

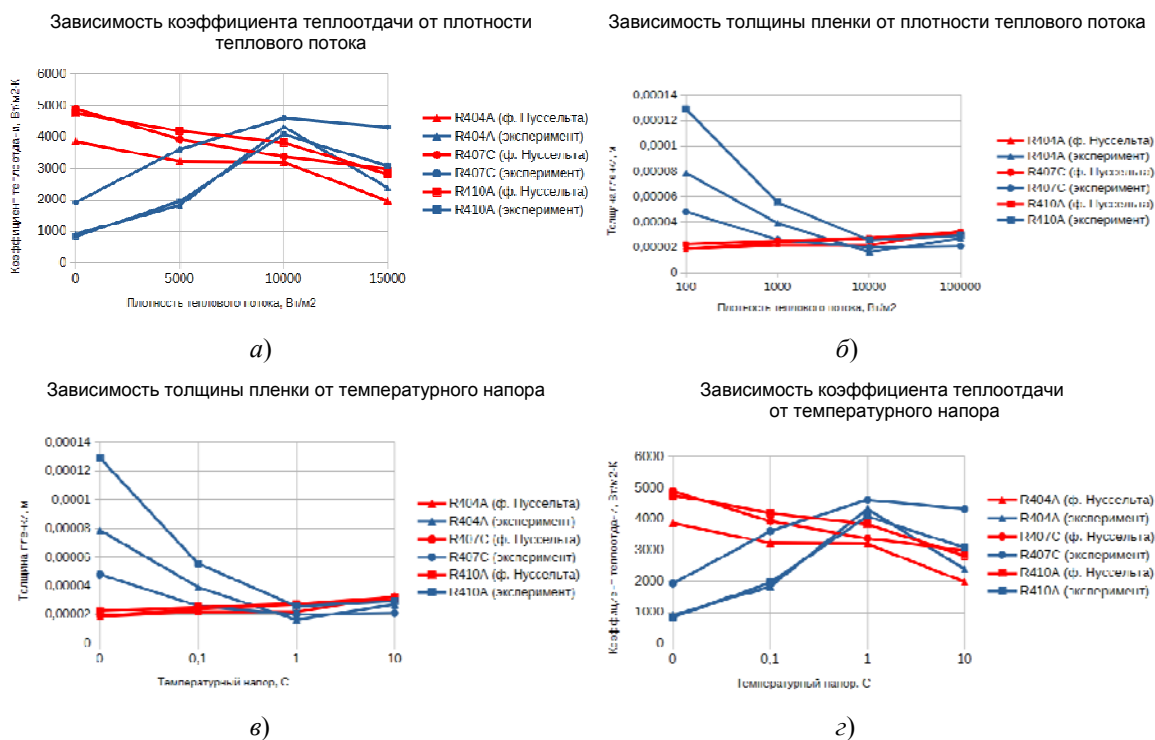


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных фреонов и данных по Нуссельту

Полученные зависимости коэффициентов теплоотдачи хорошо согласуются при значениях плотности теплового потока $q = 7000\text{--}15000 \text{ Вт/м}^2$ с коэффициентами теплоотдачи полученными, по формуле Нуссельта (неопределенность составляет $< 17\%$).

Литература

1. 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. – С. 50–57.
2. Овсянник, А. В. Теплообмен при конденсации чистого озонобезопасного хладагента R404A на продольно-оребрённых горизонтальных трубах / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 4. – С. 58–69.

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ ОЗОНОБЕЗОПАСНОГО ХЛАДАГЕНТА R410A НА ОРЕБРЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Д. Г. Шутов

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

Представлены результаты анализа исследования процессов пленочной конденсации хладагента R410A на горизонтальной продольно-оребрённой трубке с уклоном. Рассмотрены теплофизические свойства хладагента, а также влияние тепловой нагрузки и темпера-

турного напора на коэффициенты теплоотдачи и толщину пленки. На основе данных построены графические зависимости, позволяющие оценить гидродинамику и интенсивность теплообмена на оребренной поверхности.

Ключевые слова: хладагент R410A, пленочная конденсация, продольно-оребренная поверхность, коэффициент теплоотдачи, тепловой поток, температурный напор, толщина конденсатной пленки.

Озонобезопасный смесевой хладагент R410A представляет собой двойную азеотропную смесь фреонов R32 и R125 в соотношении 50/50 и применяется для заправки новых систем кондиционирования воздуха высокого давления, в сплит-системах и тепловых насосах для охлаждения и отопления. Применяемые масла – полиэфирные. Температура кипения R410A при нормальных условиях составляет $-51,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, что предполагает его использование и в низкотемпературных системах охлаждения.

Таблица 1

Теплофизические характеристики R410A

Температура кипения при нормальных условиях	Теплота парообразования, кДж/кг	Критическая температура $t_{кр}$, $^{\circ}\text{C}$	Критическое давление $P_{кр}$, МПа	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/мК	Удельная теплоемкость C_p , кДж/кг	Давление насыщения $P \cdot 10(-5)$
-51,5	270,3	72,13	4,93	1340	0,108 (при 15 $^{\circ}\text{C}$) 0,087 (при 25 $^{\circ}\text{C}$)	1,692	1,1 (при -50 $^{\circ}\text{C}$) 16,4 (при 25 $^{\circ}\text{C}$)

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

Конденсация паров 410A осуществлялась на горизонтальной трубке с ребром трапецевидного профиля высотой 25 мм (рис. 1).

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. Для определения гидродинамических характеристик движущейся пленки по поверхности оребренной трубки необходимо ввести понятие некой 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.

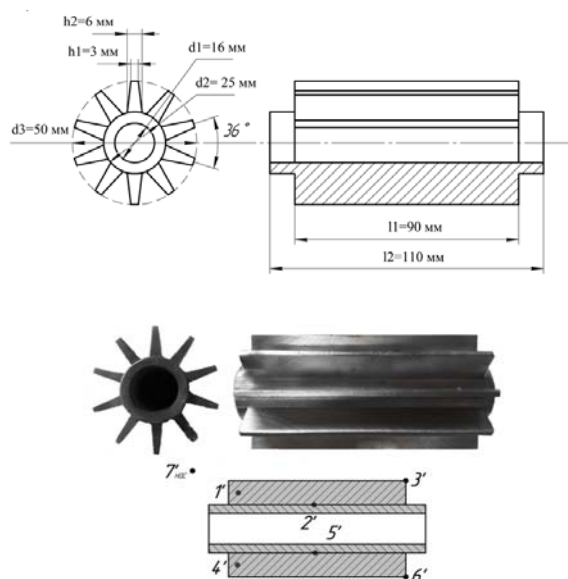


Рис. 1. Экспериментальный образец с расположением термопар

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

Теоретические исследования. Плотности тепловых потоков, коэффициенты теплоотдачи и температурные напоры «температура насыщения – температура поверхности» представлены в табл. 2.

Таблица 2

Q , Вт	q_p , Вт/м ²	α_p , Вт/м ² · К	Δt_p , °С	q_{mp} , Вт/м ²	α_{mp} , Вт/м ² · К	Δt_{mp} , °С	q_0 , Вт/м ²	α_0 , Вт/м ² · К	Δt_0 , °С
30	728	91	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	2138	3793	3,2	57904	10528	5,5	3361	3072	4,35

Толщина гравитационно стекающей пленки конденсата по ребру и общая оребренной поверхности определялась по экспериментальным данным коэффициентов теплоотдачи ребра и общего. Результаты представлены в табл. 3

Таблица 3

Q , Вт	По формуле Нуссельта					
	α_p , Вт/м ² · К	α_{mp} , Вт/м ² · К	α_0 , Вт/м ² · К	δ_p , м	δ_{mp} , м	δ_0 , м
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	$2,84 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$3,21 \cdot 10^{-5}$

Продолжение табл. 3

Q , Вт	Экспериментальный					
	α_p^3 , Вт/м ² · К	α_{mp}^3 , Вт/м ² · К	α_0^3 , Вт/м ² · К	δ_p^3 , м	δ_{mp}^3 , м	δ_0^3 , м
30	910	2316	835	$11,8 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$12,9 \cdot 10^{-5}$
120	1713	6948	1947	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$5,54 \cdot 10^{-5}$
285	4612	13202	4079	$2,57 \cdot 10^{-5}$	$0,8 \cdot 10^{-5}$	$2,57 \cdot 10^{-5}$
500	3793	10528	3072	$2,37 \cdot 10^{-5}$	$0,85 \cdot 10^{-5}$	$2,92 \cdot 10^{-5}$

Данные в виде графических зависимостей представлены на (рис. 2–7), которые позволяют проводить анализ полученных результатов и протекающих процессов гидродинамики и теплообмена при конденсации паров 410А на вертикальной поверхности при гравитационном течении пленки конденсата.

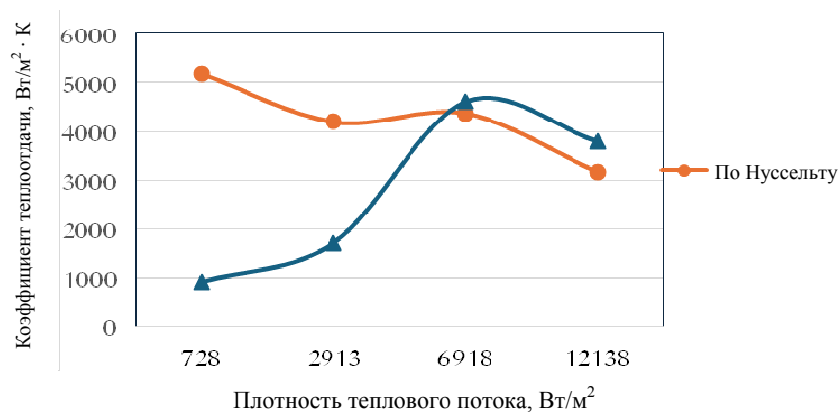


Рис. 2. Влияние плотности теплового потока на ребре на коэффициент теплоотдачи ребра

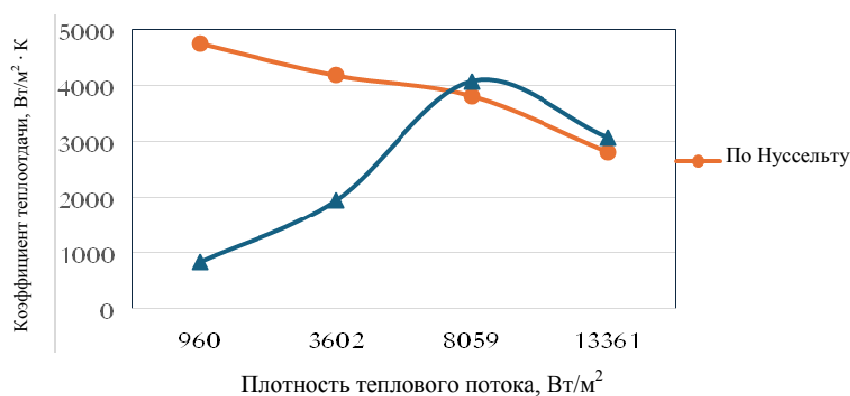


Рис. 3. Влияние плотности теплового потока оребренной поверхности на коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности

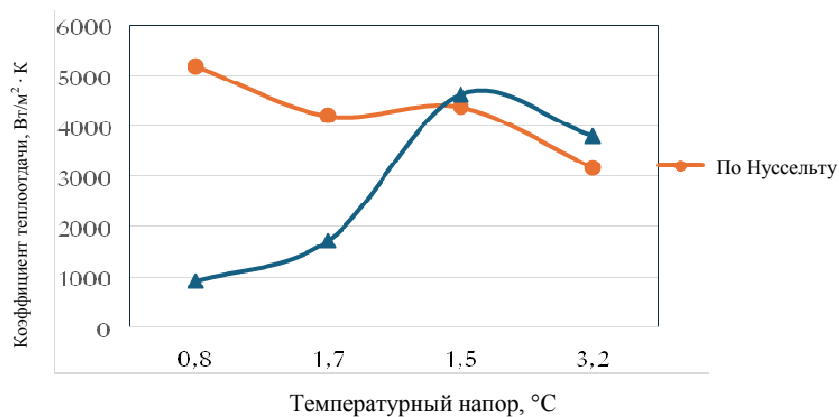


Рис. 4. Влияние температурного напора по ребру на коэффициент теплоотдачи ребра

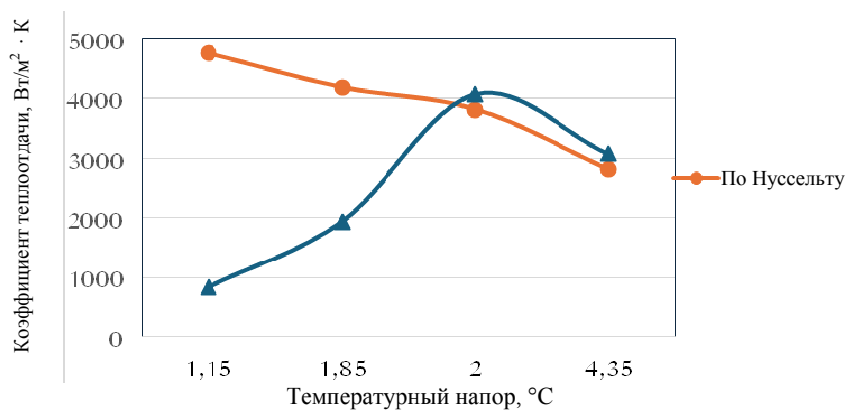


Рис. 5. Влияние температурного напора оребренной поверхности на коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности

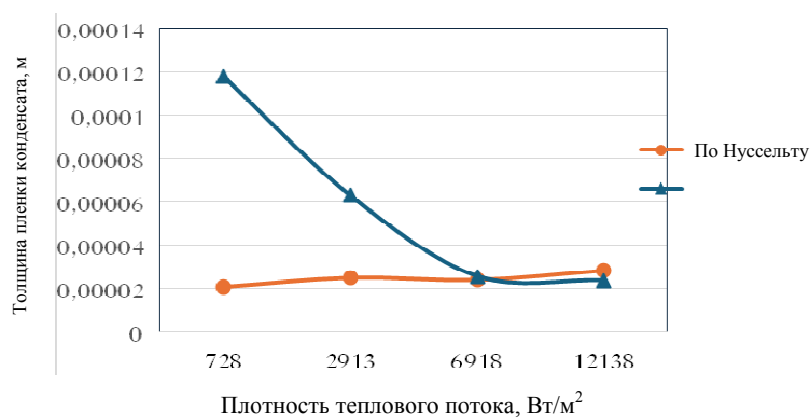


Рис. 6. Влияние плотности теплового потока по ребру на толщину пленки конденсата на ребре

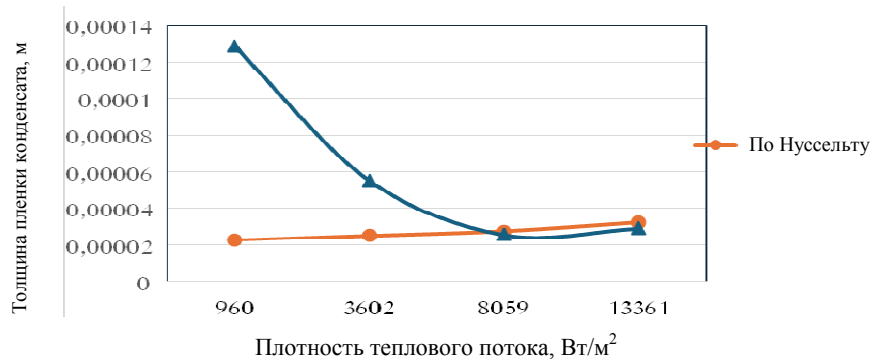


Рис. 7. Влияние плотности теплового потока по оребренной поверхности на толщину пленки конденсата на оребренной поверхности

Исследования показали, что при конденсации R410C на продольно-оребреной поверхности существует оптимальный режим работы ($q \approx 6918 \text{ Вт/м}^2$, $\Delta t \approx 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$), при котором достигаются максимальные коэффициенты теплоотдачи $\alpha_r = 4612 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$, $\alpha_o = 44079 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$) и минимальная толщина пленки конденсата. Дальнейшее увеличение тепловой нагрузки приводит к утолщению пленки и снижению интенсивности теплообмена. Установлено, что температурный глайд R410C увеличивается с ростом нагрузки от 1,15 до 4,35 $^\circ\text{C}$ и оказывает значительное влияние на эффективность конденсации: максимальная теплоотдача достигается при глайде 2,0 $^\circ\text{C}$, а его дальнейший рост снижает эффективность.

Проведенные исследования показали, что характер изменения коэффициентов теплоотдачи и толщины конденсатной пленки R410A на продольно-оребреной поверхности определяется тепловой нагрузкой и температурным напором, что подтверждается полученными графическими зависимостями. Установлено наличие выраженного оптимума: при тепловом потоке порядка $q \approx 6900 \text{ Вт/м}^2$ и температурном глайде около 2 $^\circ\text{C}$ достигаются максимальные значения коэффициентов теплоотдачи и минимальная толщина пленки. При дальнейшем росте тепловой нагрузки наблюдается утолщение пленки и снижение интенсивности теплообмена, что отражено на графиках зависимости α и δ от q и Δt . Таким образом, оптимизация режима конденсации на оребренных поверхностях позволяет существенно повысить эффективность теплообмена в системах, использующих хладагент R410A.

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. – 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. – 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. – 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. – С. 50–57

5. Овсянник, А. В. Теплообмен при конденсации чистого озонобезопасного хладагента R404A на продольно-ребреных горизонтальных трубах / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2024. – № 4. – С. 58–69.

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ КАК ДРАЙВЕРЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ, УСТОЙЧИВОСТИ И АДАПТИВНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Д. В. Короткевич

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

Научный руководитель Г. А. Рудченко

Рассмотрена роль искусственного интеллекта в трансформации современных энергосистем. Проанализированы ключевые направления применения искусственного интеллекта: прогнозирование спроса и генерации, оптимизация распределения электроэнергии и предиктивное обслуживание оборудования.

Ключевые слова: искусственный интеллект, энергосистема, оптимизация, прогнозирование.

Современные электроэнергетические системы сталкиваются с ростом энергопотребления, необходимостью интеграции возобновляемых источников энергии и старением инфраструктуры. Традиционные методы управления уже не справляются с возрастающей сложностью. Искусственный интеллект (ИИ) становится ключевым фактором трансформации энергетики, обеспечивая интеллектуальную координацию и оптимизацию процессов. Основные направления применения ИИ:

1. Прогнозирование спроса и генерации электроэнергии. Традиционные методы прогнозирования часто не справляются с колеблющимися моделями потребления, на которые влияют погодные условия, экономическая ситуация и поведение потребителей. Алгоритмы ИИ способны обрабатывать большие объемы исторических и текущих данных, включая метеорологические факторы, для создания высокоточных прогнозов потребления и выработки электроэнергии.

Точное прогнозирование позволяет более эффективно интегрировать возобновляемые источники энергии в общую энергосистему. ИИ-алгоритмы анализируют данные метеопрогнозов и текущего спроса, чтобы оптимизировать выработку нетрадиционных источников энергии, снижая зависимость от ископаемого топлива и повышая общую устойчивость системы.

2. Оптимизация распределения электроэнергии и динамическое балансирование потоков. В прошлом диспетчеры вручную перераспределяли мощность между регионами, что часто приводило к неравномерному использованию энергии, перегрузкам в пиковые часы и повышенному износу оборудования. Системы на базе ИИ способны в реальном времени перераспределять потребление на основе текущего спроса и состояния оборудования. Алгоритмы прогнозируют пиковые нагрузки и заранее корректируют параметры сети, предотвращая скачки напряжения и сбои. Это приводит к значительному сокращению потерь энергии, вызванных перенапряжением (до 10 %), снижению эксплуатационных расходов на сеть и уменьшению преждевременного выхода оборудования из строя.