

Для условий Беларуси с характерными значительными сезонными колебаниями температур CO₂-ТНУ демонстрирует стабильно высокую эффективность как в зимний, так и в летний периоды, обеспечивая надежное теплоснабжение при минимальном воздействии на окружающую среду.

Проведенное исследование подтвердило высокую технико-экономическую эффективность внедрения модульных CO₂-ТНУ для утилизации сбросного тепла от ЦОД в условиях Беларуси.

Расчеты показывают, что для ЦОД мощностью 1 МВт срок окупаемости проекта составляет 1,06–1,59 года при годовой экономии около 1,46 млн руб. Ключевыми преимуществами решения являются экологическая безопасность CO₂ как хладагента, устойчивость работы в климатических условиях Беларуси и модульный принцип построения установки, обеспечивающий гибкость масштабирования. Реализация проекта позволит не только снизить операционные затраты ЦОД, но и внести вклад в энергосбережение и декарбонизацию городской инфраструктуры.

Литература

1. Bruno, F. CO₂ Refrigeration and Heat Pump Systems – A Comprehensive Review / F. Bruno, M. Belusko, E. Halawa // Energies. – 2019. – N 12 (15). – P. 2959.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВ ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ХЛАДАГЕНТОВ R404A, R410A И R407C НА ОРЕБРЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

П. С. Колмачева

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

Научный руководитель А. В. Овсянник

Представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена при конденсации паров озонобезопасных хладагентов R404A, R410A и R407C на горизонтальных продольно-оребрённых трубах с трапециевидными ребрами. В диапазоне плотностей теплового потока относительно всей оребренной поверхности 3500–93000 Вт/м² и давлений насыщения 0,95–1,5 МПа. Установлено повышение интенсивности теплоотдачи в 2–2,5 раза по сравнению с гладкими поверхностями; коэффициенты теплоотдачи достигают 4300 Вт/(м² · К), толщина конденсационной пленки 1,6–7,9 · 10⁻⁵ м. Хладагент R410A показал наилучшие значения коэффициентов теплоотдачи. Получены опытные данные, согласующиеся с теорией Нуссельта (отклонение < 17 %). Разработаны рекомендации для проектирования энергоэффективных оребренных конденсаторов для рассмотренных хладагентов.

Ключевые слова: конденсация хладагентов, теплообмен, оребренные поверхности, интенсификация теплоотдачи, пленка конденсата.

Проведены теоретические и экспериментальные исследования при конденсации пара и гравитационном ламинарном течении пленки конденсата на вертикальной поверхности.

Экспериментальное исследование проводилось на продольно оребренной трубе с ребром трапециевидного профиля, представленного на рис. 1.

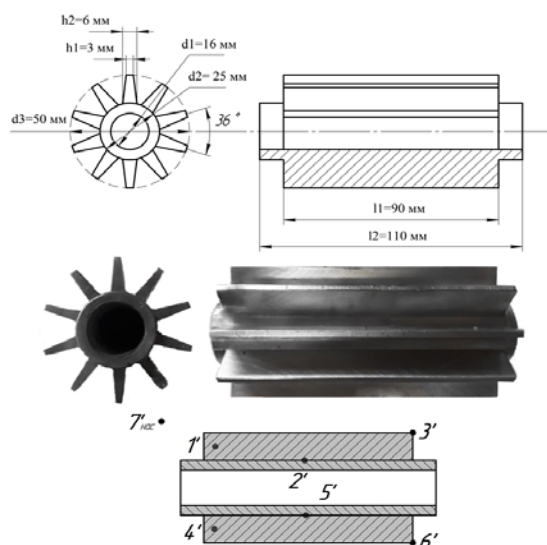


Рис. 1. Экспериментальный образец с расположением термодпар

Измерительная система для камеры конденсации представляет собой комплекс, состоящий из аналого-цифрового преобразователя. Управление процессом измерений производится специально созданной для этих целей программой, далее измеренное значение температур в виде термо-ЭДС поступает на компьютер, где программой обработки данных производится перевод значений термо-ЭДС в градусы.

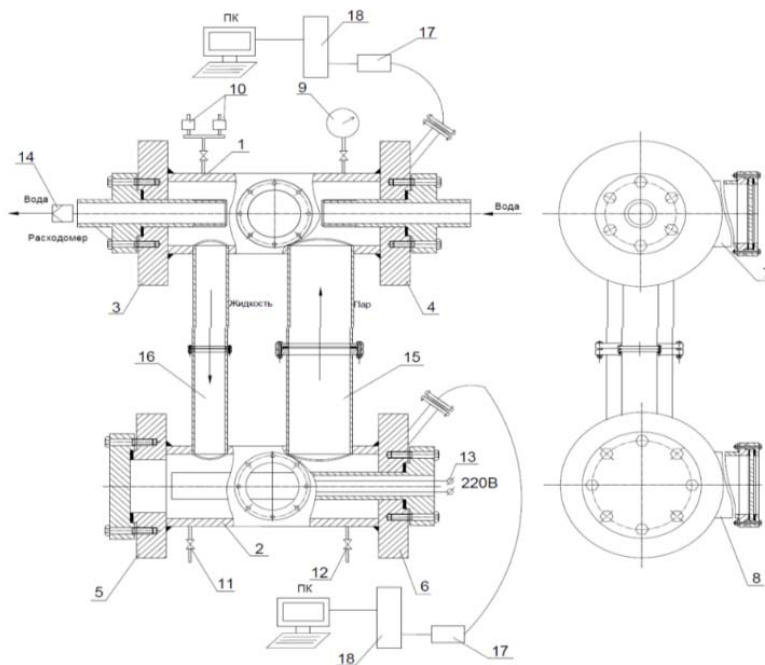


Рис. 2. Экспериментальный стенд [1]:

- 1, 2 – рабочие камеры; 3–6 – фланцы; 7, 8 – смотровые иллюминаторы;
 9 – манометр; 10 – предохранительный клапан; 11, 12 – вентиль;
 13 – нагреватель; 14 – расходомер; 15 – паровой канал; 16 – жидкостной канал;
 17 – аналого-цифровой преобразователь; 18 – компьютер

Рассматривалась пленочная конденсация медленно движущегося сухого насыщенного пара на горизонтальной оребренной трубе, имеющей уклон относительно горизонтальной оси 5° . Такой уклон, обеспечивает хорошее стекание образующейся пленки конденсата и освобождение поверхности теплообмена, тем самым уменьшая термическое сопротивление пленки конденсата.

Для проверки полученных в эксперименте значений были проведены расчеты, основанные на экспериментальных данных и формуле Нуссельта. В таблице указаны коэффициент теплоотдачи « α » и толщина пленки « δ ».

Результаты экспериментальных и расчетных данных

R404A	По Нуссельту		Эксперимент	
Q, Вт	α, Вт/м² · К	δ, м	α, Вт/м² · К	δ, м
30	3850,627	$1,858 \cdot 10^{-5}$	909,398	$7,865 \cdot 10^{-5}$
120	3216,372	$2,207 \cdot 10^{-5}$	1818,796	$3,903 \cdot 10^{-5}$
285	3192,067	$2,202 \cdot 10^{-5}$	4319,642	$1,627 \cdot 10^{-5}$
800	1965,504	$3,277 \cdot 10^{-5}$	2377,512	$2,709 \cdot 10^{-5}$
R410A				
30	4757	$2,27 \cdot 10^{-5}$	835	$12,9 \cdot 10^{-5}$
120	4183	$2,51 \cdot 10^{-5}$	1947	$5,54 \cdot 10^{-5}$
285	3818	$2,75 \cdot 10^{-5}$	4079	$2,57 \cdot 10^{-5}$
800	2812	$3,21 \cdot 10^{-5}$	3072	$2,92 \cdot 10^{-5}$
R407C				
30	4890	$1,9 \cdot 10^{-5}$	1920	$4,8 \cdot 10^{-5}$
120	3922	$2,4 \cdot 10^{-5}$	3602	$2,6 \cdot 10^{-5}$
285	3370	$2,7 \cdot 10^{-5}$	4605	$2,0 \cdot 10^{-5}$
800	2980	$3,0 \cdot 10^{-5}$	4310	$2,1 \cdot 10^{-5}$

Толщиной пленки конденсата определялась, вычисленная по формуле Нуссельта и по методике, описанной в [2]:

$$\delta_{пл} = \sqrt[4]{\frac{4\lambda_{ж}\mu_{ж}(t_n - t_c)x}{2\rho_{ж}^2 q}}. \quad (1)$$

На рис. 3, а–г показаны следующие зависимости: коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока; толщины пленки от плотности теплового потока; толщины пленки от температурного напора; коэффициента теплоотдачи от температурного напора.

Сравнительный анализ показывает, что на оребренной поверхности максимальные значения коэффициентов теплоотдачи достигаются при конденсации R410A, затем следует R404A, а R407C в целом демонстрирует наименьшую интенсивность теплообмена при одинаковых условиях.

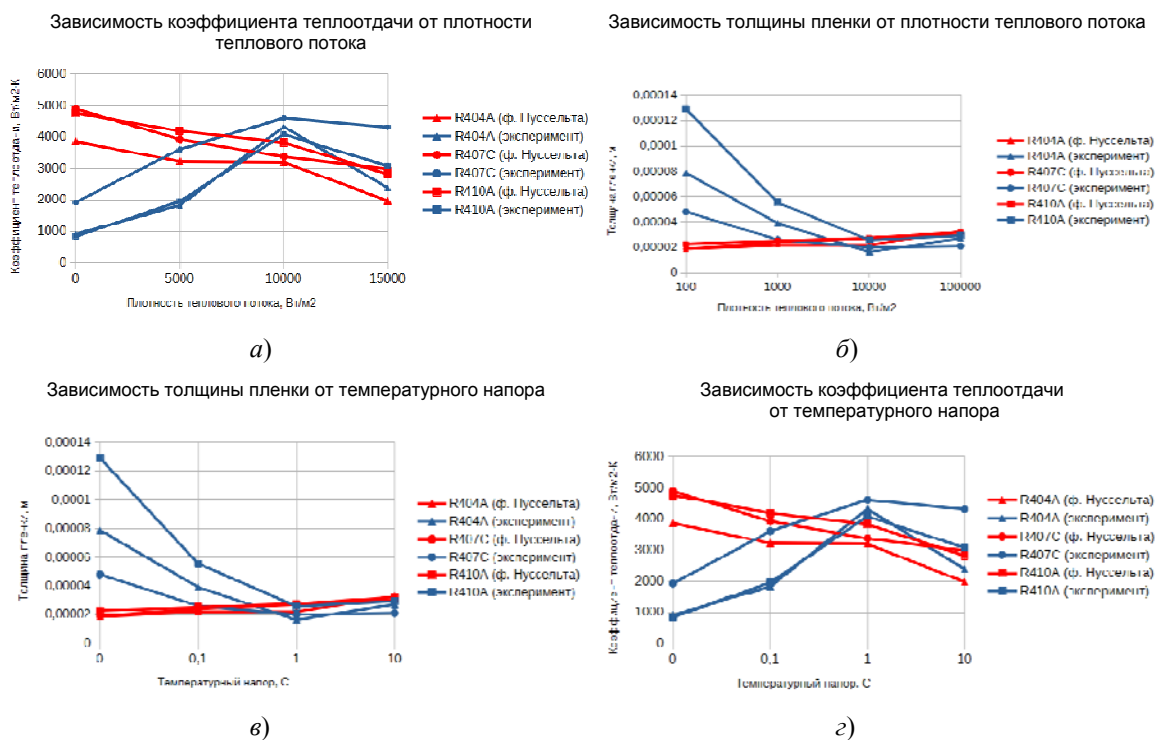


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных фреонов и данных по Нуссельту

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 $< 17\%$).

Л и т е р а т у р а

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-