

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2372>  
<https://elibrary.ru/VTCVRL>

Обзорная статья  
<https://fptt.ru>

## Традиционные и инновационные способы применения ультрафиолетового излучения в молочной промышленности



К. А. Рязанцева\*<sup>ORCID</sup>, Н. Е. Шерстнева<sup>ORCID</sup>

Всероссийский научно-исследовательский институт  
молочной промышленности<sup>ROR</sup>, Москва, Россия

Поступила в редакцию: 14.01.2022  
Принята после рецензирования: 02.03.2022  
Принята в печать: 15.06.2022

\*К. А. Рязанцева: [k\\_riazantseva@vniimi.org](mailto:k_riazantseva@vniimi.org),  
<https://orcid.org/0000-0003-3207-2837>  
Н. Е. Шерстнева: <https://orcid.org/0000-0002-2121-9293>

© К. А. Рязанцева, Н. Е. Шерстнева, 2022



### Аннотация.

Традиционные методы термической обработки являются частью молочной промышленности при производстве молока и молочных продуктов. Однако в последнее время возрос интерес к нетермическим методам обработки сырья, обеспечивающим микробиологическую безопасность при сохранении питательной ценности и улучшающим технологические свойства продуктов. Целью работы является обзор научно-технической литературы о применении ультрафиолетовой (УФ) обработки, в том числе в комплексе с традиционной пастеризацией, как нетермического способа обработки молочного сырья и ее влиянии на структуру и свойства белков молока, а также технологические показатели молочных продуктов.

В обзор включены статьи, опубликованные на английском и русском языках за период 2004–2021 гг. Для поиска были использованы базы данных Scopus, Web of Science, Elsevier, ResearchGate и Elibrary.

Обзор литературы показал, что большая часть доступной информации по УФ-обработке сосредоточена на аспектах сохранения микробиологической безопасности молока и молочных продуктов. В исследованиях показано, что УФ-обработка может вызывать денатурацию и агрегацию молочных белков с последующим образованием новых поперечных связей в зависимости от дозы облучения. Конформационные изменения молочных белков под действием УФ-излучения способствуют улучшению их функциональных свойств. Это делает их ценными пищевыми ингредиентами при разработке пленочных покрытий и в технологии приготовления кисломолочных продуктов.

Способность сывороточных белков к полимеризации в результате электромагнитного воздействия применяют при изготовлении пленочных покрытий с высокими прочностными характеристиками и низкой паропрооницаемостью. В технологии кисломолочных продуктов (йогурт) УФ-излучение способствует улучшению их технологических свойств, включая вязкость и влагоудерживающую способность. Воздействие электромагнитных волн на животные белки, а также на сенсорные и технологические свойства молочных продуктов изучено недостаточно. Поэтому данное направление представляет интерес для дальнейших исследований.

**Ключевые слова.** Молоко, сывороточные белки, ультрафиолетовая обработка, доза облучения, патогенные микроорганизмы, функциональные свойства белков

**Для цитирования:** 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. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2372>

## Traditional and Innovative Uses of Ultraviolet Treatment in the Dairy Industry

Ksenia A. Riazantseva\*<sup>ID</sup>, Natalia E. Sherstneva<sup>ID</sup>

All-Russian Dairy Research Institute<sup>ROR</sup>, Moscow, Russia

Received: 14.01.2022

Revised: 02.03.2022

Accepted: 15.06.2022

\*Ksenia A. Riazantseva: [k\\_riazantseva@vniimi.org](mailto:k_riazantseva@vniimi.org),

<https://orcid.org/0000-0003-3207-2837>

Natalia E. Sherstneva: <https://orcid.org/0000-0002-2121-9293>

© K.A. Riazantseva, N.E. Sherstneva, 2022



### Abstract.

Traditional heat treatment methods are an integral part of the dairy industry. However, non-thermal methods ensure microbiological safety while preserving nutritional value of the dairy product, as well as improving its technological properties. The article reviews scientific and technical publications on ultraviolet (UV) treatment and its effect on the structure and properties of milk proteins and technological indicators of dairy products.

The review includes English and Russian articles published in Scopus, Web of Science, Elsevier, ResearchGate, and Elibrary databases in 2004–2021.

Most publications focus on maintaining the microbiological safety of milk and dairy products. Depending on the radiation dose, UV treatment was reported to cause denaturation and aggregation of milk proteins, followed by new cross-links. Conformational changes improve the functional properties of milk proteins, which makes them valuable food ingredients of film coatings and fermented milk products.

Electromagnetic treatment polymerizes whey proteins. This property can be used to produce strong film coatings with low vapor permeability. In fermented milk production, UV radiation improves such technological properties of yogurt as viscosity and water-holding capacity. The effect of electromagnetic waves on animal proteins and dairy products remains an understudied area of advanced research.

**Keywords.** Whey proteins, ultraviolet treatment, radiation dose, pathogenic microorganisms, functional properties of proteins

**For citation:** 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>

### Введение

Методы термической обработки являются частью молочной промышленности при производстве молока и молочных продуктов. Тепловая обработка молока применяется для инактивации патогенных микроорганизмов и ферментов, чтобы повысить стабильность продуктов во время хранения. В последнее время за рубежом вырос интерес к нетермическим процессам обработки молока, таким как импульсные электрические поля, высокое давление и ультрафиолетовое облучение. Это связано с их способностью оказывать высокое бактерицидное действие, сохраняя исходное качество сырья. Во многих отраслях пищевой промышленности повышается интерес к ультрафиолетовому излучению как к более щадящей нетермической технологии [1].

Ультрафиолетовое (УФ) излучение – это электромагнитная энергия, которая находится в спектре от 100 до 400 нм на длинах волн между

рентгеновскими лучами и видимым светом. УФ-спектр существует в трех диапазонах: УФ-А (от 315 до 400 нм), УФ-В (от 280 до 315 нм) и УФ-С (от 100 до 280 нм). Граница между УФ-В и УФ-С обусловлена тем, что свет с длиной волны менее 290 нм не достигает поверхности Земли, поскольку земная атмосфера, благодаря кислороду и озону, выполняет роль эффективного природного светофильтра. Граница между УФ-В и УФ-А основана на том, что излучение короче 320 нм вызывает более сильную эритему (покраснение кожи), чем свет в диапазоне 320–400 нм [2].

Наиболее эффективное бактерицидное действие, способствующее уничтожению множества патогенных микроорганизмов (например, бактерии, грибки, плесень, дрожжи и вирусы), находится в диапазоне УФ-С [3, 4]. Более выраженным бактерицидным действием обладают короткие ультрафиолетовые лучи (254–265 нм), которые поглощаются нуклеиновыми

кислотами, белками и ДНК. Наибольшее разрушающее влияние на ДНК ультрафиолет оказывает при длине волны 253,7 нм [5]. Причинами гибели возбудителей являются летальные мутации, утрата молекул ДНК способности к репликации и нарушение процесса транскрипции. Также УФ-излучение разрушает токсины. Например, дифтерийный, столбнячный, дизентерийный, брюшного тифа и золотистого стафилококка [6–8].

Помимо продления срока хранения или микробиологического контроля и безопасности пищевых продуктов, УФ-обработка оказывает влияние на структуру белков и их взаимодействие. Улучшение функциональных свойств молочных белков представляет большой коммерческий интерес, поскольку возможно их использование в качестве ценных пищевых ингредиентов при разработке продуктов питания с желаемыми характеристиками [9].

Целью работы является аналитический обзор применения ультрафиолетового излучения как инновационного метода нетермической обработки молочного сырья и его влияния на структуру, а также функциональные характеристики белков молока.

#### **Объекты и методы исследования**

В обзор были включены статьи, опубликованные на английском и русском языках. Поиск был ограничен периодом времени с 2004 г., когда стали появляться исследования по ультрафиолетовой обработке молока. Для поиска были использованы базы данных Scopus, Web of Science, Elsevier, ResearchGate и Elibrary.

#### **Результаты и их обсуждение**

**Бактерицидный эффект ультрафиолетового излучения.** УФ-излучение применяется для дезинфекции воды и пастеризации фруктовых напитков, таких как соки, являясь одной из перспективных, недорогих и энергоэффективных нетепловых технологий [6, 10, 11]. Широко распространено обеззараживание ультрафиолетовым облучением упаковочных материалов [12–14]. УФ-излучение также используется для обеззараживания воздуха и поверхностей, что является актуальным в сфере медицины, транспорта, промышленных предприятий и т. д., особенно в последние 1–2 года в связи с распространением коронавирусной инфекции. Согласно рекомендациям Министерства здравоохранения РФ от 07.05.2021 и Национальной ассоциации специалистов по контролю инфекций, связанных с оказанием медицинской помощи, от 14.05.2020 требуемая УФ-доза для инактивации SARS-CoV-2 (COVID-19) при эффективности обеззараживания 99,9 % составляет 25 мДж/см<sup>2</sup>.

Ограниченная способность УФ-С света проникать в мутные жидкости считалась одним из основных препятствий для его использования в качестве

нетепловой технологии для обработки молока [15]. В сравнении с водой молоко или молочная сыворотка имеют разные оптические и физические свойства, а также химический состав, влияющие на проникновение УФ-излучения в продукт из-за присутствия большого количества поглощающих УФ-С соединений и взвешенных частиц, тем самым ухудшая процесс дезинфекции. Однако правильный источник УФ-излучения, а также конструкция самого модуля могут повысить эффективность инактивации микроорганизмов как за счет увеличения его проникновения в жидкость, так и за счет использования более высокой интенсивности УФ-излучения [16].

Существует ряд источников ультрафиолетового излучения, в том числе ртутные тлеющие разряды низкого давления, ртутные разряды среднего давления, импульсный ксенонный дуговой разряд, ксенонный эксимер и дуга под флюсом. Электрический разряд ионизирует газ, который излучает фотоны. Примерно 95 % УФ-света, излучаемого ртутными дугами низкого давления, имеет длину волны 253,7 нм и считается эффективным источником для бактерицидных применений, поскольку фотоны больше всего поглощаются ДНК микроорганизмов на этой длине волны. Излучение с длиной волны ниже 230 нм эффективно для диссоциации химических соединений. На длинах волн ниже 200 нм (например, 185 нм) из кислорода образуется озон и органические соединения могут окисляться [17].

Согласно ГОСТ 31449-2013 в сыром молоке количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов не должно превышать  $1,0 \times 10^5$  КОЕ/см<sup>3</sup> или 5 log<sub>10</sub> КОЕ/мл. Доза УФ-излучения, необходимая для 10-кратного уменьшения (на один порядок) микробной популяции, может инактивировать 90 % (один log<sub>10</sub>) микробной нагрузки в пищевой среде. Также она коррелирует с количеством энергии, поглощаемой фракционной популяцией жизнеспособных клеток. Эта величина обычно используется для характеристики УФ-чувствительности микробных групп [18]. УФ-С излучение снижает количество бактерий, но доза, необходимая для достижения нужного показателя (5-логарифмическое уменьшение), вызывает неприятный и индуцированный светом привкус молока. Проведено множество исследований, доказавших бактерицидную эффективность УФ-С излучения молока [16, 19–22]. Коротковолновое ультрафиолетовое облучение предполагает нетепловой метод обработки в непрерывном потоке, который может обеспечить безопасность против большинства микроорганизмов. Ультрафиолетовая обработка в качестве дополнения к термической пастеризации может обеспечить лучшее поддержание качества молока [22].

Таблица 1. Дозы ультрафиолетового излучения при длине волны 253,7 нм, необходимые для инактивации различных групп микроорганизмов

Table 1. Doses of ultraviolet radiation (253.7 nm) required to inactivate various groups of microorganisms

Группа микроорганизмов	Доза облучения мДж/см <sup>2</sup>
Энтеробактерии	2–8
Кокки и микрококки	1,5–20,0
Спорообразующие	4–30
Кишечные вирусы	5–30
Дрожжи	2,3–8,0
Грибы	30–300
Простейшие	60–120
Водоросли	300–600

Бактерицидный эффект зависит от дозы УФ-излучения. В таблице 1 приведены примеры влияния доз, необходимых для экспоненциального разрушения различных микроорганизмов [23].

Доза облучения является произведением интенсивности света и продолжительности воздействия. Интенсивность света в каждой точке объема жидкости зависит как от мощности ламп, так и от эффекта проникновения УФ-света через жидкую среду. Эффект проникновения УФ-излучения зависит от типа жидкости и коэффициента поглощения УФ-С, от растворимых растворенных веществ, присутствующих в жидкости, и от взвешенных веществ. Молоко и сыворотка имеют высокий коэффициент поглощения УФ-С излучения, которое проникает в жидкость всего на несколько миллиметров, а не на несколько сантиметров, как в случае воды [1, 24].

Современное оборудование для УФ-обработки обычно включает трубку, проницаемую для УФ-излучения, через которую перекачивается жидкий продукт. Поток в трубке может быть турбулентным или ламинарным. В качестве критерия подобия течения жидкости выступает число Рейнольдса. Например, для прямых гладких труб критическое значение числа Рейнольдса  $Re_{кр} = 2300$ , а движение жидкости при  $Re < Re_{кр}$  будет устойчивое ламинарное. Движение при условии  $Re > Re_{кр}$  становится неустойчивым турбулентным. Устойчивый турбулентный характер поток жидкости приобретет при  $Re > 10^4$  [25]. Турбулентный поток обусловлен хаотичным движением частиц жидкости, которые возникают в результате вихревых потоков течения. При ламинарном потоке частицы жидкости не перемешиваются и движутся слоями по параллельным траекториям [26].

Турбулентный поток постоянно обновляет поверхность и обеспечивает контакт всех частей

жидкости с ультрафиолетовым излучением [27]. Ламинарный поток проходит в очень тонком слое [16].

В различных исследованиях приводятся данные об использовании УФ-обработки с непрерывным турбулентным потоком в сочетании с пастеризацией в качестве способа увеличения срока хранения молока как минимум на 30 %. В лабораторных исследованиях, проведенных в Калифорнийском университете в Дэвисе, для обработки предварительно пастеризованного молока жирностью 3,5 и 2 % была использована УФ-система с непрерывным турбулентным потоком при 254 нм и дозах облучения 880 и 1760 Дж/л. Молоко обрабатывали при 6 °С в канале диаметром 0,9–1,6 мм над кварцевым рукавом со скоростью 4000 л/ч. Подобная обработка показала свою бактерицидную эффективность, увеличив срок хранения молока до 28–35 дней. Испытания показали, что дозы облучения ниже 880 Дж/л оказывают незначительное влияние на патогены и микроорганизмы. Органолептическая оценка (метод треугольника) не показала различий между необработанным контрольным образцом молока 3,5 % жирности и образцом молока 2 % жирности (880 Дж/л). В остальных УФ-обработанных образцах молока были обнаружены сенсорные дефекты, описываемые как «сгоревший», «выключенный», «сильный» и «несвежий». Сенсорный дефект, связанный с воздействием ультрафиолетового излучения, был связан с окислением липидов. Об этом свидетельствует увеличение количества веществ, реагирующих с тиобарбитурином [28].

В работе J. C. Sappozzo и др. исследованы химические изменения в составе сырого молока, подвергнутого УФ-воздействию в непрерывном турбулентном потоке в зазоре 7,75 мм со скоростью 4000 л/ч и дозами облучения 1045 и 2090 Дж/л. Их сравнивали с традиционной термической пастеризацией и комбинацией данных процессов (до или после УФ-излучения). Проведенное сравнительное исследование не выявило каких-либо статистически значимых химических изменений в отношении содержания жира, белка, золы, влажности, профиля жирных кислот и окисления липидов. Авторы пришли к выводу, что технологию У-излучения с турбулентным потоком можно рассматривать как альтернативу нетермической обработке молока для продления срока хранения [19].

Результаты исследования J. A. Ansari и др. показали, что предварительная ультрафиолетовая обработка молока (доза облучения  $2,37 \pm 0,126$  Дж/мл) перед пастеризацией может стать альтернативой стерилизации обезжиренного молока (135 °С, 3 с) [29].

В таблице 2 показаны некоторые результаты научных исследований влияния УФ-излучения на бактерицидный эффект молока, молочной сыворотки и молочных продуктов.

Таблица 2. Бактерицидный эффект УФ-обработки молока и молочных продуктов

Table 2. Bactericidal effect of UV treatment on milk and dairy products

Объект исследования	Условия обработки	Целевой микроорганизм	Бактерицидный эффект	Ссылка
Сырое молоко	Доза облучения 1,07 Вт/м <sup>2</sup> , температура 5 °С, время 60 с	<i>Staphylococcus aureus</i>	Снижение обсемененности на 7 log <sub>10</sub> КОЕ/мл	[30]
Козье обезжиренное молоко	Доза облучения 15,8 ± 1,6 мДж/см <sup>2</sup> , температура 4 °С, время 18 с	<i>Listeria monocytogenes</i>	Снижение обсемененности на 5 log <sub>10</sub> КОЕ/мл	[31]
Обезжиренное молоко	Лампа 40 Вт, доза облучения 168,33 мДж/см <sup>2</sup>	Суррогатные вирусы (MS2 и T1UV), бактерии ( <i>Escherichia coli</i> ATCC 25922, <i>Salmonella enterica serovar Typhimurium</i> ATCC 13311 и <i>Listeria monocytogenes</i> ATCC 19115)	Снижение обсемененности более чем на 5 log <sub>10</sub> КОЕ/мл	[4]
Сырое молоко, обезжиренное молоко	Доза облучения 11,187 мДж/см <sup>2</sup> , длина волны 253,7 нм	<i>E. coli</i> W1485, <i>Bacillus cereus</i>	Максимальное снижение <i>E. coli</i> составило 7,8 log <sub>10</sub> КОЕ/мл в обезжиренном молоке, в сыром – 4,1 log <sub>10</sub> КОЕ/мл. Для обезжиренного молока максимальное снижение <i>B. cereus</i> составило 2,72 log <sub>10</sub> КОЕ/мл, для сырого – 2,65 log <sub>10</sub> КОЕ/мл	[32]
Сырое молоко	Доза облучения 39 (98 мДж/см <sup>2</sup> ) и 48 Вт (109,9 мДж/см <sup>2</sup> )	Общая бактериальная нагрузка	Снижение обсемененности на 4,70 (39 Вт) и 4,60 log <sub>10</sub> КОЕ/мл (48 Вт) за 120 мин	[33]
Полутвердый сыр	Доза облучения 44 Дж/см <sup>2</sup> , расстояние до объекта 13 см, время 45 с	<i>S. aureus</i> и <i>E. coli</i> O157:H7	Снижение обсемененности на 1,62 и 3,02 log <sub>10</sub> КОЕ/см <sup>3</sup> соответственно	[34]
Итальянский сыр Fiordilatte	Длина волны 253,7 нм, излучение до продукта 2 см, доза облучения 20 Вт/м <sup>2</sup> , время обработки от 5 до 750 с	<i>Pseudomonas</i> spp., <i>Enterobacteriaceae</i>	Снижение количества микроорганизмов на 1–2 log <sub>10</sub> КОЕ/см <sup>3</sup>	[35]
Сыр Рикотта	Расстояние от источника излучения до облучаемого объекта 6 см, время облучения – 400 с, доза 6,54 Дж/см	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Уровень <i>Pseudomonas</i> spp. в сыре, инокулированном 103, 104 и 105 КОЕ/мл после УФ-облучения, составил 2,1 ± 0,1, 2,1 ± 0,1, 4,6 ± ± 0,1 соответственно	[36]
Подсырная сыворотка	Доза облучения 450 Вт/м <sup>2</sup> , температура 28 °С, время 100 с	Общая бактериальная нагрузка	Снижение обсемененности на 3,5 log <sub>10</sub> КОЕ/мл	[37]

В исследовании К. Krishnamurthy и др. для снижения бактериальной обсемененности молока *Staphylococcus aureus* на 7 log<sub>10</sub> КОЕ/мл доза УФ-излучения составила 1,07 Вт/м<sup>2</sup> [30].

В работе К. Е. Matak и др. УФ-излучение (15,8 ± ± 1,6 мДж/см<sup>2</sup>) использовалось для снижения количества *Listeria monocytogenes* в обезжиренном козьем молоке. В результате обсемененность снизилась на 5 log<sub>10</sub> КОЕ/мл [31].

В работе D. M. Ward и др. была исследована эффективность УФ-облучения (лампа 40 Вт, доза

облучения 168,33 мДж/см<sup>2</sup>) обезжиренного молока, инокулированного двумя суррогатными вирусами (MS2 и T1UV) и тремя видами бактерий (*Escherichia coli* ATCC 25922, *Salmonella enterica serovar Typhimurium* ATCC 13311 и *L. monocytogenes* ATCC 19115). В результате микробная нагрузка суррогатными вирусами и бактериями была снижена более чем на 5 log<sub>10</sub> КОЕ/мл. Облученное обезжиренное молоко не проявило токсичности для клеток печени и кишечника мышей [4].

В университете Иллинойса (США) исследовали влияние числа Рейнольдса (Re) на инактивацию эндоспор *E. coli* W1485 и *Bacillus cereus* в сыром и обезжиренном молоке. Исследования проводились в двух УФ-реакторах со спиральными трубками, имеющих внутренний диаметр 1,6 и 3,2 мм. Время пребывания в них продукта составило 11,3 с при комнатной температуре. Эффективность инактивации *E. coli* (на  $7,8 \log_{10}$  КОЕ/мл, что соответствовало Re 532) и *B. cereus* (на  $2,65 \log_{10}$  КОЕ/мл при значении Re 713) была выше в обезжиренном молоке, чем в сыром, в УФ-реакторе с диаметром трубок 1,6 мм. Максимальное снижение *E. coli* и *B. cereus* в сыром молоке составило 4,1 (Re 713) и  $2,72 \log_{10}$  КОЕ/мл (Re 1024) соответственно. На протяжении всего исследования инактивация эндоспор *B. cereus* была ниже, чем у клеток *E. coli* [32].

В работе D. Makararong и др. исследовано влияние УФ-излучения на общую микробную нагрузку в сыром молоке непосредственно после доения. Эксперименты проводились при скорости потока 2,4 и 7 л/мин и мощности УФ-излучения 39 и 48 Вт (253,7 нм). Количество микроорганизмов уменьшилось на 4,70 (39 Вт) и  $4,60 \log_{10}$  КОЕ/мл (48 Вт) за 120 мин. При времени пребывания 4,95 с и дозах УФ-излучения 98 и  $109,9 \text{ мДж/см}^2$  наблюдалось уменьшение количества микроорганизмов без значительного влияния мощности УФ-С на окисление молочного жира [33].

В работе N. M. Keklik и др. изучалось влияние импульсного ультрафиолетового излучения на *S. aureus* и *E. coli* O157:H7 на поверхности свежего сыра. Импульсный ультрафиолетовый свет подавался на сыр в течение разного времени (5, 15, 30, 45, 60 с) на расстоянии 5, 8 и 13 см от кварцевого окна. Основываясь на уровне инактивации, времени и визуальной оценке, эффективными режимами обработки выбраны продолжительность 45 с и расстояние 13 см (доза облучения  $44 \text{ Дж/см}^2$ ). Данная обработка снизила обсемененность на 1,62 и  $3,02 \log_{10}$  КОЕ/см<sup>2</sup> для *S. aureus* и *E. coli* O157:H7 соответственно, не изменив ( $P > 0,05$ ) pH, окисление липидов и содержание влаги в сыре. Когда сыр кашар толщиной 0,5 см обрабатывали импульсным ультрафиолетовым светом на расстоянии 5 см от кварцевого стекла, то был обнаружен высокий коэффициент пропускания энергии – 9,16 %. Результаты демонстрируют, что импульсный ультрафиолетовый свет имеет потенциал для последующей обработки поверхностей полутвердых сыров [34].

В работе V. Lacivita и др. исследовано положительное действие на инактивацию *Pseudomonas* spp. и *Enterobacteriaceae* в итальянском сыре Fiordilatte от 1 до  $2 \log_{10}$  КОЕ/см<sup>3</sup>. Результат показал увеличение срока годности на 80 %, которое было достигнуто

путем выбора адекватных условий обработки сыра под воздействием дозы излучения  $6,0 \text{ мДж/м}^2$  [35].

Аналогичное исследование проводили на сыре Рикотта. Задачей работы было изучение влияния УФ-излучения на дезактивацию искусственно инокулированной *Pseudomonas fluorescens* в различных концентрациях ( $1,0 \times 10^3$ ,  $1,0 \times 10^4$  и  $1,0 \times 10^5$  КОЕ/мл). Для обработки образцов ультрафиолетовым облучением был сконструирован блок, состоящий из 4 ламп мощностью 95 Вт. Длина волны источников излучения – 254 нм, доза облучения образцов –  $6,54 \text{ Дж/см}^2$ , расстояние от источника излучения до образца – 3,5 см, время обработки – 30 с. Результат показал, что контрольные образцы сыра стали непригодными с точки зрения микробиологии менее чем через 5 дней. Обработанные УФ-излучением образцы сохранялись более 6 дней. Уровень *Pseudomonas* spp. в сыре, инокулированном в количестве  $1,0 \times 10^3$ ,  $1,0 \times 10^4$  и  $1,0 \times 10^5$  КОЕ/мл без УФ-обработки, составил  $3,6 \pm 0,1$ ,  $4,4 \pm 0,1$  и  $5,7 \pm 0,1$  КОЕ/мл, а после УФ-облучения –  $2,1 \pm 0,1$ ,  $2,1 \pm 0,1$  и  $4,6 \pm 0,1$  КОЕ/мл соответственно [36].

В молочной промышленности УФ-излучение используется для стерилизации подсырной сыворотки как альтернатива пастеризации, поскольку сыворотку часто приходится хранить в течение некоторого времени перед переработкой в концентрат или изолят сывороточных белков и ее нельзя термически пастеризовать. Поэтому снижение бактериальной нагрузки в молочной сыворотке с помощью УФ-излучения для улучшения сохраняемости привлекательно. В работе M. J. N. Simmons и др. было зафиксировано снижение полной микробной нагрузки на  $3,5 \log_{10}$  КОЕ/мл в подсырной сыворотке при дозе УФ-излучения  $450 \text{ Вт/м}^2$  [37].

Большая часть доступной информации по УФ-обработке сосредоточена на аспектах сохранения микробиологической безопасности молока и молочных продуктов. Обеспечение населения качественными и безопасными продуктами питания является одной из основных задач пищевой промышленности [38–41]. Имеется ограниченное количество опубликованной информации о влиянии УФ-излучения на структурные изменения молочных белков и их взаимодействие [9]. Физико-химические и сенсорные характеристики молока и молочных продуктов важны для обеспечения их качества и безопасности. На них влияют параметры УФ-облучения, включая тип обработки и интенсивность. УФ-обработка должна эффективно обеспечивать микробиологическую чистоту, сохраняя питательные и сенсорные свойства продуктов [22].

**Влияние УФ-излучения на физико-химические изменения молока.** Существуют исследования, посвященные оценке возможных негативных последствий УФ-излучения на физико-химические и сенсорные характеристики молока и молочных продуктов. Большинство исследований сводится к

Таблица 3. Ароматически активные соединения (фактор разбавления аромата), идентифицированные в сыром, пастеризованном и УФ-молоке

Table 3. Aromatic compounds (aroma dilution factor) in raw, pasteurized, and UV-treated milk

Соединение	Фактор разбавления аромата			Аромат
	Сырое молоко	Пастеризованное молоко	УФ-молоко	
Диацетил	–	< 1	6	Масло
3-метилтиофен	11	13	11	Пластик
Гексанал	3	2	6	Трава
Этилгексаноат	3	–	5	Сложный эфир
2-Нонанон	3	< 1	5	Окисленный
(E, Z)-2,6-нонадиеналь	2	4	5	Огурец
(E)-2-ноненал	5	3	3	Сено
(E, E)-2,4-нонадиеналь	4	3	5	Окисленный

тому, что воздействие ультрафиолетового света не оказывает существенного влияния на химический состав молока [22, 42].

Среди макроэлементов молока углеводы менее чувствительны к УФ-излучению. Некоторые гликозидные связи, связывающие моносахариды, разрываются при воздействии излучения, что снижает степень полимеризации и увеличивает вязкость растворов полисахаридов [22]. Основным негативным последствием УФ-обработки молока является возможное окисление липидов или белков, что влечет за собой порчу продукта [43–45]. При окислении липидов могут образовываться такие нежелательные вещества, как пероксиды, альдегиды, кетоны, оксокислоты и низкомолекулярные жирные кислоты, снижающие пищевую и биологическую ценность продукта [46]. За окислительные изменения отвечают содержащиеся в сыром молоке прооксиданты. Достаточно сильным прооксидантом молока является трехвалентное железо. Также к прооксидантам относятся медь, кобальт, никель, марганец и др. Невысокое содержание аскорбиновой кислоты в молоке действует как прооксидант, регенерируя перферрильный радикал при инициации перекисного окисления липидов [47, 48]. При воздействии света окисление в молоке аскорбиновой кислоты в дегидроаскорбиновую (70–80 % остается в восстановленной форме) ускоряется. Скорость и степень окисления липидов молока обуславливаются их жирнокислотным составом. Свободные жирные кислоты окисляются быстрее, чем связанные, насыщенные жирные кислоты медленнее [47]. По мере увеличения дозы УФ-излучения степень окисления липидов и неприятного запаха в молочных продуктах увеличивается. Данный эффект является результатом окисления остатков ненасыщенных жирных кислот в липидах и фосфолипидах молока. Фотодеградация белков также приводит к появлению неприятного запаха и органолептическим изменениям в молоке [49]. За изменение запаха молока после его УФ-обработки отвечает повышение

концентрации таких летучих соединений, как альдегиды и кетоны. В работе В. Engin и др. после облучения молока в турбулентном потоке (доза УФ-излучения за один проход 13,87 Дж/мл) с помощью газовой хроматографии-ольфактометрии и газовой хроматографии-масс-спектрометрии были идентифицированы различные летучие соединения в сравнении с сырым и пастеризованным (65 °С, 30 мин) молоком [50]. Жирность всех исследуемых образцов молока составляла 3,32 %. Предподготовка включала экстрагирование молока диэтиловым эфиром с последующим центрифугированием и удалением эфирной фазы из верхнего слоя. На последнем этапе полученные экстракты, содержащие летучие нейтральные/основные и кислые вещества, постепенно разбавляли диэтиловым эфиром в соотношении 1:3 (об./Об.) пока с помощью газовой хроматографии-ольфактометрии не переставали обнаруживать запахи. Наибольшее разбавление определяли как фактор разбавления аромата (РА). Сводные данные исследования приведены в таблице 3.

Среди летучих соединений был обнаружен диацетил с маслянистой ноткой. Фактор разбавления аромата диацетила в УФ-молоке составил 6. Также в УФ-молоке было зафиксировано высокое значение разбавления аромата гексанала (РА = 6). Для сырого и пастеризованного молока фактор разбавления аромата гексанала составил 3 и 2 соответственно. Обнаруженные альдегиды, включая гексанал, (E, Z)-2,6-нонадиеналь и (E, E)-2,4-нонадиеналь, имели более высокие коэффициенты фактора разбавления аромата в обработанном УФ-излучением молоке, чем в других образцах [50].

Маркером окисления липидов является образование первичных (содержание гидроперекисей и оксипиринов) и вторичных продуктов окисления (активных форм тиобарбитуровой кислоты). В исследовании К. Е. Matak и др. с увеличением дозы ультрафиолета до  $15,8 \pm 1,6$  мДж/см<sup>2</sup> возросло содержание тиобарбитуровой кислоты и значения кислотности образцов козьего молока [31]. В

работе G. Nu и др. не было обнаружено изменений значений тиобарбитуровой кислоты сырого молока, обработанного УФ-С (доза 11,8 Вт/м<sup>2</sup>). Было установлено окисление белка по изменению количества его карбонильных групп. После УФ-обработки оно повысилось с 2,74 до 4,43 нмоль/мг белка [51].

Что касается белков молока, то двумя наиболее важными последствиями индуцированного УФ-излучением окисления являются разворачивание и агрегация. Степень денатурации после УФ-обработки менее интенсивна, чем при термическом воздействии [22]. Различные исследования показали, что казеины более восприимчивы к повреждению отдельных аминокислот, чем глобулярные белки ( $\alpha$ -лактальбумин и  $\beta$ -лактоглобулин) [52]. Воздействие УФ-излучения на белки связано с поглощением света ароматическими аминокислотами, триптофаном, тирозином и фенилаланином с последующим образованием свободных радикалов и межмолекулярных ковалентных связей. При обычно используемой длине волны 254 нм эти соединения имеют коэффициенты поглощения 1, 0,11 и 0,05 соответственно. Это указывает на то, что триптофан претерпевает изменения во время облучения УФ-С [15]. Обработка сывороточных белков ультрафиолетовым светом (280–295 нм) приводит к опосредованному триптофаном фотолузу дисульфидных связей, который вызывает разворачивание, олигомеризацию и агрегацию с образованием отдельных свободных тиолов [53]. В таблице 4 приведены научные результаты влияния УФ-излучения на структурные изменения молочных белков.

В работе S. Buhler и др. исследовано влияние УФ-обработки в сравнении с традиционной термообработкой при  $72,1 \pm 0,1$  °С в течение 15 с на белковый состав подсырной сыворотки. Для этого авторами был сконструирован УФ-реактор с 8 установленными амальгамными лампами с длиной волны 253,7 нм и мощностью 400 Вт [1]. Исследовали два образца обезжиренной (6 % сухих веществ) и концентрированной (22,8 % сухих веществ) подсырной сыворотки. Скорость потока при УФ-обработке составила 30 м<sup>3</sup>/ч для образцов обезжиренной сыворотки и 7,9 м<sup>3</sup>/ч для концентрированной. Доза облучения составила 40 мДж/см<sup>2</sup>. Было проведено количественное определение растворимых сывороточных белков и их гликозилированных форм в образцах сыворотки до и после УФ и термообработки. Авторами установлено, что УФ-обработка не изменяла количество (содержание  $\beta$ -лактоглобулина ( $\beta$ -лг) и  $\alpha$ -лактальбумина ( $\alpha$ -лг) составило 5 и 2 мг/мл соответственно) и степень гликозилирования растворимых белков сыворотки (14 и 6 % для  $\beta$ -лг и  $\alpha$ -лг соответственно) по сравнению с контрольными необработанными образцами.

Напротив, образцы, подвергнутые термообработке, показывали более низкие содержания растворимых сывороточных белков (4 и 1,6, мг/мл для  $\beta$ -лг и  $\alpha$ -лг соответственно). Было обнаружено, что их процент гликозилирования выше (15,0 и 6,4 % для  $\beta$ -лг и  $\alpha$ -лг соответственно). В результате оценки обработанных образцов сыворотки не было обнаружено потерь ароматических аминокислот, что подтверждает отсутствие окислительных процессов. УФ-обработка концентрированных образцов сыворотки вызывала незначительное уменьшение количества растворимых сывороточных белков (содержание  $\beta$ -лг и  $\alpha$ -лг составило 16 и 7 мг/мл соответственно) по сравнению с контролем (17 и 7,5 мг/мл для  $\beta$ -лг и  $\alpha$ -лг соответственно). Наименьшее содержание растворимых белков было установлено после термической обработки (14 и 5 мг/мл для  $\beta$ -лг и  $\alpha$ -лг соответственно). По сравнению с неконцентрированной сывороткой степень гликозилирования существенно не изменилась под действием УФ-обработки. Это подчеркивает тот факт, что процесс концентрирования оказывает незначительное влияние на качество продукта [1].

В исследовании Y. H. Kuan и др. было установлено улучшение эмульгирующих и пенообразующих свойств казеината натрия после 6 ч УФ-обработки (253,7 нм, 30 Вт), возникшие в результате перекрестного сшивания белков после длительного облучения [54]. Предварительно образцы казеината натрия массой около 15 г были нанесены тонким слоем на стерильные чашки Петри (диаметром 15 см), высушены в шкафу, а затем подвергнуты продолжительному воздействию УФ-излучения на расстоянии 30 см в шкафу. В образцах было зафиксировано снижение содержания свободных аминокислот с  $1,12 \pm 0,02$  до  $0,91 \pm 0,02$  и  $0,82 \pm 0,02$  ммоль/г на 4 и 6 ч УФ-излучения соответственно. Подобное изменение авторы связывают с нарушением вторичной и третичной структуры белков, приводящее к их сшиванию. Результаты оценки молекулярной массы белков методом электрофореза в полиакриламидном геле показали снижение интенсивности полос около молекулярной массы 75–150 кДа при длительном воздействии более 4 ч по сравнению с контрольным образцом. При воздействии в течение 6 ч все основные полосы исчезли, что указывало на индуцированное сшивание белков УФ-излучением (рис. 1). Пенообразующая способность в необработанном образце казеината натрия составляла 153 %, а после 4 и 6 ч УФ-воздействия возросла и составила 160 и 165 % соответственно [54].

В работе D. Scheidegger и др. исследован процесс окисления белков в обезжиренном и цельном молоке в результате УФ-обработки (15 Вт, интенсивность излучения 2,34 Вт) в течение 24 ч при 4 °С. Образцы объемом 5 мл разливали в чашки Петри диаметром 6 см



Таблица 4. Влияние УФ-излучения на структурные изменения молочных белков

Table 4. Effect of UV radiation on structural changes in milk proteins

Объект исследования	Условия обработки	Результаты исследования	Ссылка
Подсырная сыворотка (6 % сухих веществ)	Турбулентный поток, доза облучения 40 мДж/см <sup>2</sup>	Содержание растворимых белков не изменилось. Окислительные процессы отсутствовали	[1]
Концентрат сывороточных белков (22,8 % сухих веществ)		Незначительное снижение растворимых белков. Окислительные процессы отсутствовали	
Казеинат натрия	Мощность лампы 30 Вт, время 6 ч, расстояние до объекта 30 см	Снижение содержания свободных аминогрупп. Индуцированное сшивание белков УФ-излучением. Улучшение эмульгирующих и пенообразующих свойств	[54]
Обезжиренное молоко	Импульсное УФ-излучение, интенсивность излучения 2,34 Вт, температура 4 °С, время 24 ч, расстояние до объекта 30 см	Более высокие уровни N'-формилкинурина, чем у цельного молока. Олигомеризация белков	[55]
Цельное молоко		Более высокие уровни образования дитиозиновой связи. Олигомеризация белков	
Изолят сывороточных белков (1 % раствор)	Импульсное УФ-излучение от 4 до 16 Дж/см <sup>2</sup>	Увеличение содержания свободных SH-групп (разворачивание). Образование дисульфидных связей. Ассоциация промежуточных и более крупных белковых молекул. Образование растворимых агрегатов между $\beta$ -лактоглобулином ( $\beta$ -лг) и $\alpha$ -лактальбумином ( $\alpha$ -лг)	[56]
Изолят сывороточных белков (1 % раствор)	Доза УФ-излучения от 6,6 до 0,285 кДж/л	Изменения в третичной структуре белков. Денатурация и агрегация белков. Образование продуктов окисления (N-формилкинурина из триптофана и дитиозина из тирозина). Увеличение сульфгидрильных групп	[15]
Изолят сывороточных белков (5 % раствор)			
Раствор концентрата сывороточных белков (8 % белка)	Доза УФ-излучения 4 Дж/см <sup>2</sup>	Увеличение свободных SH-групп с 16,88 ± 1,62 ммоль/г белка в необработанном растворе до 27,47 ± 0,54 ммоль/г белка	[57]
	Доза УФ-излучения 12 Дж/см <sup>2</sup>	Увеличение свободных SH-групп с 16,88 ± 1,62 ммоль/г белка в необработанном растворе до 25,65 ± 0,97 ммоль/г белка	
Казеин Сывороточные белки	Доза УФ-излучения 6 Дж/см <sup>2</sup>	Снижение интенсивности полос $\beta$ -лг и $\alpha$ -лг. Полное удаление полос бычьего сывороточного альбумина и иммуноглобулинов. Снижение аллергенности на 25 % для $\alpha$ -казеина на 27,7 % для фракций сыворотки	[61]
Раствор $\alpha$ -казеина	Доза облучения 11,8 Вт/м <sup>2</sup>	Снижение содержания во вторичной структуре белка $\beta$ -листов и увеличение $\alpha$ -спиралей и $\beta$ -витков. Снижение аллергенности	[62]

и подвергали воздействию УФ-света внутри камеры (30 см в высоту, 50 см в длину и 20 см в ширину). Контрольные образцы были завернуты в алюминиевую фольгу, чтобы избежать воздействия излучения. Окисление белков оценивали по образованию карбониллов белка и дитиозиновой связи (DiTug) и изменениям молекулярной массы (фрагментация и полимеризация белка). Через 1 ч УФ-излучения было

обнаружено присутствие карбонильных фрагментов из-за окисления триптофана, гистидина и метионина. Карбонилы белков увеличивались как функция времени облучения для цельного и обезжиренного молока. После 24 ч воздействия УФ-излучения у обезжиренного молока были более высокие уровни N'-формилкинурина, чем у цельного. Напротив, образцы цельного молока имели более высокие уровни

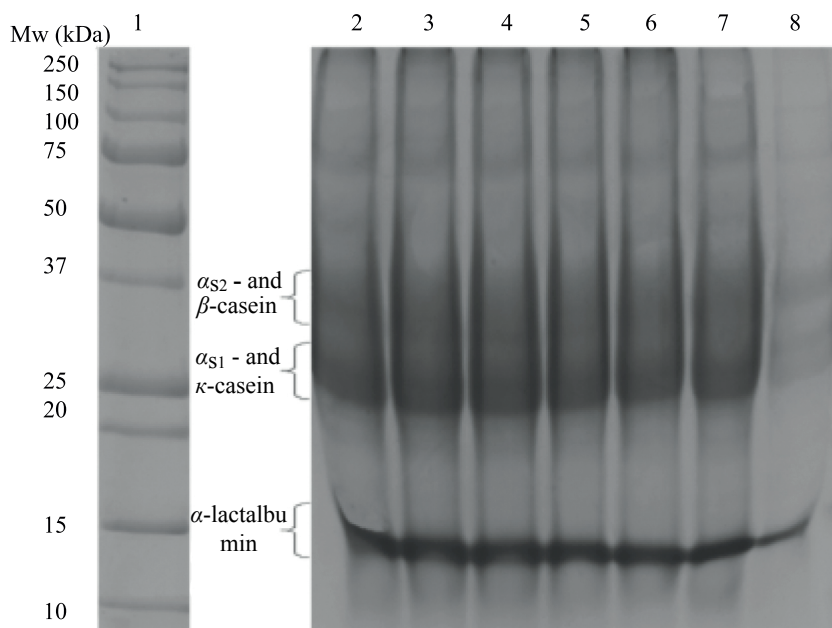


Рисунок 1. Образцы SDS-PAGE для контроля и казеината натрия, подвергнутые УФ-излучению: дорожка 1 – стандарт молекулярной массы; дорожка 2 – контроль; дорожки 3–8 – продолжительность воздействия УФ-излучения 30, 60, 90, 120 мин, 4 и 6 ч соответственно

Figure 1. SDS-PAGE samples for control and sodium caseinate exposed to UV light: lane 1 – molecular weight standard; lane 2 – control; lanes 3–8 – UV exposure time 30, 60, 90, 120 min, 4 and 6 h, respectively

DiTуг. Образование внутри- или межмолекулярных связей DiTуг может указывать на изменения в третичной структуре или олигомеризацию белков [55].

В работе М. А. В. Siddique и др. было исследовано влияние импульсного УФ-излучения на агрегацию растворов изолята сывороточного белка. При обработке 1 % раствора изолята сывороточного белка в натрий-фосфатном буфере (рН = 7,5) доза облучения составила от 4 до 16 Дж/см<sup>2</sup>. Структурную модификацию и агрегацию сывороточного белка оценивали путем определения свободных SH-групп и спектров УФ-поглощения. Изолят сывороточного белка после УФ-обработки показал структурные изменения. Об этом свидетельствует увеличение содержания свободных SH-групп (разворачивание) и последующее образование небольшой фракции агрегации развернутых белков из-за гидрофобных взаимодействий и образования дисульфидных связей. Мутность, средний размер частиц и индекс агрегации увеличились во всех исследуемых образцах. При анализе гель-электрофореза авторы наблюдали ассоциацию промежуточных и более крупных белковых молекул и образование растворимых агрегатов между β-лактоглобулином и α-лактальбумином. Результаты исследования продемонстрировали потенциал УФ-обработки сывороточных белков к денатурации белка с минимальным образованием агрегатов раство-

римого белка. Авторы работы предположили, что частичная денатурация и образование небольшой фракции растворимых агрегатов могут улучшить функциональные и технологические свойства изолята сывороточного белка [56].

В работе Е. Kristo и др. изучены структурные изменения 1 и 5 % растворов сывороточных белков, вызванные УФ-обработкой на длине волны 254 нм в системе непрерывного действия УФ-реактора Тейлора-Куэтта, оснащенного трубопроводом для жидкости из тефлона FEP (фторированный этиленпропилен) и статическим смесительным элементом. Дозировку УФ-излучения варьировали, изменяя скорость потока растворов изолята сывороточного белка (от 30 до 800 мл/мин). В результате этого уровни дозы УФ-излучения составляли от 6,6 до 0,285 кДж/л. На основе флуоресцентной спектроскопии и определений гидрофобности было показано, что УФ-обработка вызывает изменения в третичной структуре белков. Авторы наблюдали денатурацию и агрегацию белков, образование продуктов окисления (N-формилкинуренин из триптофана и дитиозин из тирозина), повышенную чувствительность белков к гидролизу пепсином и увеличение сульфгидрильных групп. Во всех аспектах влияние на белки в 1 % растворе было больше, чем в 5 %.

Это было связано с более высокой мутностью и меньшим проникновением УФ-излучения в 5 %-ный раствор [15].

В исследовании O. Díaz с соавторами установлено увеличение свободных SH-групп растворов сывороточных концентратов (8 % белка) с  $16,88 \pm 1,62$  ммоль/г белка в необработанном растворе до  $27,47 \pm 0,54$  и  $25,65 \pm 0,97$  ммоль/г белка в обработанных растворах УФ-облучением в тонком слое при применении доз 4 и 12 Дж/см<sup>2</sup> [57]. Также при данных дозах облучения анализ профиля SE-HPLC (высокоэффективной жидкостной хроматографии) показал уменьшение  $\beta$ -лактоглобулина и  $\alpha$ -лактальбумина и увеличение белковых агрегатов с высокой молекулярной массой. Эти различия могут быть вызваны УФ-опосредованным лизисом дисульфидных связей  $\alpha$ -лактальбумина и индуцированной полимеризацией. Исходя из полученных данных, было установлено, что  $\alpha$ -лактальбумин больше подвержен действию УФ-излучения, чем  $\beta$ -лактоглобулин, и денатурируется при более низких дозах облучения [57].

Одним из направлений существующих исследований применения УФ-излучения является снижение аллергенности молочных белков. Данная проблема освещена во многих работах российских и зарубежных исследователей [58–60]. В исследовании S. V. R. K. Tammineedi и др. было изучено влияние УФ-излучения (8,7 Вт, длина волны 253,7 нм) на стабильность и аллергенность казеина и сывороточных белков [61]. Оценка молекулярной массы методом гель-фильтрации показала, что обработка в течение 15 мин (расчетная доза излучения 6 Дж/см<sup>2</sup>) привела к снижению интенсивности полос  $\beta$ -лг и  $\alpha$ -лг и полному удалению полос бычьего сывороточного альбумина и иммуноглобулинов. Это также вызвало снижение значений связывания IgE по сравнению с контрольными образцами, что указывает на снижение аллергенности белков (снижение на 25 % для  $\alpha$ -казеина и снижение на 27,7 % для фракций сывотки) [61].

В работе G. Hu и др. рассматривалось влияние обработки высокого гидростатического давления, УФ-С и дальним ИК-диапазоном на морфологию и ультраструктуру  $\alpha$ -казеина. Обработку УФ-излучением проводили при 254 нм. Растворы  $\alpha$ -казеина (образцы 10 мл) помещали в чашку Петри (диаметром 90 мм и высотой 15 мм) на глубину ~ 1 мм и подвергали воздействию УФ-С излучения (доза облучения 11,8 Вт/м<sup>2</sup>) в течение 5 и 15 мин. Обработка УФ-излучением снизила содержание во вторичной структуре белка  $\beta$ -листов и увеличила содержание  $\alpha$ -спиралей и  $\beta$ -витков по сравнению с контролем. При 5 мин УФ-обработки наблюдалось уменьшение  $\beta$ -листов по сравнению с обработкой 15 мин. УФ-обработка вызвала разворачивание  $\alpha$ -казеина со снижением содержания  $\beta$ -слоев. УФ-С (15 мин)

обработка была более эффективна в отношении снижения аллергенности  $\alpha$ -казеина [62].

Таким образом, анализ различных научных исследований показал, что УФ-обработка вызывает некоторые изменения сывороточных белков из-за поглощения света ароматическими аминокислотами, особенно триптофаном. Они включают изменения третичной структуры белков, низкие уровни денатурации и агрегации, образование продуктов окисления, повышенную восприимчивость к протеолизу, снижение аллергенности, разрыв дисульфидных связей и увеличение сульфгидрильных групп [63]. Что касается казеина, то УФ-обработка существенно не изменяет его молекулярную массу. Однако при продолжительной обработке происходит сшивание белков и снижение их аллергенности [61, 62].

**Применение УФ-излучения для улучшения техно-функциональных свойств молочных продуктов.** Одним из перспективных направлений применения УФ-обработки является разработка пленочных покрытий на основе концентратов сывороточных белков с адекватной проницаемостью и механическими свойствами [57, 64, 65]. Способность глобулярных сывороточных белков разворачиваться и связываться с новыми полимерными структурами при определенных условиях делает их отличным сырьем для изготовления пленок и покрытий [66–68]. УФ-облучение двойных связей и ароматических колец приводит к образованию свободных радикалов и аминокислотных остатков, которые образуют новые поперечные связи при формировании белковой пленки [69]. С увеличением дозы облучения пленки демонстрируют повышенную прочность, не меняя барьерных свойств. Это особенно важно для обеспечения длительного срока хранения и поддержания качества продукции, поскольку основной функцией упаковочных материалов является их защита от внешних воздействий, таких как проницаемость кислорода и паропроницаемость [70, 71].

В работе Z. Ustunol и B. Mert была исследована обработка УФ-С (0,324 кДж/см<sup>2</sup> в течение 180 мин) как процедура сшивания белков при получении пленок из сывороточных белков. Сшивание под действием УФ-излучения происходило из-за образования свободных радикалов ароматических аминокислот, таких как тирозин и фенилаланин, которые участвуют в образовании межмолекулярных ковалентных связей. УФ-обработку сравнивали с использованием химических сшивающих агентов (глутаральдегид, формальдегид, полимерный (крахмальный) диальдегид и карбонилдиимидазол). Использование УФ-излучения и химических сшивающих агентов привело к увеличению прочности пленки на разрыв, но, в

Таблица 5. Влияние УФ-излучения на техно-функциональные свойства молочных продуктов

Table 5. Effect of UV radiation on the techno-functional properties of dairy products

Наименование продукта	Условия обработки молока	Результат исследования	Ссылка
Сыр Чеддер	Температура 73,5 °С, доза облучения 1045 кДж/л, время 15 с	Снижение содержания холестерина на 18 %	[27]
Йогурт	Температура 85 °С, доза облучения 1060 мДж/см <sup>2</sup> , 400 мм.рт.ст, время 20 мин	Снижение синерезиса при хранении на 60 %	[16]
Йогурт	Доза облучения 13,87 Дж/мл за 1 проход	Наибольшее значение вязкости (24,75 ± 0,75 спс) и наименьшее значение синерезиса (3,29 ± 0,01 мл) в йогурте по сравнению с образцами из сырого и пастеризованного молока	[75]

отличие от химической обработки, УФ-обработка не повлияла на растворимость, водо- и кислородную проницаемость пленки [72].

В работе М. Schmid и др. пленки изолята сывороточного белка обрабатывали УФ-С излучением в дозах до 0,0314 кДж/см<sup>2</sup> в течение 200 мин. Это увеличивало прочность пленок на разрыв, но не повлияло на их механические свойства (модуль Юнга, удлинение при разрыве) или барьерные свойства [73].

В исследовании О. Díaz и др. оценивалось влияние обработки УФ-излучением на пленкообразующие свойства концентратов сывороточных белков с активной кислотностью рН 9 и 11. УФ-излучение увеличивало агрегацию белков при указанных значениях рН. Свободные сульфгидрильные группы уменьшались при рН 9 и увеличивались при рН 11. Ультрафиолетовая обработка растворов с рН 9 увеличивала количество свободных сульфгидрильных групп и давала пленки с более высокой растворимостью, прочностью на разрыв, модулем упругости, свойствами прокола и меньшим удлинением при разрыве. УФ-излучение при рН 11 уменьшало количество свободных сульфгидрильных групп, а пленки демонстрировали более высокую растворимость и модуль упругости, а также меньшую деформацию прокола и удлинение при разрыве, чем необработанные пленки [74]. Таким образом, сочетание УФ-излучения и подщелачивания можно использовать для получения пленок с адаптируемыми свойствами для многократного применения в упаковке пищевых продуктов.

УФ-С излучение также применяют для улучшения питательных или сенсорных аспектов пищевых продуктов, в том числе совместно с традиционной тепловой обработкой пищевых сред. Поскольку в РФ производство продукции из сырого непастеризованного молока, согласно ТР ТС 033/2013, запрещено, то комбинация данных технологий для улучшения техно-функциональных свойств молочных продуктов является перспективной.

В таблице 5 представлены некоторые результаты научных исследований применения УФ-обработки отдельно или совместно с другими технологическими процессами в технологии молочных продуктов, показавшие улучшение технологических или физико-химических показателей.

В исследовании F. P. Cilliers и др. УФ-С излучение в сочетании с высокотемпературной кратковременной пастеризацией (73,5 °С, 15 с) применялось к сырому молоку для производства сыра Чеддер. Авторы провели обширное исследование микробиологических, химических и сенсорных аспектов молока, облученного в турбуляторе SurePure Turbulator без рециркуляции при дозировке 1045 кДж/л. Было установлено, что УФ-обработка не влияла на активность фермента сыворотки и лактопероксидазы. Также была зафиксирована аналогичная традиционной тепловой пастеризации антимикробная эффективность УФ-С излучения. Содержание холестерина после комбинированной обработки было снижено на 18 % [27].

В работе P. Vázquez-Mazo и др. было проведено исследование воздействия ультрафиолетового облучения при производстве йогурта. Ультрафиолетовая обработка молока перед заквашиванием проводилась одновременно в процессе пастеризации при температуре 85 °С в течение 20 мин в условиях вакуума (400 мм.рт.ст) и без. Доза облучения составляла 1060 мДж/см<sup>2</sup>. Для проведения эксперимента авторами был разработан УФ-реактор для обработки молока в тонком слое. Система состояла из двух последовательно соединенных УФ-ламп (30 Вт, длина волны 253,7 нм), расположенных внутри стеклянной трубки объемом 0,22 л. После окончания обработки молоко охлаждали и заквашивали при температуре 43 °С симбиотическими культурами *Streptococcus thermophilus* и *Lactobacillus bulgaricus*. Исследуемые образцы йогурта хранились при 4 °С в течение 21 суток. Йогурт, полученный из обработанного в условиях вакуума УФ-молока,

показал на 60 % меньше синерезиса и высокий индекс белизны, демонстрируя аналогичные механические свойства, по сравнению йогуртом, полученном без вакуума [16].

В работе В. Engin и Y. Karagul Yuceer для обработки молока была разработана УФ-система, оснащенная девятью лампами, мощность которых составляла 87 Вт, выходная мощность каждой лампы 28 Вт. Каждая лампа в блоке была четырехконтактной, одноточечной и с длиной волны 254 нм. Скорость потока молока составляла 1090 мл/мин. Интенсивность УФ-излучения за один проход молока составляла 13,87 Дж/мл. На основе УФ-обработанного молока, по сравнению с сырым и пастеризованным (65 °С, 30 мин), были приготовлены образцы йогуртов. Наиболее высокие значения вязкости ( $24,75 \pm 0,75$  спс) и наименьшее значение синерезиса ( $3,29 \pm 0,01$  мл) были определены для йогурта, приготовленного из УФ-обработанного молока. Значения вязкости для образцов йогурта на основе сырого и пастеризованного молока были ниже и составляли  $17,85 \pm 0,45$  и  $12,00 \pm 0,01$  спс соответственно [75].

Анализируя представленные результаты работ, можно сделать вывод о том, что в технологии кисломолочных продуктов УФ-обработка молока оказывает положительное влияние как на структурно-технологические свойства, включая вязкость и влагоудерживающую способность, так и на физико-химические показатели. Однако исследований в данной области проведено недостаточно. Поэтому представляет интерес дальнейшее изучение влияния режимов УФ-обработки на полимеризацию белков при формировании сгустка кисломолочных напитков.

### **Выводы**

На сегодняшний день проведено множество исследований, доказавших бактерицидную эффективность УФ-обработки молока и молочной сыворотки. Поскольку сыворотку часто приходится хранить в течение некоторого времени перед переработкой, то снижение ее бактериальной нагрузки с помощью УФ-излучения для улучшения сохраняемости привлекательно. В технологии молока для обеспечения безопасности и продления срока хранения применение УФ-обработки эффективно в сочетании с традиционной пастеризацией.

Помимо снижения бактериальной нагрузки, в различных исследованиях показано, что УФ-обработку можно применять для улучшения технологических свойств молока или растворов сывороточных белков.

Среди недавних исследований выявлено влияние УФ-обработки на структурные изменения молочных белков. Глобулярные белки подвержены изменениям под действием электромагнитных волн. Обработка молока или сывороточных концентратов при дозах облучения в диапазоне от 4 до 16 Дж/см<sup>2</sup> приводит к увеличению свободных сульфгидрильных групп, образованию дисульфидных связей и к ассоциации промежуточных и более крупных белковых молекул. Конформационные изменения сывороточных белков под действием УФ-облучения способствуют улучшению их функциональных свойств. Это делает их ценными пищевыми ингредиентами при разработке пленочных покрытий с высокими прочностными характеристиками и низкой паропроницаемостью. В технологии кисломолочных продуктов (йогурт) УФ-облучение молока способствует улучшению их технологических свойств, включая вязкость и влагоудерживающую способность. Однако применение более высоких доз облучения (свыше 6 кДж/см<sup>2</sup>) при обработке молока может привести к ухудшению качества продуктов и образованию нежелательных соединений.

Воздействие электромагнитных волн на животные белки, а также на сенсорные и технологические свойства молочных продуктов изучено недостаточно. Поэтому данное направление исследований представляет интерес. Таким образом, для улучшения питательных или сенсорных аспектов качества молочной продукции и расширения применения УФ-обработки перспективно провести дальнейшие исследования данной технологии в комбинации с традиционной пастеризацией и другими новыми подходами.

### **Критерии авторства**

К. А. Рязанцева руководила проектом. Н. Е. Шерстнева проводила теоретические исследования, участвовала в написании и корректуре статьи.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

### **Contribution**

K.A. Riazantseva supervised the project. N.E. Sherstneva conducted the theoretical research, processed the data, and prepared the manuscript.

### **Conflict of interest**

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

## References/Список литературы

1. Buhler S, Solari F, Gasparini A, Montanari R, Sforz S, Tedeschi T. UV irradiation as a comparable method to thermal treatment for producing high quality stabilized milk whey. *LWT*. 2019;105:127–134. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.051>
2. Myalenko DM, Fedotova OB. Development and improvement of packaging disinfection technology by ultraviolet irradiation. In: Galstyan AG, editor. *Ideas of academician Vladimir Dmitrievich Kharitonov in science-intensive technologies of milk processing*. Moscow: VNIMI; 2021. pp. 207–226. (In Russ.). <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-6-3>
3. Gunter-Ward DM, Patras A, Bhullar MS, Kilonzo-Nthenge A, Pokharel B, Sasges M. Efficacy of ultraviolet (UV-C) light in reducing foodborne pathogens and model viruses in skim milk. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2018;42(2). <https://doi.org/10.1111/jfpp.13485>
4. Ward DM, Patras A, Kilonzo-Nthenge A, Yannam SK, Pan C, Xiao H, *et al*. UV-C treatment on the safety of skim milk: Effect on microbial inactivation and cytotoxicity evaluation. *Journal of Food Process Engineering*. 2019;42(4). <https://doi.org/10.1111/jfpe.12944>
5. Ikhlov BL. Spectra of DNA. Review. *Journal of New Medical Technologies*. 2018;25(2):121–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1609-2163-2018-16001>
6. Peng K, Koubaa M, Bals O, Vorobiev E. Recent insights in the impact of emerging technologies on lactic acid bacteria: A review. *Food Research International*. 2020;137. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109544>
7. Bhullar MS, Patras A, Kilonzo-Nthenge A, Pokharel B, Yannam SK, Rakariyatham K, *et al*. Microbial inactivation and cytotoxicity evaluation of UV irradiated coconut water in a novel continuous flow spiral reactor. *Food Research International*. 2018;103:59–67. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.10.004>
8. Unluturk S, Atilgan MR, Handan BA, Tari C. Use of UV-C radiation as a non-thermal process for liquid egg products (LEP). *Journal of Food Engineering*. 2008;85(4):561–568. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.08.017>
9. Singh PK, Huppertz T. Effect of nonthermal processing on milk protein interactions and functionality. In: Boland M, Singh H, editors. *Milk proteins*. Academic Press; 2020. pp. 293–324. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815251-5.00008-6>
10. Ochoa-Velasco CE, Diaz-Lima MC, Ávila-Sosa R, Ruiz-López II, Corona-Jiménez E, Hernández-Carranza P, *et al*. Effect of UV-C light on *Lactobacillus rhamnosus*, *Salmonella* Typhimurium, and *Saccharomyces cerevisiae* kinetics in inoculated coconut water: Survival and residual effect. *Journal of Food Engineering*. 2018;223:255–261. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.010>
11. Singh H, Bhardwaj SK, Khatri M, Kim K-H, Bhardwaj N. UVC radiation for food safety: An emerging technology for the microbial disinfection of food products. *Chemical Engineering Journal*. 2021;417. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128084>
12. Fedotova OB, Myalenko DM. Non-traditional approach to the decontamination of food package. *Dairy Industry*. 2016;(1):25–27. (In Russ.).
- Федотова О. Б., Мьяленко Д. М. Нетрадиционный подход к обеззараживанию пищевой упаковки // Молочная промышленность. 2016. № 1. С. 25–27.
13. Myalenko DM, Golowan NS. The influence of ultraviolet radiation on sanitary and hygiene indicators of polyethylene film for dairy products filled with inorganic components. *Bulletin of KSAU*. 2020;164(11):205–212. (In Russ.). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-11-205-212>
14. Fedotova OB, Myalenko DM. The research of physical and mechanical indicators of filled food soot of polyethylene film for dairy and food products after exposing to its pulse UV radiation. *Bulletin of KSAU*. 2020;160(7):155–172. (In Russ.). <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-7-166-172>
15. Kristo E, Hazizaj A, Corredig M. Structural changes imposed on whey proteins by UV irradiation in a continuous UV light reactor. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2012;60(24):6204–6209. <https://doi.org/10.1021/jf300278k>
16. Vásquez-Mazo P, Loredó AG, Ferrario M, Guerrero S. Development of a novel milk processing to produce yogurt with improved quality. *Food and Bioprocess Technology*. 2019;12(6):964–975. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02269-z>
17. Voronov A. New generation of low pressure mercury lamps for producing ozone. *Ozone: Science and Engineering*. 2008;30(6):395–397. <https://doi.org/10.1080/01919510802341012>
18. Sommers CH, Cooke PH. Inactivation of avirulent *Yersinia pestis* in Butterfield's phosphate buffer and frankfurters by UVC (254 nm) and gamma radiation. *Journal of Food Protection*. 2009;72(4):755–759. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-72.4.755>
19. Cappozzo JC, Koutchma T, Barnes G. Chemical characterization of milk after treatment with thermal (HTST and UHT) and nonthermal (turbulent flow ultraviolet) processing technologies. *Journal of Dairy Science*. 2015;98(8):5068–5079. <https://doi.org/10.3168/jds.2014-9190>
20. Fedotova OB, Pryanichnikova NS. Research of the polyethylene packaging layer structure change in contact with a food product at exposure to ultraviolet radiation. *Food Systems*. 2021;4(1):56–61. (In Russ.). <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-1-56-61>

21. Chughtai MFJ, Farooq MA, Ashfaq SA, Khan S, Khaliq A, Antipov S, et al. Role of pascalization in milk processing and preservation: A Potential alternative towards sustainable food processing. *Photonics*. 2021;8(11). <https://doi.org/10.3390/photonics8110498>
22. Delorme MM, Guimarães JT, Coutinho NM, Balthazar CF, Rocha RS, Silva R, et al. Ultraviolet radiation: An interesting technology to preserve quality and safety of milk and dairy foods. *Trends in Food Science and Technology*. 2020;102:146–154. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.06.001>
23. Koutchma T. Advances in ultraviolet light technology for non-thermal processing of liquid foods. *Food and Bioprocess Technology*. 2009;2(2):138–155. <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0178-3>
24. Li Z, Liu D, Xu S, Zhang W, Hemar Y, Regenstein JM, et al. Effects of pasteurization, microfiltration, and ultraviolet-c treatments on microorganisms and bioactive proteins in bovine skim milk. *Food Bioscience*. 2021;43. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101339>
25. Khatuntseva ON. On finding the critical Reynolds number of laminar-turbulent transition in Hagen-Poiseuille problem. *Trudy MAI*. 2018;101. (In Russ.).  
Хатунцева О. Н. О нахождении критического числа Рейнольдса ламинарно-турбулентного перехода в задаче Хагена-Пуазейля // Труды МАИ. 2018. № 101.
26. Kapitanskaya MA. Mathematical modeling of laminar and turbulent flow of viscous incompressible fluid in a pipe of elliptic cross section. *Sustainable Development of Science and Education*. 2019;(6):155–163. (In Russ.).  
Капитанская М. А. Математическое моделирование ламинарного и турбулентного течения вязкой несжимаемой жидкости в трубах эллиптического поперечного сечения // Устойчивое развитие науки и образования. 2019. № 6. С. 155–163.
27. Cilliers FP, Gouws PA, Koutchma T, Engelbrecht Y, Adriaanse C, Swart P. A microbiological, biochemical and sensory characterisation of bovine milk treated by heat and ultraviolet (UV) light for manufacturing Cheddar cheese. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2014;23:94–106. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.03.005>
28. Rossitto PV, Cullor JS, Crook J, Parko J, Sechi P, Cenci-Goga BT. Effects of UV irradiation in a continuous turbulent flow UV reactor on microbiological and sensory characteristics of cow's milk. *Journal of Food Protection*. 2012;75(12):2197–2207. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-12-036>
29. Ansari JA, Ismail M, Farid M. Investigate the efficacy of UV pretreatment on thermal inactivation of *Bacillus subtilis* spores in different types of milk. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2019;52:387–393. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.02.002>
30. Krishnamurthy K, Demirci A, Irudayaraj JM. Inactivation of *Staphylococcus aureus* in milk using flow-through pulsed UV-light treatment system. *Journal of Food Science*. 2007;72(7):M233–M239. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00438.x>
31. Matak KE, Sumner SS, Duncan SE, Hovingh E, Worobo RW, Hackney CR, et al. Effects of ultraviolet irradiation on chemical and sensory properties of goat milk. *Journal of Dairy Science*. 2007;90(7):3178–3186. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-642>
32. Choudhary R, Bandla S, Watson DG, Haddock J, Abughazaleh A, Bhattacharya B. Performance of coiled tube ultraviolet reactors to inactivate *Escherichia coli* W1485 and *Bacillus cereus* endospores in raw cow milk and commercially processed skimmed cow milk. *Journal of Food Engineering*. 2011;107(1):14–20. <https://doi.org/10.1016/j.jlwt.2011.10.024>
33. Makarapong D, Tantayanon S, Gowanit C, Inchaisri C. Development of an innovative apparatus using UV-C for controlling the number of microorganisms in raw milk after milking. *International Journal of Dairy Technology*. 2020;73(1):301–305. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12654>
34. Keklik NM, Elik A, Salgin U, Demirci A, Koçer G. Inactivation of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli* O157:H7 on fresh kashar cheese with pulsed ultraviolet light. *Food Science and Technology International*. 2019;25(8):680–691. <https://doi.org/10.1177/1082013219860925>
35. Lacivita V, Conte A, Manzocco L, Plazzotta S, Zambrini VA, Del Nobile MA, et al. Surface UV-C light treatments to prolong the shelf-life of Fiordilatte cheese. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2016;36:150–155. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.06.010>
36. Ricciardi EF, Pedros-Garrido S, Papoutsis K, Lyng JG, Conte A, Del Nobile MA. Novel technologies for preserving ricotta cheese: Effects of ultraviolet and near-ultraviolet-visible light. *Foods*. 2020;9(5). <https://doi.org/10.3390/foods9050580>
37. Simmons MJH, Alberini F, Tsofigkas AN, Gargiuli J, Parker DJ, Fryer PJ, et al. Development of a hydrodynamic model for the UV-C treatment of turbid food fluids in a novel “SurePure turbulator™” swirl-tube reactor. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2012;14:122–134. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.11.006>
38. Yurova EA. Methods for monitoring quality and safety indicators in the dairy industry. *Milk Processing*. 2017;210(4):12–14. (In Russ.).  
Юрова Е. А. Методы контроля показателей качества и безопасности в молочной промышленности // Переработка молока. 2017. Т. 210. № 4. С. 12–14.

39. Yurova EA. Identification of raw milk. Confirmation of the compliance with the requirements of the TP TC 033/2013. Dairy Industry. 2017;(1):16–18. (In Russ.).

Юрова Е. А. Идентификация молока-сырья подтверждение соответствия требованиям ТР ТС 033/2013 // Молочная промышленность. 2017. № 1. С. 16–18.

40. Yurova EA, Kobzeva TV, Fil'chakova SA. Standardization of measurement methods for indicators of quality and safety of milk and dairy products. Milk Processing. 2019;241(11):6–11. (In Russ.).

Юрова Е. А., Кобзева Т. В., Фильчакова С. А. Стандартизация методик измерений показателей качества и безопасности молока и продуктов его переработки // Переработка молока. 2019. Т. 241. № 11. С. 6–11.

41. Yurova EA. Control of dairy products in terms of quality and safety. Milk Processing. 2019;234(4):6–9. (In Russ.).

Юрова Е. А. Особенность контроля молочной продукции по показателям качества и безопасности // Переработка молока. 2019. Т. 234. № 4. С. 6–9.

42. Koca N, Urgu M, Saatli TE. Ultraviolet light applications in dairy processing. In: Koca N, editor. Technological approaches for novel applications in dairy processing. IntechOpen; 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74291>

43. Yurova EA, Kobzeva TV, Filchakova SA. The peculiarity of the development of express methods for determining the shelf life of functional milk-based products for long-term storage. Food Industry. 2021;(3):36–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/0235-2486-2021-3-0026>

44. Yurova EA, Kobzeva TV, Filchakova SA. Application of the accelerated storage method for functional dry milk mixtures. Food Industry. 2021;(8):18–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.8.8.004>

45. Yurova EA, Kobzeva TV. Application of the sensory evaluation method when using the accelerated storage technique. Food Industry. 2021;(8):15–17. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.8.8.003>

46. Shidlovskaya VP, Yurova EA. Antioxidant activity of enzymes. Dairy Industry. 2011;(12):48–49. (In Russ.).

Шидловская В. П., Юрова Е. А. Антиоксидантная активность ферментов // Молочная промышленность. 2011. № 12. С. 48–49.

47. Shidlovskaya VP, Yurova EA. Antioxidants in milk and their role in assessing milk quality. Dairy Industry. 2010;(2):24–26. (In Russ.).

Шидловская В. П., Юрова Е. А. Антиоксиданты молока их роль в оценке его качества // Молочная промышленность. 2010. № 2. С. 24–26.

48. Dobriyan EI. Dairy antioxidant system. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2020;82(2):101–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-2-101-106>

49. Koutchma T. Ultraviolet light in food technology: principles and applications. Boca Raton: CRC Press; 2019. 376 p. <https://doi.org/10.1201/9780429244414>

50. Engin B, Karagul Yuceer Y. Effects of ultraviolet light and ultrasound on microbial quality and aroma-active components of milk. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2012;92(6):1245–1252. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4689>

51. Hu G, Zheng Y, Wang D, Zha B, Liu Z, Deng Y. Comparison of microbiological loads and physicochemical properties of raw milk treated with single-/multiple-cycle high hydrostatic pressure and ultraviolet-C light. High Pressure Research. 2015;35(3):330–338. <https://doi.org/10.1080/08957959.2015.1063626>

52. Pattison DI, Rahmanto AS, Davies MJ. Photo-oxidation of proteins. Photochemical and Photobiological Sciences. 2012;11(1):38–53. <https://doi.org/10.1039/C1PP05164D>

53. Schmid M, Prinz TK, Müller K, Haas A. UV radiation induced cross-linking of whey protein isolate-based films. International Journal of Polymer Science. 2017;2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1846031>

54. Kuan Y-H, Bhat R, Karim AA. Emulsifying and foaming properties of ultraviolet-irradiated egg white protein and sodium caseinate. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2011;59(8):4111–4118. <https://doi.org/10.1021/jf104050k>

55. Scheidegger D, Pecora RP, Radici PM, Kivatinitz SC. Protein oxidative changes in whole and skim milk after ultraviolet or fluorescent light exposure. Journal of Dairy Science. 2010;93(11):5101–5109. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3513>

56. Siddique MAB, Maresca P, Pataro G, Ferrari G. Influence of pulsed light treatment on the aggregation of whey protein isolate. Food Research International. 2017;99:419–425. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.06.003>

57. Díaz O, Candia D, Cobos Á. Effects of ultraviolet radiation on properties of films from whey protein concentrate treated before or after film formation. Food Hydrocolloids. 2016;55:189–199. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.11.019>

58. Kharitonov VD, Agarkova EYu, Kruchinin AG, Ryazantseva KA, Korolyeva OV, Fedorova TV, *et al.* Impact of new fermented dairy product with whey protein hydrolysate on tolerance and dynamics of atopic dermatitis manifestation in children suffering from cow's milk protein allergy. Problems of Nutrition. 2015;84(5):56–63. (In Russ.).

Влияние нового кисломолочного продукта с гидролизатом сывороточных белков на переносимость и динамику проявлений атопического дерматита у детей с аллергией на белки коровьего молока / В. Д. Харитонов [и др.] // Вопросы питания. 2015. Т. 84. № 5. С. 56–63.

59. Simonenko ES, Begunova AV. Development of fermented milk product based on mare milk and lactic microorganisms association. Problems of Nutrition. 2021;90(5):115–125. (In Russ.). <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2021-90-5-115-125>



60. Shuvarikov AS, Pastukh ON, Yurova EA. Qualitative indicators of cow, goat, and camel milk, including allergenicity. *Farmer*. Chernozem Region. 2018;18(9):20–25. (In Russ.).
- Шувариков А. С., Пастух О. Н., Юрова Е. А. Качественные показатели коровьего, козьего и верблюжьего молока с учетом аллергенности // *Фермер*. Черноземье. 2018. Т. 18. № 9. С. 20–25.
61. Tammineedi CVRK, D Choudhary R, Perez-Alvarado GC, Watson DG. Determining the effect of UV-C, high intensity ultrasound and nonthermal atmospheric plasma treatments on reducing the allergenicity of  $\alpha$ -casein and whey proteins. *LWT – Food Science and Technology*. 2013;54(1):35–41. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.05.020>
62. Hu G, Zheng Y, Liu Z, Deng Y, Zhao Y. Structure and IgE-binding properties of  $\alpha$ -casein treated by high hydrostatic pressure, UV-C, and far-IR radiations. *Food Chemistry*. 2016;204:46–55. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.113>
63. Huppertz T, Vasiljevic T, Zisu B, Deeth H. Novel processing technologies: Effects on whey protein structure and functionality. In: Deeth HC, Bansal N, editors. *Whey proteins*. Academic Press; 2019. pp. 281–334. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812124-5.00009-6>
64. Guo M, Shen X. Modifications of whey protein. In: Guo M, editor. *Whey protein production, chemistry, functionality, and applications*. John Wiley and Sons; 2019. pp. 205–225. <https://doi.org/10.1002/9781119256052.ch8>
65. de Castro RJS, Domingues MAF, Ohara A, Okuro PK, dos Santos JG, Brexó RP, et al. Whey protein as a key component in food systems: Physicochemical properties, production technologies and applications. *Food Structure*. 2017;14:17–29. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2017.05.004>
66. Silva KS, Mauro MA, Gonçalves MP, Rocha CMR. Synergistic interactions of locust bean gum with whey proteins: Effect on physicochemical and microstructural properties of whey protein-based films. *Food Hydrocolloids*. 2016;54:179–188. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.09.028>
67. Schmid M, Hinz L-V, Wild F, Noller K. Effects of hydrolysed whey proteins on the techno-functional characteristics of whey protein-based films. *Materials*. 2013;6(3):927–940. <https://doi.org/10.3390/ma6030927>
68. Zink J, Wyrobnik T, Prinz T, Schmid M. Physical, chemical and biochemical modifications of protein-based films and coatings: An extensive review. *International Journal of Molecular Sciences*. 2016;17(9). <https://doi.org/10.3390/ijms17091376>
69. Schmid M, Müller K. Whey protein-based packaging films and coatings. In: Deeth HC, Bansal N, editors. *Whey proteins*. Academic Press; 2019. pp. 407–437. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812124-5.00012-6>
70. Fedotova OB, Myalenko DM. Safety of packaging formed during the production of dairy products. *Dairy Industry*. 2021;(2):11–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2021-02-11-13>
71. Fedotova OB. The role of packaging in determining the expiration date of dairy products with extended shelf life. *Dairy Industry*. 2021;(9):6–8. (In Russ.). <https://doi.org/10.31515/1019-8946-2021-09-6-8>
72. Ustunol Z, Mert B. Water solubility, mechanical, barrier, and thermal properties of cross-linked whey protein isolate-based films. *Journal of Food Science*. 2004;69(3):FEP129–FEP133. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb13365.x>
73. Schmid M, Held J, Hammann F, Schlemmer D, Noller K. Effect of UV-radiation on the packaging-related properties of whey protein isolate based films and coatings. *Packaging Technology and Science*. 2015;28(10):883–899. <https://doi.org/10.1002/pts.2150>
74. Díaz O, Candia D, Cobos Á. Whey protein film properties as affected by ultraviolet treatment under alkaline conditions. *International Dairy Journal*. 2017;73:84–91. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2017.05.009>
75. Engin B, Karagul Yuceer Y. Effects of ultraviolet light and ultrasound on microbial quality and aroma-active components of milk. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2012;92(6):1245–1252. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4689>