ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)
УДК 637.13.02
https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-4-331-341

Поступила в редакцию 17.03.2025
Received 17.03.2025

Ю. В. Трофимов[1], С. И. Лишик[1], О. Л. Сороко[2], Е. В. Беспалова[2], А. Н. Полын[2], Д. В. Град[1], В. Е. Слепокуров[1], А. Е. Челяпин[1], А. И. Щитникова[1], Д. А. Асиненко[1], Н. А. Захарова[1]

[1]Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
[2]Институт мясо-молочной промышленности, Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СВЕТОДИОДНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ МОЛОКА

Аннотация. Разработана экспериментальная установка для светодиодного ультрафиолетового (УФ) обеззараживания молока-сырья в реакторе типа Куэтта – Тейлора. Представлены результаты моделирования распределения энергетической освещенности на внутренней поверхности кварцевой трубы в зависимости от расстояния между печатной платой с УФ-светодиодами и кварцевой трубой. Важным параметром системы УФ-обработки молока является время нахождения элементарных частиц молока в приповерхностном слое реактора. Для его оценки проводилось моделирование траекторий перемещения отдельных частиц молока с вычислением их радиус-вектора (глубины залегания) в цилиндрической системе координат УФ-реактора. В ходе исследований проведена серия экспериментов с целью изучения влияния скорости вращения ротора внутри реактора и интенсивности свечения УФ-светодиодов на эффективность обеззараживания молока. Анализ полученных результатов показывает, что скорость вращения ротора и мощность УФ-светодиодов оказывают существенное влияние на эффективность снижения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ). Выявлено, что при обеззараживании молока через установку при оптимальном режиме обработки содержание КМАФАнМ в образце коровьего молока уменьшилось в 21 раз, а количество бактерий группы кишечной палочки (БГКП) – в 16 раз, что соответствует требованиям, предъявляемым к молоку питьевому. Полученные результаты могут использоваться при проектировании энергоэффективных промышленных установок УФ-обеззараживания молока.

Ключевые слова: ультрафиолетовое излучение, светодиод, течение Куэтта – Тейлора, обеззараживание молока, пастеризация, микробиологические показатели

Для цитирования: Эффективность светодиодного ультрафиолетового обеззараживания молока / Ю. В. Трофимов, С. И. Лишик, О. Л. Сороко [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2026. – Т. 64, № 4. – С. 331–341. https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-4-331-341

Yuri V. Trofimov[1], Sergey I. Lishik[1], Oleg L. Soroko[2], Ekaterina V. Bespalova[2], Angelina N. Polyn[2], Dmitry V. Grad[1], Vadim E. Slepokurov[1], Alexey E. Chelyapin[1], Anna I. Shchitnikova[1], Denis A. Asinenko[1], Nina A. Zakharova[1]

[1]Center for LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
[2]Institute of Meat and Dairy Industry, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

EFFICIENCY OF LED ULTRAVIOLET DISINFECTION OF MILK

Abstract. An experimental installation for LED ultraviolet (UV) disinfection of raw milk in a Couette – Taylor reactor has been developed. The results of modeling the distribution of irradiance on the inner surface of a quartz tube as a function of the distance between a printed circuit board with UV LEDs and a quartz tube are presented. An important parameter of the UV milk treatment system is the residence time of the elementary milk particles in the surface layer of the reactor. To evaluate it, the trajectories of individual milk particles were modeled and their radius vector (depth of immersion) was calculated in the cylindrical coordinate system of the UV reactor. In the course of the research, a series of experiments was conducted to study the effect of the rotor rotation speed inside the reactor and the intensity of the UV LEDs on the effectiveness of milk disinfection. An analysis of the results shows that both rotor speed and UV LED power have a strong effect on the effectiveness of reducing the number of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms (NMAFAnM). It was shown that when milk was disinfected using the installation under an optimal treatment regime, the content of NMAFAnM in a cow's milk sample decreased 21-fold, and the coliform bacteria (BECG) count decreased 16-fold, which meets the requirements for drinking milk. The results obtained can be used in the design of energy-efficient industrial installations for UV disinfection of milk.

Keywords: ultraviolet radiation, LED, Couette – Taylor flow, milk disinfection, pasteurization, microbiological indicators

For citation: Trofimov Yu. V., Lishik S. I., Soroko O. L., Bespalova E. V., Polyn A. N., Grad D. V., Slepokurov V. E., Chelyapin A. E., Shchitnikova A. I., Asinenko D. A., Zakharova Nina A. A. Efficiency of led ultraviolet disinfection of milk. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2026, vol. 64, no. 1, pp. 331–341 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1817-7204-2026-64-4-331-341

Введение. Методы термической обработки являются неотъемлемой частью технологий при производстве молока и молочных продуктов. В настоящее время тепловая обработка молока применяется в первую очередь для инактивации патогенных микроорганизмов и ферментов, чтобы повысить стабильность продуктов во время хранения. Однако в последнее время за рубежом значительно вырос интерес к нетермическим процессам обработки молока, таким как импульсные электрические поля, высокое давление и ультрафиолетовое облучение, потому что они оказывают высокий бактерицидный эффект, сохраняя исходное качество сырья. В частности, во многих отраслях пищевой промышленности все больше повышается интерес к ультрафиолетовому (УФ) облучению как к более щадящей нетермической технологии [1, 2].

Наиболее эффективный бактерицидный эффект, способствующий уничтожению множества патогенных микроорганизмов (бактерии, грибки, плесень, дрожжи и вирусы), находится в диапазоне УФ-С (коротковолновое излучение с длиной волны 200–280 нм) [3–5]. При этом более выраженным бактерицидным действием обладает УФ-излучение в диапазоне длин волн 254…265 нм, которые поглощаются нуклеиновыми кислотами, белками и в первую очередь ДНК. Наибольшее разрушающее влияние на ДНК оказывает УФ при длине волны 253,7 нм [6]. Причинами гибели возбудителей являются летальные мутации, утрата молекулами ДНК способности к репликации, нарушение процесса транскрипции. УФ-излучение разрушает также токсины, например дифтерийный, столбнячный, дизентерийный, брюшного тифа, золотистого стафилококка [7].

Облучение коротковолновым УФ-излучением обладает отличными бактерицидными свойствами, способствующими уничтожению множества патогенных микроорганизмов, таких как бактерии, грибки, плесень, дрожжи и вирусы [8–13]. Эффективность УФ-обработки зависит от способности излучения проникать через клеточную стенку патогенных микроорганизмов, затем блокировать транскрипции и репликации ДНК за счет образования диммеров тимина, препятствующих росту и размножению клетки [14–18].

Традиционная пастеризация молока – процесс достаточно энергоемкий. В то же время за счет использования УФ-обработки молока данный показатель может быть уменьшен более чем в три раза. Таким образом, проведение исследований в области УФ-обработки молока является актуальной научно-технической задачей, которая может дать значительный экономический эффект. В Беларуси исследования по светодиодной УФ-обработке молока ранее не проводились.

1. Экспериментальная УФ-установка для обеззараживания молока. Установка состоит из каркаса, УФ-модулей и реактора, шагового двигателя для перемешивания молока и перистальтического насоса для подачи его в зону реактора, систем электрического питания и охлаждения УФ-модулей, блока управления и обработки информации и сопутствующего оборудования (рис. 1).

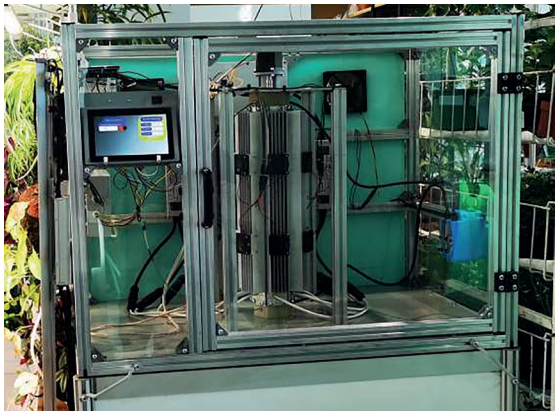


Рис. 1. Экспериментальная УФ-установка для обеззараживания молока

Fig. 1. Experimental UV milk disinfection installation

Реактор представляет собой вертикально ориентированную кварцевую трубу, герметично закрытую с торцов крышками. Внутри кварцевой трубы располагается ротор, приводимый во вращение шаговым двигателем, установленным на верхней крышке. В верхнюю и нижнюю крышки встроены входной и выходной штуцеры, сквозь которые через реактор протекает обрабатываемое молоко. Скорость потока молока регулируется в интервале 0–20 л/ч.

Технические параметры УФ-установки представлены в табл. 1.

Таблица 1. **Технические характеристики экспериментальной УФ-установки для обеззараживания молока**

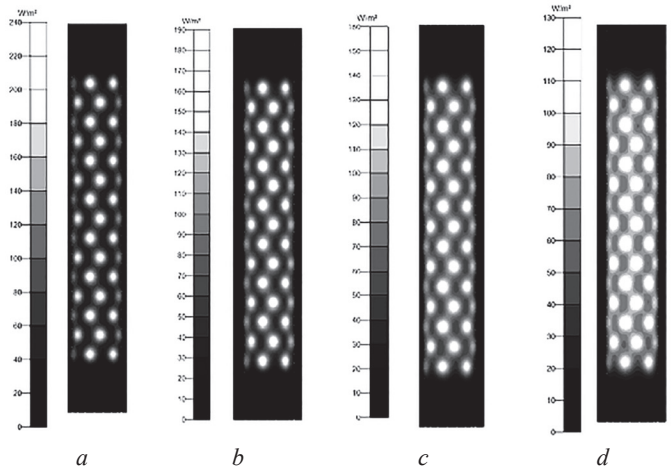
Table 1. **Technical characteristics of an experimental UV milk disinfection installation**

Параметр	Значение параметра
Напряжение питания, В/Гц	230/50
Потребляемая мощность, Вт	<700
Объем молока в УФ-реакторе, л	0,25
Пиковая длина волны УФ-излучения, нм	278
Габариты (Д × Ш × В)	1 000 × 600 × 750
Масса, кг	30

Блок управления и обработки информации состоит из контроллера, датчиков температуры молока на входе и выходе из реактора, шагового двигателя с источником питания, регулятора мощности (диммера) УФ-светодиодов. Управление шаговым двигателем, диммирование УФ-светодиодов, мониторинг температур светодиодов и обрабатываемого молока, а также отображение этой информации осуществляется посредством сенсорной панели управления на основе 7-дюймового ЖК-дисплея.

Для функционирования экспериментальной УФ-установки очень важно обеспечить интенсивную и равномерную засветку обрабатываемого молока. На рис. 2 представлены результаты моделирования распределения энергетической освещенности на внутренней поверхности кварцевой трубы в зависимости от расстояния между печатной платой с УФ-светодиодами и кварцевой трубой.

Оптическое моделирование выполнялось с использованием специализированного ПО TracePro. Из анализа полученных данных (см. рис. 2) следует, что при приближении УФ-светодиодов к кварцевой трубе энергетическая освещенность на внутренней поверхности кварцевой трубы возрастает со 130 до 240 Вт/м^2, но при этом также ухудшается равномерность освещенности. Анализ обоих этих параметров позволяет определить оптимальное расстояние между печатной платой с УФ-светодиодами и кварцевой трубой. Дополнительно для увеличения интенсивности и равномерности освещения кварцевой трубы использовались рефлекторы, устанавливаемые над светодиодными платами.



a *b* *c* *d*

Рис. 2. Распределение энергетической освещенности на внутренней поверхности облучаемой кварцевой трубы (развертка половины трубы) на расстоянии 6 мм (*a*), 8 мм (*b*), 10 мм (*c*), 12 мм (*d*)

Fig. 2. Distribution of irradiance on the inner surface of the irradiated quartz tube (unrolled view of half of the tube) at a distance of 6 mm (*a*), 8 mm (*b*), 10 mm (*c*), 12 mm (*d*)

Следует отметить, что молоко является практически непрозрачной средой для УФ-С-излучения, в частности слой молока толщиной всего 100 мкм поглощает около 85 % проходящего через него УФ-излучения [19]. Таким образом, УФ-обработка молока, равно как и других непрозрачных сред, является достаточно сложной научно-технической задачей. Для ее решения внутри реактора формировалось так называемое течение Куэтта – Тейлора, возникающее в общем случае между двумя вращающимися с разными скоростями соосными цилиндрами. При этом при определенной скорости вращения в жидкости возникают правильно чередующиеся вихри в виде торов с правым и левым вращением.

Для оценки стабильности профиля потока жидкости между двумя вращающимися цилиндрами используется число Тейлора:

$$\mathrm{Ta} = \frac{\omega^2 R_1 (R_2 - R_1)^3}{\nu^2}, \tag{1}$$

где Ta – число Тейлора; ω – угловая скорость вращения ротора; R_1, R_2 – радиус ротора и внутренний радиус кварцевой трубы соответственно; ν – кинематическая вязкость (ν = μ /ρ; μ – динамическая вязкость, ρ – плотность молока).

Динамическая вязкость и плотность молока зависят от температуры (T) и жирности (F) молока [11]:

$$\ln(\omega) = 2721{,}5 / T + 0{,}1F - 8{,}9, \tag{2}$$

$$\rho = 0{,}3T - 0{,}03T^3 - 0{,}7F - 0{,}01F^2 + 1034{,}5. \tag{3}$$

Течение Куэтта – Тейлора образуется при значении числа Тейлора $\mathrm{Ta} > \mathrm{Ta_k} = 1\,700$, что соответствует критической угловой скорости вращения ω_k:

$$\omega_k = \sqrt{\frac{\mathrm{Ta_k}\nu^2}{R_1(R_2 - R_1)^3}}. \tag{4}$$

Таким образом, при $T = 313$ К, $R_1 = 32{,}15$ мм, $R_2 = 35,\ 15$ мм и $\nu(T) = \mu(T) / \rho(T) = 0{,}0014/1021{,}83$ критическая скорость вращения ротора составляет $\omega_k \approx 60$ об/мин.

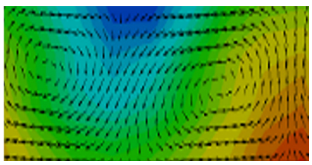
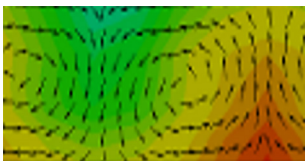
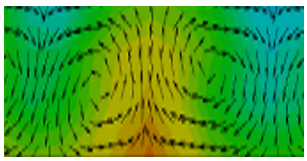
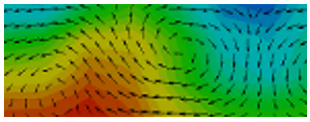
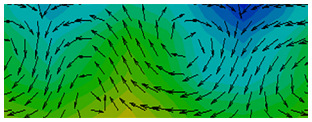
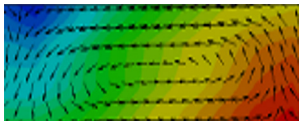
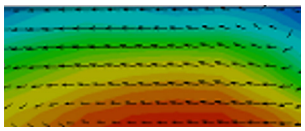
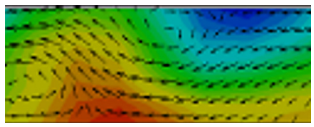
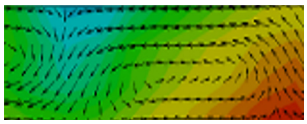
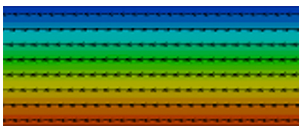
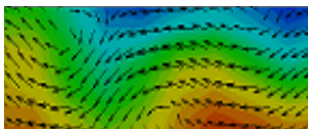
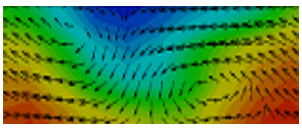
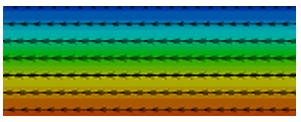
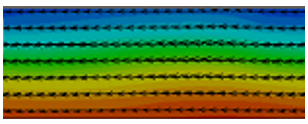
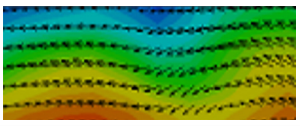
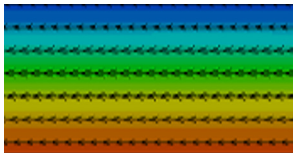
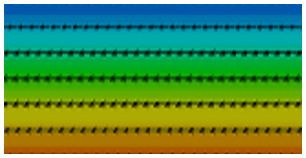
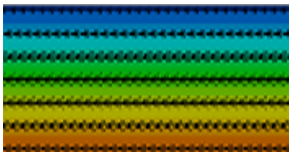
Следует отметить, что формула (4) не применима для проточной системы. При наличии входящего потока вихри Тейлора не являются устойчивыми и могут разрушаться. Для получения более точного представления о гидродинамике процесса необходимо проведение численного моделирования.

В табл. 2 представлены результаты гидродинамического моделирования с использованием ПО SolidWorks. Из анализа полученных результатов следует, что при фиксированном значении потока молока увеличение скорости вращения ротора приводит вначале к появлению вихрей Тейлора с четко выраженной доменной структурой, а затем – к более хаотичному и турбулентному течению. С другой стороны, при фиксированной скорости вращения ротора увеличение потока молока приводит вначале к разрушению доменной структуры течения Тейлора и образованию проточного течения между доменами, а затем – к полностью ламинарному течению молока внутри реактора. При этом часть молока протекает вдали от облучаемой поверхности и, следовательно, не подвергается УФ-обработке. Для практического использования метода светодиодного УФ-обеззараживания молока важным является обеспечение высокой производительности обработки молочного сырья.

На рис. 3 представлены фотографии вихрей Тейлора в реакторе, заполненном тестовой жидкостью при различных скоростях вращения ротора. В качестве тестовой жидкости использовался раствор дистиллированной воды и глицерина, имитирующий по вязкости молоко. Для визуализации течения в тестовую жидкость добавлялся порошок слюды красного цвета. Из рис. 3, *a* видно, что при низкой скорости вращения ротора в тестовой жидкости наблюдается тороидальная структура, соответствующая доменам течения Тейлора. Анализ рис. 3, *a* позволяет определить средний размер доменов – около 5 мм, что коррелирует с результатами гидродинамического моделирования (см. табл. 2). При увеличении скорости вращения ротора торы становятся волнистыми (рис. 3, *b*), т. е. структура течения Тейлора разрушается.

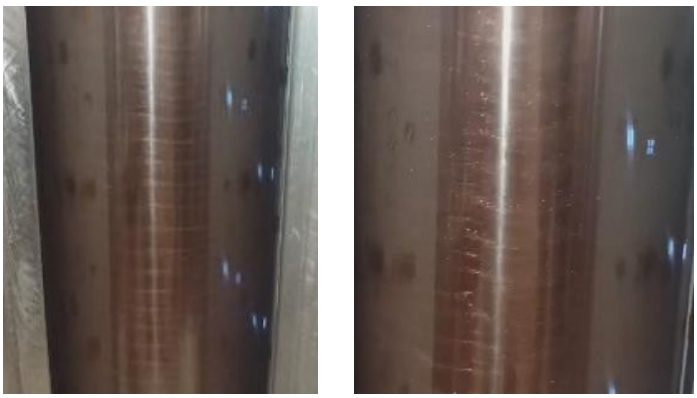
Таблица 2. **Паттерны течения Куэтта – Тейлора в зависимости от скорости вращения ротора и потока молока через УФ-реактор***

Table 2. **Couette-Taylor flow patterns depending on the speed of rotation of the rotor and the flow of milk through the UV reactor***

Поток молока *Q*, л/ч	Скорость вращения ротора ω, об/мин		
	90	120	140
4			
10			
20			
30			
50			
100			

* Стрелками показано направление продольной, а цветом – тангенциальной составляющей вектора скорости течения молока. Красный цвет соответствует направлению движения к наблюдателю, а синий – от наблюдателя.

* The arrows indicate the direction of the longitudinal component of the milk flow velocity vector, while the color indicates its tangential component. The red color corresponds to the direction of movement towards the observer, and the blue color corresponds to the direction of movement away from the observer.



a *b*

Рис. 3. Фотографии вихрей Тейлора, возникающих внутри УФ-реактора при скорости вращения ротора 100 об/мин (*a*) и 140 об/мин (*b*)

Fig. 3. Photographs of Taylor vortices generated inside a UV reactor at rotor speeds of 100 rpm (*a*) and 140 rpm (*b*)

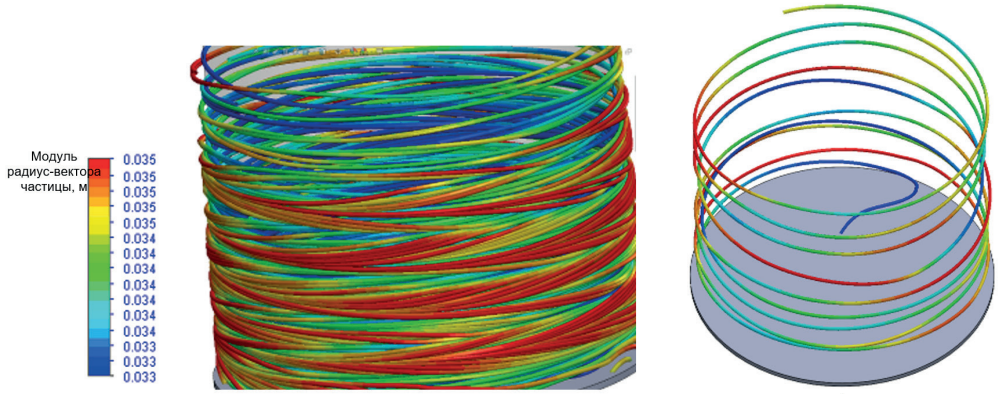


Рис. 4. Типичные траектории движения группы из 20 частиц (*a*) и 1 частицы (*b*) молока в УФ-реакторе

Fig. 4. Typical trajectories of a group of 20 milk particles (*a*) and single particle (*b*) in a UV reactor

Важным параметром системы УФ-обработки молока является время нахождения элементарных микрообъемов (далее – частиц) молока в приповерхностном слое реактора. Для его оценки проводилось моделирование траекторий перемещения отдельных частиц молока с вычислением их радиус-вектора (глубины залегания) в цилиндрической системе координат УФ-реактора. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, частицы молока перемещаются по сложным траекториям с плавно изменяющейся глубиной залегания. В процессе движения частицы молока многократно поднимаются в приповерхностный слой, перемешаются вдоль него на 1/3–1/2 витка спирали, после чего вновь уходят на глубину. Исходя из полученных данных (рис. 4, *b*), длины и радиуса кварцевой трубы, можно оценить среднее время нахождения частиц молока в приповерхностном слое – около 2 с (при скорости вращения ротора 110 об/мин и температуре молока 45 °С).

Таким образом, разработанная экспериментальная установка УФ-обеззараживания обеспечивает равномерное перемешивание молока, причем частицы молока, двигаясь по вихреобразным траекториям, проходят вдоль приповерхностного слоя, где и подвергаются УФ-обработке.

2. Исследование микробиологической эффективности экспериментальной УФ-установки для обеззараживания молочного сырья. Определение физико-химических показателей объектов исследований осуществлялось в лабораторных условиях РУП «Институт мясо-молочной промышленности», при этом использованы стандартные и специальные методы анализа. Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием компьютерных программных приложений Excel.

Согласно СТБ 1598-2006[1], молоко коровье сырое подразделяется на сорта: первый, высший и экстра. По микробиологическим показателям и количеству соматических клеток молоко должно соответствовать требованиям, указанным в табл. 3.

Таблица 3. **Микробиологические показатели молока-сырья**

Table 3. **Microbiological parameters of raw milk**

Наименование показателя	Норма для молока сорта		
	экстра	высший	первый
Количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ), КОЕ/см^3, не более	$1 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$
Общее количество микроорганизмов (бактериальная обсемененность методом пробы на редуктазу), КОЕ/см^3, не более	Не допускается	$3 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$
Количество соматических клеток в 1 см^3, не более	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$
Патогенные микроорганизмы, в том числе сальмонеллы в 25 см^3	Не допускается		

[1] Технические условия = Малако каровіна сырое. Тэхнічныя ўмовы: СТБ 1598-2006. Взамен на территории РБ ГОСТ 13264-88; введ. 01.08.2006. Мн.: Госстандарт, 2015. 13 с.

Для исследования работоспособности и эффективности экспериментального образца светодиодного УФ-реактора было отобрано коровье сырое молоко высшего сорта с массовой долей жира 3,8 %. Скорость вращения ротора внутри реактора составляла 100 об/мин, мощность УФ-светодиодов – 100 %. Следует отметить, что во всех нижеописанных микробиологических экспериментах скорость молока, протекающего через УФ-реактор, составляла 20 л/ч. После каждого прогона через светодиодный УФ-реактор обеззараженное молоко собиралось в стерильную тару, чтобы не допустить смешивание с молоком, которое еще не прошло обработку.

Микробиологические показатели КМАФАнМ (количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов) и БГКП (бактерии группы кишечной палочки) молока-сырья и обеззараженного молока приведены в табл. 4.

Таблица 4. **Микробиологические показатели (КМАФАнМ, БГКП) коровьего молока-сырья и обеззараженного молока высшего сорта с массовой долей жира 3,8 %**

Table 4. **Microbiological indicators (NMAFAnM, BECG) of raw cow's milk and disinfected milk of the highest grade with a mass fraction of 3.8 % fat**

Показатель	Количество прогонов через светодиодный УФ-реактор				
	Молоко-сырье	1 прогон	3 прогона	5 прогонов	7 прогонов
КМАФАнМ, КОЕ/см^3	$2{,}6 \cdot 10^5$	$1{,}3 \cdot 10^3$	$5{,}6 \cdot 10^2$	$4{,}9 \cdot 10^2$	$4{,}5 \cdot 10^2$
БГКП, КОЕ/см^3	$1{,}6 \cdot 10^2$	<10	<10	<10	<10

Графики изменений микробиологических показателей представлены на рис. 5.

На основании микробиологических показателей можно сделать вывод, что после 5-го прогона через светодиодный УФ-реактор содержание мезофильных аэробных и анаэробных микроорганизмов в образце молока уменьшилось в 200 раз (с $2{,}6 \cdot 10^5$ до $1{,}3 \cdot 10^3$ КОЕ/см^3), что соответствует требованиям, предъявляемым к молоку питьевому. Содержание БГКП после 5-го прогона через светодиодный УФ-реактор уменьшилось более чем в 16 раз по сравнению с исходным образцом молока-сырья (с $1{,}6 \cdot 10^2$ до < 10 КОЕ/см^3).

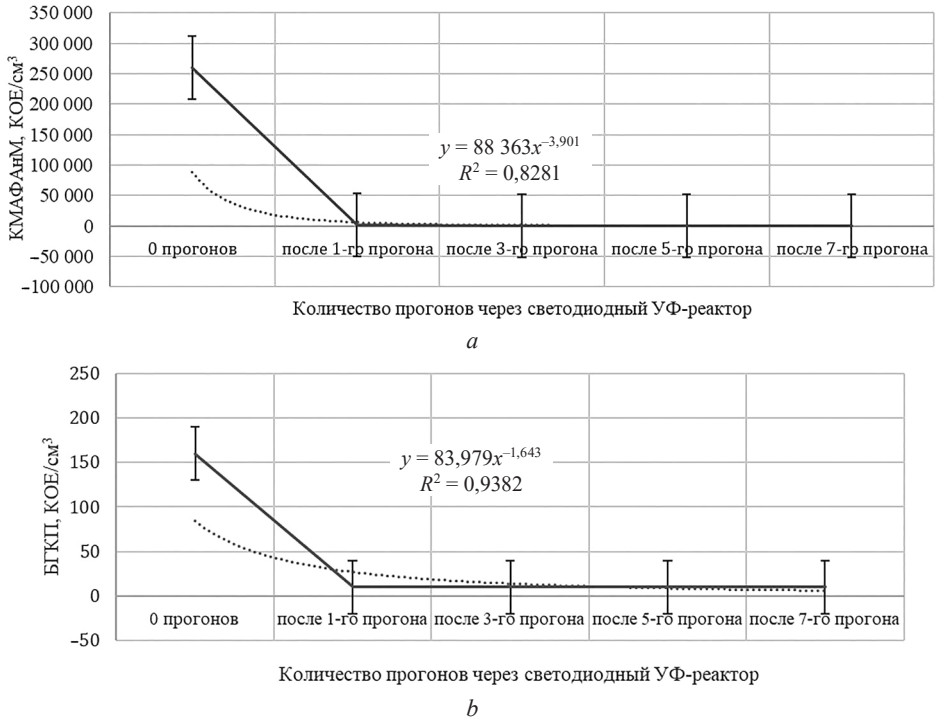
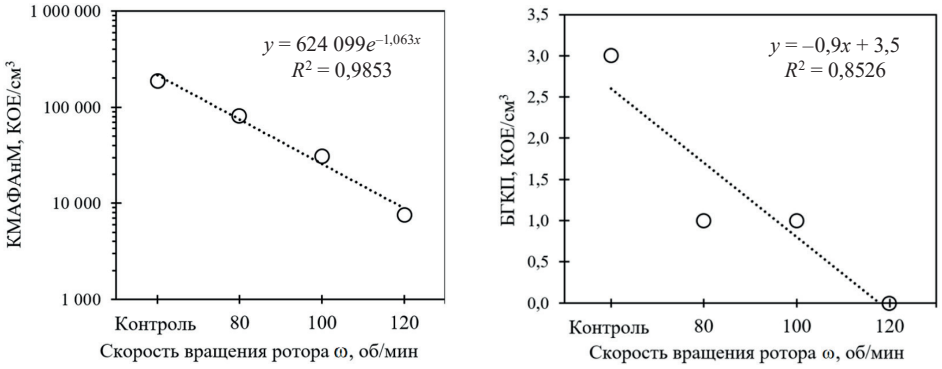


Рис. 5. Изменение микробиологических показателей КМАФАнМ (*a*) и БГКП (*b*) молока-сырья высшего сорта с массовой долей жира 3,8 % в зависимости от количества прогонов через экспериментальную УФ-установку (ω = 100 об/мин, I_{LED} = 100 %)

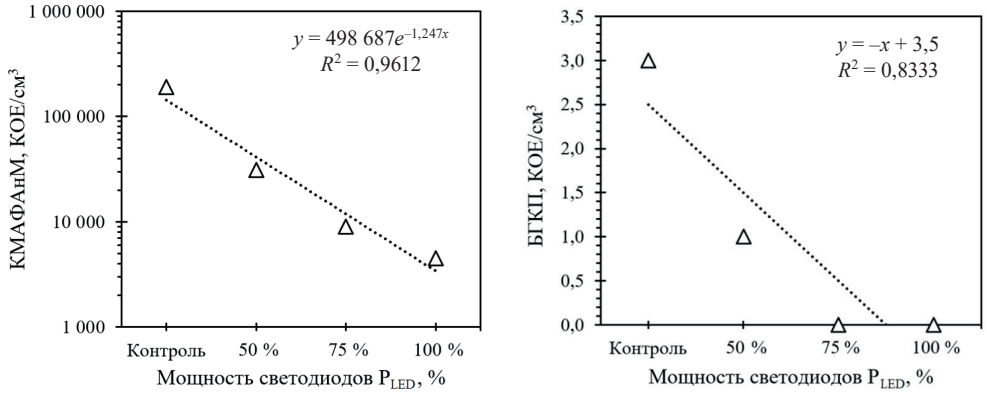
Fig. 5. Change in microbiological parameters of NMAFAnM (*a*) and BECG (*b*) premium-grade raw milk with a mass fraction of 3.8 % fat, depending on the number of runs through the experimental UV installation (ω = 100 rpm, I_{LED} = 100 %)



a *b*

Рис. 6. Зависимости количества КМАФАнМ (*a*) и БГКП (*b*) молока-сырья с массовой долей жира 3,8 % от скорости вращения ротора ω при P_{LED} = 50 %

Fig. 6. Effect of rotor speed ω on NMAFAnM (a) and BECG (b) raw milk with a mass fraction of 3.8 % fat (P_{LED} = 50 %)



a *b*

Рис. 7. Зависимости количества КМАФАнМ (*a*) и БГКП (*b*) молока-сырья с массовой долей жира 3,8 % от мощности светодиодов P_{LED} при скоростях вращения ротора ω = 100 об/мин

Fig. 7. Effect of UV LED power on NMAFAnM (*a*) and BECG (*b*) raw milk with a mass fraction of 3.8 % fat (P_{LED} at rotor speeds of ω = 100 rpm)

В ходе исследований проведена серия экспериментов с целью изучения влияния скорости вращения ротора внутри реактора и интенсивности свечения УФ-светодиодов на эффективность обеззараживания молока. Исследования проводились при трех скоростях вращения ротора: 80, 100 и 120 об/мин. На каждой из указанных скоростей были проведены отдельные опыты с использованием трех уровней мощности светодиодов: 50, 75 и 100 %.

Для исследований отобраны образцы сырого коровьего молока высшего сорта с массовой долей жира 3,8 %. Для усреднения данных эксперименты повторялись по 5 раз. После каждого прогона через светодиодный УФ-реактор обеззараженное молоко собиралось в стерильную тару, чтобы не допустить смешивания с необработанным молоком. Графики изменения микробиологических показателей (КМАФАнМ, БГКП) молока-сырья и образцов обеззараженного молока представлены на рис. 6 и 7.

Анализ полученных результатов показывает, что скорость вращения ротора и мощность УФ-светодиодов оказывают сильное влияние на эффективность снижения количества КМАФАнМ. Так, количество КМАФАнМ при мощности светодиодов 50 % и скорости вращения ротора 80 об/мин снизилось в 2,3 раза (до 82 000 КОЕ/см^3), при 100 об/мин – в 6,1 раза (до 31 000 КОЕ/см^3), при 120 об/мин – в 25 раз (до 7 600 КОЕ/см^3) по сравнению с молоком-сырьем (рис. 6, *a*). После всех режимов обработки количество КМАФАнМ соответствовало требованию, предъявляемому к молоку питьевому. При скорости вращения ротора реактора 100 об/мин количество КМАФАнМ по сравнению с молоком-сырьем уменьшается в 6, 21

и 42 раза при мощности светодиодов 50, 75 и 100 % соответственно (рис. 7, *a*). Оценка полученных графиков (рис. 6, *b* и 7, *b*) свидетельствует о том, что увеличение скорости вращения ротора в реакторе и мощности УФ-светодиодов не оказывает существенного влияния на количество БГКП. При воздействии ультрафиолетового излучения количество БГКП понижается до допустимого при всех выбранных параметрах.

Таким образом, чем выше скорость вращения ротора в реакторе и мощность УФ-светодиодов, тем ниже уровень бактериальной обсемененности (КМАФАнМ) обработанного молока. При этом для данного варианта исполнения экспериментальной установки при выбранном молоке-сырье высшего сорта с массовой долей жира 3,8 % оптимальным является режим со скоростью вращения ротора 100 об/мин и мощностью светодиодов 75 %. Он обеспечивает высокую эффективность обеззараживания и экономическую целесообразность, позволяя повысить сортность молока до сорта экстра. Дальнейшее повышение мощности светодиодов экономически неоправданно, так как приводит к росту потребления электроэнергии, а увеличение числа оборотов – к ускоренному износу деталей установки, их частому обслуживанию и замене. Конструкция экспериментальной светодиодной УФ-установки позволяет провести оптимальный подбор режимов обработки любого молока-сырья.

Выводы. Разработана экспериментальная установка для светодиодного УФ-обеззараживания молока-сырья в реакторе типа Куэтта – Тейлора. Дана оценка среднего времени нахождения частиц молока в приповерхностном 100-мкм слое УФ-реактора. Исследовано влияние светодиодной УФ-обработки молочного сырья на микробиологическую обсемененность при разных режимах облучения и скорости вращения ротора. Подобраны оптимальные режимы процесса. Показано, что при обеззараживании молока через установку при оптимальном режиме обработки КМАФАнМ в образце коровьего молока уменьшилось в 21 раз, а БГКП – в 16 раз, что соответствует требованиям, предъявляемым к молоку питьевому по содержанию бактерий группы кишечной палочки. Полученные результаты планируется использовать при проектировании энергоэффективных промышленных установок обеззараживания молока.

Список использованных источников

1. UV irradiation as a comparable method to thermal treatment for producing high quality stabilized milk whey / S. Buhler, A. Gasparini, R. Montanari [et al.] // LWT – Food Science and Technology. – 2019. – Vol. 105. – P. 127–134. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.051

2. Мяленко, Д. М. Разработка и совершенствование технологии обеззараживания упаковки ультрафиолетовым облучением / Д. М. Мяленко, О. Б. Федотова // Идеи академика Владимира Дмитриевича Харитонова в наукоемких технологиях переработки молока / Всерос. науч.-исслед. ин-т молоч. пром-сти; под общ. ред. А. Г. Галстяна. – М., 2021. – С. 207–226.

3. Efficacy of ultraviolet (UV-C) light in reducing foodborne pathogens and model viruses in skim milk / D. M. Gunter-Ward, A. Patras, M. Bhullar [et al.] // Journal of Food Processing and Preservation. – 2018. – Vol. 42, № 2. – Art. e13485. https://doi.org/10.1111/jfpp.13485

4. Inactivation and potential reactivation of pathogenic *Escherichia coli* O157:H7 in bovine milk exposed to three monochromatic ultraviolet UVC lights / F. Yin, Y. Zhu, T. Koutchma, J. Gong // Food Microbiology. – 2015. – Vol. 49. – P. 74–81. https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.01.014

5. UV-C treatment on the safety of skim milk: effect on microbial inactivation and cytotoxicity evaluation / D. M. Ward, A. Patras, A. Kilonzo-Nthenge [et al.] // Journal of Food Process Engineering. – 2019. – Vol. 42, № 4. – Art. e12944. https://doi.org/10.1111/jfpe.12944

6. Ихлов, Б. Л. Спектры ДНК. Обзор / Б. Л. Ихлов // Вестник новых медицинских технологий. – 2018. – Т. 25, № 2. – С. 121–134. https://doi.org/10.24411/1609-2163-2018-16001

7. Recent insights in the impact of emerging technologies on lactic acid bacteria: a review / K. Peng, M. Koubaa, O. Bals, E. Vorobiev // Food Research International. – 2020. – Vol. 137. – Art. 109544. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109544

8. Bakshi, A. S. Effect of fat content and temperature on viscosity in relation to pumping requirements of fluid milk products / A. S. Bakshi, D. E. Smith // Journal of Dairy Science. – 1984. – Vol. 67, № 6. – P. 1157–1160. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(84)81417-4

9. Bactericidal effect of ultraviolet C light-emitting diodes: optimization of efficacy toward foodborne pathogens in water / S.-K. Park, D.-M. Jo, M.-G. Kang [et al.] // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. – 2021. – Vol. 222. – Art. 112277. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112277

10. Bactericidal effects of 310 nm ultraviolet light-emitting diode irradiation on oral bacteria / A. Takada, K. Matsushita, S. Horioka [et al.] // BMC Oral Health. –2017. – Vol. 17. – Art. 96. https://doi.org/10.1186/s12903-017-0382-5

11. Effects of ultraviolet irradiation equipment on endodontic disease–related bacteria / A. Haraguchi, Y. Shinichiro, M. Takeshita [et al.] // Lasers in Dental Science. – 2022. – Vol. 6, № 1. – P. 31–40. https://doi.org/10.1007/s41547-021-00145-8

12. Kim, D. Effect of surface characteristics on the bactericidal efficacy of UVC LEDs / D. Kim, D.-H. Kang // Food Control. – 2020. – Vol. 108. – Art. 106869. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106869

13. Yolmeh, M. Evaluate the effects of ultraviolet radiation on the growth of Escherichia coli and Bacillus cereus isolated from raw milk and raw rice / M. Yolmeh, M. B. Habibi Najafi, M. Najafzadeh // Iranian Food Science and Technology Research Journal. – 2015. – Vol. 11, № 4. – P. 319–324. https://doi.org/10.22067/ifstrj.v1394i11.37989

14. Srimagal, A. Effect of light emitting diode treatment on inactivation of *Escherichia coli* in milk / A. Srimagal, T. Ramesh, J. K. Sahu // LWT – Food Science and Technology. – 2016. – Vol. 71. – P. 378–385. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.04.028

15. Microbial inactivation and cytotoxicity evaluation of UV irradiated coconut water in a novel continuous flow spiral reactor / M. S. Bhullar, A. Patras, A. Kilanzo-Nthenge [et al.] // Food Research International. – 2018. – Vol. 103. – P. 59–67. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.10.004

16. Use of UV-C radiation as a non-thermal process for liquid egg products (LEP) / S. Unluturk, M. R. Atılgan, A. H. Baysal, C. Tarı // Journal of Food Engineering. – 2008. – Vol. 85, № 4. – P. 561–568. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.08.017

17. Wadsworth, J. Perchlorates on Mars enhance the bacteriocidal effects of UV light / J. Wadsworth, C. S. Cockell // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7. – Art. 4662. https://doi.org/10.1038/s41598-017-04910-3

18. Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with other environmental factors / D. P. Häder, C. E. Williamson, S. Å. Wängberg [et al.] // Photochemical & Photobiological Sciences. – 2015. – Vol. 14, № 1. – P. 108–126. https://doi.org/10.1039/c4pp90035a

19. Влияние светодиодного ультрафиолетового излучения на обеззараживание молока / Ю. В. Трофимов, С. И. Лишик, О. Л. Сороко [и др.] // Наука, питание и здоровье: сб. науч. тр. / НАН Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по продовольствию; под общ. ред. З. В. Ловкиса. – Мн., 2024. – С. 381–386.

References

1. Buhler S., Gasparini A., Montanari R., Montanari R., Sforza S., Tedeschi T. UV irradiation as a comparable method to thermal treatment for producing high quality stabilized milk whey. *LWT – Food Science and Technology*, 2019, vol. 105, pp. 127–134. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.051

2. Myalenko D. M., Fedotova O. B. Development and improvement of technology for disinfection of packaging by ultraviolet irradiation. *Ideas of academician Vladimir Dmitrievich Kharitonov in high-tech technologies of milk processing*. Moscow, 2021, pp. 207–226 (in Russian).

3. Gunter-Ward D. M., Patras A., Bhullar M. S., 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, vol. 42, no. 2, art. e13485. https://doi.org/10.1111/jfpp.13485

4. Yin F., Zhu Y., Koutchma T., Gong J. Inactivation and potential reactivation of pathogenic *Escherichia coli* O157:H7 in bovine milk exposed to three monochromatic ultraviolet UVC lights. *Food Microbiology*, 2015, vol. 49, pp. 74–81. https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.01.014

5. Ward D. M., Patras A., Kilonzo-Nthenge A., Sudheer K. Y., Pan C., Xiao H., Sasges M. R. UV-C treatment on the safety of skim milk: effect on microbial inactivation and cytotoxicity evaluation. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, vol. 42, no. 4, art. e12944. https://doi.org/10.1111/jfpe.12944

6. Ikhlov B. L. Spectra of DNAa. Review. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii = Journal of New Medical Technologies*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 121–134 (in Russian). https://doi.org/10.24411/1609-2163-2018-16001

7. 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, vol. 137, art. 109544. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109544

8. Bakshi A. S., Smith D. E. Effect of fat content and temperature on viscosity in relation to pumping requirements of fluid milk products. *Journal of Dairy Science*, 1984, vol. 67, no. 6, pp. 1157–1160. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(84)81417-4

9. Park S.-K., Jo D.-M., Kang M.-G., Khan F., Hong S. D., Kim C. Y., Kim Y.-M., Ryu U.-C. Bactericidal effect of ultraviolet C light-emitting diodes: optimization of efficacy toward foodborne pathogens in water. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2021, vol. 222, art. 112277. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112277

10. Takada A., Matsushita K., Horioka S., Furuichi Y., Sumi Y. Bactericidal effects of 310 nm ultraviolet light-emitting diode irradiation on oral bacteria. *BMC Oral Health*, 2017, vol. 17, art. 96. https://doi.org/10.1186/s12903-017-0382-5

11. Haraguchi A., Yoshida S., Takeshita M., Sumi Y., Mitarai H., Yuda A., Wada H., Nishimura F., Maeda H., Wada N. Effects of ultraviolet irradiation equipment on endodontic disease–related bacteria. *Lasers in Dental Science*, 2022, vol. 6, no. 1, pp. 31–40. https://doi.org/10.1007/s41547-021-00145-8

12. Kim D., Kang D.-H. Effect of surface characteristics on the bactericidal efficacy of UVC LEDs. *Food Control*, 2020, vol. 108, art. 106869. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106869

13. Yolmeh M., Habibi Najafi M. B., Najafzadeh M. Evaluate the effects of ultraviolet radiation on the growth of Escherichia coli and Bacillus cereus isolated from raw milk and raw rice. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*, 2015, vol. 11, no. 4, pp. 319–324. https://doi.org/10.22067/ifstrj.v1394i11.37989

14. Srimagal A., Ramesh T., Sahu J. K. Effect of light emitting diode treatment on inactivation of *Escherichia coli* in milk. *LWT – Food Science and Technology*, 2016, vol. 71, pp. 378–385. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.04.028

15. Bhullar M. S., Patras A., Kilanzo-Nthenge A., Pokharel B., Yannam S. K., Rakariyatham K., Pan C., Xiao H., Sasges M. Microbial inactivation and cytotoxicity evaluation of UV irradiated coconut water in a novel continuous flow spiral reactor. *Food Research International*, 2018, vol. 103, pp. 59–67. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.10.004

16. Unluturk S., Atılgan M. R., Baysal A. H., Tarı C. Use of UV-C radiation as a non-thermal process for liquid egg products (LEP). *Journal of Food Engineering*, 2008, vol. 85, no. 4, pp. 561–568. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.08.017

17. Wadsworth J., Cockell C. S. Perchlorates on Mars enhance the bacteriocidal effects of UV light. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, art. 4662. https://doi.org/10.1038/s41598-017-04910-3

18. Häder D. P., Williamson C. E., Wängberg S. Å., Rautio M., Rose K. C., Gao K., Helbling E. W., Sinha R. P., Worrest R. Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with other environmental factors. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2015, vol. 14, no. 1, pp. 108–126. https://doi.org/10.1039/c4pp90035a

19. Trofimov Yu. V., Lishik S. I., Soroko O. L., Bespalova E. V., Tsvirko V. I., Chelyapin A. E., Bareko E. A. The effect of LED ultraviolet radiation on milk disinfection. *Nauka, pitanie i zdorov'e: sbornik nauchnykh trudov* [Science, nutrition, and health: collection of scientific papers]. Minsk, 2024, pp. 381–386 (in Russian).

Информация об авторах

Трофимов Юрий Васильевич – кандидат технических наук, директор Центра светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси (Логойский тракт, 20, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@ledcenter.by

Лишик Сергей Иванович – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе, Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси (Логойский тракт, 20, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@ledcenter.by

Сороко Олег Леонидович – кандидат технических наук, доцент, главный энергетик, Институт мясо-молочной промышленности, Национальная академия наук Беларуси (пр. Партизанский, 172, 220075, Минск, Республика Беларусь). E-mail: saroka.aleh@gmail.com

Беспалова Екатерина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, заведующий отраслевой лабораторией, Институт мясо-молочной промышленности, Национальная академия наук Беларуси (пр. Партизанский, 172, 220075, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bespalova-kat@mail.ru

Полын Ангелина Николаевна – инженер отраслевой лаборатории, Институт мясо-молочной промышленности, Национальная академия наук Беларуси (пр. Партизанский, 172, 220075, Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@instmmp.by

Град Дмитрий Валентинович – младший научный сотрудник, Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси (Логойский тракт, 20, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@ledcenter.by

Слепокуров Вадим Евгеньевич – начальник конструкторско-технологического бюро, Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси (Логойский тракт, 20, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@ledcenter.by

Челяпин Алексей Евгеньевич – заведующий научно-исследовательским отделом, Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси (Логойский тракт, 20, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@ledcenter.by

Щитникова Анна Игоревна – младший научный сотрудник, Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси (Логойский тракт, 20, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@ledcenter.by

Асиненко Денис Артурович – младший научный сотрудник, Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси (Логойский тракт, 20, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@ledcenter.by

Захарова Нина Аркадьевна – ведущий инженер-конструктор, Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий Национальной академии наук Беларуси (Логойский тракт, 20, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@ledcenter.by

Information about the authors

Yuri V. Trofimov – Ph. D. (Engineering), Director of the Center for LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus (20, Logoysky Trakt, 220090, Minsk). E-mail: info@ledcenter.by

Sergey I. Lishik – Ph. D. (Engineering), Deputy Director for Research, Center for LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus (20, Logoysky Trakt, 220090, Minsk). E-mail: info@ledcenter.by

Oleg L. Soroko – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Chief Power Engineer, Institute of Meat and Dairy Industry, National Academy of Sciences of Belarus (172, Partizansky Ave., 220075, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: saroka.aleh@gmail.com

Ekaterina V. Bespalova – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Industry Laboratory, Institute of Meat and Dairy Industry, National Academy of Sciences of Belarus (172, Partizansky Ave., 220075, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bespalova-kat@mail.ru

Angelina N. Polyn – Engineer at the Industrial Laboratory, Institute of Meat and Dairy Industry (172, Partizansky Ave., 220075, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: info@instmmp.by

Dmitry V. Grad – Junior Researcher, Center for LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus (20, Logoysky Trakt, 220090, Minsk). E-mail: info@ledcenter.by

Vadim E. Slepokurov – Head of the Design and Technology Bureau, Center for LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus (20, Logoysky Trakt, 220090, Minsk). E-mail: info@ledcenter.by

Alexey E. Chelyapin – Head of the Research Department, Center for LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus (20, Logoysky Trakt, 220090, Minsk). E-mail: info@ledcenter.by

Anna I. Shchitnikova – Junior Researcher, Center for LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus (20, Logoysky Trakt, 220090, Minsk). E-mail: info@ledcenter.by

Denis A. Asinenko – Junior Researcher, Center for LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus (20, Logoysky Trakt, 220090, Minsk). E-mail: info@ledcenter.by

Nina A. Zakharova – Leading Design Engineer, Center for LED and Optoelectronic Technologies of the National Academy of Sciences of Belarus (20, Logoysky Trakt, 220090, Minsk). E-mail: info@ledcenter.by