

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ

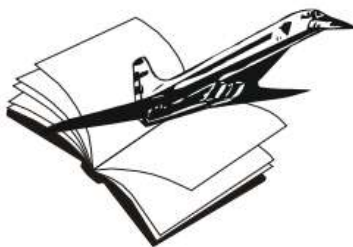
Белорусский национальный технический университет



**Международная молодежная
научная конференция**

**«XXV ТУПОЛЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ
(школа молодых ученых)»,**

**посвященная 60-летию со дня осуществления
Первого полета человека в космическое пространство
и 90-летию Казанского национального исследовательского
технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ**



ТОМ II

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

СБОРНИК ДОКЛАДОВ

Казань 2021

УДК 629.7(082)
ББК 39.5Я43
Туп 85

Туп 85 XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых): Международная молодёжная научная конференция, 10–11 ноября 2021 года: Материалы конференции. Сборник докладов. – В 6 т.; Т. 2. – Казань: Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2021. – 507 с.: ил.

ISBN 978-5-6045150-8-2

ISBN 978-5-6047603-2-1

В сборнике представлены тексты докладов участников Международной молодёжной научной конференции «XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых)», посвященные актуальным вопросам и проблемам развития аэрокосмических технологий, машиностроения, энергетики, приборостроения, информационных, инфокоммуникационных, радиоэлектронных технологий, а также социально-экономические аспекты создания аэрокосмической техники.

*Материалы докладов публикуются в авторской редакции.
Ответственность за аутентичность и точность имен, названий и иных сведений,
а также за соблюдение законов об интеллектуальной собственности
несут авторы публикуемых материалов.*

Редакционная коллегия:

Аникин И.В., д.т.н., профессор; **Бабушкин В.М.**, д.т.н., доцент;
Беляев В.А., д.полит.н., профессор; **Варсегов В.Л.**, д.т.н.;
Вершинин И.С., к.т.н., доцент; **Гайнутдинов В.Г.**, д.т.н., профессор;
Гайсин А.Ф., д.т.н., доцент; **Галимов Э.Р.**, д.т.н., профессор;
Гатауллина И.А., д.и.н., доцент; **Гильмутдинов А.Х.**, д.ф.-м.н., профессор; **Глебов Г.А.**,
д.т.н., доцент; **Гортышов Ю.Ф.**, д.т.н., профессор;
Данилаев М.П., д.т.н., профессор; **Денисов Е.С.**, к.т.н., доцент;
Евдокимов Ю.К., д.т.н., профессор; **Зайдуллин С.С.**, к.т.н., доцент;
Захаров О.Г., к.т.н.; **Козлов С.В.**, д.т.н., доцент; **Костин В.А.**, д.т.н., профессор;
Мингазов Б.Г., д.т.н., профессор; **Михайлов С.А.**, д.т.н., профессор;
Морозов О.Г., д.т.н., профессор; **Надеев А.Ф.**, д.ф.-м.н., профессор; **Насыбуллин А.Р.**,
к.т.н., доцент; **Низамеев И.Р.**, к.х.н., доцент;
Новикова С.В., д.т.н., доцент; **Нугуманова Л.Ф.**, д.э.н., доцент;
Першин Е.А., к.т.н.; **Попов И.А.**, д.т.н., профессор;
Сабирзянов А.М., к.филос.н., доцент; **Саиткулов В.Г.**, д.т.н., профессор;
Саттаров А.Г., д.т.н.; **Сафаргалиев М.Ф.**, к.э.н., доцент;
Сиразетдинов Р.Т., д.т.н., доцент; **Солодухо Н.М.**, д.филос.н., профессор;
Тимеркаев Б.А., д.ф.-м.н., профессор; **Файзуллин Р.Р.**, д.т.н., доцент;
Ференец А.В., к.т.н., с.н.с.; **Хабибуллин Ф.Ф.**, к.т.н.;
Халиулин В.И., д.т.н., профессор; **Чермошенцев С.Ф.**, д.т.н., профессор; **Шарнин Л.М.**,
д.т.н., профессор; **Шлеймович М.П.**, к.т.н., доцент;
Юнусов Р.Ф., к.т.н., доцент; **Якупов З.Я.**, к.ф.-м.н., доцент;
Янбаев Р.М., к.т.н.; **Яхина Р.Р.**, к.фил.н., доцент.

ISBN 978-5-6045150-8-2

ISBN 978-5-6047603-2-1

© Оформление. Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2021

© Авторы докладов, 2021

СЕКЦИЯ 4

ТЕПЛОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

оребрения при свободно-конвективном теплообмене с воздухом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. №5. С. 128–141.

4. Сухоцкий А.Б., Маршалова Г.С., Данильчик Е.С. Особенности расчета лучистой составляющей теплового потока горизонтального пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63. № 4. С. 380–388.

5. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г.С. Исследование смешанноконвективной теплоотдачи однорядных воздухоохлаждаемых теплообменников при различных поперечных шагах установки труб // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. №19. С. 3–11.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF THE OUTLET AREA AND THE HEIGHT OF THE EXHAUST SHAFT ON THE FREE CONVECTIVE HEAT EXCHANGE OF A SINGLE BUNCH WITH DIFFERENT HEIGHT OF TYBE IN THE AIR FLOW

Danilchik E.S.^{1,2}

katya.156.156@gmail.com

Supervisors: A. Sukhotskii¹, PhD (Engineering), Associate Professor,
(¹Belarusian State Technological University, Minsk,

²A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk)

The article presents the results of an experimental study of the average heat transfer of a single-row bundle of bimetallic finned tubes with different heights of finning (finning coefficient $\varphi \approx 1-19.6$) in the free convection mode, intensified using an exhaust shaft. It was found that with an increase in the area of the outlet of shaft 1 and the height of shaft 2, an increase in the intensity of heat transfer is observed.

УДК 621.564.2:621.577

ДИОКСИД УГЛЕРОДА КАК ХЛАДАГЕНТ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Даутов Р.Р.

gluza.dautova@ya.ru

Научный руководитель: А. Е. Кондратьев, к.т.н., доцент
Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

Аннотация: в работе представлены особенности применения диоксида углерода в качестве хладагента теплового насоса, изучены его основные достоинства по сравнению с традиционными холодильными агентами и целесообразность применения в системах теплоснабжения.

В настоящее время широкое применение в мировой практике альтернативных источников тепловой энергии постепенно ведет к вытеснению традиционных. Это объясняется возможностью получения дешевого тепла без вреда для окружающей среды, а также нескончаемыми запасами природных источников. Одним из таких энергоэффективных решений, применяемых для систем теплоснабжения, является тепловой насос (ТН). По принципу действия он представляет собой устройство, с помощью которого можно преобразовать тепло от источника с низким температурным уровнем в высокопотенциальную тепловую энергию [1].

Тепловой насос состоит из конденсатора, испарителя, расширительного клапана, и компрессора. Все эти конструктивные элементы соединены в один замкнутый контур. По

трубам циркулирует хладагент – рабочая жидкость с низкой температурой кипения. В испарителе он вскипает от тепла низкопотенциальных источников и далее в газообразном состоянии перемещается в компрессор, где под действием высокого давления сжимается, при этом температура и давление хладагента существенно повышается. Горячий газ поступает в конденсатор, в котором происходит тепло переходит теплоносителю, циркулирующего в отопительной системе. Отдав тепловую энергию, хладагент охлаждается и переходит снова в жидкое состояние. Проходя через расширительный клапан, холодильный агент сбрасывает давление и температуру и в виде сжиженного газа снова попадает в испаритель.

В качестве источников низкопотенциальной энергии для тепловых насосов используются как естественные - атмосферный воздух, водоёмы, грунт, так и искусственные источники – сточные воды, вентиляционные выбросы и др. Наиболее эффективным из них является использование тепла водных ресурсов, а именно, грунтовых вод, так как этот вариант является высокая и практически постоянная температура круглый год, а также доступность и простота схемы теплоснабжения, которая заключается в подаче воды в тепловой насос и ее возврате через соответствующие скважины.

В тепловых насосах, использующих воздух в качестве низкопотенциального источника испаритель находится снаружи. Тепловая энергия также передается хладагенту, который далее проходит через конденсатор и отдает тепло циркулирующей в системе отопления воде. Воздух как источник низкопотенциального тепла для тепловых насосов является очень доступным ресурсом, однако его коэффициент теплоотдачи очень низок, а при изменениях его температуры в большом диапазоне, эффективность данной установки снижается.

За счет своей высокой температуры большим потенциалом обладают сточные воды, промышленные сбросы, вентиляционные выбросы и воды обратных систем охлаждения промышленных предприятий [2].

Чаще, в роли рабочей жидкости теплового насоса выступает фреон – фторсодержащий насыщенный углеводород. Определенной температуре источника отбора тепла соответствует температура кипения фреона. Её изменение существенно влияет на значения коэффициента преобразования теплового насоса. Величина данного коэффициента зависит от разности температур кипения хладагента в испарителе и его конденсации в конденсаторе. Чем меньше разность между этими температурами, тем выше коэффициент преобразования теплового насоса.

Однако, в последнее время фреоны подверглись критике – как из-за их воздействия на защитный озоновый слой Земли, так и из-за их влияния на глобальное потепление. Парниковым эффектом обладают абсолютно все синтетические хладагенты, в том числе и те, которые не относятся к озоноразрушающим веществам. Этот эффект возникает из-за того, что определенные газы поглощают инфракрасное излучение, исходящее от поверхности Земли, задерживая его при этом в атмосфере.

Пришедшие на замену обычным фреонам гидрофторуглероды намного лучше с точки зрения разрушения озонового слоя, но они также являются газами, оказывающими значительное влияние на глобальное потепление [3].

В результате ужесточения законов к экологически вредным хладагентам, в последнее время все больший интерес вызывают естественные хладагенты. К ним относятся диоксид углерода (R744), аммиак, пропан и изобутан. Аммиак уже много лет используется во многих странах в качестве хладагента теплонасосных установок, однако он ядовит, горюч и взрывоопасен. Данный хладагент имеет высокую энергетическую эффективность, он практически не имеет в составе воду и другие примеси. У него отсутствует прямое влияние на озоновый слой и парниковый эффект. Аммиак способен при испарении поглощать большое количество тепла, недорог, доступен и работает при давлениях, сопоставимых с другими хладагентами,

Наиболее предпочтительным из природных хладагентов во многих областях применения является диоксид углерода, поскольку он не горюч, не токсичен, в изобилии встречается в природе, не вызывает разрушение озонового слоя и практически не создает парниковый эффект. Также другими преимуществами являются большой коэффициент теплопередачи и доступность. Высокая объемная емкость тепловых насосов на R744 (из-за высокого рабочего давления) позволяет использовать трубопроводы малого диаметра [4].

В мировом масштабе имеется опыт в проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по изучению диоксида углерода в качестве хладагента. Так, например, проект "ЕС COHEPS" показал, что технология двуокиси углерода действительно работает в тепловых насосах – они способны создавать высокие температуры для горячей воды с температурой до 90 °С.

В России тепловые насосы на CO₂ нашли широкое применение лишь в промышленности и в системах централизованного теплоснабжения агрегатов высокой мощности. Причиной непопулярности данной технологии для индивидуальных систем отопления на отечественном рынке является малоизученность и дешевизна традиционных способов обогрева домов (природный газ). Однако, при сравнении эксплуатационных вложений, пожаробезопасности и вреда на экологию ТН на основе R744 являются одними из самых перспективных и энергетически эффективных методов. Кроме этого, они хорошо работают в самых холодных условиях и могут обеспечить высокую температуру горячей воды.

С точки зрения производительности, тепловые насосы на основе R744 отличаются своей возможностью производить гораздо более высокие температуры на выходе. Это объясняется тем, что диоксид углерода не полностью меняет фазу, как другие хладагенты. Достаточно высокая температура газа после компрессора в цикле на диоксиде углерода не связана жестко с давлением, как в случае с парокомпрессионными тепловыми насосами. Значительное изменение температуры при охлаждении газообразного R744 в надкритической области позволяет нагревать теплоносители на большую разность температур с минимальными потерями энергии [5].

Отличительная черта тепловых насосов на диоксиде углерода – использование транскритического цикла и отсутствие в конструкции конденсатора. Так как отвод тепла от хладагента в транскритическом цикле происходит при температуре, превышающей критическую точку, конденсации не происходит, поэтому вместо конденсатора используется газоохладитель. При прохождении диоксида углерода через газоохладитель его температура снижается. Тепло, отводимое на высокотемпературной стороне, используется для обогрева помещения или производства горячей воды. Простейшая теплонасосная установка, работающая по транскритическому циклу, состоит из компрессора, газоохладителя, испарителя и расширительного устройства.

Высокое давление пара приводит не только к низкому соотношению давлений. Преимущество также состоит в высоком КПД компрессора. Несмотря на недостаточную эффективность теоретического транскритического цикла, цикл сверхкритического охлаждения диоксида углерода может все еще конкурировать с циклом сжатия пара с использованием других хладагентов.

Транскритические тепловые насосы на диоксиде углерода особенно популярны в странах ближнего и дальнего зарубежья. Так, на Японском рынке имеется высокотемпературный тепловой насос TICA от компании MAYEKAWA JAPAN. Данный агрегат предназначен для нагрева воды с максимально достижимой выходной температурой до 90 °С. Также компанией Mitsubishi Electric была выпущена на британский рынок система Ecodan QUNZ, представляющая собой моноблочный тепловой насос производительностью 4 кВт, который способен нагревать воду до 70°С и использующий двуокись углерода в качестве хладагента [6].

Основным недостатком тепловых насосов на диоксиде углерода является высокое рабочее давление. Оно намного выше, чем у других традиционно используемых хладагентов (при температуре 31 °С давление составляет 7,4 МПа). Кроме этого, у тепловых насосов, использующих R744 более низкий коэффициент преобразования COP (Coefficient of Performance) при высоких температурах. Проблема высокого рабочего давления может быть преодолена за счет создания оптимальной конструкции, которая включает более мелкие и более прочные узловые компоненты. Тем не менее, новые разработанные компоненты должны быть произведены по доступным ценам.

Одна из проблем, связанных с тепловыми насосами на основе CO₂, заключается в том, что для работы им требуется довольно большая температура подъема. Это разница температуры подачи и температуры обратной воды.

Другая проблема заключается в том, что циклы хладагента CO₂ работают при гораздо более высоком давлении, чем стандартное оборудование цикла сжатия пара. На стороне испарителя давление может составлять около 4.1 МПа, тогда как в газоохладителе (который заменяет конденсатор в устройстве стандартного цикла сжатия) давление может составлять от 10.3 до 12.4 МПа. Более высокое давление и необходимость в более надежных и более дорогостоящих компонентах для сдерживания этого давления замедлили развитие тепловых насосов на основе диоксида углерода [7].

Тепловые насосы на R744 действительно целесообразны для применения в системах теплоснабжения, поскольку они безопасны, безвредны для окружающей среды, позволяют получать более высокие температуры для обогрева жилых помещений и вполне конкурентоспособны по сравнению с другими видами теплонасосных установок. Характерное для диоксида углерода высокое давление ведет к увеличению степени сжатия, что в свою очередь приводит к уменьшению веса системы, а следовательно и затрат на оборудование. Диоксид углерода не ядовит, не горюч, не разрушает озоновый слой и имеет самый низкий потенциал глобального потепления среди применяемых рабочих жидкостей. В качестве хладагента теплового насоса он обладает уникальными теплофизическими и термодинамическими свойствами. Прежде всего, это низкая критическая температура, которая приводит к тому, что процесс конденсации заменен охлаждением газообразного R744 в надкритической области. Кроме этого, достаточно высокая температура газа после компрессора и значительное изменение температуры при охлаждении газообразного диоксида углерода позволяют нагревать воду на большую разность температур с малыми потерями тепловой энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Даутов, Р. Р. Перспективы применения тепловых насосов / Р. Р. Даутов // Инженерные кадры - будущее инновационной экономики России. – 2020. – № 5. – С. 107-108.
2. Гатауллина, И. М. Использование тепловых насосов в системах теплоснабжения зданий / И. М. Гатауллина // Научному прогрессу – творчество молодых. – 2018. – № 2. – С. 71-74.
3. Гатауллина, И. М. Построение системы теплоснабжения на основе теплового насоса / И. М. Гатауллина // Тинчуринские чтения : Тезисы докладов XIII молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 24–27 апреля 2018 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. – С. 160-162.
4. Гафуров, Ш. Д. Перспективы применения углекислого газа в холодильных машинах // Молодой ученый. – 2017. – № 7 (141). – С. 46-48. – URL: <https://moluch.ru/archive/141/39627/> (дата обращения: 19.08.2021).
5. Мотрев А. А., Цветков О. Б. Тепловые насосы на диоксиде углерода // Сборник научных работ молодых ученых по материалам XLV научной и учебно-методической

конференции университета ИТМО 02-06 февраля 2016 / - Санкт-Петербург: 2016. – С. 291-294.

6. Шит М.Л., Журавлев А.А. Система теплоснабжения "ТЭЦ-тепловые насосы на диоксиде углерода" // Сборник научных трудов по материалам XVIII Международной научно-технической онлайн-конференции "Актуальные проблемы энергетики и экологии" 29-30 сентября 2020 / ред. А. С. Титлов. - Одесса: ФОП Бондаренко М. О., 2020. – С. 60-64.

7. Ghazizade-Ahsaei H., Ameri M. Study of a direct-expansion ground source heat pump using carbon dioxide // Modares Mechanical Engineering 2017. – № 17(6) / – Tehran: 433-443 p.

CARBON DIOXIDE AS A REFRIGERANT FOR HEAT PUMPS USED IN HEAT SUPPLY SYSTEMS

Dautov R.R.

gluza.dautova@ya.ru

Scientific adviser: A.E. Kondratyev, Ph.D., Associate Professor

Kazan State Power Engineering University, Kazan

Abstract: the paper presents the features of using carbon dioxide as a refrigerant for a heat pump, studies its main advantages in comparison with traditional refrigerants and the feasibility of using it in heat supply systems.