

ИННОВАЦИИ В СФЕРЕ ПРИКЛАДНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ. НАПРАВЛЕНИЯ И ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Кандидат технических наук **В.А. ГРУШНИКОВ**
(ВИНИТИ РАН)

Поступила в редакцию: 06.12.2024
Принята к публикации: 05.04.2025

Используемые в промышленных, коммерческих и бытовых энергетических установках термодинамические процессы позволяют технологично и функционально реализовывать физические принципы преобразования разных видов энергии из одного в другой. Рассмотрим некоторые, заслуживающие внимания направления исследований, ставящих своей целью повышение эффективности за счёт использования инновационных решений.

Термодинамические процессы играют важную роль в промышленной, коммерческой и бытовой энергетике. Однако, вряд ли даже профессиональный водитель автомобиля в поездке, находясь за рулём, задумывается о физической сути реализуемого двигателем внутреннего сгорания цикла Карно, представляющего собой идеальный круговой процесс, состоящий из двух адиабатных и двух изотермических процессов. Также маловероятно, что жители прибрежных, морских и засушливых материковых климатических зон Африки при нехватке питьевой воды оценивают эффективность

используемого в опреснительных и конденсационных установках цикла Стирлинга. А в нём реализуются фазы нагрева, расширения, переход к источнику холода, охлаждения, сжатия и переход от источника к холодному носителю тепловой энергии с расширением и сжатием газа, находящегося в цилиндре двигателя внешнего сгорания.

Также крайне редко рядовым потребителем коммунальных услуг рассматривается функциональность, технологичность и энергоэффективность цикла Рэнкина – термодинамического цикла преобразования тепла в работу с помощью рабочего тела, претерпевающего фазовый

переход жидкость-пар (испарение), приводящий к повышению давления, и обратный фазовый переход пар-жидкость (конденсация), обеспечивающий понижение давления. То же самое относится к органическому циклу Ренкина производства электрической энергии из непригодного (отработанного) тепла в виде горячей воды, пара, термического масла или дымовых газов. Не является исключением и цикл Брайтона или Брайтона/Джоуля – термодинамический цикл, описывающий рабочие процессы газотурбинного, турбореактивного и прямоточного воздушно-реактивного двигателей внутреннего сгорания, а также газотурбинных двигателей внешнего сгорания с замкнутым контуром газообразного (однофазного) рабочего тела.

И далеко не каждый владелец домашнего холодильника часто или вообще задумывается о физической сущности компрессионного холодильного цикла фазовых переходов циркулирующего в замкнутом контуре хладагента. Может быть, зря, поскольку эти термодинамические циклы определяют потребление ограниченной по свободному наличию энергии, а холодильные, в частности, – экологическую ситуацию на планете Земля с динамически изменяющимся состоянием атмосферы и её озонового слоя. Но это невнимание к жизненно важным физическим процессам рядового обывателя с лихвой компенсируется многочисленными исследованиями специалистов по прикладной термодинамике (они реализуются эмпирическими виртуальными моделями, экспериментальными и теоретическими методами).

Экспериментальное исследование

Осуществляемые постоянно совершенствуемыми аппаратными возможностями имитационного математического моделирования и натурных экспериментов эмпирические исследования наблюдаемых конкретных явлений являются свободными от догм и философских течений. Поэтому они наиболее интересны для независимых оценок эффективности рассматриваемых явлений и процессов, позволяя, по результатам объективного анализа результатов подкорректировать действующие и создать новые теории.

Наглядным примером такого комплексного исследования с полным правом может служить моделирование производительности оригинальной холодильной системы с турбонаддувным компрессором. Во многих приложениях широко используются холодильные системы, которым требуется высокая энергия. Любое улучшение холодильных систем может снизить потребность в энергии. Распространённым методом улучшения производительности системы является переохлаждение хладагента на выходе из конденсатора. В качестве дополнения к известным системам переохлаждения, по результатам проведённого на Факультете машиностроения Университета турецкого Тарсуса исследования в виртуальных экспериментах предлагается¹ детандер-компрессор – дожимной цикл сжатия

¹ Erdinc M.T. Performance simulation of expander-compressor boosted subcooling refrigeration system // International Journal of Refrigeration. 2023. Vol. 149. P. 237–247.

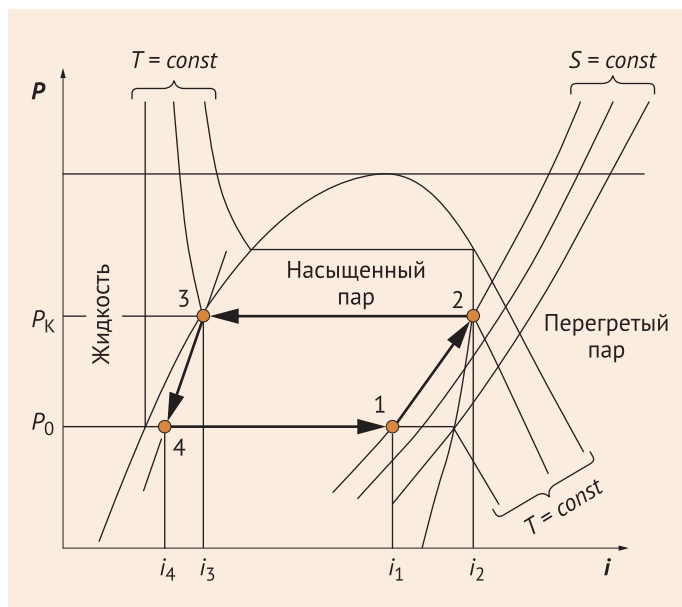


Рис. 1. Диаграмма парокомпрессионного холодильного цикла с переохлаждением и насыщением

пара с усиленным переохлаждением (рис. 1). На выходе из конденсатора хладагент разделяется на две части: одна часть расширяется в расширительном устройстве для достижения необходимой температуры переохлаждения, а другая часть поступает сразу в отдельный теплообменник. Позже этот дополнительный хладагент поступает в другой расширительный клапан, испаритель и дожимной расширитель-компрессор, чтобы увеличить давление на входе компрессора.

В качестве рабочих жидкостей в моделировании использовались шесть различных хладагентов с низкими потенциалами глобального потепления: R134a, R1234yf, R32, R290, R1270 и R600a. Коэффициент производительности при охлаждении и приращение его значений для каждого хладагента рассчитаны и отображены графически для различных температур испарения от -10°C до 5°C . Кроме того, анализ теплообменника переохлажде-

ния выполнен для сравнения площади поверхности теплопередачи и падения давления для каждого хладагента. Результаты этого анализа показали, что R1234yf достигает наибольшей производительности при увеличении КПД на 16.7, 19.1 и 21.8% в зависимости от механического КПД детандера и компрессоров, а также изэнтропического КПД детандера.

Используя детандер-компрессор с более высоким или более низким механическим и изэнтропическим КПД, эти улучшения можно увеличить или уменьшить. Парокомпрессионные холодильные системы являются наиболее часто используемыми холодильными системами. По мере увеличения потребности в охлаждении работа, потребляемая этими системами, также увеличивается. Поэтому исследование энергоэффективности в этих системах может иметь решающее значение для сокращения энергопотребления. Установлено, что использование

переохлаждения жидкого хладагента на выходе из конденсатора холодным хладагентом, поступающим из выхода испарителя, не так сильно повышает производительность традиционной системы. Для переохлаждения с помощью внешнего теплообменника необходимы дополнительные градирни и циркуляционные насосы.

В рамках ранее проведённых саудитскими специалистами по прикладной термодинамике исследований (Зубаир, 1990 г.) для снижения энергопотребления холодильной системы был предложен верифицированный на результативность холодильный цикл с механическим переохлаждением.

Ещё тогда было заявлено, что КПД обычного холодильного цикла может быть увеличен на 20% во время пиковых нагрузок, что подтверждено канадским исследователем Торнтоном и его коллегами в 1994 г., которые ввели дополнительный цикл сжатия пара на выходе конденсатора, чтобы обеспечить переохлаждение. Они отметили, что температура испарителя системы переохлаждения может быть напрямую связана с количеством переохлаждения, тепловым лифтом системы переохлаждения и, следовательно, производительностью всего цикла. В различных обстоятельствах, типичных для супермаркетов, было обнаружено, что использование переохладителя увеличивает КПД примерно на 10%. Зубаир в 1994 г. провёл термодинамический анализ механической системы переохлаждения. В тех же условиях холодильные системы с высокой и низкой температурой экономят соответственно 30% и 80% всей своей энергии.

Согласно исследованиям, системы кондиционирования воздуха могут работать на 23% лучше, когда температура конденсации достигает своего пика. В них упомянуто, что необратимые потери в расширительном устройстве можно значительно уменьшить, если система будет работать в идеальном состоянии переохлаждения, согласно термодинамическому анализу, основанному на втором законе или начале термодинамики. Также обнаружено, что это оптимальное состояние существует при температуре насыщения переохладителя, которая находится примерно посередине между температурой конденсации и температурой испарения. Хан и Зубаир в 2000 г. разработали термодинамические модели интегрированной механической системы переохлаждения, виртуальной оценки реальной производительности системы переохлаждения с особым вниманием к температуре насыщения переохладителя. Куреши и Зубаир в 2012 г. исследовали эксплуатационные характеристики, возникающие в результате использования различных комбинаций хладагентов в специальных циклах сжатия пара механического переохлаждения.

Экспериментальное исследование специальной холодильной системы с механическим переохлаждением было проведено Куреши и его коллегами в 2013 г., показав, что переохлаждение часто происходит при температуре от 5 до 8 °C, что увеличивает охлаждающую способность испарителя. Это свидетельствует в пользу того, что специальное переохлаждение может применяться в периоды высокой температуры окружающей среды в течение дня. В циклах сжатия пара

с механическим переохлаждением распределение запаса теплообменника учтено с термоэкономической точки зрения Куреши и Зубаиром в 2013 г., и проведены исследования постоянной производительности переохладителя, скоростей отвода тепла и охлаждения, а также скорости теплопередачи.

Аналитический и численный расчёт цикла охлаждения, интегрированного с другим циклом переохлаждения, был изучен турецким исследователем Йылмазом и его коллегами в 2017 г. Испанский исследователь Ллопис и его коллеги в 2015 г. провели анализ потенциала улучшения энергетических характеристик транскритических холодильных систем на CO_2 с использованием специального механического цикла переохлаждения. Ими установлено, что комбинация циклов увеличивает коэффициент эффективности при охлаждении максимум до 20% и охлаждающую способность максимум до 28.8%, причём оба приращения больше при высоких температурах испарения.

Оптимальные рабочие параметры транскритической установки CO_2 со встроенной механической системой переохлаждения были определены экспериментально шведским исследователем Неботом-Андресом и его коллегами в 2020 г. Чтобы максимизировать КПД установки и определить оптимальные параметры для трёх температур окружающей среды, установка была протестирована в подконтрольных испытаниях при различных давлениях и переохлаждениях. Получены две корреляции для расчёта оптимального давления и переохлаждения в зависимости от температуры на выходе газоохладителя

и уровня испарения с учётом выявленных оптимальных рабочих параметров.

Бразильский специалист Каталан-Хиль и его коллеги в 2019 г. проанализировали специальные и интегрированные механические бустеры CO_2 с переохлаждением для супермаркетов. Они обнаружили что специальная механическая система переохлаждения обеспечивает ежегодную экономию энергии в зонах с умеренным климатом от 1.5% до 2.9%, в тёплых помещениях – от 2.9% до 3.4% и в горячих помещениях – от 3% до 5.1%. Интегрированная система переохлаждения обеспечивает снижение в холодных регионах от 3.1% до 4%, в регионах с умеренным климатом от 1.4% до 2.9%, в тёплых регионах от 2.9% до 3.4% и в жарких регионах от 1.3% до 2.4%. Транскритический холодильный цикл CO_2 с термоэлектрическим переохладителем и детандером был изучен американским исследователем Даем и его коллегами в 2017 г. Они отметили что их цикл лучше подходит для жаркого климата, где CO_2 не может быть надежным образом переохлаждён или если в охлаждаемом отделении наблюдаются низкие температуры испарения.

Что касается специальной механической системы переохлаждения, испанским специалистом Ллопесом и его коллегами в 2021 г. оценены зеотропные² хладагенты. Степень переохлаждения и отвод тепла были протестированы в оптимальных условиях, и было достигнуто улучшение коэффициента эффективности

² Зеотропный хладагент – это смесь двух или более веществ, которые кипят при одной и той же температуре.

при охлаждении на 1.4%. Китайский специалист по прикладной термодинамике Лю и его коллеги в 2019 г. исследовали эффективность цикла транскритического охлаждения с двухступенчатым сжатием и механическим переохлаждением с использованием R290 в качестве рабочего тела. По сравнению с традиционной эжекторной холодильной системой циркуляционный насос новой системы потребляет немного больше мощности, но позволяет достичь более высокой степени переохлаждения.

Эжекторная холодильная система с переохлаждением без дополнительного насоса или компрессора была представлена турецкими специалистами Йилмазом и Эрдинчем в 2019 г. Ими зафиксировано что хладагент R1234yf достигает наивысшей производительности с увеличением коэффициента эффективности при охлаждении на 20% и увеличением эксергетического КПД на 18%. При использовании эжектора с большей или меньшей эффективностью эти улучшения могут варьироваться примерно на 3%. Китайские специалисты Лю и его коллеги в 2019 г. исследовали эффективность цикла транскритического охлаждения с двухступенчатым сжатием и механическим переохлаждением с использованием R290 в качестве рабочего тела.

Что касается каскадной холодильной системы, китайский специалист Чэн в 2022 г. предложил модифицированный цикл переохлаждения.

Согласно первому и второму законам термодинамики, иранским специалистом Шариатзаде и его коллегами из Тегеранского университета в 2016 г. изучен транскрити-

ческий цикл CO₂ с использованием детандеров с внутренними теплообменниками, дросселированием и дросселированием с внутренними теплообменниками. Ими установлено, что использование теплообменника снижает общий и эксергетический КПД цикла с детандером, а использование теплообменника в цикле с дросселирующим клапаном увеличивает КПД и эксергетический КПД. Цикл без внутреннего теплообменника и цикл с расширителем имеют самый высокий КПД и энергоэффективность при сравнении четырех циклов.

Примечательно и комплексное экспериментальное исследование производительности транскритической пароконденсационной холодильной установки малой мощности на хладагенте R744. Считается, что транскритические конденсаторные агрегаты на хладагенте R744, оснащенные эжекторами, коммерческого холодильного оборудования, негативно воздействуют на озоновый слой атмосферы. Для преодоления сохраняющегося барьера на пути их более широкого внедрения, связанного с отсутствием доступной технологии управления эжектором, недавно был реализован новый эжектор с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), отличающийся низкой стоимостью, простотой и неуязвимостью к засорению. Устранение этого и других недостатков такого эжектора стало целью экспериментального исследования, проведенного сотрудниками Факультета машиностроения и электротехники Университета Сённерборга, Факультета гражданского строительства и машиностроения Технического университета

Льонгбюботе и компании Danfoss в Нордборге (все – Дания)³. Её целью стал анализ производительности и энергоэффективности двух транскритических конденсаторных агрегатов на R744, оснащённых эжектором ШИМ, то есть с испарителем с перегрузкой и без него. Экспериментальная оценка проводилась при температуре среды около -5°C , температуре радиатора от 30°C до 40°C и частоте вращения компрессора от 40 Гц до 60 Гц. Полученные результаты показали, что ШИМ-эжектор может эффективно управлять высоким давлением в закритических условиях эксплуатации независимо от выбранной температуры радиатора и скорости компрессора. Кроме того, было обнаружено, что при той же холодопроизводительности система R744, оснащённая ШИМ-эжектором, обеспечивает экономию энергии от 7 до 11.1% без перегруженного испарителя и от 11.5% до 16.3% с перегруженным испарителем по сравнению со стандартным агрегатом R744 с клапаном перепуска паров и без эжектора, соответственно. Наконец, было обнаружено, что ШИМ-эжектор обеспечивает более высокие значения КПД по сравнению с его действующими конкурентами.

В рамках рассмотрения функциональности, энергоэффективности и производительности энергетических систем нельзя обойти вниманием результаты термодинамического исследования, так называемого

центробежного обратного или обратимого цикла Брайтона для охлаждения в системах кондиционирования воздуха. Для решения этой проблемы сотрудниками Колледжа гражданского строительства Чжэ-цзянского научно-технического университета китайского Ханчжоу, по результатам проведённого тематического исследования, предлагается реализовывать центробежный обратный (обратимый) цикл Брайтона (ЦОЦБ) использованием вращающегося теплообменника с механизмом преобразования между равной потенциальной энергией и энергией давления для повышения производительности системы⁴. Результаты виртуальных и натурных экспериментов показали, что КПД модифицированного ЦОЦБ примерно обратно пропорционален плотности теплоносителя, более подходящим вариантом которого для систем ЦОЦБ оказался CO_2 . В экспериментах реализованы возможности трёх различных холодильных термодинамических циклов для системы ЦОЦБ: ромбовидный, трапециевидный (рис. 2) и прямоугольный.

Как с технической, так и с эксплуатационной точки зрения трапециевидный цикл оказался предпочтительным выбором для ЦОЦБ. Когда изоэнтальпический КПД системы ЦОЦБ превышает 95%, её КПД колеблется от 5.31 до 5.7, тогда как КПД транскритического холодильного цикла с CO_2 , в зависимости от комплектации, составляет до 0.79. Это говорит о том, что произ-

³ Gullo P., Birkelund M., Kriezi E.E., Kærn M.R. Comprehensive experimental performance study on a small-capacity transcritical R744 vapour-compression refrigeration unit equipped with an innovative ejectorInternational // Journal of Refrigeration. 2023. Vol. 152. P. 192–203.

⁴ Wang L., Li H., Zhou J. Thermodynamic investigation of a centrifugal reverse Brayton cycle for refrigeration in air conditioning filedInternational // Journal of Refrigeration. 2023. Vol. 152. P. 176–191.

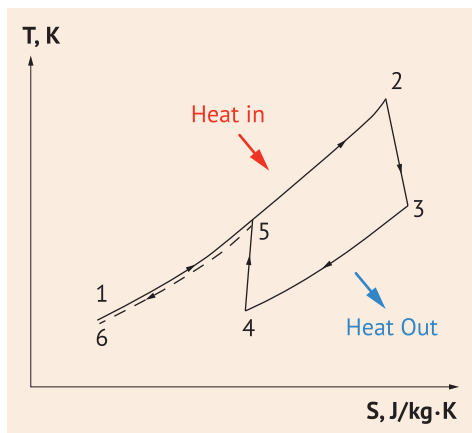


Рис. 2. Диаграмма обратного (обращенного) цикла Брайтона

водительность системы ЦОЦБ значительно превосходит производительность обычного цикла Брайтона, при этом достигая производительности, сравнимой с производительностью обычных парокомпрессионных холодильных систем.

Аналитические и теоретические исследования

Использование результатов эмпирических экспериментальных исследований позволяет повысить объективность и достоверность полученной аналитики и для обоснования выводов фундаментальных теорий, ставящих своей целью не только описание структурных элементов изучаемого явления, но и выяснение причин, которые лежат в его основе.

Результативным оказывается и прямой теоретический термодинамический, и анализ эффективности высокотемпературных энергетических систем, реализуемых, например, на основе топливных элементов с протонообменной мем-

браной и каскадной утилизацией отходящего тепла. Гибридные энергетические системы на водородных топливных элементах оказались многообещающим способом сокращения выбросов углекислого газа. Для каскадной утилизации отработанного тепла сотрудниками Колледжа энергетики и окружающей среды Института науки и технологий углеродной нейтральности и Института разработки стратегии углеродной нейтральности дельты реки Янцзы Юго-Восточного университета китайского Нанкина разработана и в экспериментальных апробациях продемонстрирована⁵ одинарная реализация высокотемпературной топливной ячейки с протонообменной мембраной. Она сочетает в себе функции охлаждения, нагрева и генерации электроэнергии с конденсационной рекуперацией тепла. Отходящее тепло в этой инновационной системе используется для запуска органического цикла Ренкина и цикла абсорбционного охлаждения, а низкотемпературное отходящее тепло – органического цикла Ренкина (рис. 3) и цикла абсорбционного охлаждения для нагрева горячей воды для бытовых нужд. Эквивалентная плотность мощности увеличивается с 59.4 кВт до 211.5 кВт, при увеличении плотности рабочего тока теплоносителя с 0.2 А/см² до 1.0 А/см², а эксергетический КПД интегрированной системы снижается с 0.689 до 0.491.

Максимальная эквивалентная плотность мощности 157 кВт дости-

⁵ Ma Z., Cai L., Zhang X., Zhang X. Thermodynamics and 3E analyses of a high-temperature proton exchange membrane fuel cell-based CCHP system with cascade utilization of waste heat // International Journal of Refrigeration. 2023. Vol. 152. P. 204–213.

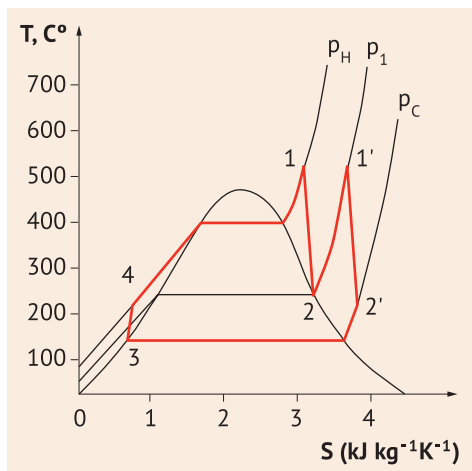


Рис. 3. Диаграмма органического цикла Ренкина

гается при коэффициенте распределения отходящего тепла 0.43 по сравнению со 128 кВт отдельной реализации такого рода энергетической системы. По сравнению с одиночной системой обычный и эксергетический КПД с рекуперацией тепла предлагаемой системы повышен на 22.6% и 10.4%, соответственно. Система обладает наименьшим потреблением ископаемой энергии и выбросами оксидов углерода, а также самым высоким коэффициентом экономии затрат при использовании ветроводородной технологии со сроком окупаемости 4.5 г. при цене водорода 5 долл/кг.

Примечательны и результаты термодинамического исследования интегрированной холодильной системы увлажнения-осушения и компрессии пара, работающей на солнечной энергии. Оно проведено⁶ сотрудниками Департамента

машиностроения Национального технологического института им. доктора Б.Р. Амбедкара в индийском Джаландхаре в рамках решения проблемы нехватки воды в засушливых регионах мира. В нём оценена эффективность интегрированной холодильной системы увлажнения-осушения и компрессии пара, работающей на солнечной энергии, позволяющей получать воду из влаги воздуха и опреснять соленую морскую воду. В ней используются возможности комбинированной установки кондиционирования воздуха, реализующего холодильный цикл сжатия пара, в котором тепло забирается его испарителем и отводится его конденсатором, но не тратится впустую, что, как правило, происходит обычно, а используется по назначению.

Такая инновационная комбинированная термодинамическая система выдаёт питьевую воду, прохладный воздух и тёплую воду, избегая при этом теплового загрязнения. Хотя интеграция охлаждающих и опреснительных установок вызвала интерес некоторых учёных, конструкция воздухопроводов в настоящей работе является новой идеей. В этом исследовании необходимая температура распыляемой воды в увлажнителе определяется с учётом комфорта человека. Изучено влияние условий окружающей среды, температуры солёной воды и эффективности увлажнителя на производительность и рабочие параметры. Разработанная термодинамическая модель верифицирована экспериментами. Для предусмотренных условий эксплуатации коэффициент усиления, холодопроизводительность, коэффициент энергетической эффективности и эксергетический КПД

⁶ Saxena A., Tangellapalli S. Thermodynamic investigation of solar-powered integrated humidification-dehumidification and vapor compression refrigeration system // *International Journal of Refrigeration*. 2023. Vol. 151. P. 304–313.

составили 2.26, 0.70, 1.94 и 18.67%, соответственно.

Для углубленного исследования характеристик газовых волн внутри каналов волнового ротора холодильной установки сотрудниками Кафедры химического машиностроения Даляньского технологического университета Китая теоретически проконтролированы⁷ изменения производительности и давления при различных условиях эксплуатации. Основные результаты исследования заключаются в следующем: метод расчёта может обеспечить точную конструкцию портов давления, хотя послеволновое давление газа в численных расчётах имеет определённую разницу с экспериментом из-за фактической утечки в зазоре и потерь на трение. Отклонение рабочего коэффициента давления от проектных значений приводит к возникновению обратных/отраженных

волн сжатия или усиливает утечку газа, что снижает производительность оборудования. Когда степень расширения α постоянна, степень снижения эффективности не превышает 11.9%, поскольку относительная скорость изменения степени сжатия составляет менее 150%; Когда степень сжатия β постоянна, эффективность снижается на долю менее 16.4%, поскольку относительная степень увеличения α составляет менее 63%.

Заключение

Столь детальное рассмотрение направлений, целей, методов и результатов исследований по эффективности реализаций возможностей энергетических установок с использованием потенциала прикладной термодинамики свидетельствует о повышенном внимании к проблеме рационального потребления энергетических ресурсов. Конкретные реализации этих конструктивно-технологических мероприятий будут представлены в последующих публикациях этой тематики.

⁷ Zhao Y., Ji Y., Hu D., Wang J. *Experimental research of the entire wave system inside a wave rotor refrigerator and the impact of pressure ratios on the equipment performance* // Transactions of the ASME. 2023. Vol. 145. № 6. P. 101–112.



НАУКА

— 1727 —

ПОДПИШИТЕСЬ
НА ЖУРНАЛЫ
ИЗДАТЕЛЬСТВА
«НАУКА»

печатные и электронные версии



Отдельные номера журналов можно купить

- в интернет-магазине **NAUKABOOKS.RU**
- в магазине «Академкнига»
по адресу: г. Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1
- по электронной почте (e-mail) journals@naukapublishers.ru
- по телефону +7 (495) 276-77-35