

На правах рукописи



БАБЕНКО Максим Сергеевич

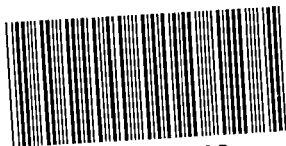
**РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПАСТЕРИЗАЦИИ МОЛОКА
В ПОЛЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ**

Специальность 05.18.12 - Процессы и аппараты
пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

25 МАЯ 2014



005549343

Воронеж – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» (ВГУИТ).

Научный руководитель: **Антипов Сергей Тихонович**
заслуженный изобретатель РФ,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
университет инженерных технологий»

Официальные оппоненты: **Харитонов Владимир Дмитриевич**
академик РАН, доктор технических
наук, профессор ГНУ ВНИМИ
Россельхозакадемии

Мордасов Анатолий Григорьевич
кандидат технических наук,
Председатель Воронежского отделения
«Российской инженерной академии»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный
технологический университет»

Защита диссертации состоится «04» июля 2014 года в 14 часов 30 минут на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д.212.035.01 при ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» по адресу: 394036, г. Воронеж, пр-т Революции, 19, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВПО ВГУИТ (<http://www.vsuet.ru>).

С авторефератом можно ознакомиться на официальных сайтах ВАК Минобрнауки РФ (<http://www.vak2.ed.gov.ru>) и ФГБОУ ВПО ВГУИТ (<http://www.vsuet.ru>).

Автореферат разослан «30» апреля 2014 г.

Ученый секретарь совета по защите
диссертаций на соискание ученой степени
кандидата наук, на соискание ученой
степени доктора наук Д.212.035.01
доктор технических наук, профессор



Калашников Г.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Согласно принятой «Доктрине продовольственной безопасности РФ», доля отечественного производства продуктов питания, включая производство молока и молочных продуктов, должно быть доведено до 90 %.

По данным Института питания РАМН, годовое потребление молока и молочных продуктов из расчета на одного человека, принято в количестве 392 кг. В 2012 году - 260 кг, что меньше необходимой нормы на 33 %.

В областной целевой программе «Развитие сельского хозяйства Воронежской области на 2013-2020 годы» особое место отведено развитию молочного скотоводства. Мероприятиями Программы предусмотрен рост производства продуктов животноводства, в том числе: увеличение производства молока и молочной продукции - до 859,2 тыс. т., из них питьевого молока до 403,0 тыс. т., что должно привести к увеличению потребления молока и молочных продуктов на душу населения с 254 до 340 кг.

Увеличение потребления молока возможно при увеличении поголовья КРС и производственных мощностей на фоне снижения себестоимости готового продукта.

Снижение себестоимости молока и молочной продукции возможно также через усиление производственной базы малых пищевых предприятий и молочных животноводческих ферм, на долю которых в Воронежской области приходится около 40 - 50 % производимого молока. Первичная обработка его здесь затруднена из-за разрозненности производителей молока в сельских поселениях, отсутствием «технической базы» и отдаленности от молочных перерабатывающих заводов.

Наличие современных технологий и технических средств по первичной обработке и переработке молока, резко повышает конкурентоспособность и рентабельность производства. Поэтому создание компактных, недорогих и энергоэффективных технологических установок является важной проблемой в развитии молочной промышленности.

Разработка и внедрение энергоэффективных электропастеризаторов на малых пищевых предприятиях и молочных животноводческих фермах позволит выйти на прямые связи данных хозяйств с потребителем и снизить конечную цену готового продукта. При этом готовый продукт должен отвечать требованиям ГОСТов, иметь хорошие вкусовые и питательные качества, а также быть пригодно для выработки из него молочных продуктов.

В последние годы наибольшее распространение приобрели установки с комбинированным энергоподводом.

Наиболее перспективным направлением для пастеризации жидких пищевых продуктов является использование возможностей ИК излучения с целью направленного воздействия на молоко и микроорганизмы, содержащиеся в нем.

Поэтому актуальная задача обработки молока на малых перерабатывающих предприятиях может быть решена при разработке энергоэффективного способа пастеризации молока в поле инфракрасного излучения и оборудования для его осуществления.

В результате теоретических и экспериментальных исследований в качестве дополнительного энергоподвода нами выбрано ИК излучение.

Значительный вклад в теоретические основы обработки молока в поле ИК излучения внесли работы ученых И. А. Рогова, А. Э. Мянды, В. Н. Магда, В. Г. Гизатулина, С. Г. Ильясова, Е. П. Тюрева и др.

Проведя литературный, а также патентный поиск по теме пастеризации, и изучив свойства молока, нами был сделан вывод о том, что процесс пастеризации молока необходимо проводить в поле ИК излучения.

Для реализации процесса пастеризации молока в поле ИК излучения необходим выбор его рациональных режимов, обеспечивающих необходимые условия для ликвидации токсичной и балластной микрофлоры и улучшения сохранности продукта. Однако системная информация о процессе пастеризации молока в поле ИК излучения устарела и не соответствует возможностям современных технологий.

Исследования по обработке молока ИК излучением потребовали использовать достижения современной науки и техники (светотехники, микробиологии, технологии обработки молока и др.), и проводились в содружестве с несколькими научными учреждениями и организациями: Центр коллективного пользования ФГБОУВПО «Воронежский государственный университет», Управление федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Воронежской области «Роспотребнадзор», г. Воронеж и филиале в г. Павловск, Федеральное бюджетное учреждение здравоохранения «Центр гигиены и эпидемиологии в Воронежской области», ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт комбикормовой промышленности», фермерское хозяйство ОАО «Рассвет».

Определение рациональных режимов процесса ИК пастеризации молока с использованием возможностей современных технологий обеспечит значительное преимущество перед традиционными методами и позволит выйти на новый уровень производства.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью исследований является совершенствование процесса пастеризации молока в установке с ИК нагревательными элементами применительно к условиям производства его фермерскими и личными подсобными хозяйствами.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи исследования:

- исследование гидродинамики и выбор формы перемешивающего устройства ИК излучателя;
- исследование оптических характеристик молока;
- исследование и оценка основных факторов, оказывающих наибольшее влияние на процесс пастеризации молока;
- статистическое определение оптимальных режимов работы экспериментальной пастеризационной установки, позволяющее в широком диапазоне изменения входных факторов обеспечить минимальную величину энергозатрат;
- разработка математической модели процесса пастеризации молока в поле ИК-излучения;
- проведение качественной оценки полученного молока;
- разработка машинной технологии переработки молока;

- разработка высокоинтенсивного пастеризатора для жидких пищевых продуктов;
- разработка способа автоматического управления процессом пастеризации молока с использованием ИК нагревательных элементов;
- проведение промышленной апробации и разработка технико-экономического обоснования эффективности предлагаемых разработок.

Научная новизна. При помощи системы САПР Solid Works исследовано движение жидкости в колбе из шара и колбе из нескольких шаров, на основании полученных результатов выбрана форма ИК нагревательных элементов, исследованы оптические характеристики молока и получен диапазон длин волн ИК излучения эффективного воздействия на молоко, на основании которых выбран источник ИК излучения - токопроводящая пленка, нанесенная на поверхность кварцевых колб, с требуемой излучательной способностью $\lambda_{\text{max}} 1500 \div 2700\text{нм}$.

На основе полного факторного эксперимента на установке с ИК нагревательными элементами определены рациональные режимы работы ИК пастеризатора, а также установлено влияние различных факторов на процесс ИК пастеризации.

Разработана математическая модель процесса пастеризации молока в поле ИК излучения, на основании которой создана программа, моделирующая работу пастеризатора в среде Mathcad-15, позволяющая рассчитывать и проектировать ИК излучатели и их параметры.

Практическая значимость работы. На основании комплекса экспериментально-теоретических исследований показана целесообразность использования ИК пастеризации молока. Разработаны: оригинальная технологическая линия пастеризации молока с ИК нагревом, высокоинтенсивная пастеризационно-охлаждающая установка для молока с ИК нагревательными элементами и способ автоматического управления процессом пастеризации молока с использованием ИК нагревательных элементов для обеспечения работы установки по заранее заданной программе.

Новизна технических решений подтверждена патентом РФ № 2479232.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на научных конференциях Воронежского государственного университета инженерных технологий с 2010 по 2014 гг. Результаты работы экспонировались на Международных постоянно действующих выставках «Агропром», «Пищевая индустрия», «Воронежский промышленный форум» и др.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, из которых 4 в журнале, рекомендованном ВАК, получен 1 патент РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов и результатов, библиографического списка и приложения. Работа изложена на 177 страницах машинописного текста, содержит 73 рисунка и 15 таблиц. Список литературы включает 120 наименований. Приложения к диссертации представлены на 52 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении охарактеризовано современное состояние переработки молока, обоснована актуальность темы диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость выполненных исследований.

В первой главе проанализировано современное состояние теории, техники и технологии обработки пищевых продуктов в поле ИК излучения. Изложены физические основы процесса ИК пастеризации и выделены основные характеристики, оказывающие наибольшее воздействие на структуру обрабатываемых материалов. Особое внимание уделено воздействию ИК поля на качественные показатели молока. Классифицированы способы и аппараты для проведения технологических процессов тепловой обработки с использованием дополнительного энергоподвода с выделением их класса для обработки в поле ИК излучения. Исследованы основные закономерности воздействия ИК излучения на продукт. Классифицированы источники ИК излучения, исследованы спектральные характеристики.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи диссертационной работы, обоснован выбор объекта исследования, определены методы решения поставленных задач.

Во второй главе для научно-практического анализа процесса ИК пастеризации приводятся данные, характеризующие свойства молока и методы их определения.

Для научного обоснования рациональных методов обработки и оптимальных режимов процесса, инженерного расчета процесса ИК пастеризации, а так же создания современной системы автоматического регулирования были исследованы физико-механические, гидродинамические и оптические характеристики молока.

Исследования физико-механических свойств молока проводились при помощи ареометра типа АМТ, а также на синусоидальных вибростандах прибора SV-10 фирмы A&D COMPANY TOKYO.

Результаты, полученные в ходе реологических исследований, в дальнейшем использовались при выборе формы ИК излучателей.

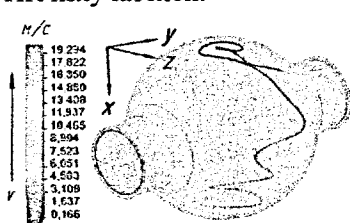


Рис 1. Движение частицы молока в шаре

Выбор формы ИК излучателей осуществлялся расчетным методом, с помощью программы SolidWorks, и ее приложения Flow Simulation, позволяющие моделировать движение жидкости с заданными параметрами в любых режимах течения и исследовать гидродинамику процесса движения. В расчет взяты следующие условия: производительность,

компактность, а также исключение зоны застоя продукта и высокая степень перемешивания.

Пример расчета движения частицы молока в шаре представлен на рис. 1.

В ходе моделирования, поставленная задача была решена и формой ИК излучателей была выбрана трехшаровая колба.

Для изучения поглощающей способности молока в поле ИК излучения были проведены исследования на спектрометрах МРА (800 ÷ 2500нм), TENSOR 27 (1350 ÷ 5000нм), VERTEX 70 (2500 ÷ 2500нм), фирмы Bruker Optics.

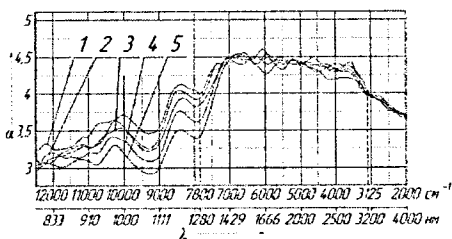


Рис 2. Зависимость коэффициента поглощения молока различной жирности от длины волны
 1 — жирность молока 6 %; 2 — 3,8 %;
 3 — 3,2 %; 4 — 2,5 %; 5 — 1 %

выбрана токопроводящая пленка, нанесенная на поверхность кварцевой колбы, в состав которой входит: оксид олова, 8 % свинца, 0,25 % бора.

В третьей главе для полного анализа и обоснования рациональных режимных параметров процесса изложено описание экспериментальной установки и методика проведения экспериментальных исследований, приведены результаты исследования процесса пастеризации молока в поле ИК излучения с использованием математических методов планирования эксперимента. Исследование процесса ИК пастеризации проводилось на экспериментальной установке (рис. 3).

Перед началом эксперимента производился разогрев секции ИК нагрева. Запуск производится на воде. При достижении температуры в выдерживателе близкой к рабочей (298...303 К), загружали сырое молоко, в объеме 30 л и обрабатывали продукт в установленном режиме при определенном значении жирности и бактериальной обсемененности молока, расходе, удельным энергозатратам и температуре пастеризации молока. Первоначально происходит подогрев молока в циркулирующем режиме, до достижения всем объемом продукта температуры 316...319 К. Далее продукт вновь подается в секцию ИК нагрева для окончательной пастеризации при температуре 345...353 К. В конце эксперимента, после опустошения емкости исходного продукта, подавалась вода для проталкивания остатков продукта.

Результаты полученные в ходе спектрального анализа представлены на рис. 2.

Приведенные данные показывают, что наилучшим диапазоном ИК воздействия на молоко различной жирности является диапазон от 1280 до 3200 нм, в соответствии с которым источником ИК излучения

Для окончательной мойки, в воду добавляли кислоту и щелочь, а затем установку промывали водой.

При этом в каждом эксперименте фиксировали значения величины давления, расхода, температуры до секции ИК нагрева и после выдерживателя, энергозатрат и бактериальной обсемененности.

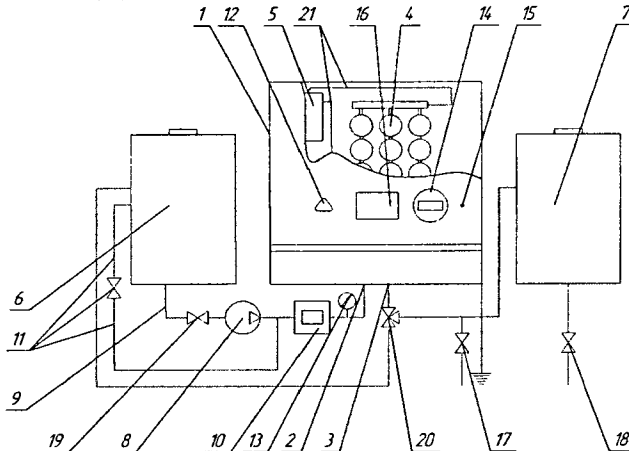


Рис. 3. Схема экспериментальной установки пастеризации молока с ИК нагревательными элементами:

- 1 – корпус пастеризатора; 2 – патрубок для ввода исходного продукта;
- 3 – патрубок для вывода готового продукта; 4 – секция ИК-нагрева с тонкопленочными нагревательными элементами; 5 – промежуточная емкость (выдерживатель); 6 – емкость исходного продукта; 7 – емкость готового продукта; 8 – центробежный насос; 9 – трубопровод; 10 – счетчик расхода жидкости; 11 – обводной трубопровод (байпас); 12 – регулятор расхода жидкости; 13 – манометр; 14 – счетчик расхода электроэнергии; 15 – индикатор потока жидкости; 16 – измеритель-регулятор температуры; 17, 18 – кран отбора проб; 19 – кран для подачи исходного продукта; 20 – кран переключения потока; 21 – трубопровод расположенный внутри пастеризатора

Для исследования влияния различных факторов процесса пастеризации молока в поле ИК излучения было выполнено центральное композиционное ротатбельное равномерное планирование и выбран полный факторный эксперимент типа 2³. В качестве основных факторов, влияющих на процесс ИК пастеризации молока, были выбраны: x_1 – расход молока,

подаваемого в ИК пастеризатор, м³/с; x_2 – температура нагрева молока, К; x_3 – жирность молока, %.

Критериями оценки влияния различных факторов на процесс ИК пастеризации были выбраны: y_1 – общее количество бактерий в 1 см³ молока, ед/см³; y_2 – удельные энергозатраты на 1 м³ пастеризованного молока, кВт·ч/м³. В результате статистической обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии, адекватно описывающее данный процесс под влиянием исследуемых факторов:

$$y_1 = 0,7733 + 0,2154 x_1 + 0,1590 x_2 + 0,0398 x_3 - 0,2710 x_1 x_2 + 0,1590 x_1 x_3 - 0,1435 x_2 x_3 + 0,0971 x_1^2 + 0,1108 x_2^2 + 0,1165 x_3^2; \quad (1)$$

$$y_2 = 53,4586 + 1,7145 x_1 + 4,0809 x_2 - 2,4256 x_3 - 9,4658 x_1 x_2 + 6,4864 x_1 x_3 - 8,3818 x_2 x_3 + 4,2164 x_1^2 + 3,1132 x_2^2 - 0,6833 x_3^2. \quad (2)$$

Анализ уравнений регрессии (1) - (2) позволяет выделить факторы, наиболее влияющие на рассматриваемый процесс.

Проведенные опыты позволили сделать вывод о том, что параметры процесса ИК пастеризации, значениями которых возможно было варьировать в ходе проведения экспериментов, одинаково влияют на бактериальную обсемененность молока, а именно, с увеличением расхода молока, прокачиваемого через установку ИК пастеризации величина бактериальной обсемененности молока монотонно повышается (рис. 4, 6), что может быть объяснено недостаточностью воздействия на биологические организмы, содержащиеся в парном молоке, ИК излучения и температурного воздействия на них.

Температура нагрева молока также оказывает значительное влияние на бактериальную обсемененность молока (рис. 4, 8).

С повышением температуры нагрева, бактериальная обсемененность молока снижается, вследствие гибели мезофильных молочнокислых бактерий и большинства колоний термонеустойчивых психотрофных бактерий в результате теплового воздействия на них. Наличие остаточного количества бактерий свидетельствует о присутствии в молоке некоторого количества термостойких бактерий.

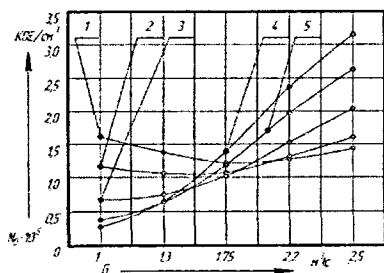


Рис. 4. Зависимость бактериальной обменности от величины расхода и температуры молока ($J = 1\%$) при 1 – 333 К; 2 – 339 К; 3 – 348 К; 4 – 357 К; 5 – 363 К

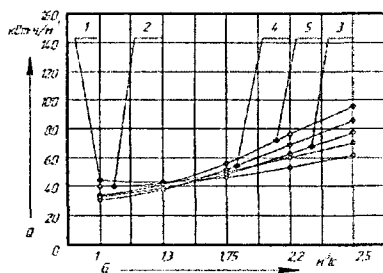


Рис. 5. Зависимость удельных энергозатрат от величины расхода и температуры молока ($J = 1\%$) при 1 – 333 К; 2 – 339 К; 3 – 348 К; 4 – 357 К; 5 – 363 К

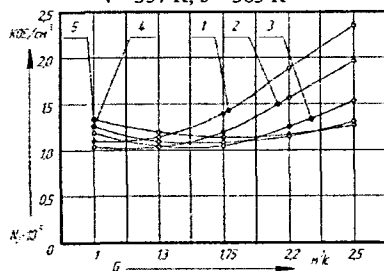


Рис. 6. Зависимость бактериальной обменности от величины расхода и температуры молока ($T = 357\text{ К}$) при 1 – 6%; 2 – 5%; 3 – 3,5%; 4 – 2,5%; 5 – 1%

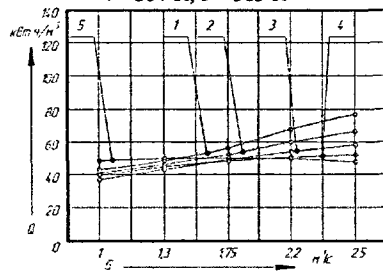


Рис. 7. Зависимость удельных энергозатрат от величины расхода и температуры молока ($T = 357\text{ К}$) при 1 – 6%; 2 – 5%; 3 – 3,5%; 4 – 2,5%; 5 – 1%

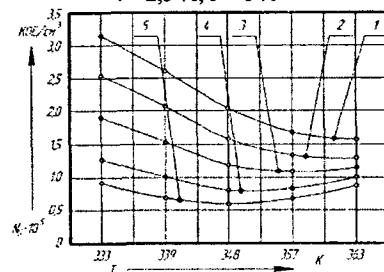


Рис. 8. Зависимость бактериальной обменности от величины расхода и температуры молока ($G = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$) при 1 – 6%; 2 – 5%; 3 – 3,5%; 4 – 2,5%; 5 – 1%

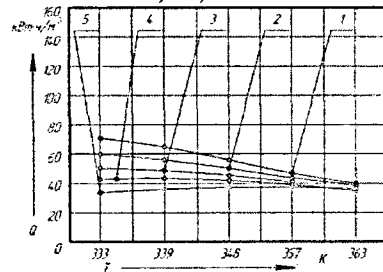


Рис. 9. Зависимость удельных энергозатрат от величины расхода и температуры молока ($G = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$) при 1 – 6%; 2 – 5%; 3 – 3,5%; 4 – 2,5%; 5 – 1%

Зависимость бактериальной обсемененности молока после пастеризации также нелинейна. Отмечено, что при увеличении жирности молока, количество бактерий, оставшихся в нем после тепловой обработки, снижается.

Зависимость удельных энергозатрат на получение одного кубического метра молока, прокачиваемого через ИК нагреватель установки пастеризатора, от расхода молока и температуры его нагрева (рис. 5, 7, 9), носят нелинейный характер. Повышение расхода молока, подаваемого на термообработку методом ИК пастеризации, обуславливает увеличение удельных затрат энергии на реализацию процесса, что связано с необходимостью завышения мощности ИК излучателей установки с целью достижения требуемого эффекта тепловой обработки.

При увеличении температуры нагрева молока при ИК пастеризации увеличиваются затраты энергии на реализацию указанного процесса.

Оценка зависимости величины затрат энергии от содержания жира в молоке (рис. 7, 9) позволяет отметить, что ее характер близок к линейному. Повышение содержания молочного жира в продукте вызывает пропорциональное увеличение затрат энергии на его нагрев.

По регрессионной модели (1), (2) была поставлена и решена задача оптимизации, которая была сформулирована следующим образом: найти такие режимы работы ИК пастеризатора, которые бы в широком диапазоне изменения входных параметров обеспечивали минимальное значение бактериальной обсемененности молока и минимум удельных энергозатрат.

Поиск оптимальных режимов процесса показал, что для выходных параметров в качестве оптимальных могут быть приняты следующие значения: расход молока, подаваемого в ИК пастеризатор $1,21...1,22 \cdot 10^{-4}$ м³/с; температура нагрева молока 348,6...348,7 К; жирность молока 2,15...3,10 %.

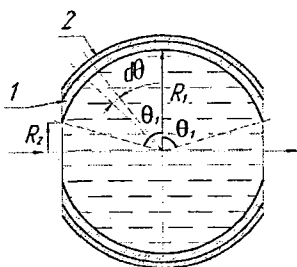


Рис 10. Секция нагревательного элемента:
1 – кварцевое стекло;
2 – токонесущий слой

В четвертой главе разработана математическая модель процесса пастеризации молока в поле ИК излучения. Рассмотрим процесс нагревания молока в отдельном шаре нагревательного элемента (рис. 10) со следующими допущениями: задачу рассматриваем в сферической системе координат, считая, что температура токонесущего слоя зависит только от угла θ , предельные значения этого угла (3)

$$\theta_1 = \arccos\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (3)$$

где: R_1 – внутренний радиус нагревательного элемента; R_2 – радиус соединительного отверстия.

Электрическое сопротивление токонесущего слоя:

$$dR_3 = \rho_{30} \cdot [1 + \alpha_R(T - T_0)] \cdot \frac{R_1 \cdot d\theta}{R_1 \cdot \cos \theta \cdot \delta_3} \quad (4)$$

где: ρ_{30} – удельное электрическое сопротивление токонесущего слоя при температуре T_0 ; α_R – температурный коэффициент сопротивления токонесущего слоя; T – рабочая температура токонесущего слоя; δ_3 – толщина токонесущего слоя.

Мощность электрического тока в элементе $d\theta$:

$$dN = I^2 dR_3 \quad (5)$$

где: I – величина тока.

Условия нормировки:

$$N = \int_{-\theta_1}^{\theta_1} A [1 + \alpha_R(T - T_0)] \frac{d\theta}{\cos \theta}, \quad (6)$$

$$A = \frac{N}{\int_{-\theta_1}^{\theta_1} [1 + \alpha_R(T - T_0)] \frac{d\theta}{\cos \theta}}, \quad (7)$$

Если электросопротивление токонесущего слоя не зависит от температуры ($\alpha_R = 0$), то:

$$A = \frac{N}{\ln \frac{1 + \sin \theta_1}{1 - \sin \theta_1}} \quad (8)$$

Уравнение теплового баланса для элемента токонесущего слоя $d\theta$ имеет вид:

$$dN = [\alpha_{\text{воз}}(T - T_{\text{воз}}) + \sigma \varepsilon_{\text{воз}}(T^4 - T_{\text{воз}}^4) + k_{\text{м}}(T - T_{\text{м}}) + \sigma \varepsilon_{\text{м}}(T - T_{\text{м}}^4)] \cdot dF, \quad (9)$$

где: $\alpha_{\text{воз}}$ – коэффициент теплоотдачи от токонесущего слоя к воздуху; $T_{\text{воз}}$ – абсолютная температура воздуха; σ – постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м² К⁴); $\varepsilon_{\text{воз}}$ – степень черноты токонесущего слоя со стороны воздуха; $k_{\text{м}} = \frac{1}{\frac{\delta_{\text{с}}}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{м}}}}$ – коэффициент теплопередачи на

участке «токонесущий слой - молоко»; $\delta_{\text{с}}$ – толщина стенки колбы; $\lambda_{\text{с}}$ – коэффициент теплопроводности материала колбы; $\alpha_{\text{м}}$ – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности колбы к молоку; $\varepsilon_{\text{м}}$ – степень черноты токонесущего слоя со стороны молока; $T_{\text{м}}$ – абсолютная температура молока;

$$dF = 2\pi R_1^2 \cos \theta d\theta, \quad (10)$$

dF – элементарная площадь участка.

$$A \cdot \frac{[1 + \alpha_{\text{R}}(T - T_0)]}{\cos(\theta)} d\theta = [\alpha_{\text{воз}}(T - T_{\text{воз}}) + \sigma \varepsilon_{\text{воз}}(T^4 - T_{\text{воз}}^4) + k_{\text{м}}(T - T_{\text{м}}) + \sigma \varepsilon_{\text{м}}(T - T_{\text{м}}^4)] \cdot 2\pi R_1^2 \cos \theta d\theta \quad (11)$$

или после преобразований:

$$\frac{A \cdot [1 + \alpha_{\text{R}}(T - T_0)]}{2\pi R_1^2 \cos^2(\theta)} d\theta = \alpha_{\text{воз}}(T - T_{\text{воз}}) + \sigma \varepsilon_{\text{воз}}(T^4 - T_{\text{воз}}^4) + k_{\text{м}}(T - T_{\text{м}}) + \sigma \varepsilon_{\text{м}}(T - T_{\text{м}}^4) \quad (12)$$

Коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности колбы определяется в зависимости от режима течения молока.

При ламинарном режиме ($Re < 2300$)

$$Nu = 0,15 Re^{0,32} Pr^{0,33} (GrPr)^{0,1}, \quad (13)$$

При турбулентном ($Re > 2300$)

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}, \quad (14)$$

где $Nu = \frac{\alpha'_{\text{м}} d_{\text{ср}}}{\lambda_{\text{м}}}$ – число Нуссельта; $\alpha'_{\text{м}}$ – коэффициент теплоотдачи к молоку в трубе постоянного сечения; $d_{\text{ср}} = R_1 R_2$ – средний диаметр канала; $\lambda_{\text{м}}$ – теплопроводность молока; $Re = \frac{v \cdot d_{\text{ср}}}{\nu_{\text{м}}}$ – число Рейнольдса для молока; $Pr = \frac{\nu_{\text{м}} \cdot c_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{м}}}{\lambda_{\text{м}}}$ – число Прандтля для молока; $c_{\text{м}}$ – теплоемкость молока; $\rho_{\text{м}}$ – плотность молока;

$Gr = \frac{gd_{cp}^3}{\nu_M^2} \beta_M (T_c - T_M)$ – число Грасгофа для молока;
 $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;
 β_M – температурный коэффициент расширения молока;
 T_c – температура внутренней поверхности колбы.

Суммарный тепловой поток от токонесущего слоя к молоку определяется выражением:

$$Q_M = \int_{-\theta_1}^{\theta_1} [k_M(T - T_M) + \sigma \varepsilon_M(T - T_M^4)] \cdot 2\pi R_1 \cos \theta d\theta, \quad (15)$$

Общее тепловыделение в токонесущем слое равно его электрической мощности. При заданной приведенной мощности A , электрическая мощность N равна (6).

КПД нагревательного элемента:

$$\eta = \frac{Q_M}{N}, \quad (16)$$

Конечная температура молока определяется из соотношения:

$$c_M G_M dT_M = [k_M(T - T_M) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_{в03}^4)] 2\pi R_1 \cos \theta d\theta, \quad (17)$$

$$\frac{dT_M}{d\theta} = \frac{1}{c_M G_M} [k_M(T - T_M) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_{в03}^4)] 2\pi R_1 \cos \theta, \quad (18)$$

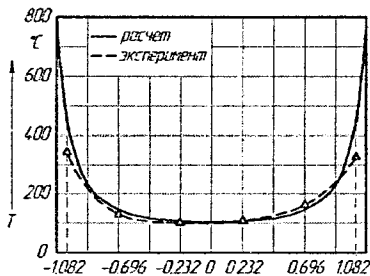


Рис 11. Изменение температуры токонесущего слоя по длине шара

Важнейшим параметром пастеризатора, определяющим качество продукта, является температура внутренней поверхности колбы T_c . При чрезмерно большом ее значении происходит пригорание молока, разложение термолабильных веществ.

Температура внутренней поверхности T_c определяется из условия теплового баланса для конвективных тепловых потоков:

$$k_M \cdot (T - T_M) = \alpha_M (T_c - T_M), \quad (19)$$

$$T_c = T_M + \frac{k_M(T - T_M)}{\alpha_M}, \quad (20)$$

На основании математической модели составлена программа расчета сферических ИК нагревательных элементов, в среде Mathcad-15.

Решение данной математической модели позволяет производить инженерные расчеты по прогнозированию процесса пастеризации молока в поле ИК излучения.

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных показал хорошую сходимость: отклонение расчетных от экспериментальных данных не превышало 8 % (рис. 11).

В пятой главе проведены исследования комплексной оценки качественных показателей молока, полученного в процессе ИК пастеризации. Исследованиями установлено, что молоко, обработанное по предлагаемой технологии, соответствует качественным показателям ГОСТов.

В шестой главе на основании результатов исследования было разработано оригинальное машинное и аппаратное оформление технологической линии пастеризации молока с ИК нагревательными элементами.

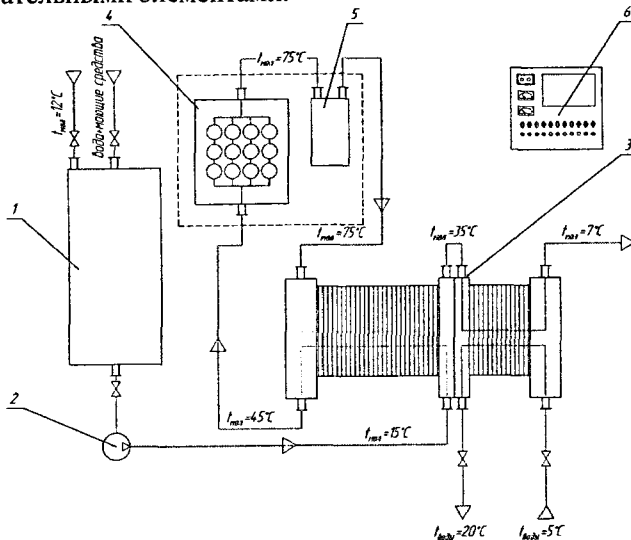


Рис. 12. Схема высокоинтенсивной пастеризационно-охлаждающей установки для молока, с ИК нагревательными элементами:

1 – уравнительный бак; 2 – центробежный насос; 3 – пластинчатый теплообменник; 4 – блок ИК нагрева; 5 – выдерживатель; 6 – панель управления

Разработаны электропастеризатор для жидких пищевых продуктов (патент РФ №2479232), высокоинтенсивная пастеризационно-охладительная установка для пастеризации в поле ИК излучения (рис. 12 (заявка на изобретение) и способ автоматического управления процессом ИК пастеризации, обеспечивающий работу установки по заранее заданной программе.

Разработан бизнес-план реализации инновационного проекта и его технико-экономическое обоснование. Необходимые инвестиции составляют 1,8 млн. р. Срок окупаемости 2 года.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В результате гидродинамических исследований формы ИК излучателей средствами САПР, определена форма и размеры колбы.

2. На основании проведенных исследований оптических свойств молока можно рекомендовать ИК излучатели для обработки молока, спектр излучения которых находится в области $1250 \div 2500$ нм с λ_{max} вблизи длины волны 1550 нм.

3. Выбран источник ИК излучения: токопроводящая пленка нанесенная на поверхность кварцевых колб с требуемой излучательной способностью $\lambda_{\text{max}} 1500 \div 2700$ нм.

4. Разработана математическая модель процесса пастеризации молока в сферических ИК нагревательных элементах, которая позволяет рассчитывать распределение температур на поверхности токопроводящей пленки, внутренней и внешней стенке ИК нагревательных элементов, а также температуру молока, до и после нагрева. На ее основе разработана программа расчета сферических ИК излучателей, позволяющая оценивать тепловые затраты на осуществление процесса ИК пастеризации, а также находить режимные параметры работы ИК нагревательных элементов в зависимости от изменения расхода, температуры, свойств токопроводящей пленки и кварцевой стенки.

5. Предлагаемый способ пастеризации молока в поле ИК излучения позволяет упростить процесс обработки молока при одновременном повышении его качества вследствие снижения температуры пастеризации до $72...75$ °С, времени ИК нагрева до 2...3 с и времени выдержки до 15...20 с, экономить от 30 до 40 % электроэнергии в сравнении с другими ИК пастеризаторами.

6. Выполнен комплексный анализ качества готового продукта, в результате которого установлено, что молоко пастеризованное на установке с ИК нагревательными элементами, по микробиологическим и физико-химическим показателям соответствует требованиям ГОСТ и СанПиН.

7. Предложены технические решения по разработке перспективных конструкций устройств, обеспечивающие осуществление высокоэффективного процесса пастеризации молока в поле ИК излучения, а также способа автоматического управления процессом пастеризации молока с использованием тонкопленочных ИК нагревательных элементов (Патент РФ № 2479232).

8. Проведены экспериментально-производственные испытания, которые подтвердили высокую эффективность разработанных рациональных технологических режимов процесса ИК пастеризации.

9. Разработан бизнес-план и технико-экономическое обоснование инновационного проекта создания участка пастеризации в условиях малого фермерского хозяйства, при этом инвестиции необходимые для приобретения специального оборудования составляют 1,8 млн. р., срок окупаемости 2 года.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Антипов, С. Т. Математическое моделирование процесса инфракрасной пастеризации молока [Текст] / С. Т. Антипов, В. Ю. Овсянников, М. С. Бабенко // Вестник ВГУИТ. – Воронеж, 2013. - № 4. – с. 67-72.

2. Бабенко, М. С. Разработка способа ИК пастеризации молока и комплексная оценка качества полученного продукта [Текст] / М. С. Бабенко // Вестник ВГУИТ, 2013. - № 4. - С. 130 - 134.

3. Овсянников, В. Ю. Определение оптимальных условий ИК-пастеризации молока [Текст] / В. Ю. Овсянников, М. С. Бабенко и др // М. : Молочная промышленность, 2014. - № 3. – С. 35 - 36.

4. Антипов, С. Т. Математическое моделирование процесса нагрева жидкости в шарообразных ИК нагревательных элементах [Текст] / С. Т. Антипов, М. С. Бабенко // Вестник ВГТУ, 2014. - Т.10, № 2. - С. 8 - 12.

Статьи и материалы конференций

1. Бабенко, М. С. Перспективы и оценка возможности ИК-пастеризации в условиях малых предприятий [Текст]: Новые технические решения / М. С. Бабенко // Известия Калининградского государственного технического университета. 2012. №27.

2. Антипов, С. Т. Разработка конструкции экспериментальной пастеризационной установки для изучения электростатической обработки потока жидких пищевых продуктов в поле ИК-излучения [Текст] / С. Т. Антипов, М. С. Бабенко // Материалы XLIX отчетной научной конференции за 2010 год – Воронеж: ВГТА, 2011. – Часть 2. – с. 12.

3. Бабенко, М. С. Обоснование выбора источника ИК-излучения для пастеризации молока [Текст] / М. С. Бабенко // Материалы L отчетной научной конференции за 2011 год – Воронеж: ВГУИТ, 2012. – Часть 2. – с. 15.

4. Бабенко, М. С. Исследование спектральных характеристик молока в инфракрасной области спектра [Текст] / М. С. Бабенко // Материалы LI отчетной научной конференции за 2012 год – Воронеж: ВГУИТ, 2013. – Часть 2. – с. 18.

5. Пат. 2479232 Российская Федерация, МПК А23L 3/18, А23С 3/07. Электропастеризатор для жидких пищевых продуктов [Текст] / Антипов С. Т., Бабенко М. С., Воронеж. гос. технол. акад. – № 2011144349/13; заявл. 01.11.2011; опублик. 20.04.2013, Бюл. 11.

Подписано в печать 30.04.2014. Формат 60×84 1/20
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 85
ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
университет инженерных технологий»
(ФГБОУ ВПО «ВГУИТ»)
Отдел полиграфии ФГБОУ ВПО «ВГУИТ»
Адрес университета и отдела полиграфии
394000, Воронеж, пр. Революции, 19

