

УДК 62.65 + 62-97/-98

Возникновение кризиса теплообмена первого рода на вертикальной парогенерирующей трубе при выпаривании солевых растворов

А. В. Жуков, О. А. Голубева*

*Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия;
e-mail: golubevaoo@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2747-3054>

Информация о статье

Поступила
в редакцию
20.05.2025;

получена
после доработки
24.06.2025;

принята
к публикации
02.07.2025

Ключевые слова:

кризис теплообмена
первого рода,
парогенерирующая
труба,
тепловизионная съемка,
концентрация раствора,
выпарной аппарат

Реферат

Кризис теплообмена первого рода возникает на парогенерирующей трубе выпарного аппарата при скачкообразном переходе от пузырькового кипения к пленочному, когда вдоль теплообменной поверхности образуется паровая пленка, ухудшающая условия теплопередачи. Исследования проводились на солевых растворах хлористого натрия концентрацией по сухому веществу 5–11 % с равномерным шагом 2 % (5, 7, 9, 11 %) при трех режимах обогрева парогенерирующей трубы, установленных в ходе предыдущих исследовательских этапов. В ходе экспериментов определялись сила тока и напряжение в цепи обогревающей спирали, а также температура обогреваемой поверхности. Кризис теплообмена первого рода фиксировался посредством тепловизионной съемки при резком скачкообразном изменении температуры поверхности трубы. Теплограммы обрабатывались с помощью программного обеспечения, соответствующего модели использованного тепловизора. На основе тепловых профилей теплообменной поверхности парогенерирующей трубы подтверждается возникновение кризиса теплообмена первого рода в средней и нижней частях парогенерирующей трубы. Критическая температура солевых растворов увеличивается как с повышением концентрации раствора в условиях постоянного режима обогрева, так и с увеличением плотности обогрева при постоянной концентрации. Проведенное исследование процессов выпаривания солевых растворов при различных экспериментальных режимах способствует выработке новых научно-практических подходов к исследованию кризиса теплообмена первого рода.

Для цитирования

Жуков А. В. и др. Возникновение кризиса теплообмена первого рода на вертикальной парогенерирующей трубе при выпаривании солевых растворов. Вестник МГТУ. 2025. Т. 28, № 3. С. 439–445. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-3-439-445>.

The occurrence of a heat exchange crisis of the first kind on a vertical steam-generating pipe during the evaporation of salt solutions

Andrey V. Zhukov, Olga A. Golubeva*

*Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia;
e-mail: golubevaoo@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2747-3054>

Article info

Received
20.05.2025;

received
in revised
24.06.2025;

accepted
02.07.2025

Key words:

heat exchange crisis
of the first kind,
steam-generating
pipe,
thermal imaging,
solution concentration,
evaporator

Abstract

A heat exchange crisis of the first kind occurs on the steam-generating tube of the evaporator during an abrupt transition from nucleate boiling to film boiling, when a steam film is formed along the heat-exchange surface, worsening the heat transfer conditions. The studies have been conducted on saline solutions of sodium chloride with a dry matter concentration of 5–11 % with a uniform step of 2 % (5, 7, 9, 11 %) under three heating modes of the steam-generating tube established during the previous research stages. During the experiments, the current strength and voltage in the heating coil circuit, as well as the temperature of the heated surface, have been determined. A heat exchange crisis of the first kind is recorded using thermal imaging photography during an abrupt change in the tube surface temperature. Thermal images have been processed using software corresponding to the model of the thermal imager used. Based on the thermal profiles of the heat exchange surface of the steam-generating tube, the occurrence of a heat exchange crisis of the first kind in the middle and lower parts of the steam-generating tube is confirmed. The critical temperature of salt solutions increases both with an increase in the solution concentration under conditions of a constant heating mode and with an increase in the heating density at a constant concentration. The conducted study of the processes of evaporation of salt solutions under various experimental conditions contributes to the development of new scientific and practical approaches to the study of the crisis of heat exchange of the first kind.

For citation

Zhukov, A. V. et al. 2025. The occurrence of a heat exchange crisis of the first kind on a vertical steam-generating pipe during the evaporation of salt solutions. *Vestnik of MSTU*, 28(3), pp. 439–445. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2025-28-3-439-445>.

Введение

Кризис теплообмена первого рода возникает на парогенерирующей трубе выпарного аппарата при скачкообразном переходе от пузырькового кипения к пленочному, когда вдоль теплообменной поверхности образуется паровая пленка, ухудшающая условия теплопередачи¹ (Гогонин, 2009; Дьяконов и др., 2015; Katto, 1986). Данный процесс связан с резким повышением температуры теплопередающей поверхности, что негативно влияет на эксплуатационные свойства выпарных аппаратов, снижает их производительность и увеличивает затраты на техническое обслуживание.

Исследование кризиса теплообмена первого рода, в том числе в части определения участков его возникновения на парогенерирующей трубе, имеет большое значение в ходе теоретического осмысления данного физического процесса и выработки конкретных эксплуатационных рекомендаций, касающихся повышения эффективности работы выпарных аппаратов (Голубева, 1998).

Проблему ухудшения условий теплопередачи не удалось решить посредством многоточечного измерения температуры поверхности парогенерирующей трубы выпарного аппарата, поскольку явление кризиса теплообмена первого рода сложно прогнозировать (Жуков, 2024). В ходе экспериментальных исследований была поставлена задача определения участков наиболее частого возникновения кризиса теплообмена первого рода.

Целью эксперимента являлось подтверждение расположения участков парогенерирующей трубы, испытывающих максимальную тепловую нагрузку и подверженных наибольшему износу вследствие возникновения кризиса теплообмена первого рода, а также установление влияния концентрации солевых растворов на величину критической температуры.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи на кафедре технологического и холодильного оборудования Мурманского арктического университета разработана и собрана экспериментальная установка на основе одиночной вертикальной парогенерирующей трубы.

Для установки выбрана медная труба 22×1 , имитирующая вертикальную трубчатую теплообменную поверхность выпарного аппарата; отношение длины трубы к ее внутреннему диаметру трубы составило 37,5. Выбор данных параметров парогенерирующей трубы обусловлен предыдущими этапами выполненных экспериментальных исследований (Жуков и др., 2023; 2024б). Электрообогрев поверхности парогенерирующей трубы был равномерным и обеспечивался нихромовой электрической спиралью мощностью 1,5 кВт. Наружная поверхность медной трубы, во избежание короткого замыкания, покрыта изолятором – стеклотканью. Подаваемое на спираль напряжение регулировалось с помощью автотрансформатора типа АДЧН-20-220-75 УХЛ4 ТУ-16-517 847-74 (класс изоляции А, регулируемое напряжение 5–240 В).

Растворы хлористого натрия концентрацией по сухому веществу 5–11 % с равномерным шагом 2 % (5, 7, 9, 11 %) были приготовлены из соли, соответствующей ГОСТ Р 51574-2018².

Экспериментальные исследования проводились с использованием трех режимов обогрева парогенерирующей трубы, определенных в ходе предыдущих исследовательских этапов и представленных в таблице. При каждом режиме осуществлялось трехкратное повторение экспериментов с соблюдением условий стационарного электрообогрева теплообменной поверхности парогенерирующей трубы.

Таблица. Параметры экспериментальных режимов исследования³ (Голубева и др., 2017; 2018;

Жуков и др., 2024а)

Table. Parameters of experimental modes of research (Golubeva et al., 2017; 2018; Zhukov et al., 2024a)

Номер режима	Параметр режима обогрева		
	Напряжение, В	Сила тока, А	Плотность обогрева, Вт/м ²
1	150	3,6–4,1	8681,67–9887,46
2	160	4,0–4,4	10289,39–11138,33
3	170	4,2–4,6	11479,10–12572,35

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В ходе проведения эксперимента солевой раствор подавался через вентиль 5, труба 1 нагревалась спиралью 3, амперметром фиксировалась сила тока, вольтметром – напряжение. Температура поверхности парогенерирующей трубы измерялась

¹ Дьяконов В. Г., Лоншаков О. А. Основы теплопередачи и массообмена. Казань : КНИТУ, 2015. 242 с.

² ГОСТ Р 51574-2018. Соль пищевая. Общие технические условия. Введен 01.09. 2018. М. : Стандартинформ, 2018. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200159300> (дата обращения 01.05. 2025).

³ Голубева О. А., Грекова О. М. Разработка и совершенствование оборудования для исследования кризиса теплообмена первого рода в многокомпонентных гетерогенных смесях // Отчет по ГБ НИР "Разработка и совершенствование технологического и холодильного оборудования пищевых производств" № ГР 01201375267 ; номер государственного учета АААА-Б18-218021660002-2 ; дата постановки на учет 16.02.2018.

мультиметром марки М 838, оснащенным термопарой типа "К" (4) в шести точках по высоте, расположенных с равномерным шагом. Уровень заполнения выпарной трубы солевым раствором контролировался с помощью стеклянной трубы 2.

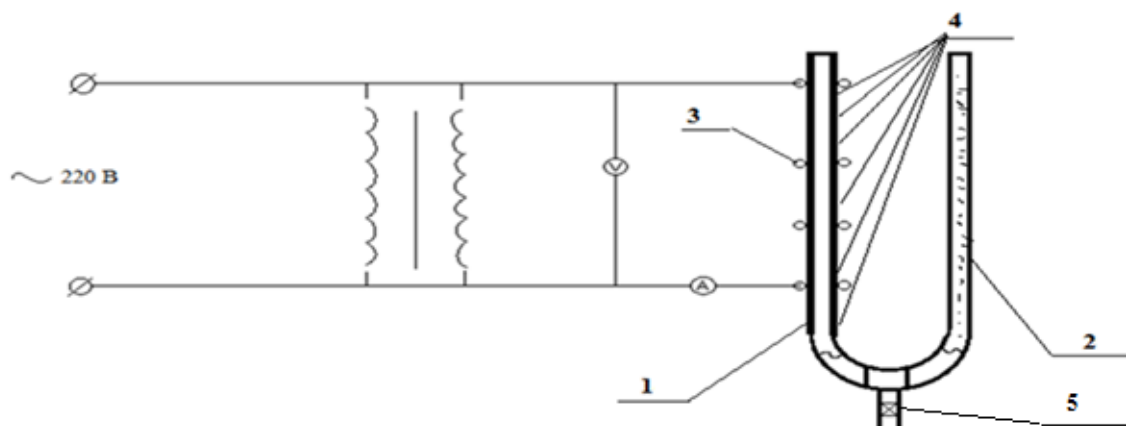


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (составлена авторами)
Fig. 1. Experimental setup diagram (compiled by the authors)

Кризис теплообмена первого рода устанавливался на основании резкого скачка температуры парогенерирующей трубы, измеряемой термопарами. Момент кризиса фиксировался посредством тепловизионной съемки с помощью тепловизора Testo 875-1i. Полученные тепловые профили обрабатывались с использованием программного обеспечения Testo irsoft 4.5 на основе термографического анализа изображений в инфракрасном диапазоне поиска.

Результаты и обсуждение

В результате обработки экспериментальных данных получены тепловые профили с распределением температуры по высоте теплообменной поверхности.

Общий вид окна экрана программного обеспечения Testo irsoft 4.5 представлен на рис. 2. Результат тепловизионной съемки и тепловой профиль для солевого раствора 5%-й концентрации, выпариваемого при режиме 1 (согласно данным таблицы), показаны на рис. 3 и 4. В ходе эксперимента производилась съемка всей обогреваемой части трубы. На оси ординат программой нанесены значения температуры обогреваемой поверхности в градусах Цельсия, на оси абсцисс – длина трубы в направлении снизу вверх от начала координат.

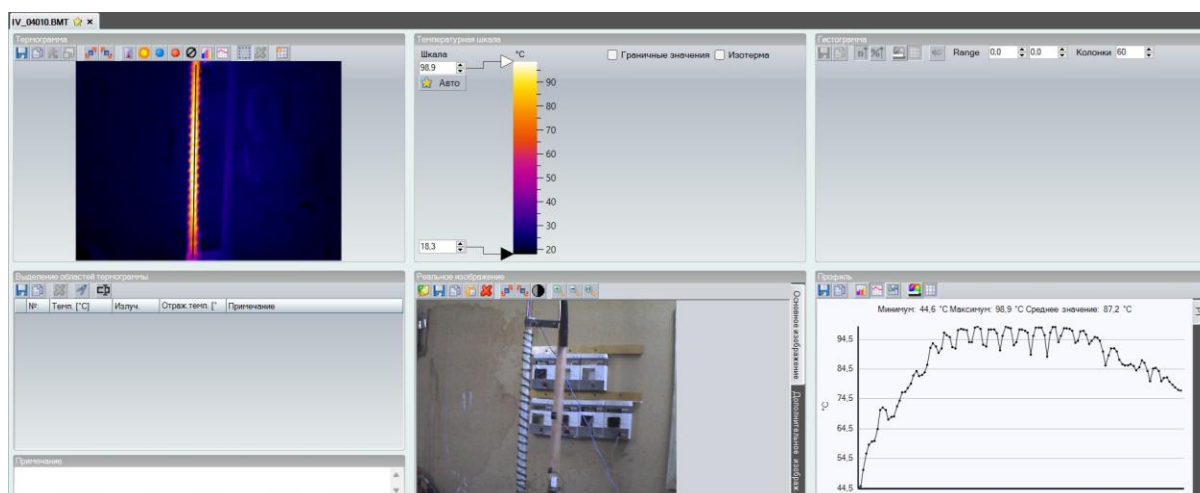


Рис. 2. Общий вид окна экрана программного обеспечения Testo irsoft 4.5 (составлен авторами)
Fig. 2. General view of the Testo irsoft 4.5 software screen window (compiled by the authors)

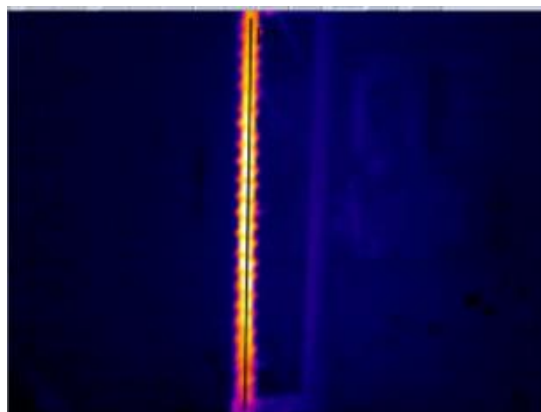
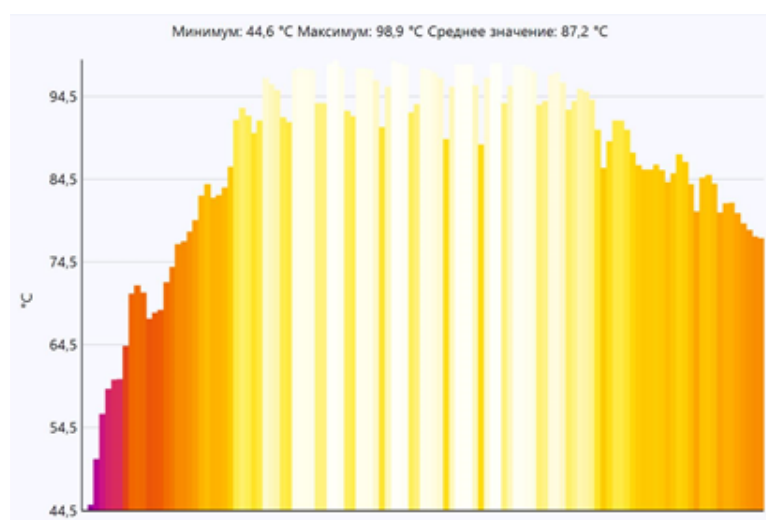


Рис. 3. Фото тепловизионной съемки для солевого раствора 5%-й концентрации, выпариваемого при режиме 1 (фото авторов)

Fig. 3. Photo of thermal imaging for a 5 % concentration salt solution evaporated in mode 1 (photo made by the authors)



a



б

Рис. 4. Тепловые профили для солевого раствора 5%-й концентрации, выпариваемого при режиме 1: *a* – заполненный; *б* – линейный (составлены авторами)

Fig. 4. Thermal profile for a 5 % salt solution evaporated in mode 1: *a* – filled out; *б* – linear (compiled by the authors)

На тепловом профиле одновременно отражаются значения температур обогреваемой поверхности и греющей спирали, что усложняет обработку экспериментальных данных. В процессе обработки данных более удобным является использование теплового профиля линейного вида, на котором верхние точки "зубцов" соответствуют температуре спирали, средние и нижние – температуре трубчатой теплообменной поверхности.

Наименьшая и наибольшая температура начала кризиса теплообмена первого рода для солевых растворов показана на рис. 5 и 6. Представленные результаты указывают на повышение критической температуры с ростом концентрации раствора в условиях постоянного режима обогрева и увеличением плотности обогрева при постоянной концентрации раствора.

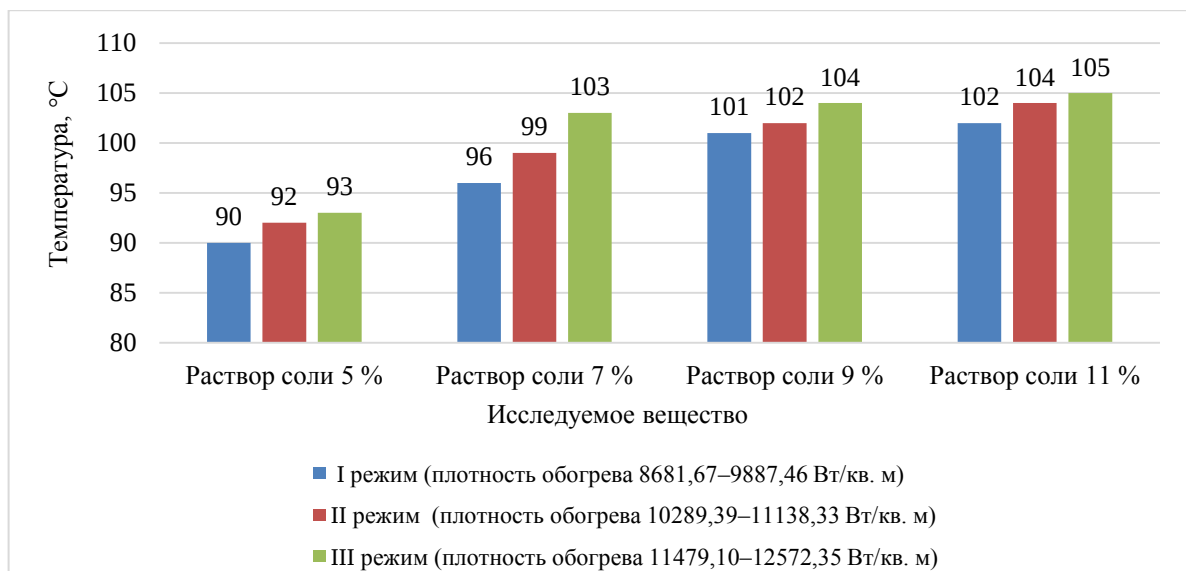


Рис. 5. Наименьшая температура начала кризиса теплообмена первого рода для солевых растворов (графики составлены авторами)

Fig. 5. The lowest temperature of the onset of the first kind heat transfer crisis for salt solutions (compiled by the authors)

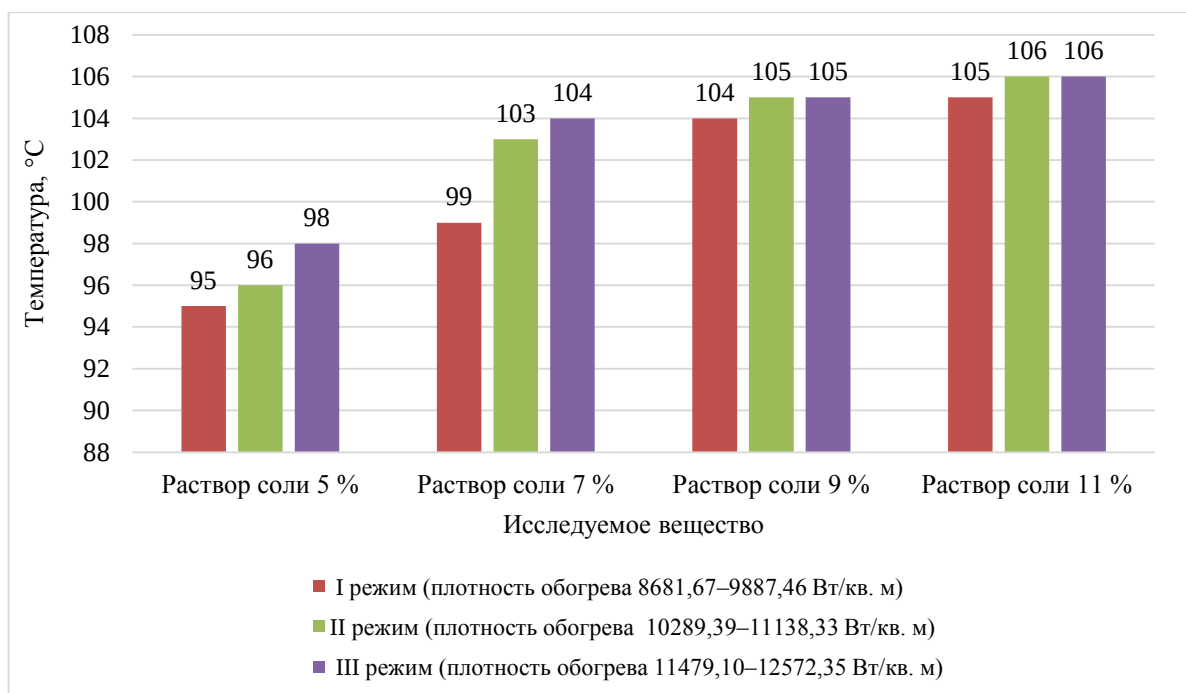


Рис. 6. Наибольшая температура начала кризиса теплообмена первого рода для солевых растворов (графики составлены авторами)

Fig. 6. The highest temperature of the onset of the first-order heat transfer crisis for salt solutions (compiled by the authors)

Заключение

В результате исследования получены тепловые профили по высоте теплопередающей поверхности парогенирующей трубы с распределением температуры, на основе которых подтверждено возникновение кризиса теплообмена первого рода в средней и нижней части парогенирующей трубы.

Критическая температура солевых растворов увеличивается как с повышением концентрации раствора в условиях постоянного режима обогрева, так и с увеличением плотности обогрева при постоянной концентрации раствора.

Проведенное исследование процессов выпаривания солевых растворов при различных экспериментальных режимах способствует выработке новых научно-практических подходов к исследованию кризиса теплообмена первого рода.

Благодарности

Авторы благодарят доктора технических наук, профессора кафедры технологии пищевых производств Мурманского арктического университета Ю. В. Шокину за помощь в ходе проведения тепловизионной съемки и предоставление экспериментального оборудования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Гогонин И. И. Зависимость критического теплового потока при кипении от физических свойств теплоносителя // Теплофизика и аэродинамика. 2009. Т. 16, № 1. С. 115–122. EDN: KJUKXR.
- Голубева О. А. Повышение эффективности работы выпарных аппаратов в условиях критических тепловых потоков : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12. Мурманск, 1998. 147 с.
- Голубева О. А., Грекова О. М. Кризис теплообмена первого рода в молочно-сахарных смесях и способы его устранения // Инновации и продовольственная безопасность. 2018. № 2(20). С. 36–44. EDN: UQFSAL.
- Голубева О. А., Грекова О. М. Кризис теплообмена первого рода при выпаривании молока: проблема и способы решения // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 3. С. 547–555. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-3-547-555>. EDN: ZMVWBD.
- Жуков А. В. Некоторые проблемы развития технической науки в Арктической зоне // Интеграционные процессы в современной науке: новые подходы и актуальные вопросы : сб. науч. тр. по материалам XXVII Междунар. науч.-практ. конф., г. Анапа, 27 ноября 2024 г. Анапа, 2024. С. 18–22. EDN: DCOLMC.
- Жуков А. В., Голубева О. А. Исследование кризиса теплообмена первого рода при выпаривании солевых растворов // Научные труды Дальрыбвтуза. 2024б. Т. 69, № 3. С. 28–36. DOI: <https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-69-03>. EDN: FJQJVB.
- Жуков А. В., Голубева О. А. Сравнение температуры возникновения кризиса теплообмена первого рода в различных пищевых средах // сб. тезисов III Междунар. симпозиума "Пищевые технологии", посвящ. 90-летию со дня рождения д-ра техн. наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ, основателя науч. школы Л. А. Остроумова, г. Кемерово, 20–21 сентября 2024 г. Кемерово : Кемеровский государственный университет, 2024а. С. 511–514. EDN: ITACHZ.
- Жуков А. В., Голубева О. А. Сходство и различие кризиса теплообмена первого рода в гетерогенных пищевых смесях и пищевых растворах // Известия высших учебных заведений. Арктический регион. 2023. № 1. С. 20–26. EDN: KNQPTI.
- Katto Yu. Critical heat flux during boiling. San Francisco. 1986. 36 p.

References

- Gogonin, I. I. 2009. Dependence of the critical heat flux during boiling on the physical properties of the coolant. *Thermophysics and Aeromechanics*, 16(1), pp. 115–122. EDN: KJUKXR. (In Russ.)
- Golubeva, O. A. 1998. Improving the efficiency of evaporators in conditions of critical heat flows. Ph.D. Thesis. Murmansk. (In Russ.)
- Golubeva, O. A., Grekova, O. M. 2018. Heat transfer crisis of the first kind in milk-sugar mixtures and methods of its elimination. *Innovations and Food Safety*, 2(20), pp. 36–44. EDN: UQFSAL. (In Russ.)
- Golubeva, O. A., Grekova, O. M. 2017. Heat transfer crisis of the first kind during milk evaporation: Problems and solutions. *Vestnik MSTU*, 20(3), pp. 547–555. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-3-547-555>. EDN: ZMVWBD. (In Russ.)
- Zhukov, A. V. 2024. Some problems of technical science development in the Arctic zone. Proceedings of the XXVII Intern. scien. and pract. conf. *Integration processes in modern science: new approaches and topical issues*, Anapa, November 27, 2024. Anapa, pp. 18–22. EDN: DCOLMC. (In Russ.)

- Zhukov, A. V., Golubeva, O. A. 2024b. Investigation of the heat exchange crisis of the first kind at evaporation of salt solutions. *Scientific Journal of the Far East State Technical Fisheries University*, 69(3), pp. 28–36. DOI: <https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-69-03>. EDN: FJQJVB. (In Russ.)
- Zhukov, A. V., Golubeva, O. A. 2024a. Comparison of the temperature of the heat exchange crisis of the first kind in different food media. Kemerovo, pp. 511–514. EDN: ITACHZ. (In Russ.)
- Zhukov, A. V., Golubeva, O. A. 2023. Similarity and difference of the heat exchange crisis of the first kind in heterogeneous food mixtures and food solutions. *News of Higher Educational Institutions. Arctic Region*, 1, pp. 20–26. EDN: KNQPTI. (In Russ.)
- Katto, Yu. 1986. Critical heat flux during boiling. San Francisco.

Сведения об авторах

Жуков Андрей Вячеславович – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, аспирант;
e-mail: zhukov-andrey12@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3357-7469>

Andrey V. Zhukov – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, PhD Student;
e-mail: zhukov-andrey12@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3357-7469>

Голубева Ольга Алексеевна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский арктический университет, канд. техн. наук, доцент;
e-mail: golubevaola@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2747-3054>

Olga A. Golubeva – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Arctic University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor;
e-mail: golubevaola@mauniver.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2747-3054>