

УДК 621.56:658.261

DOI 10.62595/1819-5245-2026-2-82-89

## ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ СМЕСЕВОГО ФРЕОНА R410A НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ОРЕБРЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

**А. В. ОВСЯННИК, В. П. КЛЮЧИНСКИЙ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*Посвящена экспериментальному исследованию теплообмена при конденсации озонобезопасного смешанного хладагента R410A на горизонтальных оребренных трубах. Рассмотрены особенности гидродинамики и теплоотдачи при гравитационном стоке пленки конденсата с поверхности сложной геометрии. Эксперименты проведены на специальном стенде с использованием трубки, имеющей ребра трапецевидного профиля и наклон для улучшения стока жидкости. Выполнен анализ распределения температур по высоте ребра, определены локальные и общие коэффициенты теплоотдачи, а также толщина пленки конденсата. Полученные данные сопоставлены с классической теорией Нуссельта. Установлены закономерности влияния теплового потока и температурного напора на интенсивность теплообмена. Отмечено, что результаты работы могут быть использованы при проектировании эффективного теплообменного оборудования для систем кондиционирования и холодильной техники.*

**Ключевые слова:** R410A, смешанного хладагента, конденсация, температурный гайд, оребренные поверхности, коэффициент теплоотдачи, пленка конденсата, экспериментальное исследование, теплообмен, хладагент.

**Для цитирования.** Овсянник, А. В. Теплообмен при конденсации смешанного фреона R410A на горизонтальных оребренных поверхностях / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2026. – № 2 (105). – С. 82–89. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-2-82-89>

## HEAT EXCHANGE DURING CONDENSATION OF MIXED FREON R410A ON HORIZONTAL FINNED SURFACES

**A. V. OVSYANNIK, V. P. KLYUCHINSKY**

*Sukhoi State Technical University of Gomel,  
the Republic of Belarus*

*This paper presents an experimental study of heat transfer during the condensation of ozone-safe R410A mixed refrigerant on horizontal finned tubes. The hydrodynamics and heat transfer characteristics of gravity-driven condensate film drainage from a complex surface are examined. Experiments were conducted on a specialized rig using a tube with trapezoidal fins and a slope to improve liquid drainage. An analysis of the temperature distribution along the fin height was performed, determining local and global heat transfer coefficients, as well as the condensate film thickness. The obtained data are compared with classical Nusselt theory. Patterns of influence of heat flow and temperature difference on heat transfer intensity are established. It is noted that the results of this study can be used in the design of efficient heat exchange equipment for air conditioning and refrigeration systems.*

**Keywords:** R410A, mixed refrigerant, condensation, temperature glide, finned surfaces, heat transfer coefficient, condensate film, experimental study, heat exchange, refrigerant.

**For citation.** Ovsyannik A. V., Klyuchinsky V. P. Heat exchange during condensation of mixed freon R410A on horizontal finned surfaces. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2026, no. 2 (105), pp. 82–89 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2026-2-82-89>

### Введение

Озонобезопасный смесевой хладагент R410A представляет собой двойную азеотропную смесь фреонов R32 и R125 в соотношении 50 : 50 и применяется в качестве альтернативного хладагента R22 для заправки новых систем кондиционирования воздуха высокого давления [6]. Применяется также в сплит-системах и тепловых насосах для охлаждения и отопления. Применяемые масла – полиэфирные. Величина удельной холодопроизводительности R410A примерно на 50 % выше чем у R22 при равных температурах конденсации, а рабочее давление в цикле на 35–45 % выше, чем у R22, что приводит к более высоким прочностным характеристикам оборудования. В связи с этим необходимо вносить конструктивные изменения в компрессор и теплообменники [6]. Это приводит к увеличению капитальных затрат на изготовление оборудования. Температура кипения R410A при нормальных условиях составляет  $-51,5$  °C, что предполагает его использование также в низкотемпературных системах охлаждения взамен R22. Теплофизические характеристики R410A приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Теплофизические характеристики R410A

Температура кипения при нормальных условиях $t_{кв}$ , °C	Теплота парообразования $r$ , кДж/кг	Критическая температура $t_{кр}$ , °C	Критическое давление $p_{кр}$ , МПа	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/м · К	Удельная теплоемкость $c_p$ , кДж/кг · К	Давление насыщения $p_n \cdot 10^{-5}$ , Па
-51,5	270	72,13	4,93	1340	0,108 (при -15) 0,087 (при +25)	1,692 (при +25)	1,1 (при -50) 16,4 (при +25)

Цель работы – теоретическое и экспериментальное определение интенсивности теплоотдачи смесевых хладагентов R410A при конденсации его паров на горизонтальных ребренных поверхностях; определение толщины пленки конденсата при ее гравитационном течении.

### Основная часть. Эксперимент

Экспериментальные исследования проводились на экспериментальном стенде, описанном в [1, 2]. Конденсация паров 410A осуществлялась на горизонтальной трубке с ребром трапециевидного профиля высотой 25 мм в [1, рис. 1]. Термопары устанавливались в основании ребра, в среднем его сечении и на вершине ребра, что позволяло, кроме всего прочего, определять эффективность ребра.

Рассматривалась пленочная конденсация медленно движущегося сухого насыщенного пара в конденсационной камере на горизонтальной ребренной трубке, имеющей уклон  $5^\circ$  относительно горизонтальной оси. Это обеспечивало интенсивное гравитационное течение пленки конденсата в сторону уклона из-за малой вязкости 410A и освобождение поверхности теплообмена от конденсата.

Режимные параметры при проведении экспериментальных исследований составляли:

- давление насыщения  $p_n = 1,2\text{--}1,5$  МПа;
- температура насыщения  $t_n = +13\text{...}+22$ ;
- плотность теплового потока относительно всей ребренной поверхности  $q_0 = 960\text{--}13361$  Вт/м<sup>2</sup>.

Геометрические характеристики ребра, их расположение и ориентация в пространстве представлены в табл. 1 и в [1, рис. 3].

Наружная поверхность продольно оребренной трубки, на которой происходит конденсация паров R410A, представляет собой сумму поверхностей ребер и межреберной поверхности, причем ребра разнонаправленно ориентированы в пространстве. Исследуемый образец установлен с наклоном к горизонтальной оси, как отмечалось выше, для беспрепятственного стока конденсата с поверхности теплообмена. Для определения гидродинамических характеристик движущейся пленки по поверхности оребренной трубки необходимо ввести понятие некоей средней скорости движения пленки, эквивалентной скорости движения ее по вертикальной поверхности, представляющей собой развертку оребренной поверхности. Эта средняя скорость может быть определена по расходу конденсата и площади поперечного сечения пленки конденсата. Такой подход к определению скорости движения пленки жидкости может быть оправдан тем, что отсутствуют систематизированные данные по течению жидкостей по поверхности сложной геометрии и различной ориентации в пространстве. Эти процессы и особенности течения жидкости необходимо знать и учитывать при определении гидродинамических характеристик стекающей пленки конденсата и термических характеристик, в частности, интенсивности теплоотдачи, учитывая то обстоятельство, что при конденсации пара на поверхности теплообмена теплота конденсации отводится теплопроводностью и при определенных условиях – вынужденной конвекцией при граничных условиях третьего рода [2].

Таким образом, знание гидродинамических характеристик гравитационно стекающей пленки конденсата с поверхности теплообмена позволит определить значение интенсивности теплоотдачи ребра и всей оребренной поверхности.

Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась на основании методики, описанной в [1–5].

### **Результаты экспериментальных исследований и их анализ**

В соответствии с режимными параметрами и геометрическими характеристиками образца при фиксированном значении отводимого теплового потока определялась тепловая мощность, проходящая через основание ребер  $Q_{\text{осн}}$  и межреберную поверхность  $Q_{\text{мп}}$ , а также плотности теплового потока относительно площади ребер  $q_{\text{р}}$ , относительно межреберной поверхности  $q_{\text{мп}}$ , относительно несущей поверхности  $q_{\text{нес}}$  и относительно всей оребренной поверхности  $q_0$  [2].

Методика определения экспериментальных коэффициентов теплоотдачи по элементам оребренной поверхности и общего коэффициента теплоотдачи описана в [2, 4]. В более ранних работах отмечалось, что температура в основании ребра равна температуре межреберной поверхности и равна температуре несущей поверхности, т. е.  $t_1 = t_{\text{мп}} = t_{\text{нес}}$ .

Результаты расчетов плотностей тепловых потоков, коэффициентов теплоотдачи и температурных напоров «температура насыщения – температура поверхности» представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Результаты расчетов

$Q$ , Вт	$q_p$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\alpha_p$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К	$\Delta t_p$ , °С	$q_{mp}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\alpha_{mp}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К	$\Delta t_{mp}$ , °С	$Q_0$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\alpha_0$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К	$\Delta t_0$ , °С
30	728	910	0,8	3474	2316	1,5	960	835	1,15
120	2913	1713	1,7	13897	6948	2,0	3602	1947	1,85
285	6918	4612	1,5	33005	13202	2,5	8059	4079	2,0
500	12138	3793	3,2	57904	10528	5,5	13361	3072	4,35

Определение общего (приведенного) коэффициента теплоотдачи при конденсации неподвижного или медленно движущегося пара на вертикальной поверхности при гравитационно стекающей пленке конденсата осуществлялось по зависимости [7]:

$$\alpha_0 = \eta_p \alpha_p \frac{F_p}{F_p + F_{mp}} + \alpha_{mp} \frac{F_{mp}}{F_p + F_{mp}}. \quad (1)$$

Здесь  $\alpha_p = \frac{q_p}{(t_n - t_p^{cp})}$  – коэффициент теплоотдачи ребра, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$\alpha_{mp} = \frac{q_{mp}}{(t_n - t_{осн.р})}$  – коэффициент теплоотдачи межреберной поверхности, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$\eta_p = \frac{t_n - t_p^{вер}}{t_n - t_{осн.р}}$  – КПД ребра, где  $t_p^{cp}$  – средняя температура ребра, °С;  $t_{осн.р}$  – средняя температура в основании ребра, °С;  $t_p^{вер}$  – средняя температура вершины ребра, °С.

Толщина гравитационно стекающей пленки конденсата по ребру и общая на оребренной поверхности определялась по экспериментальным данным коэффициентов теплоотдачи ребра и общего по формулам:

$$\delta_p^3 = \lambda / \alpha_p \quad \text{и} \quad \delta_0^3 = \lambda / \alpha_0 \quad (2)$$

и сравнивалась с расчетной толщиной пленки, определяемой по формуле Нуссельта. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Значения коэффициентов теплоотдачи и толщины пленки конденсата на ребре и оребренной поверхности

$Q$ , Вт	По формуле Нуссельта					
	$\alpha_p$	$\alpha_{mp}$	$\alpha_0$	$\delta_p$	$\delta_{mp}$	$\delta_0$
30	5192	2511	4757	$2,08 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$2,27 \cdot 10^{-5}$
120	4200	4085	4183	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,57 \cdot 10^{-5}$	$2,51 \cdot 10^{-5}$
285	4375	3846	3818	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$2,75 \cdot 10^{-5}$
500	3170	2812	2812	$2,84 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$

Продолжение табл. 3

$Q$ , Вт	Эксперимент						
	$\alpha_p'$	$\alpha_{mp}'$	$\alpha_0'$	$\delta_p'$	$\delta_{mp}'$	$\delta_0'$	$\Delta_0$
30	910	2316	835	$11,8 \cdot 10^{-5}$	$4,71 \cdot 10^{-5}$	$12,9 \cdot 10^{-5}$	82 %
120	1713	6948	1947	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$5,54 \cdot 10^{-5}$	53 %
285	4612	13202	4079	$2,27 \cdot 10^{-5}$	$0,8 \cdot 10^{-5}$	$2,57 \cdot 10^{-5}$	6,4 %
500	3793	10528	3072	$2,37 \cdot 10^{-5}$	$0,85 \cdot 10^{-5}$	$2,92 \cdot 10^{-5}$	8,5 %

Данные, полученные в результате экспериментальных и теоретических исследований, представлены в виде графических зависимостей, которые позволяют проводить анализ полученных результатов и протекающих процессов гидродинамики и теплообмена при конденсации паров R410A на вертикальной поверхности при гравитационном течении пленки конденсата.

Графические зависимости:

– влияние плотности теплового потока на ребре на коэффициент теплоотдачи ребра (рис. 1);

– влияние плотности теплового потока оребренной поверхности на коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности (рис. 1);

– влияние температурного напора по ребру на коэффициент теплоотдачи ребра (рис. 4);

– влияние температурного напора оребренной поверхности на коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности (рис. 4);

– влияние плотности теплового потока по ребру и оребренной поверхности на толщину пленки конденсата на ребре и оребренной поверхности (рис. 2).

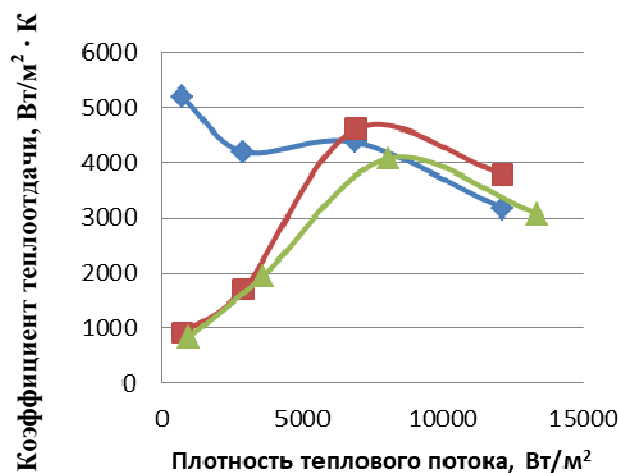


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока:

— по Нуссельту; — эксперимент (ребро);  
— эксперимент (оребренная поверхность)

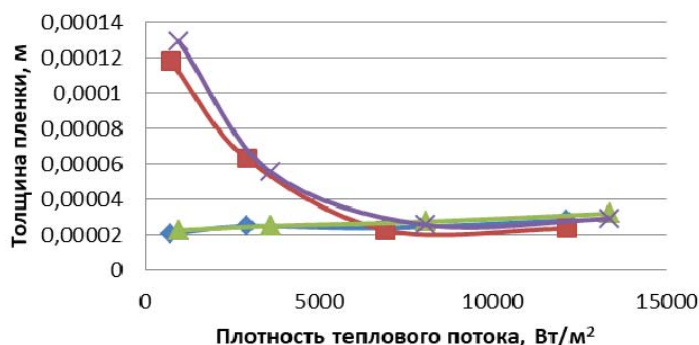


Рис. 2. Зависимость толщины пленки ребра и оребренной поверхности от плотности теплового потока по ребру и оребренной поверхности:

— по Нуссельту (ребро); — эксперимент (ребро);  
— по Нуссельту (оребренная поверхность);  
— эксперимент (оребренная поверхность)

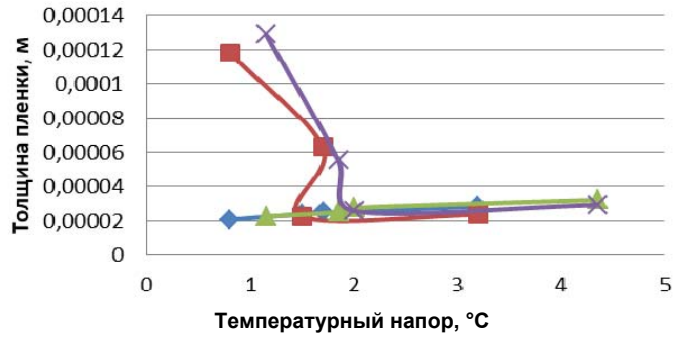


Рис. 3. Зависимость толщины пленки ребра и ребренной поверхности от температурного напора по ребру и ребренной поверхности:

— по Нуссельту (ребро); — эксперимент (ребро);  
 — по Нуссельту (ребренная поверхность);  
 — эксперимент (ребренная поверхность)

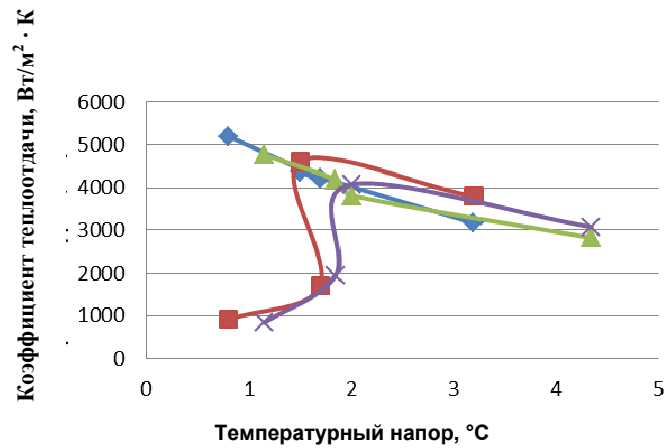


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи ребра и ребренной поверхности от температурного напора по ребру и ребренной поверхности:

— по Нуссельту (ребро); — эксперимент (ребро);  
 — по Нуссельту (ребренная поверхность);  
 — эксперимент (ребренная поверхность)

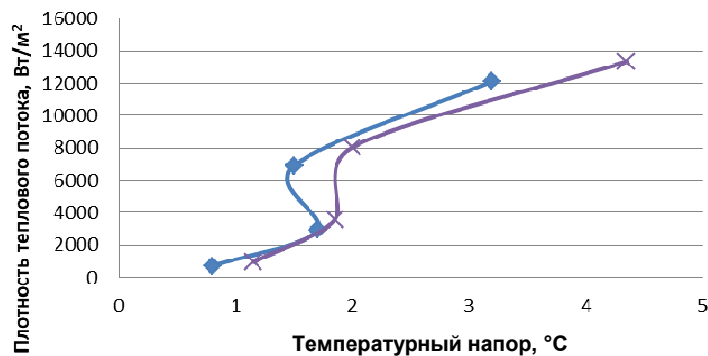


Рис. 5. Зависимость плотности теплового потока ребра и ребренной поверхности от температурного напора по ребру и ребренной поверхности:

— ребро; — ребренная поверхность

Анализ графических зависимостей (рис. 1–5) дает возможность оценить тенденцию изменения зависимых параметров от различных факторов, характеризующих протекаемый процесс, и качественно оценить вклад каждого вида теплообмена (конденсации и конвекции) в общее количество теплоты, передаваемое теплообменной поверхностью. На теплообменной поверхности конденсации могут протекать процессы охлаждения пара до температуры насыщения, конденсации пара и переохлаждения конденсата.

Кроме того, основным результатом анализа графических зависимостей является определение оптимальных значений коэффициентов теплоотдачи (рис. 1) при оптимальных значениях плотностей тепловых потоков и температурных напоров (рис. 4). Анализ графических зависимостей показывает, что оптимальные значения коэффициентов теплоотдачи оребренной поверхности соответствуют значениям плотностей тепловых потоков относительно всей оребренной поверхности в диапазоне  $7000\text{--}15000\text{ Вт/м}^2$ , соответствуют расчетному режиму работы поверхности конденсации и хорошо согласуются с значениями  $\alpha$  по формуле Нуссельта. Величина неопределенности составляет 15–20 %. Значения температурных напоров по всей оребренной поверхности для оптимальной плотности теплового потока составляют 1,5–4,5 К (рис. 3 и 4), что соответствует величине толщины пленки конденсата (3,4–3,6)  $10^{-5}$  м. В диапазоне плотностей тепловых потоков  $1000\text{--}7000\text{ Вт/м}^2$  поверхность конденсации работает в эксплуатационном режиме, при котором помимо теплоты конденсации отводится и теплота конвекции. При этом режиме средний коэффициент теплоотдачи не может быть определен по формуле Нуссельта, так как последняя учитывает только теплоту конденсации.

### Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований по гидродинамике и теплообмену при конденсации неподвижных паров хладагента R410A на оребренной горизонтальной поверхности теплообмена установлено следующее:

1. На поверхности теплообмена существуют два режима работы, соответствующие расчетному режиму при  $q = 7000\text{--}15000\text{ Вт/м}^2$  и эксплуатационному – при  $q = 1000\text{--}7000\text{ Вт/м}^2$ , при котором существует переохлаждение ламинарно движущегося по поверхности теплообмена конденсата, и средний коэффициент теплоотдачи не может быть определен по формуле Нуссельта, так как последняя учитывает только теплоту конденсации.

2. Экспериментально определены и расчетным путем верифицированы оптимальные значения коэффициентов теплоотдачи, плотности тепловых потоков, температурных напоров и толщины пленки конденсата как в расчетном режиме, так и в эксплуатационном.

3. Определены области применимости формулы Нуссельта для определения гидродинамических и тепловых характеристик процесса конденсации.

### Литература

1. Овсянник, А. В. Экспериментальное исследование теплообмена при конденсации смесевых хладагентов и их маслофреоновых смесей на горизонтальных теплообменных поверхностях / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский, В. П. Никитенко // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2023. – № 3 (94). – С. 58–66.
2. Овсянник, А. В. Комплексный экспериментальный стенд для исследования процессов теплообмена при кипении и конденсации / А. В. Овсянник // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2016. – № 4 (67). – С. 79–83.

3. Овсянник, А. В. Гидродинамика и теплообмен при конденсации паров на вертикальной стенке с учетом конвекции ламинарно стекающей пленки / А. В. Овсянник // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 1 (100). – С. 93–98.
4. Овсянник, А. В. Гидродинамика и теплообмен при течении пленки конденсата по вертикальной поверхности / А. В. Овсянник // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 4 (99). – С. 50–57.
5. Овсянник, А. В. Теплообмен при конденсации чистого озонобезопасного хладагента R404A на продольно-ребренных горизонтальных трубах / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 4 (99). – С. 58–69.
6. Бабакин, Б. С. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе / Б. С. Бабакин, В. И. Стефанчук, Е. Е. Ковтунов. – М. : Колос, 2000. – 160 с.
7. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.

### References

1. Ovsyannik A. V., Klyuchinskii V. P., Nikitenko V. P. Experimental study of heat transfer during condensation of mixed refrigerants and their oil-freon mixtures on horizontal heat exchange surfaces. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2023, no. 3 (94), pp. 58–66 (in Russian).
2. Ovsyannik A. V. Complex experimental setup for studying heat transfer processes during boiling and condensation. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2016, no. 4 (67), pp. 79–83 (in Russian).
3. Ovsyannik A. V. Hydrodynamics and heat transfer during vapor condensation on a vertical wall, taking into account the convection of a laminar flowing film. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 1 (100), pp. 93–98 (in Russian).
4. Ovsyannik A. V. Hydrodynamics and heat transfer during the flow of a condensate film over a vertical surface. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 4 (99), pp. 50–57 (in Russian).
5. Ovsyannik A. V., Klyuchinskii V. P. Heat exchange during condensation of pure ozone-safe refrigerant R404A on longitudinally finned horizontal tubes. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 4 (99), pp. 58–69 (in Russian).
6. Babakin B. S., Stefanчук V. I., Kovtunov E. E. *Alternative refrigerants and refrigeration system service based on them*. Moscow, Kolos Publ., 2000. 160 p. (in Russian).
7. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Heat transfer*. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 416 p. (in Russian).

Поступила 23.03.2026 г.