

О. С. Дмитриева, А. В. Дмитриев, М. Г. Гарипов**ВЛИЯНИЕ ОРОШЕНИЯ НА ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСАТОРА
С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ***Ключевые слова: двигатель Стирлинга, конденсация, ректификация, теплообмен, орошение поверхности теплообмена.*

Тепловая энергия является наиболее распространенным и важным видом использования энергии. В настоящее время эффективное использование и управление тепловой энергией очень важны и обеспечивают эффективный способ борьбы с энергетическим кризисом. В связи с ужесточением правил выбросов и ростом цен на ископаемое топливо энергосбережение и сокращение выбросов стали особенно важными для любого процесса дистилляции с использованием тепла. В настоящее время энергосберегающие методы включают применение колонн с разделительной перегородкой или другими конфигурациями. Использование технологии термической ректификации может сыграть положительную роль в содействии развитию и использованию чистой энергии, и сокращению выбросов углекислого газа. Энергосберегающие методы, в основном используемые для улучшения ректификации, включают в технологию тепловой насос, цикл Ренкина, двигатель Стирлинга и другие. Цель работы исследовать работу двигателя за счет циклического сжатия и расширения воздуха или другого газа при разных температурах. Он применяется для привода вентилятора в промышленных процессах конденсации паров из ректификационной колонны. Вентилятор, в свою очередь, может способствовать конденсации паров, улучшая теплообмен и эффективность процесса. При этом другая часть двигателя должна быть охлаждена, чтобы создать температурный градиент. Это может быть достигнуто с помощью охлаждающей жидкости. Вода сначала проходит через холодную часть двигателя, а затем впрыскивается в поток воздуха, который вентилятор перекачивает через воздушный конденсатор. Результаты показали, что впрыск воды позволяет более эффективно снижать температуру воздуха, что способствует лучшей конденсации паров жидкости из ректификационной колонны.

O. S. Dmitrieva, A. V. Dmitriev, M. G. Garipov**THE EFFECT OF IRRIGATION ON THE THERMAL CHARACTERISTICS
OF AN AIR-COOLED CONDENSER***Keywords: Stirling engine, condensation, rectification, heat and mass transfer, irrigation of the heat exchange surface.*

Thermal energy is the most common, and important type of energy used. At present, the efficient use and management of thermal energy is very important and provides an effective way to combat the energy crisis. With stricter emission regulations and rising fossil fuel prices, energy conservation and emission reduction have become especially important for any heat-based distillation process. Currently, energy-saving methods include the use of columns with a partition wall or other configurations. Using thermal rectification technology can play a positive role in promoting the development and use of clean energy and reducing carbon dioxide emissions. Energy-saving methods mainly used to improve rectification include heat pump technology, Rankine cycle, Stirling engine and others. The purpose of the work is to investigate the operation of the engine because of cyclic compression and expansion of air or other gas at different temperatures. It is used to drive a fan in industrial steam condensation processes from a distillation column. The fan can promote vapor condensation, improving heat transfer and process efficiency. The other part of the engine must be cooled to create a temperature gradient. This can be achieved by using a coolant. The water first passes through the cold part of the engine, and then is injected into the air stream, which the fan pumps through an air condenser. The results showed that water injection makes it possible to reduce the air temperature more effectively, which contributes to better condensation of liquid vapors from the distillation column.

В последние десятилетия энерго- и ресурсосбережение стали актуальными во всех областях человеческой деятельности, особенно в промышленности и на транспорте. Объясняется это увеличением населения планеты, истощением недр Земли, ростом энерго- и ресурсопотребления на душу населения [1, 2].

Ректификационные установки играют ключевую роль в разделении жидких смесей на компоненты в химической и нефтехимической промышленности. Ректификация – самый энергоемкий массообменный процесс, т.к. энергозатраты доходят до двух третей себестоимости процесса (огромные тепловые эффекты фазовых переходов, большой расход энергии на нагрев разделяемой смеси до температуры кипения и на конденсацию ее паров, большое количество оборудования, огромные размеры ректификационных колонн) [3].

Совершенствование процесса ректификации ведется по нескольким направлениям: 1) разработка более эффективных массообменных контактных устройств (тарелок и насадок) [4-6]; 2) использование вакуума в ректификационной колонне [6-12]; 3) применение термической ректификации вместо адиабатической [12, 13]; 4) разработка энерготехнологических схем [14]; 5) использование более эффективных способов конденсации паров [15].

Одним из перспективных направлений повышения эффективности работы ректификационных установок является разработка и внедрение в производство блочной перекрестно-точной насадки (ПТН), предложенной профессором Уфимского государственного нефтяного технического университета К.Ф. Богатых. Она принципиально отличается по конструкции и принципу действия от традиционных насадок. В ПТН вме-

сто сплошного насадочного слоя используют насадочные блоки, отделенные друг от друга горизонтальными перегородками. Каждая горизонтальная перегородка распределяет стекающую сверху жидкость для нижерасположенного блока, что обеспечивает равномерное распределение жидкости по сечению колонны. Горизонтальные перегородки играют роль гидравлического затвора, исключая движение пара по вертикали мимо насадочного блока. Насадочные блоки изготавливаются из просечных гофрированных листов. Листы могут располагаться как горизонтально, так и вертикально. В обоих случаях пар проходит через блок только в поперечном направлении. ПТН характеризуются высокой массообменной эффективностью и низким гидравлическим сопротивлением (в 5 раз меньше, чем у клапанных тарелок). Это позволяет снизить энергозатраты и достичь высокой чёткости разделения углеводородных и других смесей, особенно в вакуумных ректификационных колоннах [6].

В традиционных ректификационных установках применяется внешнее флегмообразование (адиабатическая ректификация). В этом случае теплообмен между ректификационной колонной и окружающей средой отсутствует (за исключением потерь тепла через стенки колонны). В установках термической (неадиабатической) ректификации используют внутреннее флегмообразование. С этой целью колонну снабжают встроенным дефлегматором. Организация процессов испарения и конденсации внутри колонны позволяет уменьшить время взаимодействия фаз при высокой температуре. При этом, на каждой контактной ступени происходит парциальная (частичная) конденсация пара, в результате которой осуществляется парциальное испарение жидкости. За счёт этого повышается КПД каждой контактной ступени. Из колонны выводится лишь количество пара, необходимое для образования дистиллята. Это позволяет снизить задержку жидкости в рабочей зоне и сократить энергозатраты. Данный способ применим для четкого разделения термолабильных и химически неустойчивых компонентов [12].

Одна из ключевых задач совершенствования процесса ректификации – обеспечение высокой массообменной эффективности при минимальном гидравлическом сопротивлении колонны. Это особенно важно в процессе вакуумной ректификации. Повысить разделяющую способность контактных устройств можно повышением степени турбулентности потоков фаз, однако это вызывает повышение гидравлического сопротивления колонны, а, значит, и снижение глубины разрежения в аппарате. В работе [13] предлагается использовать контактные устройства с незначительной разделяющей способностью, создающих сравнительно небольшое сопротивление потоку пара. Компенсировать снижение массообменной эффективности контактных ступеней авторы предлагают за счёт внутреннего флегмообразования с использованием термических эффектов. Контактные ступени колонны представляют собой горизонтальные перфорированные пластины. Дефлегматором служит медная труба, проходящая по оси колонны. Через дефлегматор проходит снизу-вверх вода, обеспечивающая конденсацию паров. При контакте с поверхностью дефлегматора вос-

ходящих паров смеси происходит их парциальная конденсация с образованием флегмы. Флегма стекает на верхние горизонтальные пластины контактной ступени, на которой нагревается до температуры кипения. Далее конденсат соединяется с основной частью жидкости, стекающей со средней и нижней пластин ступени. После выхода из колонны пары конденсируются во внешнем дефлегматоре с образованием дистиллята.

Важным этапом процесса ректификации является конденсация паров. Эффективная конденсация паров может в значительной мере повлиять на общую производительность и энергоэффективность процесса. В работе [15] предложен способ частичной конденсации паров ректификационной колонны в воздушном конденсаторе, в который воздух подается вентилятором. В качестве привода вентилятора авторы предлагают использовать двигатель Стирлинга. Его основные преимущества в том, что он может использовать различные источники тепла, включая отходящее тепло от процесса ректификации, снижая потребление энергии из внешних источников, что делает систему более энергоэффективной. Остальная часть паров конденсируется в водяном конденсаторе.

В условиях растущего внимания к экологической устойчивости и энергоэффективности, такие инновации могут стать важным шагом на пути к более устойчивым промышленным процессам. Использование двигателя Стирлинга в ректификационных установках представляет собой перспективное направление для повышения энергоэффективности и экологичности процессов, однако для широкого внедрения необходимо преодолеть ряд технических барьеров.

Целью настоящей статьи является анализ способа повышения эффективности охлаждения теплообменных поверхностей воздушного конденсатора. Одним из путей, позволяющих повысить интенсивность теплообмена, является использование метода охлаждения нагретых поверхностей газокapельным потоком [14].

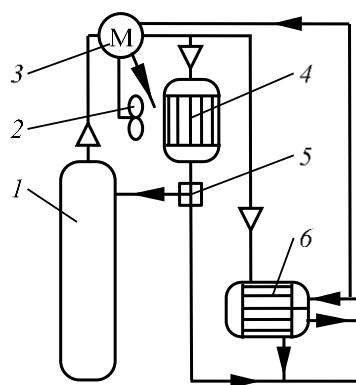


Рис. 1 – Принципиальная модифицированная схема конденсатора для ректификационной колонны: 1 – ректификационная колонна; 2 – вентилятор; 3 – двигатель Стирлинга; 4 – воздушный конденсатор; 5 – распределитель; 6 – водяной конденсатор

Fig. 1 – A modified schematic diagram of a condenser for a distillation column: 1 – a distillation column; 2 – a fan; 3 – a Stirling engine; 4 – an air condenser; 5 – a distributor; 6 – a water condenser

Повышение температуры воздуха на входе вентилятора с принудительной тягой всегда приводит к снижению производительности конденсатора пара с воздушным охлаждением, поэтому в настоящей статье предлагается часть воды пропускать через холодную часть двигателя Стирлинга, а затем впрыскивать ее в подаваемый вентилятором в воздушный конденсатор поток воздуха (рис. 1).

Принцип работы усовершенствованной нами установки [15] заключается в следующем (рис. 1). Пар, покидающий верх колонны 1, движется по паропроводу, содержащему нагреваемую часть двигателя Стирлинга 3. Часть пара проходит в воздушный конденсатор 4. Приводом вентилятора 2 служит двигатель Стирлинга 3, прокачивающий воздух через конденсатор 4. Поступающая в конденсатор 6 холодная вода перед поступлением в конденсатор 6 проходит через холодную часть двигателя Стирлинга 3, далее впрыскивается в поток воздуха, подаваемый вентилятором 2 через воздушный конденсатор 4. Остальная часть пара конденсируется в водяном конденсаторе 6. Конденсат пара из конденсатора 4 проходит в распределитель 5. Часть конденсата из распределителя 5 возвращается в колонну 1 в виде флегмы, остальная часть отводится в виде дистиллята.

Из верхней части колонны пар поступает в конденсатор, где происходит его охлаждение и конденсация. В данном случае, для повышения эффективности охлаждения, в воздух может впрыскиваться вода. Это создает эффект адиабатического охлаждения, т.к. испарение воды поглощает тепло из воздуха, снижая его температуру. Такое распыление жидкости до момента контакта с теплопередающей поверхностью конденсатора помогает обеспечить более равномерное пространственное распределение отвода тепла. Для оценочных расчетов предложенной установки конденсации паров жидкостей при ректификации с двигателем Стирлинга применялась методика расчета, представленная в работе [16].

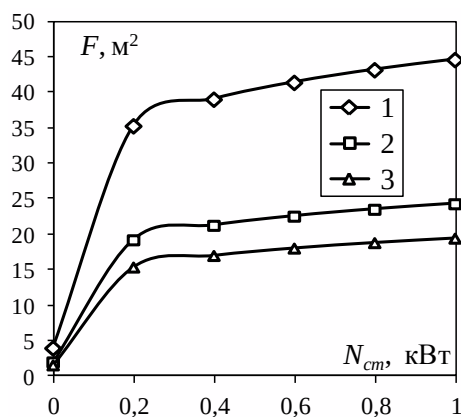


Рис. 2 – Зависимость минимальной площади теплообмена от мощности двигателя Стирлинга, $d_n = 0,025$ м; $S_{mt} = 0,2$ м²; $n_p = 7$; $t_n = 100^\circ\text{C}$; t_b , °C: 1 – -10; 2 – -20; 3 – -30

Fig. 2 – Dependence of the minimum heat exchange area on the power of the Stirling engine, $d_n = 0.025$ m; $S_{mt} = 0.2$ m²; $n_p = 7$; $t_n = 100^\circ\text{C}$; t_b , °C: 1 – -10; 2 – -20; 3 – -30

В условиях капельного орошения с попутным воздушным потоком, нагнетаемым вентилятором, теплоотдача от поверхности конденсатора определяется суммой трех процессов: воздушное охлаждение, течение плёнки и фазовый переход, сопровождающийся тепловым эффектом. Базовыми расчетными параметрами являются: наружный диаметр труб $d_n = 0,025$ м; число рядов труб в пучке в направлении движения потока $n_p = 7$; температура окружающего воздуха $t_b = 20^\circ\text{C}$; температура пара $t_n = 100^\circ\text{C}$; площадь сечения для прохода воздуха в межтрубном пространстве $S_{mt} = 0,2$ м², КПД вентилятора 0,75, КПД двигателя Стирлинга 0,15, плотность орошения $0,0051$ кг/(м²·с).

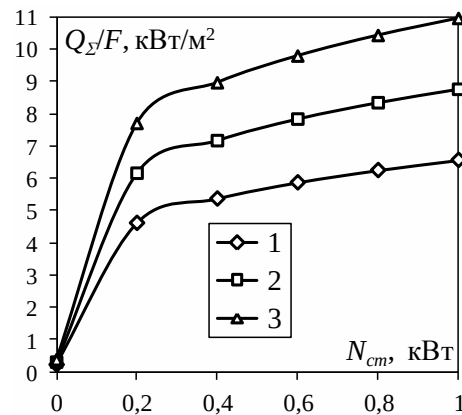


Рис. 3 – Зависимость удельного теплового потока от мощности двигателя Стирлинга, $d_n = 0,025$ м; $S_{mt} = 0,2$ м²; $n_p = 7$; $t_b = 20^\circ\text{C}$; t_n , °C: 1 – 70; 2 – 100; 3 – 130

Fig. 3 – Dependence of the specific heat flux on the power of the Stirling engine, $d_n = 0.025$ m; $S_{mt} = 0.2$ m²; $n_p = 7$; $t_b = 20^\circ\text{C}$; t_n , °C: 1 – 70; 2 – 100; 3 – 130

В сочетании с орошением большой площади поверхности конденсатора более эффективно подается воздух, что позволяет двигателю Стирлинга работать с большей мощностью. Чем больше поток тепла, тем больше энергии требуется для поддержания теплообмена, особенно при высоких температурах окружающего воздуха t_b (рис. 2). При повышении температуры воздуха эффективность теплообмена снижается, что требует увеличения мощности двигателя Стирлинга для обеспечения необходимого уровня теплоотдачи через конденсатор.

Удельный тепловой поток растёт с ростом мощности двигателя Стирлинга, т.к. при этом увеличивается скорость подачи воздуха вентилятором для поддержания достаточного теплообмена, особенно при высоких температурах пара (рис. 3).

При повышении температуры пара внутри конденсатора увеличивается разница температур между паром и охлаждающим воздухом с применением орошения, что способствует лучшему теплообмену и увеличению теплового потока. При этом требуется большая мощность двигателя Стирлинга для поддержания необходимого воздухообмена (рис. 4).

С понижением температуры окружающего воздуха увеличивается поток тепла через конденсатор на той же площади поверхности воздушного конденсатора, при этом требуется большая мощность двигателя Стирлинга (рис. 5).

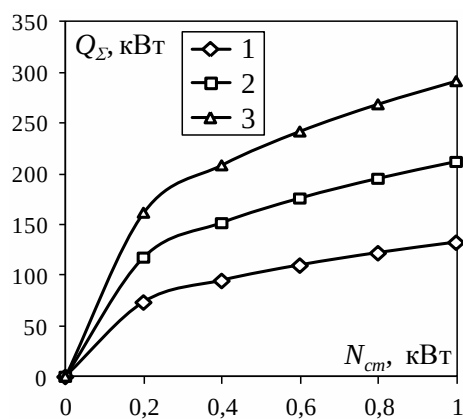


Рис. 4 – Зависимость теплового потока от мощности двигателя Стирлинга, $d_n = 0,025$ м; $S_{mt} = 0,2$ м²; $n_p = 7$; $t_b = 20^\circ\text{C}$; $t_n, ^\circ\text{C}$: 1 – 70; 2 – 100; 3 – 130

Fig. 4 – Dependence of the heat flow on the power of the Stirling engine, $d_n = 0.025$ m; $S_{mt} = 0.2$ m²; $n_p = 7$; $t_b = 20^\circ\text{C}$; $t_n, ^\circ\text{C}$: 1 – 70; 2 – 100; 3 – 130

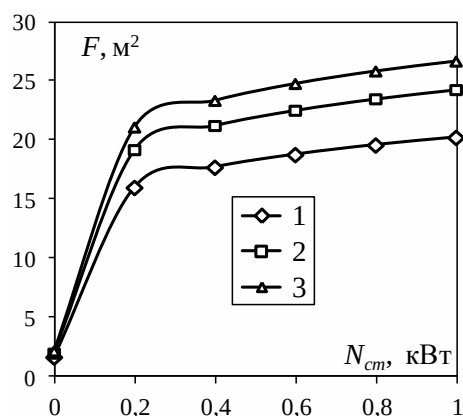


Рис. 5 – Зависимость минимальной площади теплообмена от мощности двигателя Стирлинга, $d_n = 0,025$ м; $S_{mt} = 0,2$ м²; $n_p = 7$; $t_b = 20^\circ\text{C}$; $t_n, ^\circ\text{C}$: 1 – 70; 2 – 100; 3 – 130

Fig. 5 – Dependence of the minimum heat exchange area on the power of the Stirling engine, $d_n = 0.025$ m; $S_{mt} = 0.2$ m²; $n_p = 7$; $t_b = 20^\circ\text{C}$; $t_n, ^\circ\text{C}$: 1 – 70; 2 – 100; 3 – 130

Таким образом, впрыск воды позволяет более эффективно снижать температуру воздуха, что способствует лучшей конденсации паров жидкости из ректификационной колонны. При этом использование двигателя Стирлинга и адиабатического охлаждения в модифицированной установке ректификации снижает потребность в дополнительной энергии для охлаждения. Вентилятор, приводимый в действие двигателем Стирлинга, обеспечивает постоянный поток воздуха через конденсатор.

В целом, при увеличении температуры пара или же понижении температуры воздуха, в том числе за счет орошения, тепловой поток через конденсатор увеличивается. Это приводит к необходимости повышения мощности двигателя Стирлинга для поддержания необходимого потока воздуха через конденсатор. Стоит отметить необходимость тщательного контроля количества впрыскиваемой воды во избежание избыточной влажности, которая может повлиять на эффективность работы системы в целом, и для обеспечения защиты

компонентов системы от коррозии и накипи, вызванных контактом с водой.

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of sciences (postdoctoral students) in order to defend their doctoral dissertation, perform research work, as well as perform labor functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan within the framework of the State Program of the Republic of Tatarstan «Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan».

Литература

1. А.И., Шинкевич, И.А. Зарайченко, *Вестник Казанского технологического университета*, **13**, 9, 897-900 (2010).
2. А.А. Черенцова, *Энерго-и ресурсосбережение: учеб. пособие*, Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, Хабаровск, 2018. 125 с.
3. М.Г. Гарипов, *Вестник технологического университета*, **18**, 20, 119-120 (2015).
4. Г.Б. Дмитриева, М.Г. Беренгартен, М.И. Ключенкова, А.С. Пушнов, *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, **8**, 15-17 (2005).
5. Пат. РФ № 2586037, заявл. 09.06.2015, опубл. 10.06.2016.
6. С.К. Чуракова, И.Д. Нестеров, К.Ф. Богатых, *Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт*, **4**, 51-56 (2013).
7. Ю.Н. Лебедев, В.Г. Чекменев, Т.М. Зайцева, *Химия и технология топлив и масел*, **1**, 48-53 (2004).
8. Н.Р., Сайфуллин, Р.Г. Гареев, *Химия и технология топлив и масел*, **6**, 8-10 (1999).
9. С.В. Максимов, А.И. Калошин, О.Л. Карпиловский, *Химия и технология топлив и масел*, **4**, 28-35 (2000).
10. К.Б. Рудяк, Г.Г. Мусиенко, Ю.Ю. Ратовский, Н.Н. Качанов, *Химия и технология топлив и масел*, **5**, 40-43 (2000).
11. Ю.Ю. Ратовский, Ю.Н. Лебедев, В.Г. Чекменев, *Химия и технология топлив и масел*, **1**, 55-57 (2004).
12. Д.А. Земцов, И.В. Земцова, Ю.А. Иванова, Н.А. Войнов, *Вестник Пермского государственного технического университета. Химическая технология и биотехнология*, **2**, 146-156 (2018).
13. Д.А. Земцов, Н.В. Дерягина, В.А. Кожухов, Ю.Д. Алашкевич, Н.А. Войнов, *Хвойные бореальной зоны*, **36**, 5, 471-476 (2018).
14. В. Нисковских, *Наука и жизнь*, **3**, 32 (2007).
15. О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев, А.Н. Николаев, *Вестник технологического университета*, **27**, 5, 77-81 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_5_77
16. Z. Zhang, P.-X. Jiang, Y.-T. Hu, J. Li, *Experimental Heat Transfer*, **26**, 5, 453-469 (2013). DOI: 10.1080/08916152.2012.719063

References

1. A.I., SHinkevich, I.A. Zarajchenko, *Herald of Kazan Technological University*, **13**, 9, 897-900 (2010).
2. A.A. SHerencova, *Energo-i resursosberezhenie: ucheb. posobie*, Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, Habarovsk, 2018. 125 p.

3. M.G. Garipov, *Herald of Technological University*, 18, 20, 119-120 (2015).
4. G.B. Dmitrieva, M.G. Berengarten, M.I. Klyushenkova, A.S. Pushnov, *Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 8, 15–17 (2005).
5. Pat. RF № 2586037, zayavl. 09.06.2015, publ. 10.06.2016.
6. S.K. CHurakova, I.D. Nesterov, K.F. Bogatyh, *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoj opyt*, 4, 51-56 (2013).
7. YU.N. Lebedev, V.G. Chekmenev, T.M. Zajceva, *Himiya i tekhnologiya topliv i masel*, 1, 48-53 (2004).
8. N.R., Sajfullin, R.G. Gareev, *Himiya i tekhnologiya topliv i masel*, 6, 8-10 (1999).
9. S.V. Maksimov, A.I. Kaloshin, O.L. Karpilovskij, *Himiya i tekhnologiya topliv i masel*, 4, 28-35 (2000).
10. K.B. Rudyak, G.G. Musienko, YU.YU. Ratovskij, N.N. Kochanov, *Himiya i tekhnologiya topliv i masel*, 5, 40-43 (2000).
11. YU.YU. Ratovskij, YU.N. Lebedev, V.G. Chekmenev, *Himiya i tekhnologiya topliv i masel*, 1, 55-57 (2004).
12. D.A. Zemcov, I.V. Zemcova, YU.A. Ivanova, N.A. Vojnov, *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Himicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*, 2, 146-156 (2018).
13. D.A. Zemcov, N.V. Deryagina, V.A. Kozhuhov, YU.D. Alash-kevich, N.A. Vojnov, *Hvojnye boreal'noj zony*, 36, 5, 471-476 (2018).
14. V. Niskovskih, *Nauka i zhizn'*, 3, 32 (2007).
15. O.S. Dmitrieva, A.V. Dmitriev, A.N. Nikolaev, *Herald of Technological University*, 27, 5, 77-81 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_5_77
16. Z. Zhang, P.-X. Jiang, Y.-T. Hu, J. Li, *Experimental Heat Transfer*, 26, 5, 453-469 (2013). DOI: 10.1080/08916152.2012.719063

© **О. С. Дмитриева** – к.т.н., доцент кафедры Оборудования пищевых производств, Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, ja_deva@mail.ru; **А. В. Дмитриев** – д.т.н., зав. кафедрой АТПП, Казанский государственный энергетический университет, ieremiada@gmail.com; **М. Г. Гарипов** – к.т.н., доцент кафедры Процессы и аппараты химической технологии Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) КНИТУ, Нижнекамск, Россия, vaelbuz1949@yandex.ru.

© **O. S. Dmitrieva** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Department of Food Production Equipment, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, ja_deva@mail.ru; **A. V. Dmitriev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Head of the ATPP department, Kazan State Energy University, ieremiada@gmail.com; **M. G. Garipov** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Department of Processes and Devices of Chemical Technology, Nizhnekamsk Chemical Technological Institute branch of the Kazan National Research Technological University, Nizhnekamsk, Russia, vaelbuz1949@yandex.ru.