

О. А. Голубева, О. М. Грекова

Кризис теплообмена первого рода при выпаривании молока: проблема и способы решения

Рассматривается проблема исследования и устранения кризиса теплообмена первого рода для многокомпонентных гетерогенных пищевых смесей на примере молока. Целью работы является создание рациональных режимов выпаривания молока, без возможности возникновения кризиса теплообмена первого рода. Планирование экспериментов произведено по методу комбинационных квадратов. Недостающие теплофизические характеристики (ТФХ) исследуемой пищевой смеси определены методом динамического С-калориметра. Исследование данного вида кризиса теплообмена проведено в два этапа с применением моделирования процесса выпаривания с соблюдением геометрического, гидравлического и теплового подобия. Статистическая обработка результатов экспериментов по определению теплофизических характеристик молока методом нелинейной регрессии проведена при помощи программы DataFit v 9.1.32; результаты определения первой критической плотности теплового потока обрабатывались в два этапа: на первом этапе – при помощи программы StatGraphics Plus v 5.0.1, на втором – DataFit v 9.1.32. Результат выполненной работы представлен в виде математических моделей основных ТФХ молока и эмпирического коэффициента A для уравнения первой критической плотности теплового потока многокомпонентных гетерогенных пищевых смесей; а также диапазона плотности обогрева парогенерирующей трубы, вызывающего возникновение кризиса теплообмена первого рода, рекомендаций по его исключению и поддержанию рациональных промышленных режимов выпаривания молока. Адекватность полученных математических моделей определена критерием Фишера и коэффициентом детерминации. Расширены границы применения зависимости по определению первой критической плотности теплового потока для неоднородных многокомпонентных смесей в условиях естественной конвекции при атмосферном давлении, что позволяет сделать очередной шаг к созданию универсального уравнения для ее определения и прогнозированию возникновения кризиса.

Ключевые слова: молоко, кризис теплообмена первого рода, первая критическая плотность теплового потока.

Введение

Согласно Стратегии развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2020 г. "остается ниже рекомендуемых медицинских норм потребление населением таких важнейших продуктов, как молоко и молокопродукты... Так, в 2014 г. среднедушевое потребление составило: молока и молокопродуктов – 244 кг при норме 320–340 кг"¹.

В связи с этим к 2020 г. в Стратегии предусматривается увеличение производства молока до 38,2 млн т, что уменьшит поставки импортной продукции на 29,9 %.

"К основным проблемам, сдерживающим развитие молочной отрасли, относятся недостаточность объемов производства молочного сырья, сезонность производства, низкий удельный вес молочного сырья высшего сорта, недостаток холодильных установок на молочных фермах, а также физический и моральный износ основных фондов молокоперерабатывающих заводов, большая часть которых была построена в 70-х годах прошлого века и не соответствует современным требованиям по энергоэффективности и экологии.

Степень износа основных фондов коммерческих организаций (без субъектов малого предпринимательства) по виду деятельности "Производство молочных продуктов" на конец 2014 г. составила 49,5 %, в целом по обрабатывающим производствам – 44,7 %"².

Перед пищевой и перерабатывающей промышленностью поставлена задача повышения эффективности работы производства и конкурентоспособности вырабатываемой продукции.

В последние 10 лет в рационе питания россиян отчетливо появился дефицит белка, содержащего все незаменимые аминокислоты. "Молоко улучшает соотношение составных частей пищевого рациона, повышая их усвояемость. В нем содержатся все необходимые для человеческого организма питательные вещества – белки, жиры, углеводы, минеральные вещества, витамины в легкопереваримой форме. При этом соотношение питательных веществ в молоке является сбалансированным, т. е. оптимальным для удовлетворения потребности организма в них" [1].

¹ О внесении изменений в Стратегию развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2020 года : распоряжение Правительства РФ от 30.06.2016 N 1378-р. [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-поиск. системы "Консультант Плюс". URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_200858/.

² Там же.

Молоко является природной эмульсией жира и служит отличным примером гетерогенной смеси³. После неправильной термической обработки молока некоторая часть содержащихся в нем полезных веществ перестает усваиваться организмом, что не может положительно сказаться на состоянии организма человека. Производимые молочные продукты должны соответствовать Техническому регламенту Таможенного союза "О безопасности молока и молочной продукции" (ТР ТС 033/2013)⁴.

Изучению кризиса теплообмена чистых жидкостей посвящено много работ, рассматривающих определяющие параметры в широком диапазоне их изменения. В результате этих исследований было установлено, что на величину критической плотности теплового потока влияют давление, температура и физические свойства выпариваемой жидкости, форма и размеры теплоотдающей поверхности, а также скорость движения жидкости.

Кризисы теплообмена представляют собой быстротекущие и почти непредсказуемые тепловые явления, для которых в современной науке не существует точного определения. Кризисами теплоотдачи при кипении называются процессы, связанные с коренным изменением механизма теплоотдачи [2]. Первый кризис теплообмена наблюдается в начале перехода пузырькового кипения в пленочное. Проявление кризиса теплообмена первого рода выражается резким скачкообразным повышением температуры, которая является следствием резкого изменения режимов кипения [3].

До сегодняшнего дня в области тепловой обработки неоднородных гетерогенных пищевых смесей проводилось незначительное число исследований. Однако значимость полученных результатов очень велика, поскольку они могут послужить толчком для ряда открытий в этой области.

Теплофизические характеристики пищевых продуктов являются одними из самых значимых для изучения процессов тепловой переработки пищевого сырья, предсказания и предотвращения кризиса теплообмена первого рода. Важнейшими характеристиками можно считать удельную массовую теплоемкость и теплопроводность, а также температуру кипения смеси. При проведении литературного обзора установлено, что данные для удельной теплоемкости и теплопроводности молока различной жирности при высоких температурах, соответствующих кризису теплообмена первого рода, представлены очень ограничено. Существующие математические зависимости позволяют определить значение теплофизических характеристик молока только до 80 °С.

Цель работы – разработка рациональных режимов выпаривания молока путем устранения кризиса теплообмена первого рода. Полученные результаты могут быть рекомендованы к использованию в молочной промышленности.

Материалы и методы

В качестве исследуемой гетерогенной смеси выбрано молоко цельное жирностью 1,5 %; 2,5 %; 3,2 %; 4 % как наиболее часто применяемое в пищевой промышленности при производстве сухого молока, молочных и молокосодержащих консервов [4].

Для определения истинной удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности смеси выбран метод динамического С-калориметра. Исследования проводились с помощью измерителя теплоемкости и измерителя теплопроводности ИТ-С-400 с диапазоном измерений от –125 до +400 °С. Допустимая погрешность установок ± 10 %.

Для определения условий возникновения и устранения кризиса теплообмена первого рода при выпаривании многокомпонентных гетерогенных смесей проводить эксперимент в реальных производственных условиях не представляется возможным из-за значительных габаритов выпарных аппаратов и больших расходов сырья, поэтому было проведено моделирование процесса выпаривания с соблюдением геометрического, гидравлического и теплового подобия. Целью данной части исследования являлось расширение границы применения эмпирической формулы (1) для определения первой критической плотности теплового потока при выпаривании многокомпонентных пищевых смесей

$$\frac{q_{кр1см}}{w \cdot v_{см}} = A \cdot \left[\frac{w_p^2 \cdot l}{\sigma_{см} \cdot \rho_{см}} \right]^b \cdot \left[\frac{\rho''}{\rho_{см}} \right]^e \cdot \left[\frac{l}{d_{вн}} \right]^n, \quad (1)$$

где $q_{кр1см}$ – первая критическая плотность теплового потока, Вт/м²; l , $d_{вн}$ – геометрические размеры парогенерирующей трубы, м; $\sigma_{см}$ – коэффициент поверхностного натяжения смеси, Н/м; $w_p = v_{см} \cdot \rho_{см}$ – массовая скорость смеси, кг/(м²·с); $v_{см}$ – скорость движения смеси, м/с; $\rho_{см}$ – плотность смеси, кг/м³; ρ'' – плотность вторичного пара, кг/м³; A – эмпирический коэффициент; b , e , n – показатели степени.

³ Справочник химика 21. URL: <http://chem21.info/info/1308204/>.

⁴ Технический регламент Таможенного союза "О безопасности молока и молочной продукции" (ТР ТС 033/2013) // принят решением Совета Евразийской экономической комиссии от 9 октября 2013 г. № 67. [Электронный ресурс]. Доступ из справ.-поиск. системы "Консультант Плюс". URL: www.consultant.ru.

Общий вид формулы определен в ходе ранее проведенных исследований одного из авторов [2]. Исследования выполнялись в два этапа.

Целью первого этапа являлось определение условий возникновения кризиса теплообмена первого рода при выпаривании молока. Эксперименты производились на установке, представляющей собой аналог выпарного аппарата с трубчатой цилиндрической теплообменной поверхностью и вынесенной греющей камерой при равномерном обогреве парогенерирующей трубы. Схема установки представлена на рис. 1.

Основу установки составляет парогенерирующая труба 1, на которой расположена нагревательная спираль 2 с равномерным шагом. Внутренний диаметр парогенерирующей трубы составляет 20 мм, отношение диаметра парогенерирующей трубы к ее длине составило 37,5, что менее 50 (короткая труба). Снаружи труба 1 покрыта изоляцией 3 из жидкого стекла.

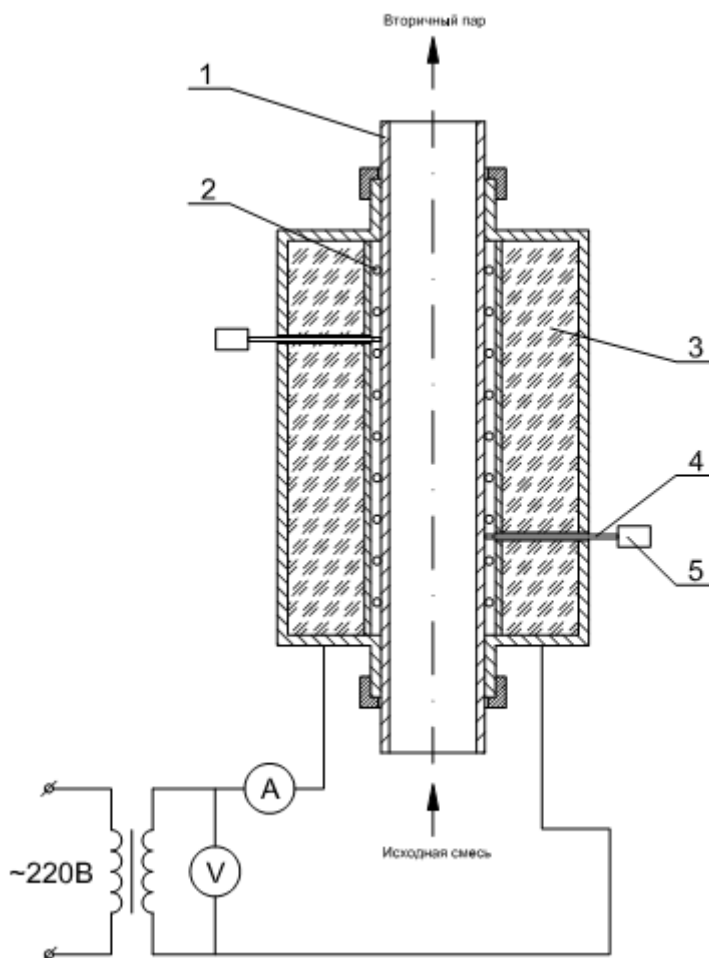


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – парогенерирующая труба; 2 – спираль электронагревателя; 3 – изоляция;
4 – термопара; 5 – мультиметр

Fig. 1. The scheme of the experimental setup:
1 – the steam generating tube; 2 – the electric heater spiral; 3 – the insulation;
4 – the thermocouple; 5 – the multimeter

В ходе проведения исследований измерялись: температура пищевой смеси на входе в трубу 1, температуры поверхности парогенерирующей трубы и наружной поверхности изоляции – при помощи мультиметров 5 с термопарами 4; сила тока и напряжение в цепи нагревательной спирали – амперметром и вольтметром соответственно. Напряжение в ходе экспериментов регулировалось автотрансформатором в зависимости от режима обогрева.

На втором этапе полученные экспериментальные данные были проверены и уточнены на полупромышленной экспериментальной установке с электрическим обогревом, имитирующей выпарной аппарат с вертикальной трубчатой поверхностью теплообмена.

На рис. 2 представлена экспериментальная установка, разработанная на кафедре технологического и холодильного оборудования МГТУ и предназначенная для исследования кризиса теплообмена.

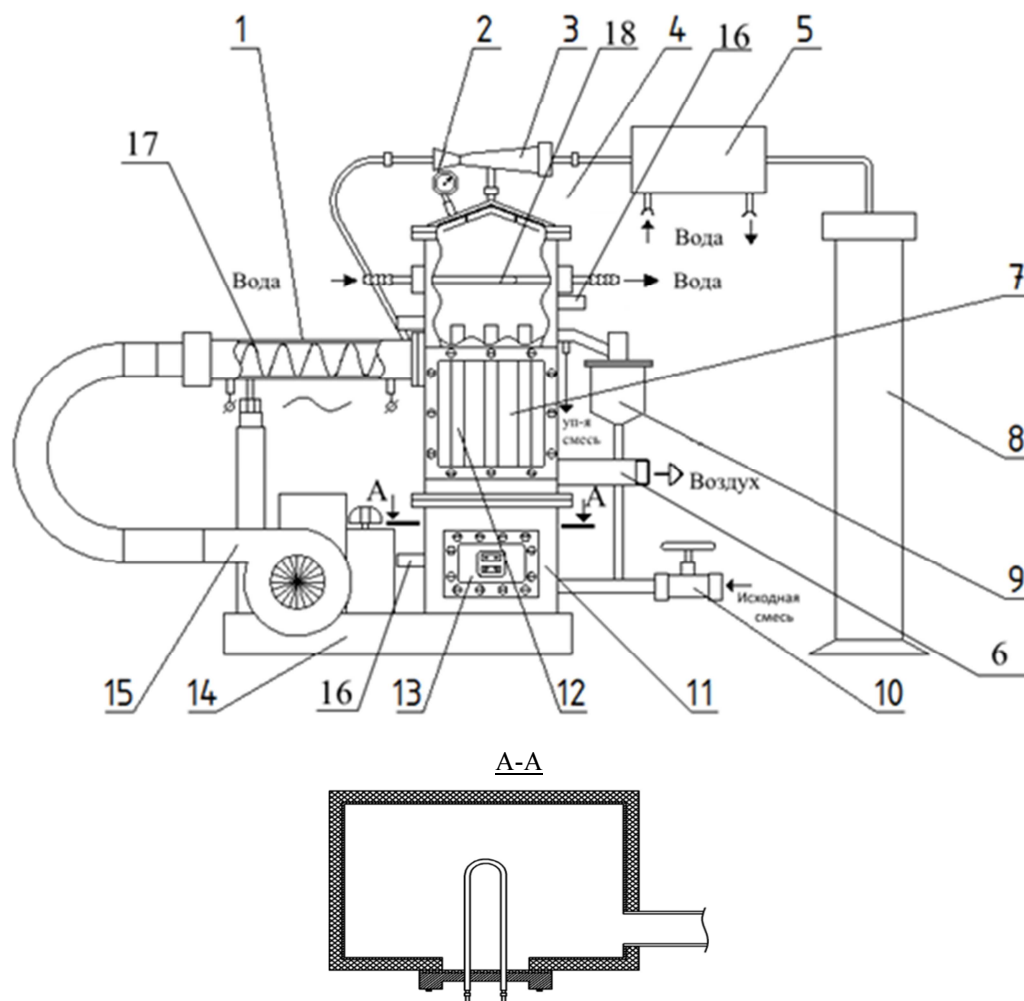


Рис. 2. Выпарная установка с электрообогревом и трубчатой вертикальной поверхностью теплообмена

Fig. 2. The evaporation plant with electric heating and tubular vertical heat transfer surface

Установка смонтирована на станине 14. Ее работа осуществляется следующим образом. Исходная смесь подается через вентиль 10, смешивается с частично упаренной смесью, движущейся по циркуляционной трубе 9, и поступает в нижнюю секцию 11 греющей камеры, снабженную двумя ТЭНами 13, мощностью по 1 кВт каждый. Установка через автотрансформатор подключена к сети электропитания с напряжением 220 В. Смесь подогревается двумя ТЭНами 13 в нижней секции 11 греющей камеры до температуры на 2–3 °С ниже температуры насыщения при заданном давлении кипения. Недогретая смесь поступает в парогенерирующие трубы 12 в верхней секции греющей камеры 7, где нагревается горячим воздухом и выпаривается. Воздух, необходимый для обогрева верхней секции 7 греющей камеры, подается вентилятором 15 в электрокалорифер 1, где нагревается ТЭНом 17. Отработанный воздух удаляется через патрубок 6. Для возможности наблюдения за процессом две противоположные стенки верхней секции 7 греющей камеры и часть парогенерирующих труб 12 выполнены из стекла. Пар, образовавшийся в парогенерирующих трубах 12, поднимается по ним в сепарационную камеру 4, увлекая за собой капельки смеси. Давление в сепарационной камере измеряется мановакууметром 2. Для отделения капелек смеси в средней части сепарационной камеры расположен водяной теплообменник 18, а в верхней части – каплеотбойники. Вторичный пар, отсасываемый эжектором 3, который определяет давление кипения в греющей камере, конденсируется в водяном конденсаторе 5. Давление в сепарационной камере определяется мановакууметром 2. Образовавшийся конденсат поступает в мерную емкость 8, где определяется его объем. Упаренная смесь частично удаляется через патрубок для упаренной смеси, остальная часть движется по циркуляционной трубе 9. Для контроля температуры выпариваемой смеси на различных стадиях процесса предусмотрены три термопары 16.

Статистическая обработка результатов экспериментов по определению теплофизических характеристик молока методом нелинейной регрессии проведена при помощи программы DataFit v 9.1.32, результаты определения первой критической плотности теплового потока – в два этапа: на первом этапе при помощи программы StatGraphics Plus v 5.0.1, на втором – DataFit v 9.1.32. Адекватность полученных математических моделей определялась критерием Фишера и коэффициентом детерминации [5].

При определении теплофизических характеристик молока функцией отклика являлись: удельная массовая теплоемкость y_1 , Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности молока y_2 , Вт/(м·К), температура кипения смеси y_3 , °С, а варьируемыми факторами: температура смеси x_1 , °С, жирность молока x_2 , %.

При определении первой критической плотности теплового потока функцией отклика явился коэффициент A формулы (1) y_4 , а варьируемыми факторами: жирность молока x_1 , % и удельная плотность обогрева парогенерирующей трубы x_2 , Вт/м².

Результаты и обсуждение

В результате реализации плана эксперимента и обработки полученных данных по теплофизическим характеристикам молока были найдены уравнения регрессий, адекватно описывающие влияние температуры и его жирности на удельную массовую теплоемкость (2) и коэффициент теплопроводности (3), а также жирности молока на его температуру кипения (4). Поверхности отклика факторного пространства для удельной массовой теплоемкости и коэффициента теплопроводности молока представлены на рис. 3 и 4 соответственно, а зависимость температуры кипения молока от жирности при нормальном атмосферном давлении – на рис. 5.

$$y_1 = 0,482 - 64,787/x_1 + 3174,523/x_1^2 - 0,0097x_2/x_1 - 39553,70/x_1^3 - 0,251 x_2^2/x_1. \quad (2)$$

При $p = 0,95$ критерий Фишера $F_{\text{факт}} = 4,97$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,834$. Таким образом, модель принята адекватной, все коэффициенты уравнения значимы.

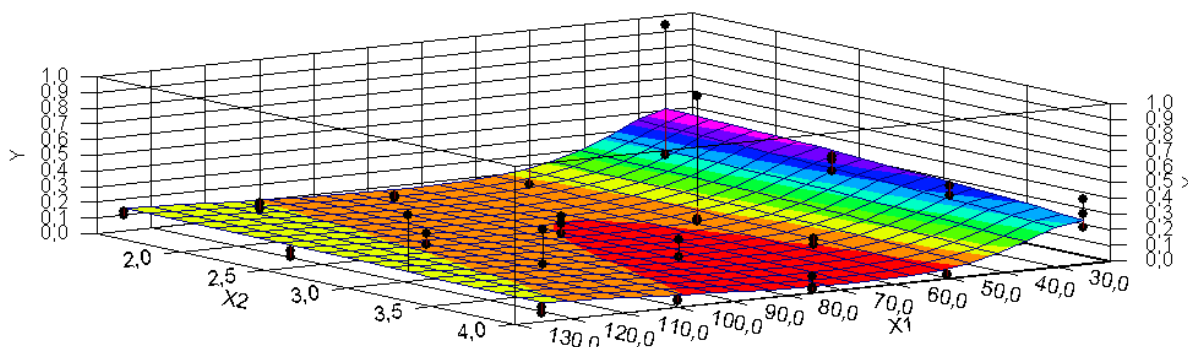


Рис. 3. Поверхность отклика факторного пространства для удельной массовой теплоемкости
Fig. 3. The surface response of the factor space for specific mass heat capacity

$$y_2 = -29,957 - 69,892/x_1 + 89,638/x_2 - 248,557/x_2^2 + 780,878/(x_1 \cdot x_2) + 205,312/x_2^3 - 814,348/(x_1 \cdot x_2^2). \quad (3)$$

При $p = 0,95$ критерий Фишера $F_{\text{факт}} = 10,327$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,827$, поэтому модель признана адекватной, все коэффициенты уравнения значимы.

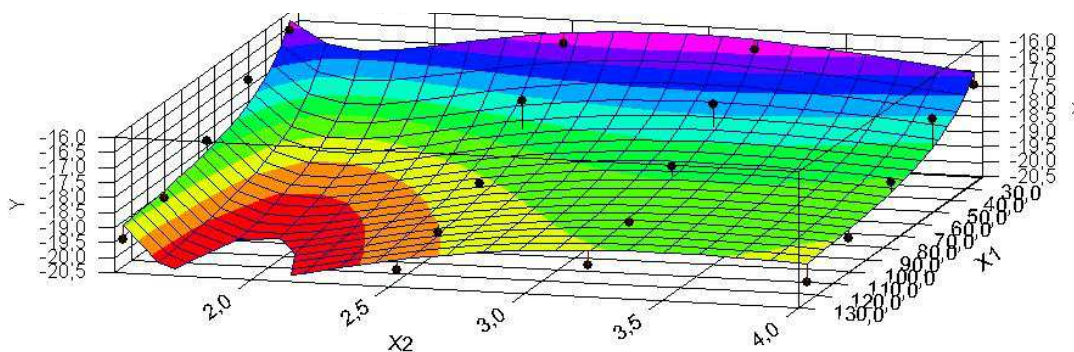


Рис. 4. Поверхность отклика факторного пространства для коэффициента теплопроводности
Fig. 4. The surface response of the factor space for the coefficient of thermal conductivity

$$y_3 = 99,471 - 2,423 \ln(x)/x + 6,693 \ln(x)/x^2. \quad (4)$$

При $p = 0,95$ критерий Фишера $F_{\text{факт}} = 9,782$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,867$. Таким образом, модель принята адекватной, все коэффициенты уравнения значимы.

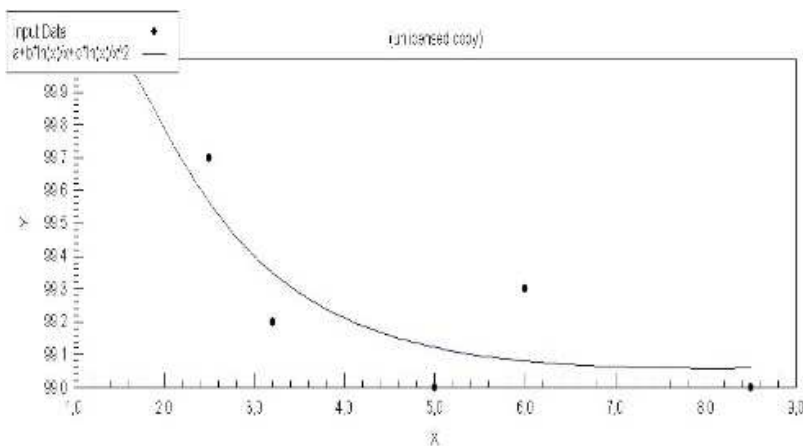


Рис. 5. Зависимость температуры кипения молока от жирности при нормальном атмосферном давлении
Fig. 5. The dependence of the milk boiling point on fat content at normal atmospheric pressure

Исследования кризиса теплообмена первого рода проводились в условиях естественной конвекции при нормальном атмосферном давлении. В ходе первого этапа исследования процесса выпаривания определена плотность обогрева парогенерирующей трубы, вызывающая возникновение кризиса теплообмена первого рода, которая изменялась от 8922,83 до 11479,10 Вт/м². На основании полученных результатов установлены три режима обогрева теплообменной поверхности, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Режимы обогрева
Table 1. The heating mode

Режим	Напряжение, В	Сила тока, А
I	150	3,7–3,8
II	160	4,0
III	170	4,2

Повторяемость экспериментов составила по три серии для каждой жирности при длительности серии от 1,5 до 2 час.

В результате первого этапа обработки экспериментальных данных по определению первой критической плотности теплового потока получены зависимости эмпирического коэффициента A от показателя степени e для всех исследованных жирностей молока на трех режимах обогрева. На рис. 6 представлена зависимость $A = f(e)$ для молока жирностью 2,5 % на I режиме обогрева. Коэффициенты $A1$ – $A9$ соответствуют кризисам теплообмена первого рода, возникающим в указанных условиях [6].

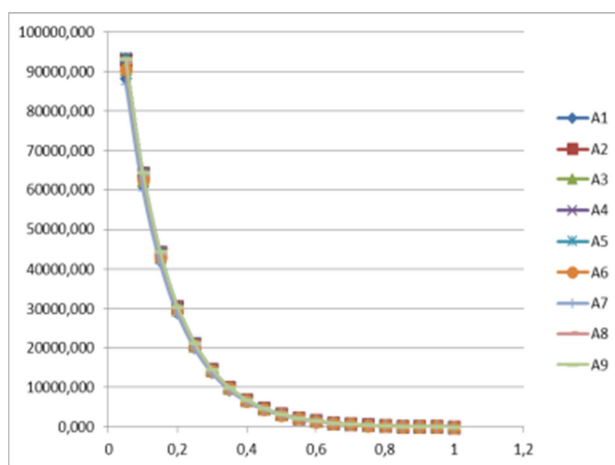


Рис. 6. Зависимость $A = f(e)$ для молока жирностью 2,5 % на I режиме обогрева
Fig. 6. The dependence $A = f(e)$ for milk with fat content of 2,5 % on the I heating mode

В табл. 2 представлены средние значения эмпирического коэффициента A , которые могут быть рекомендованы для применения в формуле (1) при проведении дальнейших исследований кризиса теплообмена первого рода при выпаривании молока.

Таблица 2. Средние значения эмпирического коэффициента
Table 2. The average values of the empirical coefficient

Жирность молока, %	Среднее значение эмпирического коэффициента A , %
1,5	$693,684 \pm 8,19$
2,5	$679,512 \pm 9,27$
3,2	$682,431 \pm 10,19$
4,0	$598,109 \pm 11,78$

Для расширения границ применения формулы (1) в условиях естественной конвекции при нормальном атмосферном давлении показатель степени e принят равным 0,69 [2]. В результате реализации плана эксперимента и обработки полученных данных первой критической плотности теплового потока для молока найдено уравнение регрессии, адекватно описывающее влияние его жирности и удельной плотности обогрева парогенерирующей трубы на эмпирический коэффициент A (5), а также поверхность отклика факторного пространства, представленная на рис. 7.

$$y_4 = 1521,230 - 34,054x_1 - 0,074x_2. \quad (5)$$

При $p = 0,95$ критерий Фишера $F_{\text{факт}} = 180,063$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,805$. Таким образом, модель принята адекватной, все коэффициенты уравнения значимы.

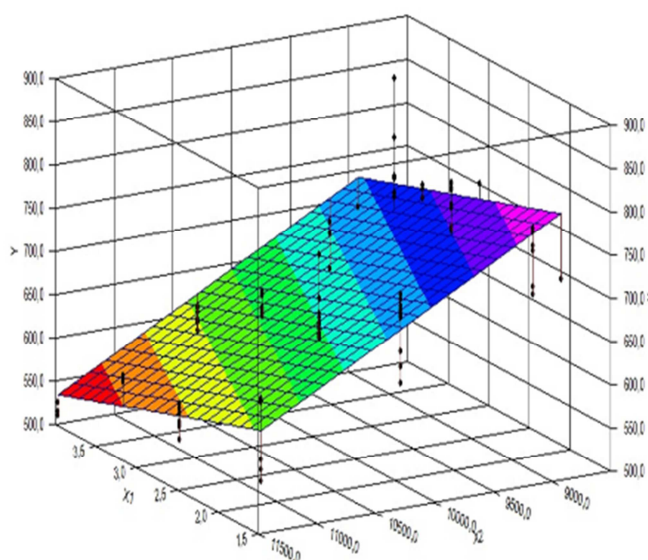


Рис. 7. Поверхность отклика факторного пространства для эмпирического коэффициента A
Fig. 7. The response surface of the factor space for the empirical coefficient A

На основании полученных результатов разработаны промышленные рекомендации по поддержанию рациональных режимов выпаривания молока, исключая возникновение кризиса теплообмена первого рода, в условиях свободной конвекции при нормальном атмосферном давлении, которые представлены в табл. 3.

Таблица 3. Рекомендации по поддержанию рациональных режимов выпаривания молока в условиях свободной конвекции при нормальном атмосферном давлении
Table 3. The recommendations for maintenance of rational regimes for milk evaporation under conditions of free convection at normal atmospheric pressure

Жирность молока, %	Рекомендуемая критическая разность температур, °С
1,5	3–4
2,5	4–5
3,2	5–6
4,0	6–7

Заключение

При выполнении данного исследования разработана полезная модель выпарной установки с электрообогревом и трубчатой вертикальной поверхностью теплообмена, позволяющая производить изучение и прогнозирование условий возникновения кризиса теплообмена первого рода для гетерогенных пищевых смесей; получены уравнения регрессии, описывающие влияние жирности молока и его температуры на наиболее важные для предсказания кризиса теплообмена первого рода теплофизические характеристики исследуемой пищевой смеси; определен диапазон плотности обогрева парогенерирующих труб, вызывающий кризис теплообмена первого рода при выпаривании молока; определены и рекомендованы к применению эмпирические коэффициенты для расчета первой критической плотности теплового потока.

В ходе проведения экспериментальных исследований доказана возможность применения зависимости 1, представленной в данной работе, для определения первой критической плотности теплового потока при выпаривании молока как одного из многочисленных представителей многокомпонентных гетерогенных пищевых смесей. Тем самым расширена область применения указанной математической модели и сделан очередной шаг по созданию универсального уравнения для определения первой критической плотности теплового потока неоднородных жидкостей.

Библиографический список

1. Першина Е. И., Рязанова О. А. Товароведение и экспертиза однородных групп товаров (молоко и молочные продукты). Кемерово : КТИПП, 2004. 26 с.
2. Голубева О. А. Повышение эффективности работы выпарных аппаратов в условиях критических тепловых потоков : дис. ... канд. техн. наук. Мурманск, 1998. 147 с.
3. Катто Ю. Критические тепловые потоки при кипении. Сан-Франциско, 1986. 36 с.
4. Протодяконов М. М., Тедер Р. И. Методика рационального планирования экспериментов. М. : Наука, 1970. 76 с.
5. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. 280 с.
6. Голубева О. А., Федышена О. М. Кризис теплообмена 1 рода в гетерогенных смесях и истинных растворах // Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств : материалы междунар. науч.-практ. конф. Мурманск, 7 апреля 2015 г. Мурманск : МГТУ, 2015. Ч. 2. С. 25–29.

References

1. Pershina E. I., Ryazanova O. A. Tovarovedenie i ekspertiza odnorodnyh grupp tovarov (moloko i molochnye produkty) [Commodity research and examination of homogeneous groups of goods (milk and dairy products)]. Kemerovo : KTIPP, 2004. 26 p.
2. Golubeva O. A. Povyshenie effektivnosti raboty vyparnykh apparatov v usloviyakh kriticheskikh teplovykh potokov [Improvement of the efficiency of the evaporators in terms of critical heat flux] : dis. ... kand. tehn. nauk. Murmansk, 1998. 147 p.
3. Katto Yu. Kriticheskie teplovye potoki pri kipenii [Critical heat flux during boiling]. San-Frantsisko, 1986. 36 p.
4. Protodyakonov M. M., Teder R. I. Metodika ratsionalnogo planirovaniya eksperimentov [Methodology of rational planning of experiments]. M. : Nauka, 1970. 76 p.
5. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskiy Yu. V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy [Planning of experiment in search of optimum conditions]. M. : Nauka, 1976. 280 p.
6. Golubeva O. A., Fedyshena O. M. Krizis teploobmena 1 roda v geterogennykh smesyakh i istinnykh rastvorakh [Crisis of heat exchange of the 1st kind in heterogeneous mixtures and true solutions] // Sovremennyye ekologo-biologicheskie i himicheskie issledovaniya, tehnika i tehnologiya proizvodstv : materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Murmansk, 7 aprelya 2015 g. Murmansk : MGTU, 2015. Ch. 2. P. 25–29.

Сведения об авторах

Голубева Ольга Алексеевна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, канд. техн. наук, доцент; e-mail: golubevaoa@mstu.edu.ru

Golubeva O. A. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor; e-mail: golubevaoa@mstu.edu.ru

Грекова Оксана Михайловна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, аспирант; e-mail: oksi-fed@yandex.ru

Grekova O. M. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Ph.D. Student; e-mail: oksi-fed@yandex.ru

O. A. Golubeva, O. M. Grekova

The crisis of heat transfer of the first kind with milk evaporation: the problem and solutions

The problem of research and elimination of the crisis of heat exchange of the first kind for multicomponent heterogeneous food mixtures by the example of milk has been considered. The aim of this work is to create rational regimes of evaporating milk without the possibility of the crisis of heat exchange of the first kind. The experiments have been planned according to the method of combinational squares. The missing thermophysical characteristics (TPC) of the food mixture studied have been determined by the dynamic C-calorimeter method. The study of this type of the heat exchange crisis has been carried out in two stages using the modeling of evaporation process with observance of geometric, hydraulic and thermal similarity. Statistical processing of the results of experiments for determining the thermophysical characteristics of milk using the nonlinear regression method has been carried out using DataFit v 9.1.32; the results of determining the first critical heat flux density have been processed in two stages: in the first stage – using StatGraphics Plus 5.0.1, the second – DataFit v 9.1.32. The result of the work performed has been presented in the form of the mathematical models of basic milk TPCs and the empirical coefficient A for the equation of the first critical heat flux density of multicomponent heterogeneous food mixtures; as well as the range of heating density of the steam generating pipe, which causes the crisis of heat exchange of the first kind, recommendations for its elimination and maintenance of rational industrial regimes of milk evaporation. The adequacy of the mathematical models obtained has been determined by Fisher's criterion and the coefficient of determination. The limits of the application of the dependence on the determination of the first critical density of the heat flux for inhomogeneous multicomponent mixtures under conditions of natural convection at atmospheric pressure have been extended, it allows to take the next step towards creating a universal equation for its determination and forecasting the occurrence of a crisis.

Key words: milk, heat transfer crisis of the first kind, the first critical heat flux density.