

УДК 66.048.5–956

## КРИЗИС ТЕПЛООБМЕНА ПЕРВОГО РОДА В МОЛОЧНО-САХАРНЫХ СМЕСЯХ И СПОСОБЫ ЕГО УСТРАНЕНИЯ

**О. А. Голубева**, кандидат технических наук, доцент  
**О. М. Грекова**, аспирант

Мурманский государственный технический университет  
E-mail: golubevaoa@mstu.edu.ru

**Ключевые слова:** молочно-сахарная смесь, кризис теплообмена первого рода, первая критическая плотность теплового потока.

*Реферат. Излагается проблема изучения кризиса теплообмена первого рода для многокомпонентных гетерогенных пищевых смесей и способа её устранения. Целью исследования является прогнозирование кризиса теплообмена первого рода и создание условий, исключающих его возникновение, на примере ряда многокомпонентных гетерогенных пищевых смесей. В качестве объектов исследования выбраны молочно-сахарные смеси, используемые для производства молока сгущённого с сахаром. В статье представлены математические зависимости для ряда теплофизических характеристик исследуемых веществ и практические рекомендации по поддержанию рабочих режимов выпарных аппаратов. Показанные результаты являются частью значительного по объёму исследования, проводимого на ряде различных многокомпонентных пищевых смесей по разработанной авторами методике, и позволяют обеспечивать работу выпарных аппаратов с вертикальной трубчатой поверхностью теплообмена с оптимальным соотношением энергозатрат на производство и качества получаемого продукта. Расширение границ формулы для определения первой критической плотности теплового потока, представленной в работе, позволяет сократить число математических моделей, используемых для таких сложных систем, как многокомпонентные гетерогенные пищевые смеси.*

## THE CRISIS OF THE FIRST-GENERATION OF THE FIRST-GENERATION OF FAT-AND-SUGAR MIXTURES AND METHODS OF ITS SOLUTION

**O. A. Golubeva**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
**O. M. Grekova**, graduate student

Murmansk State Technical University, Murmansk, Russia

**Key words:** milk and sugar mixture, heat exchange crisis of the first kind, the first critical density of heat flow.

*Abstract: The article continues the presentation of the problem of studying the crisis of heat exchange of the first kind for multicomponent heterogeneous food mixtures and the way to eliminate it. The aim of the study is to predict the crisis of heat exchange of the first kind and to create conditions that preclude its occurrence on the example of a number of multicomponent heterogeneous food mixtures. The experiments were planned according to the method of combination squares. The experimental part of the study is a complex, multistage process. The method of its carrying out and processing of the experimental data obtained is described in detail in the source [1]. The structural diagram of the experimental setup simulating the evaporator gives an idea of the types of energy used and the points of its supply. Milk-sugar mixtures used for production of condensed milk with sugar were chosen as research objects. The article presents mathematical dependencies for a number of thermophysical characteristics of the substances under study and practical recommendations for maintaining the operating conditions of evaporators. The results shown are part of a significant study conducted on a number of different multicomponent food mixtures according to the method developed by the authors and allow the operation of evaporators with a vertical tubular heat exchange surface with an optimal ratio of energy inputs to production and quality of the product obtained. Expanding the boundaries of the formula for determining the first critical heat flux density presented in the*

*paper makes it possible to reduce the number of mathematical models used for such complex systems as multicomponent heterogeneous food mixtures.*

Сгущённое молоко – один из широко распространённых и любимых населением молочных продуктов. Оно содержит витамины группы В ( $V_1$ ,  $V_6$ ,  $V_3$ ,  $V_2$ ,  $V_{12}$ ), А и D, а также РР, С, Е, Н и целый ряд минеральных веществ: кальций, железо, магний, калий, фосфор, сера, йод и селен [1]. Одной из основных технологических операций, определяющих качество готового продукта, является выпаривание, нередко сопровождающееся периодическим возникновением кризисов теплообмена, чаще первого рода [2].

Исследованием кризиса теплообмена учёные занимаются уже не одно десятилетие, но до сих пор окончательно не изучен механизм его развития. Кризис теплообмена первого рода – один из достаточно часто встречающихся видов кризиса. Наиболее распространена гипотеза о том, что кризис теплообмена первого рода обусловлен возникающим различием скоростей подвода и отвода теплоты от теплообменной поверхности [3–6].

В любой отрасли промышленности приходится проводить технологические процессы для многокомпонентных гетерогенных смесей. В молочной промышленности такие процессы происходят практически в каждой технологической линии.

Таким образом, сложность самого явления накладывается на сложность исследуемой системы. В результате до настоящего времени не существует какого-либо общего аналитического решения по определению основного параметра кризиса – критической плотности теплового потока. Существующие математические модели ограничены узким диапазоном применения по виду исследуемой среды и диапазону параметров.

Отсутствие единой гипотезы о механизме возникновения кризиса и единого аналитического решения приводит к трудности прогнозирования явления, как следствие, снижается качество получаемого продукта, ресурс выпарной установки, повышаются её энергозатраты.

Согласно Стратегии развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2020 г., одной из основных проблем, сдерживающих развитие молочной промышленности, является физический и моральный износ основных фондов молокоперерабатывающих заводов, а повышение качества производимых пищевых продуктов при снижении их себестоимости и модернизация производства – одной из первоочередных задач [7].

Для устранения кризиса теплообмена первого рода разработан ряд специальных устройств. Однако самым надёжным способом представляется поддержание режимов работы выпарных аппаратов, позволяющих не допускать возникновения кризисных явлений и при этом обеспечивающих максимальную или приближенную к максимальной производительность выпарных аппаратов. Как правило, поддержание указанных режимов соответствует эмульсионному кипению [3, 8].

На основании вышеизложенного целью исследования является создание условий, исключаящих возникновение кризиса теплообмена первого рода, на примере молочно-сахарных смесей. Полученные результаты могут быть рекомендованы к использованию в молочной промышленности.

В качестве исследуемых гетерогенных смесей выбраны молочно-сахарные смеси, используемые для производства сгущённого молока с сахаром, содержащие сахарный сироп и производимые из молока жирностью 3,2; 3,5 и 4,0%. Дополнительно потребовалось определение ряда теплофизических характеристик компонентов, составляющих смеси. В данной статье представлены результаты для сахарного сиропа с концентрациями 4; 7; 10; 13; 15% [9].

Планирование экспериментальной части выполнено по методу комбинационных квадратов [10].

Процесс экспериментального исследования разделён на несколько этапов. Методика исследования и обработки данных подробно описана ранее [1, 11]. Первоначально эксперименты производились на установке, основу которой составляет короткая вертикальная парогенерирующая труба с внутренним диаметром 20 мм и отношением диаметра парогенерирующей трубы к её длине 37,5, снаружи покрытая изоляцией из жидкого стекла [12, 13].

Затем 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 [1,13].

Структурная схема экспериментальной установки и ее подробное описание представлены в [1, 11].

При определении теплофизических характеристик смесей функцией отклика являлись удельная массовая теплоёмкость  $y_1$  и  $y_2$ , Дж/ (кг·К), коэффициент теплопроводности  $y_3$  и  $y_4$ , Вт/(м·К), а варьируемыми факторами: температура смеси  $x_1$ , °С; концентрация сухого вещества  $x_2$  для сахарного сиропа или жирность молока  $x_2$  для молочно-сахарной смеси,% [14].

Осуществление экспериментальной части работы согласно плану и математическая обработка результатов позволили получить адекватные уравнения регрессий для удельной массовой теплоёмкости и коэффициента теплопроводности сахарных сиропов и молочно-сахарных смесей в зависимости от температуры и концентрации или температуры и жирности соответственно.

Зависимость удельной массовой теплоемкости сахарного сиропа от температуры ( $x_1$ ) и концентрации сухого вещества ( $x_2$ ) может быть описана уравнением вида

$$y_1 = -2,595 + 221,861/x_1 + 2,663 \ln(x_2) + 220,189/x_1^2 - 0,614 \ln(x_2)^2 - 228,156 \ln(x_2)/x_1 + 52,894 \ln(x_2)^2/x_1. \quad (1)$$

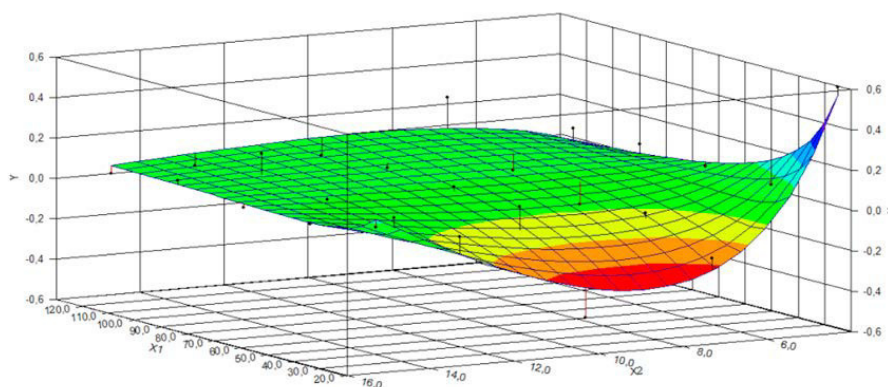


Рис. 1. Поверхность отклика факторного пространства удельной массовой теплоемкости сахарного сиропа в диапазоне температур от 25 до 125° С при изменении концентрации сухого вещества от 4 до 15 %

При  $p=0,95$  критерий Фишера  $F_{\text{факт}} = 11,53$  ( $F_{\text{факт}} = 11,53 > F_{\text{табл}} = 3,40$ ), коэффициент детерминации  $R^2 = 0,79$ . Таким образом, модель принята адекватной, все коэффициенты уравнения – значимы [12].

Анализ поверхности отклика (рис. 1.) позволяет определить максимум удельной массовой теплоёмкости сахарного сиропа в диапазоне температур от 25 до 125° С при изменении концентрации сухого вещества от 4 до 15 %, который соответствует концентрации 4 % при температуре 25° С и составляет 0,6 Дж/ (кг·К), и минимум – «минус» 0,4 Дж/ (кг·К) и 8 % при температуре 25° С.

Зависимость удельной массовой теплоемкости молочно-сахарной смеси от температуры ( $x_1$ ) и жирности молока ( $x_2$ ) может быть описана уравнением вида

$$y_2 = -143,844 + 17,311 \ln(x_1) + 56,992x_2 - 5,081x_2^2 - 4,494 \ln(x_1) x_2 \quad (2)$$

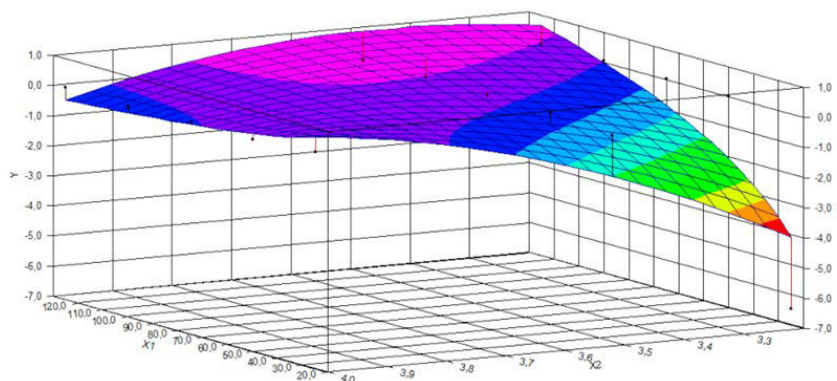


Рис. 2. Поверхность отклика факторного пространства удельной массовой теплоемкости молочно-сахарной смеси в диапазоне температур от 25 до 125<sup>0</sup> С при изменении жирности от 3,2 до 4%

При  $p=0,95$  критерий Фишера  $F_{\text{факт}} = 3,94$  ( $F_{\text{факт}} = 3,94 > F_{\text{табл}} = 3,52$ ), коэффициент детерминации  $R^2 = 0,55$ . Таким образом, модель принята допустимой и адекватной, все коэффициенты уравнения – значимы [12].

Анализ поверхности отклика (рис. 2.) позволяет определить максимум удельной массовой теплоёмкости молочно-сахарной смеси в диапазоне температур от 25 до 125<sup>0</sup> С при изменении жирности молока от 3,2 до 4,0%, который соответствует жирности молока от 3,4 до 3,5% при температуре 125<sup>0</sup> С и составляет 1,0 Дж/ (кг·К), и минимум – «минус» 4,0 Дж/ (кг·К) при 3,2% и температуре 25<sup>0</sup> С.

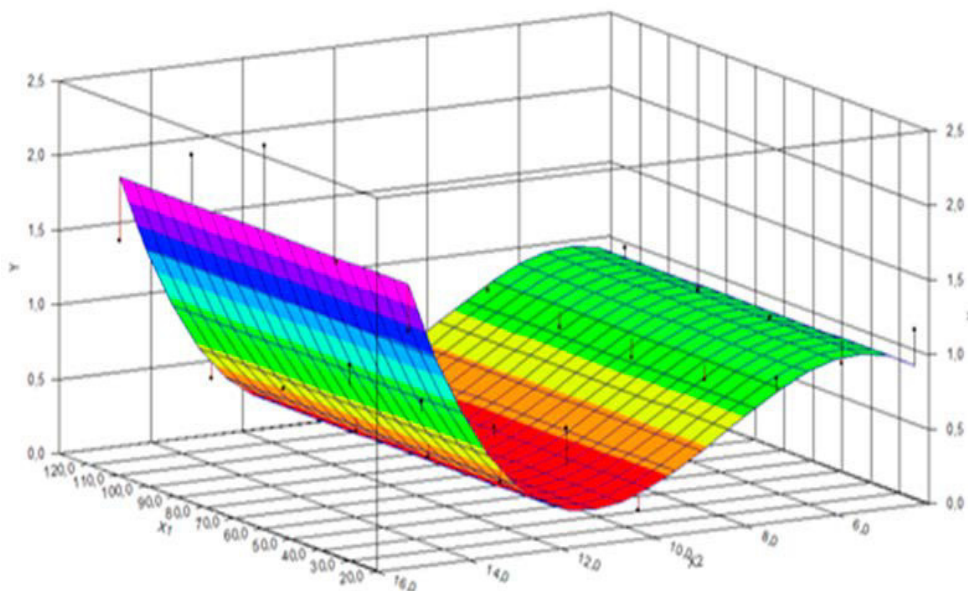


Рис. 3. Поверхность отклика факторного пространства коэффициента теплопроводности сахарного сиропа в диапазоне температур от 25 до 125<sup>0</sup> С при изменении концентрации сухого вещества от 4 до 15%

Зависимость коэффициента теплопроводности сахарного сиропа от температуры ( $x_1$ ) и концентрации сухого вещества ( $x_2$ ) может быть описана уравнением вида

$$y_3 = 0,831/x_1 + 0,099x_2^2 - 0,017x_2^3 + 0,0007x_2^4 \quad (3)$$

При  $p=0,95$  критерий Фишера  $F_{\text{факт}} = 52,6$  ( $F_{\text{факт}} = 52,6 > F_{\text{табл}} = 3,42$ ), коэффициент детерминации  $R^2 = 0,86$ . Таким образом, модель принята адекватной, все коэффициенты уравнения – значимы [12].

Анализ поверхности отклика (рис. 3.) позволяет определить максимум коэффициента теплопроводности сахарного сиропа в диапазоне температур от 25 до 125° С при изменении концентрации сухого вещества от 4 до 15 %, который соответствует концентрации 15 % во всём диапазоне температур и составляет 1,8 Вт/ (м·К), и минимум – 0,15 Вт/ (м·К), при 10 % во всём диапазоне температур.

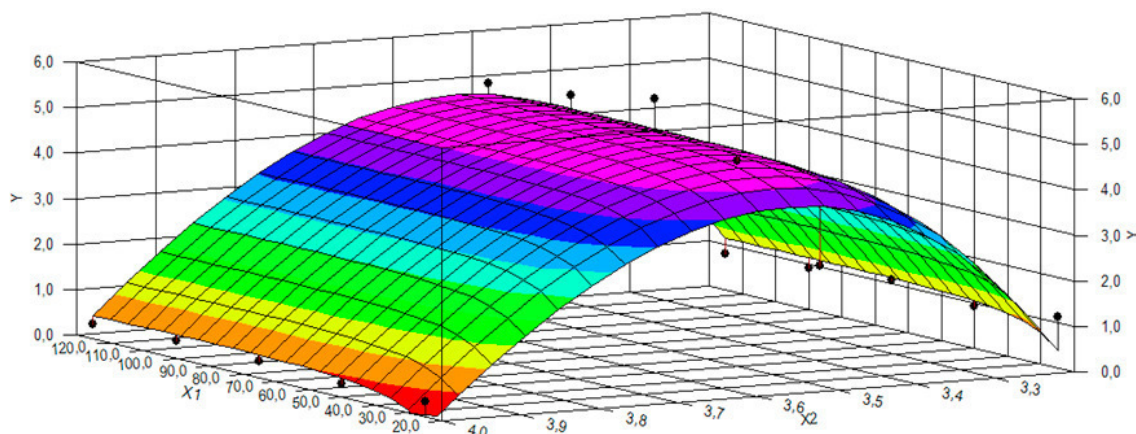


Рис. 4. Поверхность отклика факторного пространства коэффициента теплопроводности молочно-сахарной смеси в диапазоне температур от 25 до 125° С при изменении жирности от 3,2 до 4 %

Зависимость коэффициента теплопроводности молочно-сахарной смеси от температуры ( $x_1$ ) и жирности молока ( $x_2$ ) может быть описана уравнением вида

$$y_4 = -315,705 - 24,756/x_1 + 2270,792/x_2 - 4019,228/x_2^2 \quad (4)$$

Зри  $p = 0,95$  критерий Фишера  $F_{\text{факт}} = 36,6$  ( $F_{\text{факт}} = 36,5 > F_{\text{табл}} = 3,52$ ), коэффициент детерминации  $R^2 = 0,92$ . Таким образом, модель принята адекватной, все коэффициенты уравнения – значимы [12].

Анализ поверхности отклика (рис. 4) позволяет определить максимум коэффициента теплопроводности молочно-сахарной смеси в диапазоне температур от 25 до 125° С при изменении жирности молока от 3,2 до 4,0%, который соответствует жирности молока от 3,5 до 3,6% во всём диапазоне температур и составляет порядка 4,7 Вт/ (м·К), минимум – порядка 0,1 Вт/ (м·К) при 4,0% и температуре 25° С.

Кризис теплообмена первого рода для молочно-сахарных смесей исследовался в условиях естественной конвекции при нормальном атмосферном давлении. В ходе исследований были определены три режима обогрева парогенерирующих труб, представленные в табл. 1, при этом плотность обогрева, вызывающая возникновение кризиса теплообмена первого рода, составила от 8922,82 до 12025,72 Вт/м<sup>2</sup>. Повторяемость экспериментов составила по три серии для каждой жирности при длительности серии от 1,5 до 2 ч.

Таблица 1

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

Одним из результатов обработки данных стала зависимость эмпирического коэффициента  $A$  от показателя степени  $e$  в уравнении первой критической плотности теплового потока для всех исследованных жирностей молока на трёх режимах обогрева [1]. Формула (5) разработана и апробирована ранее проведёнными исследованиями одного из авторов [11]:

$$\frac{q_{\text{кр1см}}}{w \cdot v_{\text{см}}} = A \cdot \left[ \frac{w_p^2 \cdot l}{\sigma_{\text{см}} \cdot \rho_{\text{см}}} \right]^b \cdot \left[ \frac{\rho''}{\rho_{\text{см}}} \right]^e \cdot \left[ \frac{l}{d_{\text{вн}}} \right]^n \quad (5)$$

где  $q_{\text{кр1см}}$  – первая критическая плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $l, d_{\text{вн}}$  – геометрические размеры парогенерирующей трубы, м;  
 $\sigma_{\text{см}}$  – коэффициент поверхностного натяжения смеси, Н/м;  
 $w_p = v_{\text{см}} \cdot \rho_{\text{см}}$  – массовая скорость смеси, кг/(м<sup>2</sup>·с);  
 $v_{\text{см}}$  – скорость движения смеси, м/с;  
 $\rho_{\text{см}}$  – плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho''$  – плотность вторичного пара, кг/м<sup>3</sup>;  
 $A$  – эмпирический коэффициент;  
 $b, e, n$  – показатели степени.

В качестве примера на рис. 5 представлена зависимость  $A = f(e)$  для молочно-сахарной смеси из молока жирностью 4,0% на II режиме обогрева.

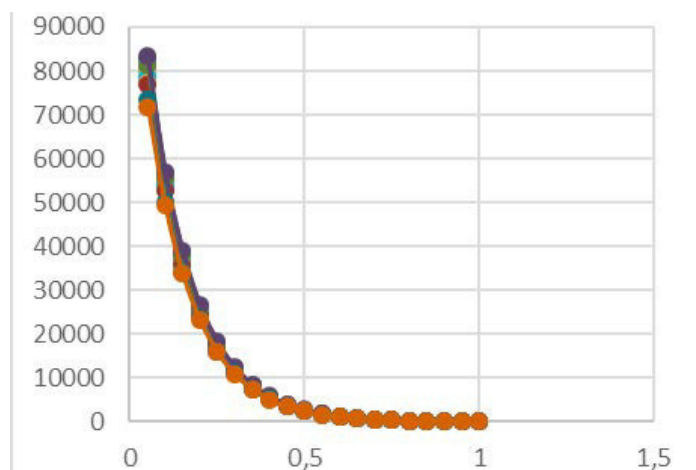


Рис. 5. Зависимость  $A = f(e)$  для молочно-сахарной смеси из молока жирностью 4,0% на II режиме обогрева

Для расширения границ применения формулы (5) в условиях естественной конвекции при нормальном атмосферном давлении показатель степени  $e$  принят равным 0,69 [11]. В табл. 2 представлены средние значения эмпирического коэффициента  $A$  при  $e=0,69$ , рекомендованные для расчёта первой критической плотности теплового потока для молочно-сахарных смесей.

Таблица 2

Средние значения эмпирического коэффициента

Жирность молока, %	Среднее значение эмпирического коэффициента $A$ , %
3,2	769,726 ± 8,020
3,5	702,353 ± 10,010
4,0	612,369 ± 6,000

Практические рекомендации по поддержанию рациональных режимов выпаривания молочно-сахарных смесей в условиях свободной конвекции при нормальном атмосферном давлении представлены в табл. 3.

Таблица 3

Рациональные режимы выпаривания молочно-сахарных смесей

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

Таким образом, представленные результаты позволяют совершенствовать прогнозирование возникновения кризиса теплообмена первого рода и обеспечивать режимы работы выпарных аппаратов с оптимальным соотношением энергозатрат на производство и качеством получаемого продукта. Расширение границ формулы для определения первой критической плотности теплового потока, представленной в работе, позволяет сократить число математических моделей, используемых для таких сложных систем, как многокомпонентные гетерогенные пищевые смеси.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голубева О. А., Грекова О. М. Кризис теплообмена первого рода при выпаривании молока: проблема и способы решения // Вестн. МГТУ. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 547–555.
2. Першина Е. И. О. А. Рязанова. Товароведение и экспертиза однородных групп товаров (молоко и молочные продукты). – Кемерово: КТИПП, 2004. – 26 с.
3. Грекова О. М., Голубева О. А. Исследование теплопроводности гетерогенных пищевых смесей // Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств: материалы междунар. науч.-практ. конф., Мурманск, 7 апр. 2017 г.: в 2 ч. – Мурманск: МГТУ, 2017. – Ч. 2. – С. 126–129.
4. Гогонин И. И. Зависимость критического теплового потока при кипении от физических свойств теплоносителя // Теплофизика и аэродинамика. – 2009. – Т. 1. – С. 115–122.
5. Выговский С. Б. Рябов Н. О. Чернов Т. В. Безопасность и задачи инженерной поддержки эксплуатации ядерных энергетических установок с ВВЭР: учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / НИЯУ МИФИ. – М., 2013. – 302 с.
6. Котельные установки и парогенераторы: учеб. для студентов вузов ж-д транспорта / В. М. Лебедев [и др.]; под ред. В. М. Лебедева. – М.: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. транспорте, 2013. – 374 с.
7. Дьяконов В. Г., Лонцаков О. А. Основы теплопередачи и массообмена: учеб. пособие / Казан. нац. исслед. технолог. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2015. – 242 с.
8. О внесении изменений в Стратегию развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2020 года [Электрон. ресурс]: распоряжение Правительства РФ от 30.06.2016 № 1378-р. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_200858/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_200858/).
9. Катто Ю. Критические тепловые потоки при кипении / пер. с англ. – Сан-Франциско, 1986. – 36 с.
10. Федышина О. М., Голубева О. А. Исследование теплопроводности сахарного сиропа методом С-калориметра // Наука и образование – 2016: материалы Всерос. заоч. науч.-практ. конф., Мурманск, 1 нояб. 2016 г. – Мурманск: МГТУ, 2016. – С. 180–183.
11. Протодьяконов М. М., Тедер Р. И. Методика рационального планирования экспериментов. – М.: Наука, 1970. – 76 с.
12. Разработка и совершенствование оборудования для исследования кризиса теплообмена первого рода в многокомпонентных гетерогенных смесях: отчет о ГБ НИР. – Номер гос. учёта отчёта АААА-Б18–218–21660002–2, дата постановки на учёт 16.02.2018. – 20 с.

13. Голубева О. А., Федышена О. М. Актуальность и условия проведения исследований кризиса теплообмена I рода при выпаривании // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития: сб. науч. тр. SWorld. – Одесса: Куприенко С. В., 2013. – Вып. 3, т. 13. – С. 43–46.

14. Голубева О. А., Федышена О. М. Кризис теплообмена I рода в гетерогенных смесях и истинных растворах // Современные эколого-биологические и химические исследования, техника и технология производств: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Мурманск, 7 апр. 2015 г.): в 2 ч. – Мурманск: МГТУ, 2016. – Ч. 2. – С. 25–29.

15. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

## REFERENCES

1. Golubeva O. A., Grekova O. M. Krizis teploobmena pervogo roda pri vyiparivanii moloka: problema i sposobyi resheniya // Vestn. MGTU. – 2017. – Т. 20, N3. – С. 547–555.

2. Pershina E. I. O. A. Ryazanova. Tovarovedenie i ekspertiza odnorodnykh grupp tovarov (moloko i molochnyye produkty) / E. I. Pershina, Kemerovo: KTIPP, 2004. – 26 s.

3. Grekova O. M., Golubeva O. A. Issledovanie teploprovodnosti geterogennykh pischevykh smesey // Sovremennyye ekologo-biologicheskie i himicheskie issledovaniya, tehnika i tehnologiya proizvodstv: materialy mezhdunar. nauch. – prakt. konf., Murmansk, 7 aprelya 2017 g.: v 2 ch. – Murmansk: MGTU, 2017. – Ch. 2. – S 126–129.

4. Gogonin I. I. Zavisimost kriticheskogo teplovogo potoka pri kipenii ot fizicheskikh svoystv teplonositelya // Teplofizika i aerodinamika. – 2009. – Т. 1. – С. 115–122.

5. Vyigovskiy S. B. Ryabov N. O. Chernov T. V. Bezopasnost i zadachi inzhenernoy podderzhki ekspluatatsii yadernykh energeticheskikh ustanovok s VVER: uchebnoe posobie dlya studentov vyssh. uchebn. zavedeniy NIYaU MIFI, 2013. – 302 s.

6. Kotelnyye ustanovki i parogeneratory: ucheb. dlya studentov vuzov zh-d transporta / [V. M. Lebedev [i dr.]; pod red. V. M. Lebedeva. – М.: Ucheb. – metod. tsentr po obrazovaniyu na zh. – d. transporta., 2013. – 374 s.

7. Dyakonov V. G. Lonschakov O. A. Osnovy teploperedachi i massoobmena: uchebn. posobie / Kazanskiy nats. issled. Tehnolog. un-t. – Kazan: Izd-vo KNITU, 2015. – 242 s.

8. O vnesenii izmeneniy v Strategiyu razvitiya pischevoy i pererabatyivayushey promyshlennosti Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda [Elektron. resurs]: rasporyazhenie Pravitelstva RF ot 30.06.2016 N 1378-r. – – Rezhim dostupa: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_200858/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_200858/)

9. Katto Yu. Kriticheskie teplovyie potoki pri kipenii. /Yu. Katto – Perevod s angl. – San =Frantsisko, 1986. – 36 s.

10. Fedyishena O. M., Golubeva O. A. Issledovanie teploprovodnosti sahnarnogo siropa metodom S-kalorimetra // Nauka i obrazovanie – 2016: materialy Vseros. zaoch. nauch. – prakt. konf., Murmansk, 1 noyab. 2016 g. – Murmansk: MGTU, 2016. – С. 180–183.

11. Protodyakonov M. M., Teder R. I. Metodika ratsionalnogo planirovaniya eksperimentov M.: Nauka, 1970. – 76 s.

12. Razrabotka i sovershenstvovanie oborudovaniya dlya issledovaniya krizisa teploobmena pervogo roda v mnogokomponentnykh geterogennykh smesyah: OtchYot o GB NIR. – Nomer gos. uchYota otchYota AAAA-B18–218–21660002–2, data postanovki na uchYot 16.02.2018. – 20 s.

13. Golubeva O. A., Fedyishena O. M. Aktualnost i usloviya provedeniya issledovaniy krizisa teploobmena I roda pri vyiparivanii // Nauchnyie issledovaniya i ih prakticheskoe primenenie.



Sovremennoe sostoyanie i puti razvitiya: sb. nauch. tr. SWorld. – Odessa, Kuprienko S.V., 2013. – Vyip. 3, t. 13. – S. 43–46.

14. Golubeva O.A., Fedyishena O.M. Krizis teploobmena 1 roda v geterogennyih smesyah i istinnyih rastvorah // Sovremennyye ekologo-biologicheskie i himicheskie issledovaniya, tehnika i tehnologiya proizvodstv: materialyi mezhdunar. nauch. – praktich. konf. (Murmansk, 7 aprelya 2015 g.): v 2 ch. – Murmansk: MGTU, 2016. – Ch. 2. – С. 25–29.

15. Adler Yu. P., Markova E.V., Granovskiy Yu. V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnyih usloviy. – M: – Nauka, 1976. – 280 s.