хотя механизм образования ГМФ и фурозина не подчиняется элементарной модели псевдодонулевого порядка (поскольку условие не выполняется на всех стадиях последовательных процессов [30]), разработанный подход демонстрирует удовлетворительное соответствие (коэффициент детерминации $R^2 \geq 0,95$) с экспериментальными данными, полученными в разных исследованиях. Это позволяет перейти к компактному описанию кинетики формирования маркеров тепловой обработки в молоке в виде двумерного изображения.

Алгоритм расчета X_R в соответствии с выражением (5) реализован на языке Python. Рассматривали несколько наиболее распространенных режимов термообработки молока: ультравысокотемпературный (УВТ) (прямой и косвенный) и модельный, подразумевающий непосредственное воздействие заданной температуры в течение определенного времени, без учета промежуточных стадий, равные температурам 140 и 90 °C соответственно. Расчет интеграла выполняли, разбивая заданный временной диапазон на участки (1000 равных отрезков) и вычисляя площадь под каждым из них по методу трапеций [31]. Относительная ошибка интегрирования не превышала $2,7 \times 10^{-4} \%$.

Метод оценки кинетики изменения белкового профиля молока. Термическая инактивация сывороточных белков является реакцией первого порядка [31], в таком случае справедливо уравнение (6):

$$\frac{[A]}{[A]_0} = \exp(-kt) \quad (6)$$

где $[A]_0$ – исходная концентрация белка; $[A] = [A](t)$ – концентрация неденатурированного белка в системе

при выдержке в заданной температуре в момент времени $t > 0$.

Логарифмируя уравнение (6) и учитывая зависимость (4), получим (7):

$$\ln \frac{[A]_0}{[A]} \times \frac{1}{t} = k_0 \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (7)$$

Таким образом, можно зафиксировать расчетную величину энергии активации реакции, построив зависимость в координатах:

$$\ln \frac{[A]_0}{[A]} \times \frac{1}{t} = f\left(-\frac{1}{T}\right)$$

Результаты и их обсуждение

Кинетика изменения углеводного профиля молока. Реализация алгоритма. При реализации алгоритма расчета интеграла X_R в соответствии с выражением (5) получены кривые зависимости температуры от продолжительности воздействия для выбранных режимов при $E_A = 150$ кДж/моль (значение величины энергии активации выбрано для визуализации расчетного подхода и не характеризует какой-либо процесс изменения составных частей молока), а также соответствующие им подынтегральные функции (рис. 1). Вклад площади под участком на графике в величину X_R в значительной степени зависит от температуры в заданный момент времени, в связи с чем использован полулогарифмический масштаб значений по оси ординат (рис. 1б). Так, при режиме 1 (прямая УВТ-обработка) значение подынтегральной функции при температуре 140 °C составляет 1×10^{-19} , что на несколько порядков больше, чем при температуре 70 °C – 1×10^{-23} .

При работе с массивом данных, полученных из подобраных исследований, режим обработки, значения температуры и продолжительности измененияли в соответствии с применяемыми в источнике. Основными индикаторами теплового воздействия на молочную систему при рассмотрении углеводной составляющей принято считать формирование лактулозы, фурозина и гидроксиметилфурфурола (ГМФ). Перечисленные соединения образуются в молоке при нагревании без видимых органолептических изменений, поскольку являются начальными и промежуточными продуктами реакции Майара (фурозин и ГМФ [30]), а также результатом пространственных изменений лактозы – перегруппировки Лобри де Брюйна-Альберта ван Экенштейна (лактулоза) [27]. Кроме того, определение данных маркеров в молоке является быстрым и доступным с точки зрения методик детектирования [30, 33]. В связи с этим математический алгоритм оценки кинетики формирования продуктов-индикаторов термического воздействия на молоко в настоящем исследовании

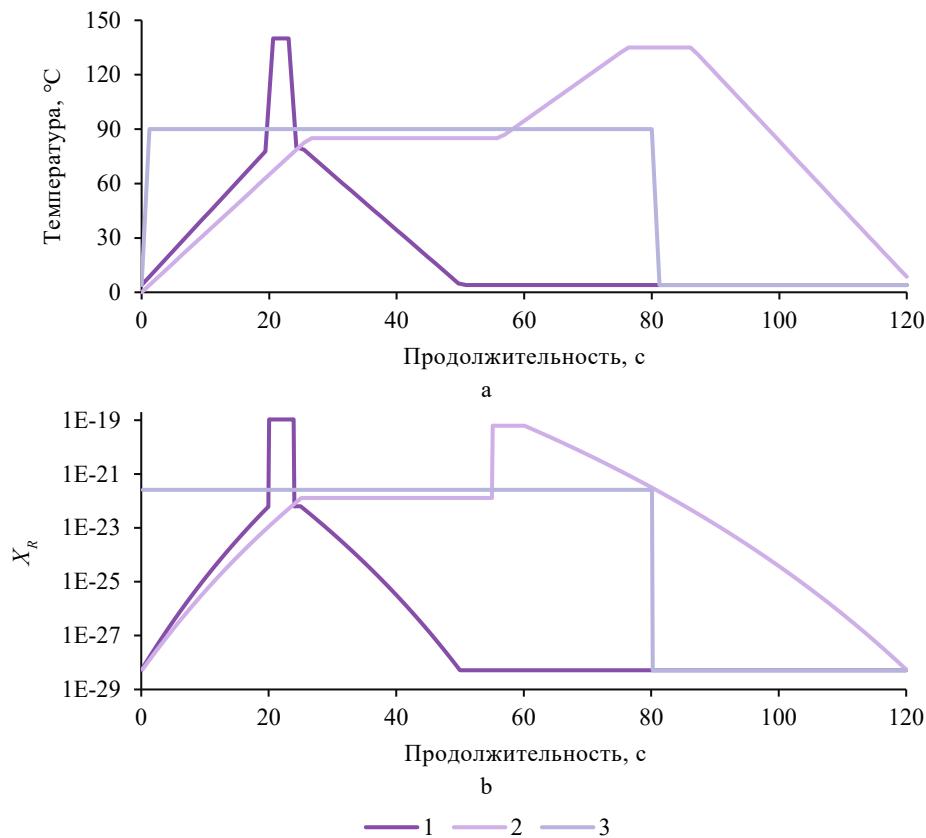


Рисунок 1. Зависимость температуры (а) и подынтегральной функции $\exp(-E_A/RT(t))$ (б) от продолжительности процесса при $E_A = 150$ кДж/моль (режимы: 1 – прямой УВТ; 2 – непрямой УВТ; 3 – модельный обобщенный режим)

Figure 1. Effect of time on temperature (a) and integrand function $\exp(-E_A/RT(t))$ (b) at $E_A = 150$ kJ/mol (modes: 1 – direct ultra-high temperature; 2 – indirect ultra-high temperature; 3 – generalized)

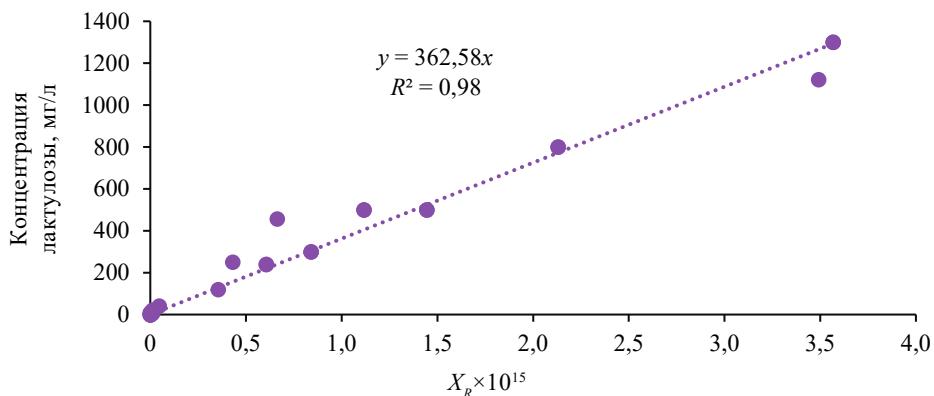


Рисунок 2. Зависимость концентрации лактулозы от $X_R = \int_0^t \exp(-E_A/RT(t')) dt'$ при $E_A = 130$ кДж/моль

Figure 2. Effect of $X_R = \int_0^t \exp(-E_A/RT(t')) dt'$ on lactulose concentration at $E_A = 130$ kJ/mol

применен к массивам экспериментальных данных об изменении концентраций лактулозы, гикроксиметилфурфурола и фурозина.

Оценку кинетики формирования лактулозы в молоке при разной термической нагрузке проводили на основе массива исследований [28, 34–37] после приведения значений к одной единице измерения

концентрации, мг/л. Для реализации расчета выбран интервал значений энергии активации 70–160 кДж/моль с шагом 10 кДж/моль, обоснованный данными исследований [28, 29]. В результате применения предложенного подхода наибольшей достоверности ($R^2 \geq 0,95$) в координатах уравнения (5) удалось достичь при значениях энергии активации 130 кДж/моль (рис. 2).

Предложенный метод расчета не подходит для оценки кинетики формирования лактулозы при длительной стерилизации молока (20 мин при 120 °C [34]), поскольку возникают значительные отклонения от линейности (рис. 3).

Вероятно, данный алгоритм подходит для оценки эффекта воздействия температуры на углеводный профиль молока в случаях незначительного формирования продуктов реакции Майяра. При длительной стерилизации в таре, как в исследовании [34], цвет продукта изменяется от белого к кремовому, что говорит о более глубоком протекании процесса, в сравнении с молоком, подвергнутым УВТ-обработке или пастеризации [38].

Оценка кинетики формирования гидроксиметилфурфурола в молоке. Для оценки кинетики накопления в молоке ГМФ использовали эмпирические данные [39–44]. Для визуализации кинетики формирования соединения в молоке в расчетах принимали интервал, представленный в исследованиях [28, 32]:

90–140 кДж/моль с шагом 10 кДж/моль. Однако наибольшей достоверности ($R^2 \geq 0,95$) (рис. 4) в координатах уравнения (5) соответствовало значение энергии активации, выходящее за рамки указанного интервала (85 кДж/моль).

Для проанализированного массива данных не выделено исследований, в которых значения концентрации ГМФ в молоке после тепловой обработки имели нелинейный характер, как это было определено для лактулозы. Вероятно, процесс накопления ГМФ отличается большей предсказуемостью, а его кинетика – лучшей согласованностью с используемой моделью, что делает возможной более точную математическую оценку.

Оценка кинетики формирования фурозина в молоке.

Для математического моделирования использовали эмпирические данные из источников [28, 33, 35, 45, 46]. Значения энергии активации принимали в диапазоне 85–105 кДж/моль [28]. Однако при оценке накопления фурозина математическое описание экспериментальных данных, дающее наибольшую достоверность

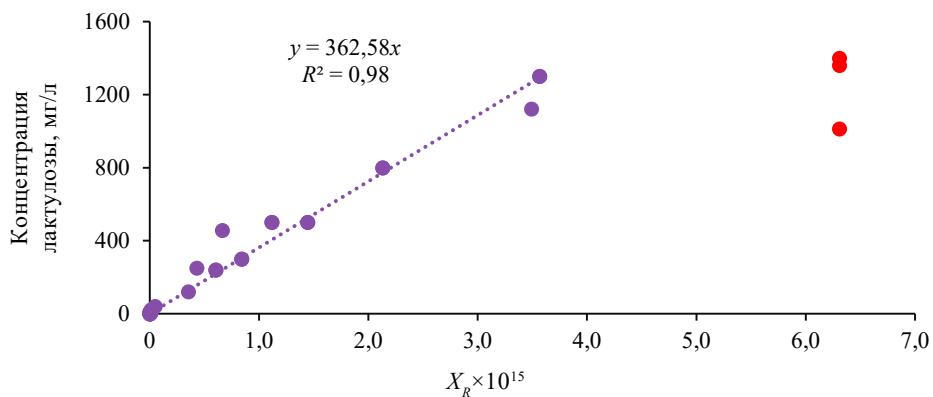


Рисунок 3. Отклонения от полученного тренда: фиолетовые точки – массив данных [28, 35–37]; красные точки – длительная стерилизация [34]

Figure 3. Deviations from the trend: Data array (purple dots) [28, 35–37]; long-term sterilization (red dots) [34]

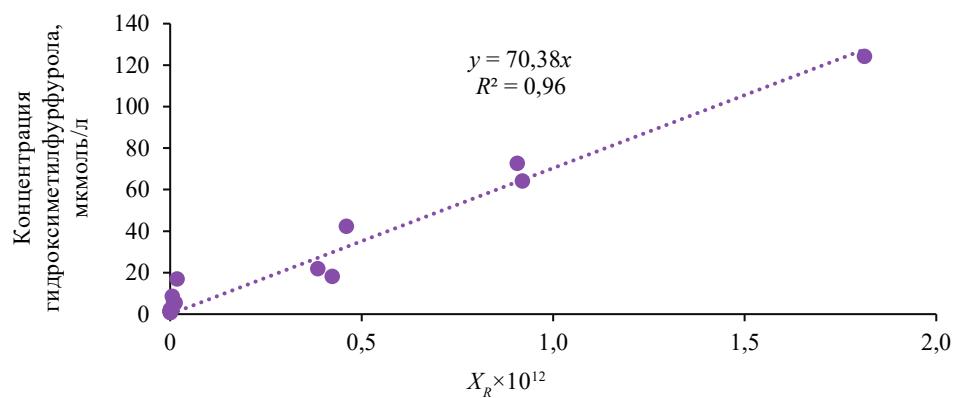


Рисунок 4. Зависимость концентрации гидроксиметилфурфурола от $X_R = \int_0^t \exp(-E_A/RT(t')) dt'$ при $E_A = 85$ кДж/моль

Figure 4. Effect of $X_R = \int_0^t \exp(-E_A/RT(t')) dt'$ on hydroxymethylfurfural concentration at $E_A = 85$ kJ/mol

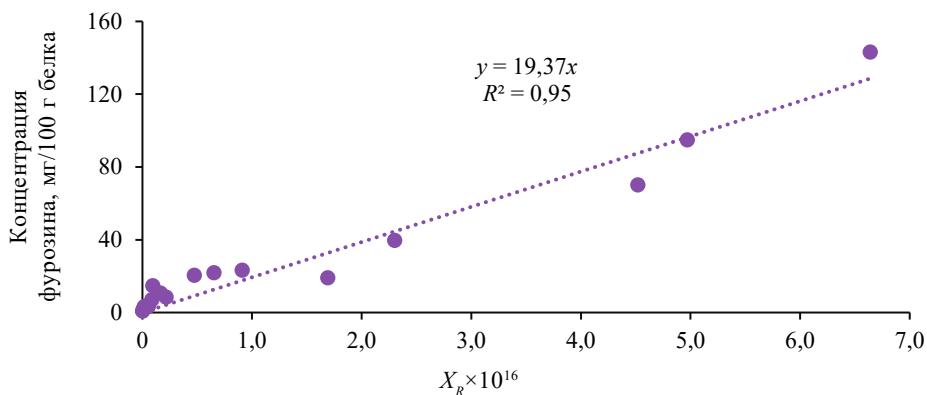


Рисунок 5. Зависимость концентрации фурозина от $X_R = \int_0^t \exp(-E_A/RT(t')) dt'$ при $E_A = 130$ кДж/моль

Figure 5. Effect of $X_R = \int_0^t \exp(-E_A/RT(t')) dt'$ on furosine concentration at $E_A = 130$ kJ/mol

Таблица 1. Значения энергий активации формирования в молоке продуктов изменения углеводного профиля

Table 1. Energy values that trigger the development of carbohydrate-changing products in milk

Процесс	E_A , кДж/моль		Q_{10}	
	Оценено в данной работе	Справочное значение	60–70 °C	90–100 °C
Образование лактулозы	130	74–153 [28], 150 [29]	3,9	3,2
Образование гидроксиметилфурфуrola	85	90–135 [28], 139 [32]	2,4	2,1
Образование фурозина	130	86,2–104,1 [28]	3,9	3,2

($R^2 \geq 0,95$) в координатах уравнения (5), получено при большем значении энергии активации, соответствующем 130 кДж/моль (рис. 5).

При анализе эмпирических данных из подобранных источников выявлены линейные зависимости концентрации фурозина от температурной нагрузки. Отсутствие существенных отклонений подтверждает валидность предложенного метода для оценки кинетики его накопления в молоке.

Таким образом, предлагаемый в настоящем исследовании подход к оценке кинетики формирования продуктов изменения углеводного профиля позволяет определить концентрации лактулозы, ГМФ и фурозина в зависимости от уровня термической нагрузки на молоко на этапе его переработки в сухие консервы. Результаты проведенных расчетов позволили определить значения энергий активации реакций образования лактулозы, ГМФ и фурозина (табл. 1), которые помогают получить наибольшую достоверность ($R^2 \geq 0,95$) экспериментальных данных в координатах уравнения (5).

Литературные данные содержат отличные друг от друга значения энергий активации рассматриваемых процессов, что может быть связано как с различной методологией исследований, так и со свойствами изучаемой системы. Кроме того, значения показателя, полученные ранее в исследованиях [1–2, 14], отлича-

ются от полученных авторами для ГМФ (85 кДж/моль) и фурозина (130 кДж/моль). Вероятно, это обосновано влиянием ряда факторов, таких как сырье (состав, значение активной кислотности и др.), соблюдение технологических режимов при его обработке, склонность нагрева и охлаждение молока [30].

В качестве метрики, описывающей скорость реакции в заданном температурном интервале, использовалась величина Q_{10} , численно равная отношению скоростей реакции при температурах T_1 и $T_2 = T_1 + 10$, т. е. описывающая во сколько раз возрастает скорость реакции при увеличении температуры на 10 К:

$$Q_{10} = \frac{k_2(T_2)}{k_1(T_1)} \quad (8)$$

Согласно уравнению (4), соотношение констант скорости реакции при температурах T_2 и T_1 , $T_2 > T_1$ описывается выражением (9):

$$\frac{k_2}{k_1} = \exp\left(\frac{E_A}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right) \quad (9)$$

Логарифмируя обе части уравнения, получим (10):

$$\ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{E_A}{R} \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2 T_1} \right) \quad (10)$$

Следовательно полагаем, что $T_2 - T_1 = 10$ К и, исходя из определения (8), получим уравнение (11):

$$\ln Q_{10} = \frac{E_A}{R} \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} = \frac{E_A}{R} \frac{10}{T_1 T_2} \quad (11)$$

В рамках данной работы значения Q_{10} получены для процессов формирования лактулозы, ГМФ и фурозина в молоке для интервалов температуры 60–70 и 90–100 °C. Так, предложенный в настоящей работе метод позволяет получить зависимости концентрации различных продуктов термической обработки молока от тепловой нагрузки с хорошей линейностью. Используемый для расчета подход также позволяет косвенно оценить энергию активации процесса.

Кинетика денатурации белков. Изменения белковой структуры, которые происходят в молочной системе в процессе производства сухих консервов, зависят от глубины температурного воздействия на сырье [47–49]. Поскольку сывороточные белки (главным образом α -лактальбумин и β -лактоглобулин) молока являются наименее термостойкими, в сравнении с казеином [50–53], в исследовании представляла интерес оценка их изменения при термической обработке. В качестве источников данных о термической денатура-

ции сывороточных белков при расчетах применяли результаты исследований авторов работ [35, 41, 46, 54, 55]. Литературные данные находятся в интервале температур нагрева 65–140 °C. Результаты для β -лактоглобулина приведены на рисунке 6.

В случае оценки степени денатурации α -лактальбумина полученная зависимость для данных из работы [55] отличается от зависимости, полученной для общего массива из других источников (рис. 7). Значения энергии активации близки в обоих случаях, и различия в зависимостях связаны с различием в предэкспоненциальном множителе.

Из полученных графиков можно рассчитать энергию активации и значение Q_{10} в интервале температур 60–70 и 90–100 °C процессов термической денатурации белков (табл. 2).

Энергия активации для процесса денатурации β -лактоглобулина (72,1 кДж/моль) меньше, чем для α -лактальбумина (85,1–85,7 кДж/моль), что соответствует исследованию [32]. Расчетные величины позволяют сделать вывод о большей подверженности β -лактоглобулина воздействию температуры, чем α -лактальбумина. Несмотря на то что температура денатура-

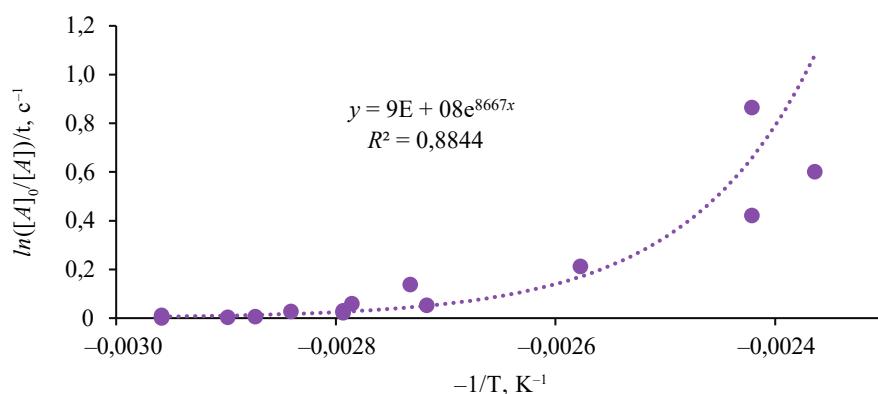


Рисунок 6. Зависимость в координатах уравнения (7) для β -лактоглобулина

Figure 6. Coordinate dependence in Equation (7) for β -lactoglobulin

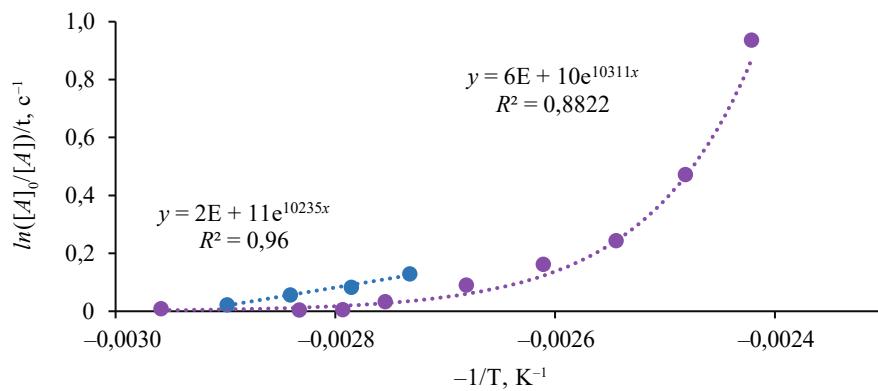


Рисунок 7. Зависимость в координатах уравнения (7) для α -лактальбумина по данным [55] (голубой) и [41, 46] (фиолетовый)

Figure 7. Coordinate dependence in Equation (7) for α -lactalbumin: [55] (blue), [41, 46] (purple)

Таблица 2. Энергии активации термоденатурации сывороточных белков

Table 2. Energies that trigger thermal denaturation of whey proteins

Белок	$\frac{E_A}{R}$, К	Энергия активации, кДж/моль	R^2 зависимости в координатах (7)	Средняя энергия активации, кДж/моль	Q_{10}	
					60–70 °C	90–100 °C
β -лактоглобулин	8667	72,1	0,88	72,1	2,1	1,9
α -лактальбумин [40, 45]	10311	85,7	0,88	85,4	2,5	2,1
α -лактальбумин [53]	10235	85,1	0,96			

ции α -лактальбумина ниже, чем у β -лактоглобулина (~62–68 и 75–85 °C соответственно) [56], меньшее значение энергии активации для второго, предположительно, может быть связано с наличием свободной тиольной группы в его молекуле, инициирующей более быстрое взаимодействие белка с другими белками молока и его агрегацию [57].

Выводы

Предложен математический подход к оценке кинетики формирования маркеров изменения углеводного и белкового профилей молока при температурной обработке, позволяющий количественно интерпретировать термическую нагрузку на систему и получить достоверные зависимости их концентрации от температуры и продолжительности процесса термообработки ($R^2 \geq 0,88$). Получены зависимости между интегральной термической нагрузкой на систему и концентрацией лактулозы, гидроксиметилфурфурола и фурозина, обладающие высокой достоверностью. Выявлено, что длительная стерилизация молока в таре (120 °C в течение 20 мин) нарушает линейность кинетики формирования лактулозы в молоке, что указывает на более глубокое протекание реакции меланоидинообразования. Для процессов образования продуктов изменения углеводного профиля молока получены значения энергии активации, соответствующие наибольшей достоверности: 130 кДж/моль (для лактулозы), 85 кДж/моль (для ГМФ) и 130 кДж/моль (для фурозина).

Оценка кинетики денатурации белков молока показала, что β -лактоглобулин больше подвержен денатурации, чем α -лактальбумин, несмотря на большую термостабильность. Рассчитаны значения интервалов энергий активации процесса денатурации: 72,1 кДж/моль (для β -лактоглобулина) и 85,1–85,7 кДж/моль (для α -лактальбумина). Полученные результаты демонстрируют возможность количественной оценки тепловой нагрузки на молочную систему с использованием математической модели. Таким образом, предложен-

ный метод представляет научную основу для создания системы оценки термической обработки молока, но требует дополнительных исследований для масштабирования и реализации на практике, что является целью нашей последующей работы. Разработанный подход в дальнейшем может применяться в пищевой промышленности для контроля качества и прогнозирования свойств сухого молока в хранении на основе режимов его термической обработки.

Критерии авторства

И. А. Барковская, В. Ю. Ярышев, В. Г. Блиадзе – разработка концепции и дизайна исследования, сбор, анализ и интерпретация данных и материалов, подготовка и редактирование текста статьи; С. Н. Туровская, Е. Е. Илларионова, В. В. Кондратенко – подготовка статьи к публикации; А. Г. Галстян – разработка концепции и дизайна исследования, редактирование текста. Все соавторы согласовали и утвердили окончательный вариант текста статьи и несут равную ответственность за его целостность, достоверность материалов и plagiat.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

I.A. Barkovskaya, V.Yu. Yaryshev, and V.G. Bliadze developed the concept, designed the research, collected and analyzed the data, and drafted and proofread the manuscript; S.N. Turovskaya, E.E. Illarionova, and V.V. Kondratenko prepared the manuscript for publication; A.G. Galstyan developed the concept, designed the research, and proofread the text. All co-authors agreed and approved of the final version and are equally responsible for its integrity, reliability, and any potential plagiarism.

Conflict of interest

The authors state that there is no conflict of interest.

Список литературы / References

1. Rosa E, Prudencio ES. A comprehensive approach about comparison between drying technologies and powdered dairy products. Food Research International. 2023;173(Part 1):113326. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113326>

2. Kourkouta L, Frantzana A, Koukourikos K, Iliadis C, Papathanasiou IV, et al. Milk nutritional composition and its role in human health. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*. 2021;9(1):10–15. <https://doi.org/10.17265/2328-2150/2021.01.002>
3. McCarthy NA, Magan JB, Kelleher CM, Kelly AL, O'Mahony JA, et al. Heat treatment of milk: Effect on concentrate viscosity, powder manufacture and end-product functionality. *International Dairy Journal*. 2022;128:105289. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105289>
4. Song X, Shen S, Dong G, Ding H, Xie Z, et al. A comprehensive review of direct, indirect, and AI-based detection methods for milk powder. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2025;9:1571317. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1571317>
5. Ryabova AE, Semipyatnyi VK, Galstyan AG. Effects of storage conditions on milk powder properties. *Journal of Dairy Science*. 2023;106(10):6741–6758. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-23094>
6. Ding Y, Han F, Xie Z, Li G, Zhuang Y, et al. Dairy fortification as a good option for dietary nutrition status improvement of 676 preschool children in China: A simulation study based on a cross-sectional diet survey (2018–2019). *Frontiers in Nutrition*. 2022;9:1081495. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1081495>
7. Hamed AM, Galli B, Hogan SA, Abdel-Hamid M, Romeih E. Adaptive and predictive approaches to mitigate the impact of milk seasonality on composition, processing technologies and quality of milk powders. *International Journal of Dairy Technology*. 2025;78(1):e13148. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.13148>
8. Qin Y, Pillidge C, Harrison B, Adhikari B. Pathways in formulating foods for the elderly. *Food Research International*. 2024;186:114324. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114324>
9. Zanini B, Simonetto A, Zubani M, Castellano M, Gilioli G. The effects of cow-milk protein supplementation in elderly population: Systematic review and narrative synthesis. *Nutrients*. 2020;12(9):2548. <https://doi.org/10.3390/nu12092548>
10. Schons PF, Colet R, Pinto SS, Verruck S. Powdered milk. In: da Cruz AG, Pimentel TC, Esmerino EA, Verruck S, editors. *Dairy Foods Processing*. NY: Springer US; 2024. pp. 179–192. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-4144-6_13
11. Рябова А. Е. Влияние условий хранения на качество сухого молока. Молочная промышленность. 2021. № 7. С. 56–57. [Ryabova AE. Influence of storage conditions on the quality of powder milk. *Dairy industry*. 2021;(7):56–57. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2021-07-56-57>
12. Duan J, Gao S, Diao Y, Zhang Q, Gu Y, et al. Effects of heat treatment on liquid milk quality and safety: Nutritional changes, hazardous substances and control strategies. *Food Control*. 2025;176:111377. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111377>
13. Рязанцева К. А., Шерстнева Н. Е. Традиционные и инновационные способы применения ультрафиолетового излучения в молочной промышленности. *Техника и технология пищевых производств*. 2022. Т. 52. № 2. С. 390–406. [Riazantseva KA, Sherstneva NE. Traditional and innovative uses of ultraviolet treatment in the dairy industry. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(2):390–406. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2372>
14. Bista A, Murphy EG, O'Donnell CP, O'Shea N. The effect of heat treatment on physicochemical properties of skim milk concentrate and spray-dried skim milk powder. *International Journal of Dairy Technology*. 2022;75(3):690–700. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12876>
15. Альгадур М. И., Пряничникова Н. С., Юрова Е. А., Петров А. Н. Влияние термической обработки и пастеризации на качество сухого молока. *Техника и технология пищевых производств*. 2024. Т. 54. № 2. С. 275–284. [Alkadour MI, Pryanichnikova NS, Yurova EA, Petrov AN. Effect of thermal treatment and pasteurization on milk powder quality. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2024;54(2):275–284. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2506>
16. Акадур М. И., Петров А. Н., Пряничникова Н. С. Влияние класса термической обработки сухого молока на структуру и свойства ферментированного сгустка. *Пищевая промышленность*. 2024. № 11. С. 82–89. [Alkadour MI, Petrov AN, Pryanichnikova NS. Influence of the class of thermal treatment of dry milk on the structure and properties of the fermented curd. *Food industry*. 2024;(11):82–89. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.11.11.015>
17. Калугина Д. Н., Юрова Е. А. Обоснование определения индекса азота сывороточного белка для оценки белкового состава сухого молока. *Молочная промышленность*. 2022. № 7. С. 35–37. [Kalugina DN, Yurova EA. Rationale for determining the nitrogen index of whey protein to assess the protein composition of milk powder. *Dairy industry*. 2022;(7):35–37. (In Russ.)] <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2022-07-35-37>
18. Мельденберг Д. Н., Полякова О. С., Семёнова Е. С., Юрова Е. А. Разработка комплексной оценки белкового состава молока сырья различных сельскохозяйственных животных для выработки продуктов функциональной направленности. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2020. № 3. С. 118–133. [Meldenbergen DN, Polyakova OS, Semenova ES, Yurova EA. Development of a comprehensive milk protein composition assessment from raw materials of various farm animals for the functional products production. *Storage and Processing of Farm Products*. 2020;(3):118–133. (In Russ.)] <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.352>
19. Paul A, Martin F, Simard B, Scher J, Gaiani C, et al. Deciphering the segregation of proteins in high-protein dairy powders after spray-drying. *Journal of Dairy Science*. 2023;106(2):843–851. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22133>
20. Рябова А. Е., Кондратенко В. В. Моделирование процесса самопрессования сухого молока в процессе хранения. *Пищевая промышленность*. 2024. № 9. С. 65–69. [Ryabova AE, Kondratenko VV. Modeling of the self-pressing process of powdered milk during storage. *Food industry*. 2024;(9):65–69 (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.9.9.013>

21. Fan X, Wang C, Cheng M, Wei H, Gao X, et al. Markers and mechanisms of deterioration reactions in dairy products. *Food Engineering Reviews*. 2023;15:230–241. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09331-9>
22. Mahmood N, Muhoza B, Huang Y, Munir Z, Zhang Y, et al. Effects of emerging food pretreatment and drying techniques on protein structures, functional and nutritional properties: An updated review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2024;64(26):9365–9381. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2212302>
23. Rauh V, Xiao Y. The shelf life of heat-treated dairy products. *International Dairy Journal*. 2022;125:105235. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105235>
24. Clarke HJ, McCarthy WP, O'Sullivan MG, Kerry JP, Kilcawley KN. Oxidative quality of dairy powders: Influencing factors and analysis. *Foods*. 2021;10(10):2315. <https://doi.org/10.3390/foods10102315>
25. Lu J, Zhu T, Dai Y, Xing L, Jinqi L, et al. The effect of heat treatment on the lactosylation of milk proteins. *Journal of Dairy Science*. 2023;106(12):8321–8330. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23526>
26. Li Y, Quan W, Jia X, He Z, Wang Z, et al. Profiles of initial, intermediate, and advanced stages of harmful Maillard reaction products in whole-milk powders pre-treated with different heat loads during 18 months of storage. *Food Chemistry*. 2021;351:129361. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129361>
27. Dong L, Yu Z, Zhao R, Peng B, Zhang Y, et al. The effect of lactulose thermal degradation products on β -lactoglobulin: Linear-, loop-, and cross-link structural modifications and reduced digestibility. *Food Chemistry*. 2023;403:134333. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134333>
28. Claeys WL, Ludikhuyze LR, Hendrickx ME. Formation kinetics of hydroxymethylfurfural, lactulose and furosine in milk heated under isothermal and non-isothermal conditions. *Journal of Dairy Research*. 2001;68(2):287–301. <https://doi.org/10.1017/s0022029901004745>
29. Andrews GR. Determining the energy of activation for the formation of lactulose in heated milks. *Journal of Dairy Research*. 1985;52(2):275–280. <https://doi.org/10.1017/S0022029900024146>
30. Wang Y, Xiao R, Liu S, Wang P, Zhu Y, et al. The impact of thermal treatment intensity on proteins, fatty acids, macro/micro-nutrients, flavor, and heating markers of milk—A comprehensive review. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024;25(16):8670. <https://doi.org/10.3390/ijms25168670>
31. Abdulhameed AF, Memon QA. An improved trapezoidal rule for numerical integration. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2090(1):012104. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2090/1/012104>
32. Kessler HG. Food and bio process engineering. In: Kessler VA. *Dairy Technology*. 2002. 694 p.
33. Li M, Shen M, Lu J, Yang J, Huang Y, et al. Maillard reaction harmful products in dairy products: Formation, occurrence, analysis, and mitigation strategies. *Food Research International*. 2022;151:110839. <https://elibrary.ru/UGUAWT>
34. Calvo MM, Olano A. Formation of galactose during heat treatment of milk and model systems. *Journal of Dairy Research*. 1989;56(5):737–740. <https://doi.org/10.1017/S0022029900029307>
35. Lan XY, Wang JQ, Bu DP, Shen JS, Zheng N, et al. Effects of heating temperatures and addition of reconstituted milk on the heat indicators in milk. *Journal of Food Science*. 2010;75(8):C653–C658. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2010.01802.x>
36. Marconi E, Messia MC, Amine A, Moscone D, Vernazza F, et al. Heat-treated milk differentiation by a sensitive lactulose assay. *Food Chemistry*. 2004;84(3):447–450. [https://doi.org/10.1016/s0308-8146\(03\)00268-1](https://doi.org/10.1016/s0308-8146(03)00268-1)
37. Olano A, Calvo MM. Kinetics of lactulose, galactose and epilactose formation during heat-treatment of milk. *Food Chemistry*. 1989;34(4):239–248. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(89\)90101-5](https://doi.org/10.1016/0308-8146(89)90101-5)
38. Топникова Е. В., Мягконосов Д. С., Абрамов Д. В., Кашникова О. Г. Колориметрический метод оценки интенсивности тепловой нагрузки при пастеризации молока. *Пищевые системы*. 2024. Т. 7. № 3. С. 481–490. [Topnikova EV, Myagkonosov DS, Abramov DV, Kashnikova OG. Colorimetric method for estimating the intensity of heat load during milk pasteurization. *Food Systems*. 2024;7(3):481–490. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-481-490>
39. Chen Z, Yan X. Simultaneous determination of melamine and 5-hydroxymethylfurfural in milk by capillary electrophoresis with diode array detection. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2009;57(19):8742–8747. <https://doi.org/10.1021/jf9021916>
40. Morales FJ, Jiménez-Pérez S. HMF formation during heat-treatment of milk-type products as related to milkfat content. *Journal of Food Science*. 1999;64(5):855–859. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1999.tb15927.x>
41. Morales FJ, Romero C, Jiménez-Pérez S. Characterization of industrial processed milk by analysis of heat-induced changes. *International Journal of Food Science and Technology*. 2000;35(2):193–200. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2000.00334.x>
42. Morales FJ, Romero C, Jiménez-Pérez S. Chromatographic determination of bound hydroxymethylfurfural as an index of milk protein glycosylation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 1997;45(5):1570–1573. <https://doi.org/10.1021/jf960930v>
43. Morales FJ, Romero C, Jiménez-Pérez S. Evaluation of heat-induced changes in Spanish commercial milk: Hydroxymethylfurfural and available lysine content. *International Journal of Food Science and Technology*. 2003;31(5):411–418. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.1996.00357.x>

44. Xing Q, Fu X, Liu Z, Cao Q, You C, et al. Contents and evolution of potential furfural compounds in milk-based formula, ultra-high temperature milk and pasteurised yoghurt. International Dairy Journal. 2021;120:105086. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105086>
45. Birlouez-Aragon I, Sabat P, Gouti N. A new method for discriminating milk heat treatment. International Dairy Journal. 2002;12(1):59–67. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(01\)00131-5](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(01)00131-5)
46. Sakkas L, Moutafi A, Moschopoulou E, Moatsou G. Assessment of heat treatment of various types of milk. Food Chemistry. 2014;159:293–301. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.020>
47. Алкадур М. И., Илларионова Е. Е. Влияние класса термообработки сухого молока на переход белка в сыворотку. Пищевая промышленность. 2025. № 3. С. 96–99. [Alkadour MI, Illarionova EE. Effect of heat treatment class of dry milk on protein transfer to whey. Food industry. 2025;(3):96–99. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2025.3.3.018>
48. Рязанцева К. А., Шерстнева Н. Е., Агаркова Е. Ю., Жижин Н. А. Влияние модифицированных ультрафиолетом сывороточных белков на стабильность кисломолочного сгустка. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2023. Т. 392. № 2–3. С. 83–92. [Ryazantseva KA, Sherstneva NE, Agarkova EYu, Zhizhin NA. Influence of ultraviolet modified whey proteins on the stability of the stabilized milk cloud. Izvestiya vuzov. Food technology. 2023;392(2–3):83–92. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2023.2-3.14>
49. Калугина Д. Н., Юррова Е. А. Характеристики белкового состава в формировании сроков годности молока ультрапастеризованного. Вестник КрасГАУ. 2021. № 10. С. 165–172. [Kalugina DN, Yurova EA. The protein composition characteristics in the formation of ultra pasteurized milk shelf life. Bulletin of KSAU. 2021;(10):165–172. (In Russ.)] <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-10-165-172>
50. Wu J, Chen S, Van der Meeren P. Heat stability assessment of milk: A review of traditional and innovative methods. Foods. 2024;13(14):2236. <https://doi.org/10.3390/foods13142236>
51. Wu Y, Wu S, Sun M, Nie L, Zhang Y, et al. Reduction of the levels of 5-hydroxymethylfurfural and advanced glycation end products in milk by the combination of high pressure and moderate heat pre-incubation. European Food Research and Technology. 2023;249:923–937. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04184-8>
52. Zhang Y, Yi S, Lu J, Pang X, Xu X, et al. Effect of different heat treatments on the Maillard reaction products, volatile compounds and glycation level of milk. International Dairy Journal. 2021;123:105182. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105182>
53. Больщакова Е. И., Стрижко М. Н. Влияние белкового профиля на технологические свойства молочных консервов с сахаром. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2023. Т. 391. № 1. С. 107–113. [Bolshakova EI, Strizhko MN. Influence of the protein profile on the technological properties of canned milk with sugar. Izvestiya vuzov. Food technology. 2023;391(1):107–113. (In Russ.)] <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2023.1.17>
54. Mayer HK, Raba B, Meier J, Schmid A. RP-HPLC analysis of furosine and acid-soluble β -lactoglobulin to assess the heat load of extended shelf life milk samples in Austria. Dairy Science & Technology. 2010;90(4):413–428. <https://doi.org/10.1051/dst/2009058>
55. Гралевская И. В., Ионова Л. В., Хавров И. В., Барсукова Л. С. Мониторинг технологических особенностей мягких кислотно-сычужных сыров. Техника и технология пищевых производств. 2012. Т. 25. № 2. [Gralevskaya IV, Ionova LV, Havrov IV, Barsukova LS. Monitoring of technological characteristics of soft acid-rennet cheese. Food Processing: Techniques and Technology. 2012;25(2). (In Russ.)]
56. Рязанцева К. А., Шерстнева Н. Е. Подходы к повышению термической стабильности сывороточных белков. Пищевая промышленность. 2021. № 8. С. 25–28. [Ryazantseva KA, Sherstneva NE. Approaches to increasing the heat stability of whey proteins. Food industry. 2021;(8):25–28. (In Russ.)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.8.8.006>
57. Čurlej J, Zajáč P, Čapla J, Golian J, Benešová L, et al. The effect of heat treatment on cow's milk protein profiles. Foods. 2022;11(7):1023. <https://doi.org/10.3390/foods11071023>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Барковская Ирина Александровна / Irina A. Barkovskaya ORCID 0000-0003-4779-1076; eLIBRARY SPIN 9404-4365
Ярышев Владислав Юрьевич / Vladislav Yu. Yaryshev ORCID 00009-0007-7848-4606; eLIBRARY SPIN 4906-1980
Блиадзе Владимир Геннадьевич / Vladimir G. Bliadze ORCID 0000-0001-9300-3267; eLIBRARY SPIN 7263-6500
Туровская Светлана Николаевна / Svetlana N. Turovskaya ORCID 0000-0002-5875-9875; eLIBRARY SPIN 6904-5308
Илларионова Елена Евгеньевна / Elena E. Illarionova ORCID 0000-0002-9399-0984; eLIBRARY SPIN 2990-2390
Кондратенко Владимир Владимирович / Vladimir V. Kondratenko ORCID 0000-0002-0913-5644; eLIBRARY SPIN 3383-1774
Галстян Арам Генрихович / Aram G. Galstyan ORCID 0000-0002-0786-2055; eLIBRARY SPIN 9355-5603