

УДК 637.13

Ю.В. Трофимов¹, С.И. Лишик¹, О.Л. Сороко², Е.В. Беспалова², А.Н. Полын²,
Д.В. Град¹, В.Е. Слепокуров¹, А.Е. Челябин¹, А.И. Щитникова¹, Д.А. Асиненко¹,
Н.А. Захарова¹

¹Государственное предприятие «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси»

²Республиканское унитарное предприятие «Институт мясо-молочной промышленности», г. Минск, Республика Беларусь

ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЮ МОЛОКА СВЕТОДИОДНЫМ УЛЬТРАФИОЛЕТОМ

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. Показано, что при обеззараживании молока через установку при оптимальном режиме обработки содержание КМАФАнМ в образце коровьего молока уменьшилось в 21 раз, а содержание 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

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, т.к. они оказывают высокий бактерицидный эффект, сохраняя исходное качество сырья. В частности, все больше во многих отраслях пищевой промышленности повышается интерес к ультрафиолетовому (УФ) облучению как к более щадящей нетермической технологии [1, 2].

Наиболее эффективный бактерицидный эффект проявляется в диапазоне УФ-С (коротковолновое излучение с длиной волны 200–280 нм) [3, 4]. При этом более выраженным бактерицидным действием обладают УФ излучения 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 [5]. Причинами гибели микроорганизмов являются летальные мутации, утрата молекулами ДНК способности к репликации, нарушение процесса транскрипции. УФ излучения разрушают также токсины, например, дифтерийный, столбнячный, дизентерийный, брюшного тифа, золотистого стафилококка [6].

Облучение коротковолновым УФ-излучением обладает отличными бактерицидными свойствами, способствующими уничтожению множества патогенных микроорганизмов (таких как бактерии, грибки, плесень, дрожжи и вирусы) [7–12]. Эффективность УФ-обработки зависит от способности излучения проникать через клеточную стенку патогенных микроорганизмов, затем блокировать транскрипции и репликации ДНК за счет образования димеров тимина, препятствующих росту и размножению клетки [13–18].

УФ-обработка молока может быть применена в сыроделии для замены бактофугирования. При бактофугировании происходит снижение содержания белка от 0,5 до 1,5 г на 1 л молока, что приводит к потерям выхода сыра. Бактофугирование оказывает также некоторое влияние на консистенцию сыра: она становится более плотной. В процессе бактофугирования удаляются из молока и пропионовокислые бактерии, что отражается на рисунке сыров с высокой температурой второго нагревания. Поэтому в молоко, подвергавшееся бактофугированию, при производстве сыров этой группы необходимо вносить дополнительно пропионовокислые бактерии.

Основные трудности при УФ обеззараживании мутных сред заключаются в том, что УФ излучение не способно проникнуть глубоко в такие среды. Особенностью молока является его чрезвычайно малая проницаемость для УФ-С излучения: слой молока толщиной 100 мкм поглощает около 90 % падающего излучения. Поэтому для УФ обеззараживания молока необходимо либо создавать в реакторе тонкий слой молока, либо оно должно постоянно перемешиваться так, чтобы все внутренние слои сменяли друг друга и выходили на поверхность, задавая турбулентность потоку.

Для решения этой проблемы внутри камеры обеззараживания целесообразно формировать вихреобразное течение Куэтта-Тейлора, т.е. течение жидкости, возникающее под действием сил вязкого трения между двумя вращающимися с разными скоростями соосными цилиндрами. Схематическое изображение течения Куэтта-Тейлора, представлено на рис. 1.

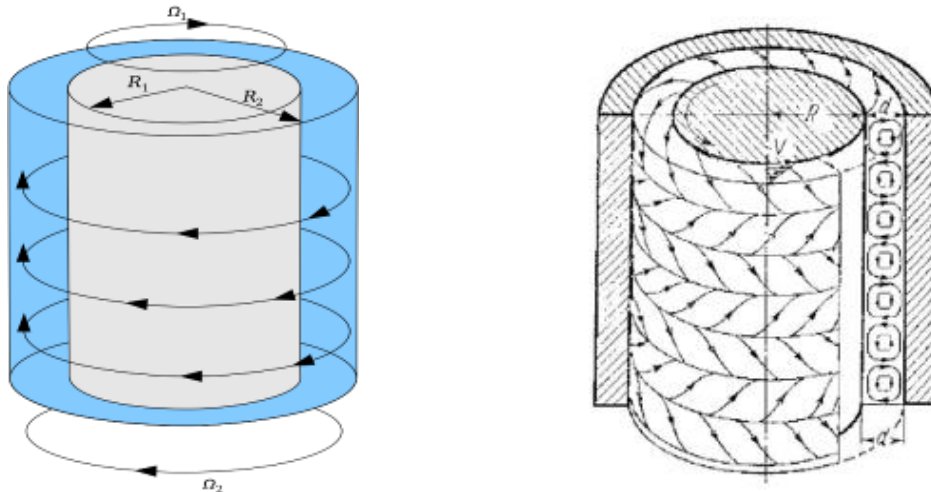


Рисунок 1. Схематическое изображение течения Куэтта-Тейлора

В процессе моделирования поэтапно рассмотрены следующие задачи: исследование таких гидродинамических параметров молока, как вязкость, плотность, теплоотдача; моделирование процесса образования вихрей Тейлора, нахождение оптимальных параметров скорости вращения центрального элемента (ротора) в соответствии с рис. 1; оптимизация модели с точки зрения ширины зазора, входного потока жидкости, скорости вращения ротора.

Основными регулируемыми параметрами, кроме радиуса ротора, являются температура жидкости, ее объемный расход на входе в установку и скорость вращения центрального элемента. Движение только вдоль оси Z происходит около центрального элемента, а движение внутри домена около стекла, что видно, если рассмотреть скорость по Z в разрезе домена в соответствии с рис. 2.

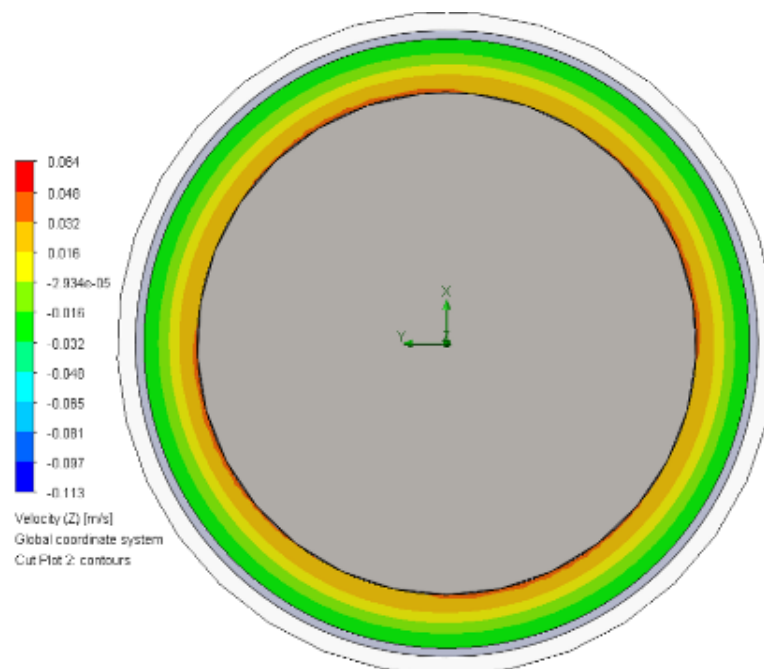


Рисунок 2. Распределение скорости по оси Z внутри домена

Моделирование показало, что перемешивание молока происходит равномерно, а его молекулы успевают пройти по внешней (стеклянной) границе реактора и получить дозу облучения УФ, а затем уходят вглубь домена и заменяются другими молекулами.

При использовании сплошного цилиндрического ротора минимальная ширина зазора, при которой наблюдался эффект вихреобразования, составила 5 мм в соответствии с рис. 3.



Рисунок 3. Наблюдаемые вихри Тейлора при сплошном цилиндрическом роторе, ширина зазора 5 мм

При использовании параболической формы ротора можно добиться 3 мм толщины слоя в соответствии с рис. 4.

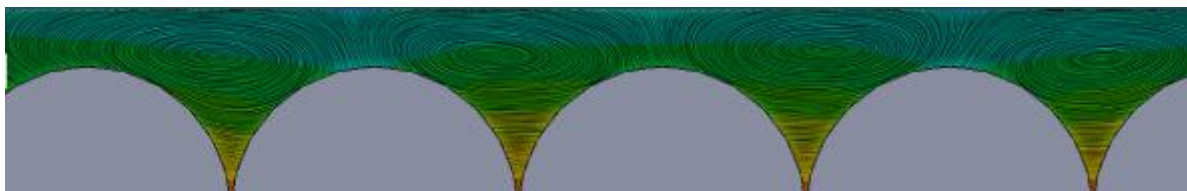


Рисунок 4. Вихри Тейлора при параболической форме ротора

На рис. 5 представлена фотография разработанной сотрудниками Государственного предприятия «Центр светодиодных и оптоэлектронных технологий НАН Беларуси» экспериментальной светодиодной УФ установки для обеззараживания молока. Установка состоит из каркаса, УФ модулей и реактора, шагового двигателя для перемешивания молока и перистальтического насоса для подачи молока в зону реактора, системы электрического питания и системы охлаждения УФ модулей, блока управления и обработки информации и др.

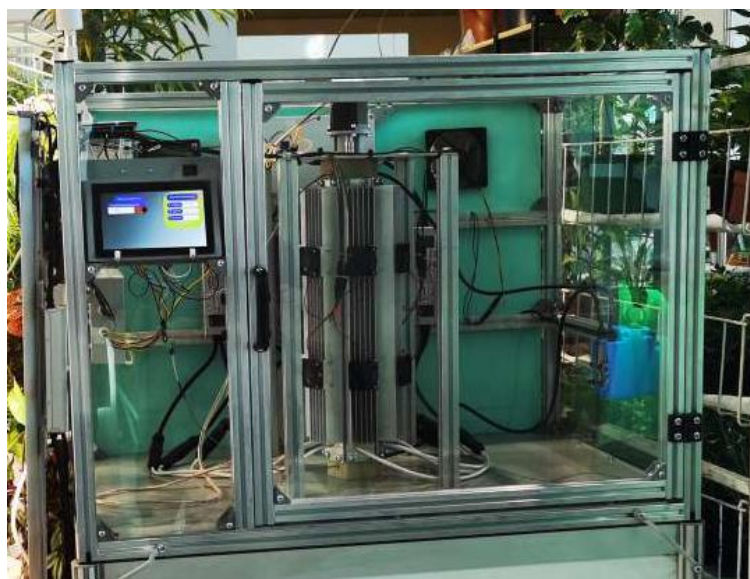


Рисунок 5. Фотография экспериментальной УФ установки для обеззараживания молока

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.

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. Технические параметры экспериментальной светодиодной УФ установки для обеззараживания молока представлены в табл. 1.

Таблица 1

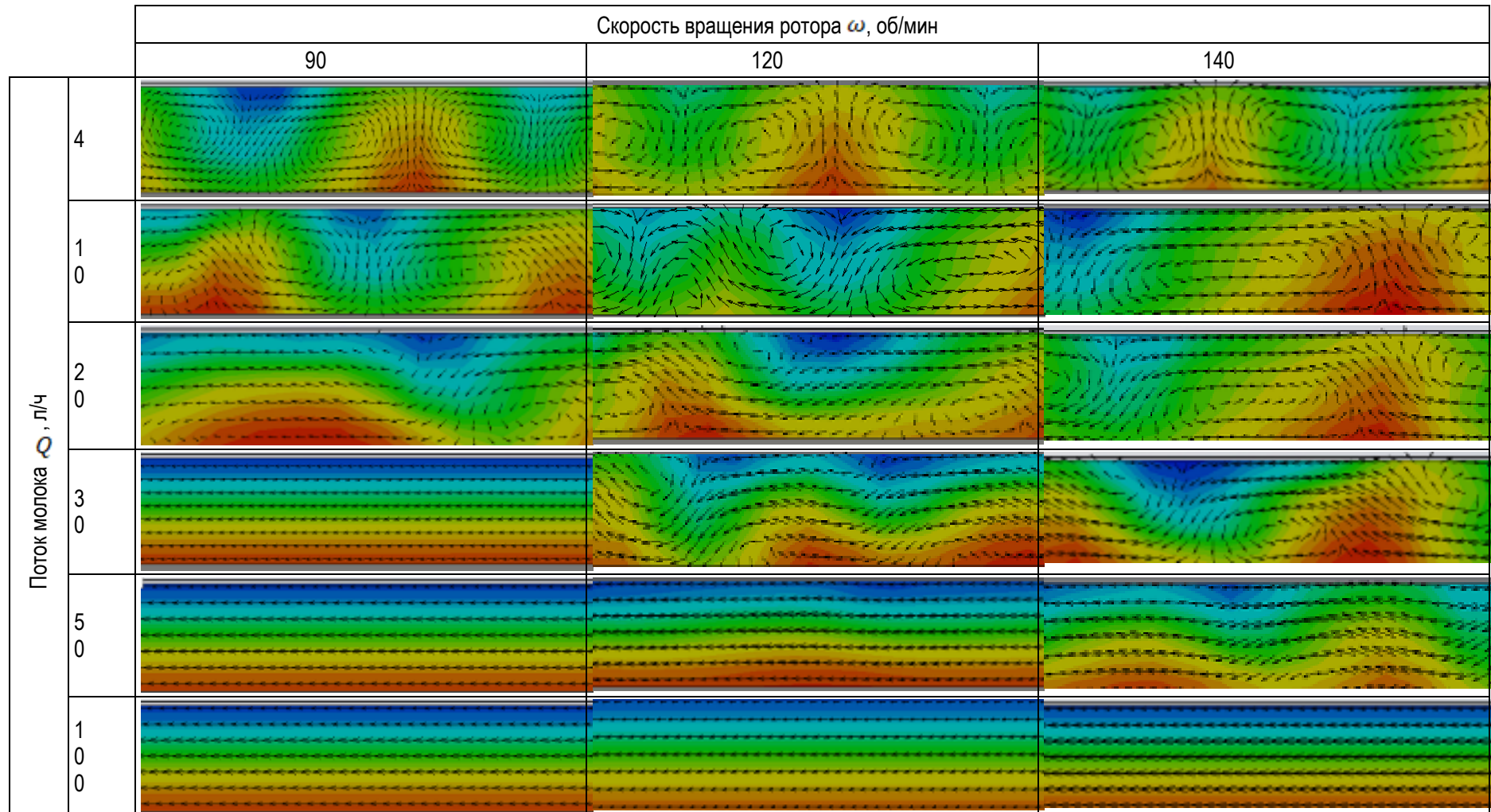
**Технические характеристики экспериментальной УФ установки
для обеззараживания молока**

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 (ДхШхВ)	1000x600x750
Масса, кг	30

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.

Таблица 2

Паттерны течения Куэтта-Тейлора в зависимости от скорости вращения ротора и потока молока через УФ реактор (стрелками показано направление продольной, а цветом – тангенциальной составляющей вектора скорости течения молока. Красный цвет соответствует направлению движения к наблюдателю, а синий – от наблюдателя)



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. 6.

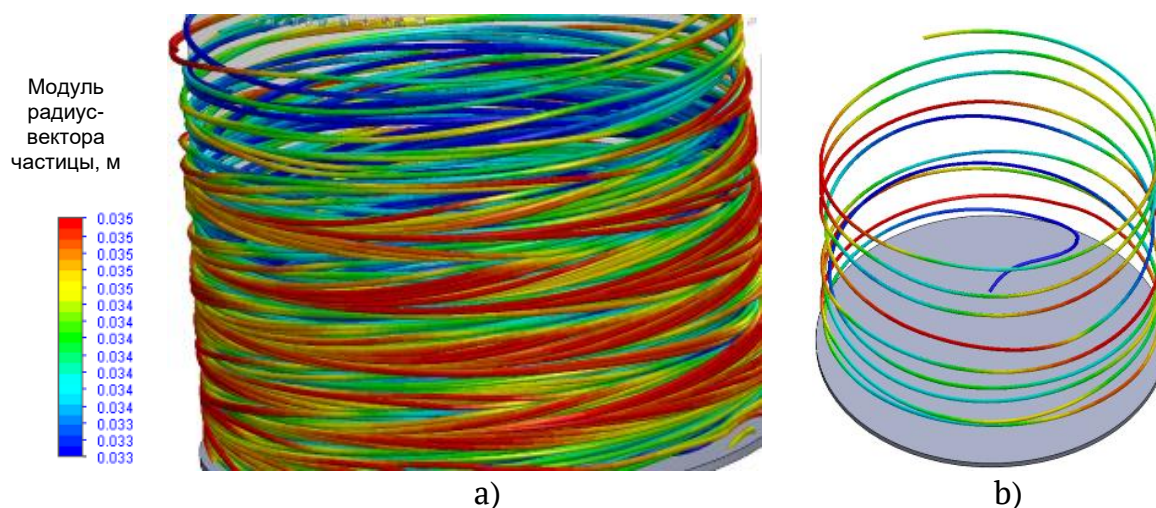


Рисунок 6. Типичные траектории движения группы из 20 (а) и 1 (б) частиц молока в УФ реакторе

Из анализа данных, представленных на рис. 6 следует, что 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. 6 б), 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.

Определение физико-химических показателей объектов исследований осуществлялось в лабораторных условиях РУП «Институт мясо-молочной промышленности», при этом использованы стандартные и специальные методы анализа (О безопасности молока и молочных продуктов: ТР ТС 033/2013; Сборник методов технологического контроля для обеспечения заданных качественных характеристик молочных продуктов РУП «Институт мясо-молочной промышленности»). Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием компьютерных программных приложений Excel.

В ходе проведения исследований отработаны различные параметры светодиодной УФ обработки. Проведена серия испытаний с целью изучения влияния скорости вращения ротора внутри экспериментального образца светодиодного УФ реак-

тора и интенсивности свечения светодиодов на эффективность обеззараживания молока. Исследования проводились при трех скоростях вращения ротора: 80, 100 и 120 оборотов в минуту.

На каждой из указанных скоростей были проведены отдельные опыты с использованием трех уровней яркости светодиодов: 50 %, 75 %, 100 %. Таким образом, для каждой скорости вращения было реализовано три варианта условий, что позволило оценить зависимость между механическими параметрами установки и оптическими характеристиками светодиодов.

Для исследования были отобраны образцы сырого коровьего молока высшего сорта с массовой долей жира 3,7 %. С целью определения эффективности обеззараживающего воздействия экспериментальной установки при разных условиях образцы молока-сырья пропускали через светодиодный УФ реактор 5 раз.

После каждого прогона через светодиодный УФ реактор обеззараженное молоко собиралось в стерильную тару, чтобы не допустить смешивания с необработанным молоком.

Анализ полученных результатов показывал, что как скорость вращения, так и уровень яркости светодиодов влияют на эффективность снижения количества КМАФАнМ.

При яркости светодиодов 50 % и скорости вращения внутри экспериментальной установки 80 об/мин количество КМАФАнМ снизилось в 2,3 раза по сравнению с молоком-сырьем, при этом количество КМАФАнМ в обработанном УФ образце составило 82000 КОЕ/см³.

Увеличив скорость вращения внутри экспериментальной установки до 100 об/мин при том же уровне яркости светодиодов, количество КМАФАнМ снизилось в 6,1 раза по сравнению с молоком-сырьем, количество КМАФАнМ в молоке, обработанном при данном режиме составило 31000 КОЕ/см³.

При скорости вращения внутри экспериментальной установки 120 об/мин и яркости светодиодов 50 % количество КМАФАнМ снизилось в 25 раз по сравнению с молоком-сырьем, количество КМАФАнМ в молоке, обработанном при данном режиме, составило 7600 КОЕ/см³.

На всех режимах количество КМАФАнМ соответствует требованию, предъявляемому к молоку питьевому.

Для оценки влияния яркости светодиодов на количество КМАФАнМ установили скорость вращения внутри экспериментальной установки постоянной – 120 об/мин. При яркости светодиодов 50 % количество КМАФАнМ снизилось в 25 раз по сравнению с молоком-сырьем, при яркости светодиодов 75 % – в 28,8 раза. При максимальной яркости светодиодов 100 % количество КМАФАнМ снизилось в 67,8 раза по сравнению с молоком-сырьем.

На количество бактерий группы кишечной палочки (БГКП) как скорость вращения ротора внутри экспериментальной установки, так и яркость светодиодов не оказывают существенного влияния. При воздействии светодиодного УФ излучения количество БГКП снижается до допустимого при всех выбранных параметрах.

Для дальнейших исследований выбран режим обработки при скорости вращения внутри экспериментальной установки 100 об/мин и яркости светодиодов 75 %. Выбор данного режима обработки молока-сырья на экспериментальном светодиодном УФ реакторе обусловлен оптимальным балансом между эффективностью деконтаминации и экономической целесообразностью процесса.

Увеличение яркости светодиодов экономически неоправдано, т.к. это приведет к увеличению потребления электроэнергии, что увеличит эксплуатационные расходы. Увеличение числа оборотов приведет к быстрому износу реактора, что потребует более частого обслуживания и замены деталей, увеличивая капитальные затраты.

Далее были проведены исследования для определения влияния гомогенизации и массовой доли жира на эффективность светодиодной УФ обработки экспериментальным образцом УФ реактора для деконтаминации молочного сырья.

Для получения образцов с разными массовыми долями жира иолоко-сырье подвергли сепарированию, после чего в разных пропорциях смешали сливки и обезжиренное молоко. В результате получили образцы с массовыми долями жира 2,9 %, 4,9 %, 8,0 %.

Для определения влияния гомогенизации на эффективность деконтаминации экспериментальным УФ реактором каждый из 3-х образцов молока разделили на две порции и одну из них подвергли гомогенизации.

Гомогенизация осуществлялась на лабораторном гомогенизаторе HOMOLAB2 (производство Италия, производительность 20 дм³/ч). Процесс гомогенизации проводили при температуре 55±2°C, давление на 1 ступени 17 МПа, на 2 ступени 3 МПа.

Отобранные образцы пропускали через экспериментальный светодиодный УФ реактор 5 раз при скорости вращения внутри экспериментальной установки 100 об/мин и яркости светодиодов 75 %.

Анализ микробиологических показателей показал, что как общая бактериальная обсемененность (КМАФАнМ), так и БГКП возрастают с увеличением массовой доли жира в образцах молока. Это объясняется тем, что жир в молоке имеет высокую оптическую плотность и молекулы жира поглощают УФ-излучение. Чем выше массовая доля жира в молоке, тем больше света поглощается и рассеивается, что снижает количество светодиодного УФ-излучения, достигающего микробов.

Анализируя гомогенизированные и негомогенизированные образцы молока, пришли к выводу, что процесс гомогенизации не оказывает интенсифицирующего воздействия на обеззараживающую способность светодиодного УФ излучения. Несмотря на то, что в гомогенизированном молоке жировые капли имеют меньший размер и более равномерное распределение, это может оказывать как негативное, так и позитивное влияние на способность светодиодного УФ излучения проникать и взаимодействовать с молоком.

С одной стороны, уменьшение размера жировых капель в гомогенизированном молоке может привести к увеличению поверхности их контакта со светодиодным УФ-излучением, что потенциально способствует более эффективному поглощению света. Однако, с другой стороны, мелкие капли могут вызывать более интенсивное рассеяние света, что может препятствовать его проникновению вглубь жидкости.

Кроме того, в гомогенизированном молоке может изменяться структура белков и других компонентов, что также влияет на их оптические свойства. Например, изменение конформации белков может привести к изменению их способности поглощать светодиодное УФ-излучение.

Таким образом, комплексное взаимодействие между размерами жировых капель, их распределением и оптическими свойствами молока может объяснить неоднозначные результаты проведенного опыта с гомогенизированными и негомогенизированными образцами.

Далее в ходе научно-испытательной работы было исследовано влияние различных параметров светодиодной УФ обработки на деконтаминацию козьего и овечьего молока.

Для исследований были отобраны образцы сырого козьего молока с массовой долей жира 4,1 % и сырого овечьего молока с массовой долей жира 7,5 %. Так как образцы молока имеют достаточно высокую массовую долю жира, нами были заданы более высокие скорости вращения: 100 и 120 об/мин.

На скорости вращения 100 об/мин выбран уровень яркости светодиодов 75 %, на скорости 120 об/мин выбрано 2 уровня яркости светодиодов 75 % и 100 %.

После прогона козьего молока через светодиодный УФ реактор его работа была остановлена и проведена мойка, после чего начали работать с овечьим молоком.

В ходе проведенных исследований было установлено, что количество КМАФАНМ в козьем молоке резко снижается по сравнению с сырым молоком и постепенно снижается в зависимости от интенсивности обработки. Аналогично наблюдается и снижение количества БГКП.

Количество КМАФАНМ овечьего молока снижается постепенно, а количество БГКП в сравнении с сырым молоком снижается более резко, но постепенно в сравнении с разными режимами обработки.

Как козье, так и овечье молоко обладают более высоким содержанием жира по сравнению с коровьим. Высокая жирность затрудняет процесс обработки. Дополнительно, следует отметить, что козье и овечье молоко имеют более сложный состав белков и других биологически активных веществ, что также требует более тщательной настройки параметров обработки для достижения оптимальных результатов.

Исходя из всего вышеперечисленного, для козьего молока рекомендуется следующий режим обработки на данной экспериментальной установке УФ реактора – скорость вращения внутри установки 120 об/мин, мощность светодиодов 75 %. Для овечьего молока рекомендуется режим обработки на данной экспериментальной установке УФ реактора – скорость вращения внутри установки 120 об/мин, мощность светодиодов 100 %.

Выводы

Разработана экспериментальная установка для светодиодного УФ обеззараживания молока-сырья в реакторе типа Куэтта-Тейлора.

Представлена оценка среднего времени нахождения частиц молока в приповерхностном 100 мкм слое УФ реактора.

Исследовано влияние светодиодной УФ обработки молочного сырья разных видов сельскохозяйственных животных на микробиологическую обсемененность при разных режимах облучения и скорости вращения ротора.

Подобраны оптимальные режимы светодиодной УФ обработки коровьего, овечьего и козьего молока. Выявлено, что при обеззараживании коровьего, овечьего и козьего молока через экспериментальную установку при оптимальных режимах обработки содержание мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) и бактерий группы кишечной палочки (БГКП) соответствуют требованиям, предъявляемым к молоку питьевому.

Процесс гомогенизации не оказывает интенсифицирующего воздействия на обеззараживающую способность светодиодного УФ излучения.

Полученные результаты в дальнейшем планируется использовать при проектировании энергоэффективных промышленных установок, исключаящих высокотемпературную обработку молока для его деконтаминации.

Список использованной литературы:

1. **Buhler, S.** UV irradiation as a comparable method to thermal treatment for producing high quality stabilized milk whey / S. Buhler 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 В.Д. Харитонов в наукоемких технологиях переработки молока. Москва: Федеральное государственное автономное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности», 2021. С. 207–226. <https://elibrary.ru/qncnbi>
3. **Gunter-Ward, D.M.** Efficacy of ultraviolet (UV-C) light in reducing foodborne pathogens and model viruses in skim milk / D. M. Gunter-Ward, A. Patras, M.t Bhullar, A. Kilonzo-Nthenge, B. Pokharel, M. Sasges // *Journal of Food Processing and Preservation*/ 2017. e13485. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13485>
4. **Yin, F.** Inactivation and potential reactivation of pathogenic *Escherichia coli* O157:H7 in bovine milk exposed to three monochromatic ultraviolet UVC lights / F. Yin, Yan Zhu, T. Koutchma, J. Gong // *Food Microbiol.* 2015. Vol. 49. P. 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2015.01.014>
5. **Ward, D.M.** UV-C treatment on the safety of skim milk: Effect on microbial inactivation and cytotoxicity evaluation / D.M. Ward et al. // *J. Food Process Eng.* John Wiley & Sons, Ltd, 2019. Vol. 42, № 4. Article 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://elibrary.ru/usmvlv>
7. **Peng, K.** Recent insights in the impact of emerging technologies on lactic acid bacteria: A review / K. Peng et al. // *Food Res. Int.* Elsevier, 2020. Vol. 137. P. 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 Products1 / A.S. Bakshi, D.E. Smith. // *Journal of Dairy Science*. Vol. 67. №6. 1984. P. 1157-1160. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(84\)81417-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(84)81417-4)
9. **Park, S.-K.** Bactericidal effect of ultraviolet C light-emitting diodes: Optimization of efficacy toward foodborne pathogens in water / S.-K. Park et al. // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2021. Vol. 222. P. 112277. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2021.112277>
10. **Takada, A.** Bactericidal effects of 310 nm ultraviolet light-emitting diode irradiation on oral bacteria / A. Takada et al. // *BMC Oral Health*. 2017. Vol. 17. № 96. P. 10. <https://doi.org/10.1186/s12903-017-0382-5>
11. **Haraguchi, A.** Effects of ultraviolet irradiation equipment on endodontic disease-related bacteria / A. Haraguchi 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. P. 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.
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. **Bhullar, M.S.** Microbial inactivation and cytotoxicity evaluation of UV irradiated coconut water in a novel continuous flow spiral reactor / M.S. Bhullar et al. // Food Research International. Elsevier. 2018. Vol. 103. P. 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.10.004>
16. **Unluturk, S.** Use of UV-C radiation as a non-thermal process for liquid egg products (LEP) / S. Unluturk et al. // Journal of Food Engineering. Elsevier, 2008. Vol. 85, № 4. Pp. 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, № 1. P. 4662. <https://doi:10.1038/s41598-017-04910-3>
18. **Häder, D.-P.** Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with other environmental factors / D.-P. Häder et al. // Photochemical & Photobiological Sciences. 2015. Vol. 14, № 1. Pp. 108–126. <https://doi.org/10.1039/C4PP90035A>