МОДУЛЬНАЯ CO_2 – ТЕПЛОНАСОСНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ СБРОСНОГО ТЕПЛА ЦОД РУП «БЕЛТЕЛЕКОМ»

П. С. Колмачева

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

Научный руководитель Т. Н. Никулина

Разработана модульная установка на базе транскритического CO_2 теплового насоса для рекуперации низкопотенциального сбросного тепла серверов ЦОД РУП «Белтелеком». Система использует парокомпрессионный цикл с CO_2, обеспечивая подъем температуры тепла до уровня, пригодного для отопления или технологических нужд (до 80–150 °С). Модульность позволяет масштабировать мощность от 100 кВт до 10 МВт, интегрируясь в существующую инфраструктуру без значительных перестроек. Главное преимущество технологии – способность транскритического цикла производить горячую воду температурой выше 85 °С, что идеально соответствует требованиям зимнего отопления и промышленных процессов.

Ключевые слова: CO_2 тепловой насос, модульная установка, утилизация сбросного тепла, ЦОД Белтелеком, транскритический цикл, энергоэффективность.

Анализ сбросного тепла ЦОД и требований теплосетей Беларуси. Крупные ЦОД в Беларуси, такие как объекты «Белтелеком» и коммерческие дата-центры, сосредоточены преимущественно в Минске и региональных центрах. Они выделяют значительное количество низкопотенциального тепла (35–45 °С) круглогодично и стабильно. Однако прямое использование этого тепла невозможно из-за высоких требований городских теплосетей. В отопительный сезон сети требуют температуру подачи 95–105 °С, а летом для ГВС – 55–60 °С. Для преодоления этого температурного разрыва необходима технология, способная значительно повысить потенциал сбросного тепла. Транскритическая CO_2-ТНУ является оптимальным решением, так как позволяет нагревать теплоноситель до 90 °С и выше. Это в свою очередь, приводит к интеграции утилизированной энергии в городскую систему через ЦТП. Такая интеграция превращает статью расходов ЦОД на охлаждение в источник дохода. Одновременно решается задача энергосбережения и снижения нагрузки на традиционную генерацию тепловой энергии с помощью котельных. Таким образом, утилизация тепла ЦОД представляет собой стратегическую возможность для повышения энергоэффективности городской инфраструктуры Беларуси.

Термодинамическое моделирование транскритического цикла CO_2-ТНУ 800 кВт для г. Минска. Для определения оптимальных рабочих параметров CO_2-ТНУ мощностью 800 кВт было проведено термодинамическое моделирование транскритического цикла с учетом климатических условий г. Минска. В табл. 1 представлены расчетные показатели системы для различных сезонных условий, включая ключевые термодинамические параметры и энергетическую эффективность.

Таблица 1

Термодинамические параметры цикла CO_2-ТНУ

Параметр	Формула расчета	Лето (+25 °С)	Зима (–15 °С)	Среднегодовое
Тепловая мощность, кВт	$Q = G(h_2 - h_1)$	800	800	800
Температура испарения, °С	$T_{исп} = f(P_{исп})$	+10	–20	–5
Давление нагнетания, МПа	$P_{нагн.опт} = f(T_{нар.возд})$	8,2	10,1	9,2
Температура газа после компрессора, °С	$T_2 = f(P_{нагн}, S_1)$	95	125	110
Температура воды на выходе, °С	$T_{воды\ вых} = T_2 - \Delta T$	85	75	80
COP системы	$COP = Q_{газ}/W_{комп}$	4,8	3,2	4,0
Электрическая мощность компрессора, кВт	$W_{комп} = m\dot{}(h_2 - h_1)$	167	250	200
Температурный напор в газоохладителе, °С	$\Delta T = T_{газа.вх} - T_{воды\ вых}$	6	8	7
Массовый расход CO_2, кг/с	$G = Q/(h_2 - h_3)$	3,2	2,8	3,0
Работа компрессора, кДж/кг	$W = h_2 - h_1$	52,2	89,3	66,7

Примечание. G – массовый расход хладагента; h_1, h_2, h_3 – энтальпии в характерных точках цикла, S_1 – энтропия на входе в компрессор; ΔT – температурный напор; $Q_{газ}$ – тепловая мощность газоохладителя; W – мощность компрессора.

Моделирование подтвердило высокую эффективность CO_2-теплонасоса в климатических условиях Беларуси с достижением среднегодового COP = 4,0. Наилучшие показатели наблюдаются в летний период (COP = 4,8), тогда как зимой требуется повышенное давление нагнетания до 10,1 МПа для стабильной работы. Оптимальный рабочий диапазон давления составляет 9,0–9,5 МПа при температурном напоре 6–7 °С в газоохладителе.

Технико-экономическая оценка внедрения. Для количественной оценки эффективности проекта рассчитаны ключевые технико-экономические показатели внедрения CO_2-теплонасосной установки. Результаты расчета, выполненные на основе актуальных тарифов на энергоносители на 2025 г., представлены в табл. 2.

Таблица 2

Технико-экономические показатели проекта

Показатель	Значение	Единица измерения	Расчетная формула
Исходные данные			
Тепловая мощность для утилизации	800	кВт	–
Коэффициент эффективности (COP)	4,0	–	–
Стоимость электроэнергии	0,3074	руб./кВт · ч	–

Окончание табл. 2

Показатель	Значение	Единица измерения	Расчетная формула
Стоимость тепловой энергии от газа	0,2125	руб./кВт · ч	–
Годовой режим работы	8 400	часов/год	–
Расчетные показатели			
Годовая выработка тепла	6 720 000	кВт · ч/год	800 кВт · 8 400 ч
Потребляемая мощность ТНУ	177	кВт	800 кВт/4,0 COP
Годовое потребление электро-энергии	1 486 800	кВт · ч/год	177 кВт · 8 400 ч
Годовые затраты на электро-энергию	457 042	руб./год	1 486 800 · 0,3074
Стоимость замещаемой тепловой энергии	1 428 000	руб./год	6 720 000 · 0,2125
Чистая годовая экономия	**970 958**	**руб./год**	**1 428 000–457 042**
Капитальные затраты			
Оборудование CO_2-ТНУ	1 000 000–1 500 000	руб.	Зависит от комплектации
Монтаж и пусконаладка	200 000–300 000	руб.	–
Общие капиталовложения	**1 200 000–1 800 000**	**руб.**	–
Инвестиционные показатели			
Срок окупаемости (min)	1,24	лет	1 200 000/970 958
Срок окупаемости (max)	1,85	лет	1 800 000/970 958

При капитальных вложениях проект утилизации тепла ЦОД с использованием CO_2-теплонасосной установки окупается примерно за 2 года за счет продажи тепла в городскую сеть.

Сравнительный анализ эффективности CO2-ТНУ и традиционных систем теплоснабжения. По энергетической эффективности CO_2-ТНУ превосходит традиционные теплонасосы на 15–25 %, обеспечивая среднегодовой COP 4,0–4,5 против 3,2–3,8 у R134a, при этом способность нагрева теплоносителя до 120 °C против максимальных 65°C у традиционных ТНУ открывает возможности для прямой интеграции в системы централизованного теплоснабжения [1].

Если CO_2-ТНУ преобразует 1 кВт · ч электроэнергии в 4–4,5 кВт тепла, то газовые котельные имеют КПД 0,85–0,92, теряя значительную часть энергии с дымовыми газами. Это определяет принципиальную разницу в эксплуатационных расходах: стоимость произведенного тепла CO_2-ТНУ составляет примерно 0,05–0,06 руб./кВт · ч против 0,21–0,25 руб./кВт · ч у газовых котельных при текущих тарифах.

Экономический анализ показывает более короткий срок окупаемости CO_2-систем (1,1–1,6 года) по сравнению с традиционными ТНУ (2,5–3,5 года), несмотря на более высокие первоначальные инвестиции, что обусловлено значительным снижением эксплуатационных затрат и возможностью утилизации бросового тепла.

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 CO_2-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 CO_2 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. CO_2 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-оребренных трубах с трапециевидными ребрами. В диапазоне плотностей теплового потока относительно всей оребренной поверхности 3500–93000 Вт/м^2 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/(м^2 · 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.