

Control of Carbon Dioxide Bivalent Heat Pump on Heating of Buildings. Part II

¹Sit M.L., ¹Juravleov A.A., ²Frid S.E., ¹Timchenko D.V., ³Denysova A.E., ¹Uzun M.

¹Institute of Power Engineering of the Technical University of Moldova
Chisinau, Republic of Moldova

²Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

³Odessa Polytechnic National University, Odessa, Ukraine

Abstract. The control system of a bivalent heat pump (BHP), using as low potential heat (LPH) sources both the heat of the return water of the network and the heat of the outside air, is considered. The aim of the work is to determine the parameters of the thermodynamic cycle of the heat pump, which would ensure the operation of the heat pump at variable temperatures and flow rates of the refrigerant in the load. The set goal is achieved by solving the following tasks: analysis of the methods of synthesis of systems at variable load, analysis of the operation of the system at random disturbances, development of the heat pump automatic control system (ACS). The main result of the work is: the scheme of the heat pump, which can work with variable pressures of the evaporator and the gas cooler, as well as the technical solution, in which the enthalpy difference at the evaporator remains constant regardless of the outside air temperatures. Significance of the obtained results consists in creation of the BTN scheme, which allows to provide both qualitative and qualitative-quantitative laws of regulation of thermal regime of a building at increase of SOR of a heat pump, thanks to rational choice of a temperature schedule of regulation. Local storage using electrochemical accumulators at the required capacity would be very expensive and would make the entire installation unprofitable. The only reasonable solution is interaction with the grid, which requires, in addition to the technical means of interfacing, the presence of appropriate regulations governing the transfer of electricity generated by the local facility to the grid, especially if the generation will be carried out throughout the year.

Keywords: bivalent heat pump scheme, automatic control, random disturbances, reliability, district heating, carbon dioxide.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.4-64.13>

UDC: 621.577

Controlul pompei de căldură bivalentă la alimentarea cu căldură a clădirilor . Partea II

¹Șit M.L., ¹Juravleov A.A., ²Frid S.E., ¹Timcenco D.V., ³Denâsova A.E., ¹Uzun M.

¹Institutul de Energetică al Universității Tehnice din Moldova, Chișinău, Republica Moldova

²Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscova, Federația Rusă

³Universitatea Națională Politehnică din Odesa, Odesa, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este de a determina parametrii ciclului termodinamic al pompei de căldură, care ar asigura funcționarea pompei de căldură la temperaturi și debite variabile ale lichidului de răcire în sarcină. Scopul stabilit se realizează prin rezolvarea următoarelor sarcini: analiza metodelor de sinteză a schemelor la sarcină variabilă, analiza funcționării schemei la perturbări aleatorii, dezvoltarea sistemului de control automat al pompei de căldură (ACS). Cel mai important rezultat al lucrării este: schema pompei de căldură, care poate funcționa la presiuni variabile ale evaporatorului și răcitorului de gaz, precum și soluția tehnică, în care diferența de entalpii la evaporator rămâne constantă indiferent de temperaturile aerului exterior. Semnificația rezultatelor obținute constă în crearea schemei BHP, care permite să se asigure atât reglarea calitativă, cât și calitativ-cantitativă a regimului termic al clădirii la creșterea COP al pompei de căldură, datorită alegerii raționale a programul de reglare a temperaturii. La utilizarea modulelor fotovoltaice problema rămâne stocarea energiei electrice generate de acestea. Depozitarea locală folosind acumulatori electrochimici la capacitatea necesară ar fi foarte costisitoare și ar face ca întreaga instalație să fie neprofitabilă. Singura soluție rezonabilă este interacțiunea cu rețeaua, care necesită, pe lângă mijloacele tehnice de interfațare, prezența unor reglementări adecvate care reglementează transferul energiei electrice generate de instalația locală către rețea, mai ales dacă generarea va să fie efectuate pe tot parcursul anului.

Cuvinte-cheie: schema pompei de căldură bivalentă, control automat, perturbări aleatorii, fiabilitate, termoficare, dioxid de carbon.

Управление бивалентным тепловым насосом при теплоснабжении зданий. Часть 2**¹Шит М.Л., ¹Журавлев А.А., ²Фрид С.Е., ¹Тимченко Д.В., ³Денисова А.Е. ¹Узун М.**¹Институт энергетики Технического университета Молдовы, Кишинев, Республика Молдова²Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва, Российская Федерация³Национальный Университет «Одесская политехника», Одесса, Украина

Аннотация. Рассмотрена система управления бивалентным тепловым насосом (БТН), использующим в качестве источников низкопотенциальной теплоты (НПТ) как теплоту обратной сетевой воды, так и теплоту наружного воздуха. Целью работы является определение параметров термодинамического цикла БТН, который обеспечивал бы работу теплового насоса при переменных температурах и расходах теплоносителя в нагрузке. Поставленная цель достигнута путем решения следующих задач: анализа методов синтеза схем при переменной нагрузке, анализа работы схемы при случайных возмущениях, разработки САУ ТН. Наиболее существенным результатом работы является: схема теплового насоса, который может функционировать при переменных давлениях испарителя и газоохладителя, а также техническое решение, при котором перепад энтальпий на испарителе остается постоянным независимо от температур наружного воздуха. Установлено, что для стабилизации режима работы регулирующего клапана достаточно ПИ-регулятора в контуре САУ температурой хладагента на выходе второй ступени газоохладителя. Значимость полученных результатов состоит в создании схемы БТН, которая позволяет обеспечить как качественный, так и качественно-количественный—законы регулирования теплового режима здания при повышении COP теплового насоса, благодаря рациональному выбору температурного графика регулирования. При использовании фотоэлектрических модулей проблемой остается аккумуляция генерируемой ими электроэнергии. Локальное аккумуляция с применением электрохимических аккумуляторов при требуемых мощностях получится очень дорогим, и сделает всю установку нерентабельной. Единственный разумный выход – взаимодействие с сетью, требующее помимо технических средств сопряжения ещё и наличия соответствующих нормативных актов, регламентирующих передачу генерируемой локальным объектом электроэнергии в сеть, особенно если генерация будет осуществляться в течение всего года.

Ключевые слова: схема гибридного теплового насоса, автоматическое управление, случайные возмущения, надежность, централизованное теплоснабжение, углекислый газ.

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе продолжается рассмотрение подхода к постепенному росту доли ВИЭ в системах теплоснабжения многоэтажных зданий. С этой целью авторами рассматривается система «ТЭЦ-местные тепловые насосы «воздух-вода» с блоками фотоэлектрических коллекторов. Предложено использовать часть теплоты обратной сетевой воды зданий, условно называемых ведущими, для подогрева воздуха, являющегося источником низкопотенциальной теплоты для теплового насоса (ТН) типа «воздух-вода», используемого для теплоснабжения зданий, называемых «ведомыми». В комплексе с ТН рассматривается блок фотоэлектрических модулей, установленных на ведущем и ведомом зданиях для электроснабжения тепловых насосов.

В [1] указано, что тепловые насосы, работающие на основе грунта, известны своей энергоэффективностью и потенциалом сокращения выбросов углерода. Однако несогласованность теплообмена между скважинным теплообменником и почвой зимой и летом в регионах с преобладанием отопления приводит к тепловому дисбалансу почвы. Для решения этой проблемы изучалась интегра-

ция гибридных фотоэлектрических модулей (PV/T) в качестве вспомогательных источников тепла с тепловыми насосами, работающими на основе грунта, и оценивалась их жизнеспособность в различных регионах с преобладанием отопления. Для оценки производительности системы при различных комбинациях источников тепла использовалась модель системы, которая взаимодействует с MATLAB и TRNSYS. Результаты показывают, что использование гибридных фотоэлектрических модулей повышает коэффициент полезного действия теплового насоса на 6,5%, сохраняя при этом тепловой баланс почвы. Более крупные системы с большим количеством модулей дают лучшую отдачу в регионах с относительно высоким соотношением нагрузки охлаждения/отопления. Более низкие капитальные затраты на модули и более высокие цены на электроэнергию в сети повышают экономическую привлекательность комбинированной системы в регионах с относительно низким соотношением нагрузки охлаждения/отопления, при этом стоимость жизненного цикла снижается до 40% по сравнению с традиционными системами. Использование таких модулей может

снизить стоимость жизненного цикла обычных тепловых насосов, использующих тепло грунта, более чем на 30 %, а их выбросы CO₂ – более чем на 50% при умеренных капитальных затратах. Это исследование предоставляет данные и рекомендации для применения таких интегрированных систем в регионах с преобладанием отопления. В обзоре [2] рассматривается интеграция солнечных технологий, тепловых насосов и систем хранения тепловой энергии для снижения энергопотребления зданий. В нем подробно рассматриваются различные типы солнечных коллекторов (СК), включая как концентрирующие устройства, такие как параболические концентраторы, фоконы и фоклины, так и неконцентрирующие конструкции, такие как плоские и трубчатые вакуумированные коллекторы. В нем рассматриваются инновационные стратегии повышения производительности СК, такие как альтернативные профили для фоконов и фоклинов, и вставка ребер в трубки-поглотители. В обзоре рассматриваются материалы для хранения тепловой энергии с разделением их на накопители «явного» тепла, накопители скрытого тепла (фазопереходные) и термохимические накопители тепла (ТНТ). Обсуждаются преимущества и недостатки каждой категории. В [3] рассматривается энергетическая система, оснащенная гибридными фотоэлектрическими коллекторами, двумя баками-аккумуляторами: источника тепла и бытового горячего водоснабжения и тепловыми насосами для отопления помещений и бытового горячего водоснабжения односемейного жилого дома, расположенного на северо-востоке Италии. Были проанализированы воздушные, солнечные и грунтовые тепловые насосы. Некоторые конфигурации были исследованы с использованием компьютерного моделирования на основе математической модели, разработанной для оценки электрических и тепловых характеристик гибридных солнечных коллекторов. Был проанализирован интеллектуальный блок управления, способный определить лучший источник тепла для теплового насоса и рассмотреть возможность впрыска собранного солнечными коллекторами в летний период тепла в грунт. Исследование показало, что мультиэнергетические системы источника были ответственны за повышение энергоэффективности на 16-25% по сравнению с обычной системой теплового насоса воздух-вода. Моделирование

также показало, что энергоэффективность системы источника воздух-солнце была немного ниже, чем у других конфигураций, включая тепловой насос грунтового источника.

Использование солнечной энергии в тепловом насосе может дополнительно способствовать энергосбережению и эффективности. Многочисленные исследовательские группы исследовали системы солнечного теплового насоса (SAHP), которые можно классифицировать на системы с прямым и косвенным расширением [1, 2]. Система нагрева воды с солнечным тепловым насосом прямого расширения (DX-SAHP), в которой солнечные коллекторы или гибридные модули PV/T используются в качестве испарителя системы теплового насоса [3-7]. Тепловой насос косвенного расширения (IDX-SAHP) можно разделить на последовательный тип, параллельный тип, параллельно-последовательный тип и тип с двойным источником тепла в соответствии с различными комбинациями между системами солнечной энергии и теплового насоса [6]. Обзор [4] ставит своей целью представление достижений и текущего состояния тепловых насосов с прямым расширением и солнечной поддержкой (DX-SAHP), которые имеют большой потенциал для различных применений и используют низкотемпературную окружающую энергию и солнечное излучение. Этот обзор показывает, что интеграция солнечных коллекторов-испарителей с некоторыми технологиями, такими как фотоэлектрические, фазопереходные тепловые аккумуляторы и тепловые трубы, позволяет DX-SAHP работать лучше в различных климатических условиях и приложениях. Это исследование приводит к выводу, что существуют четкие тенденции перспектив коммерциализации технологии с внедрением DX-SAHP в различные отрасли промышленности и изучением многофункциональных приложений DX-SAHP.

В [5] показано, что комбинации фотоэлектрических тепловых насосов (PV-HP) с аккумуляторными батареями и системами управления энергией становятся все более популярными. Эта тенденция обусловлена продолжающейся электрификацией сектора отопления и растущим неравенством между увеличением расходов на электроэнергию и снижением тарифов на подачу электроэнергии в Германии. Стратегии интеллектуального управления могут использоваться для контроля и оптимизации работы теплового насо-

са для достижения более высокого собственного потребления электроэнергии. В работе представлены результаты оценки готовой к интеллектуальной сети управляемой системы PV-HP-аккумуляторных батарей в односемейном домохозяйстве в Германии с использованием данных полевых измерений с высоким разрешением в течение 1 минуты. За 12-месячный период оценки было определено собственное потребление в размере 43%. Солнечная доля ТН составляет 36%, что также стало возможным благодаря более высоким заданным температурам для отопления помещений и производства горячей воды для бытовых нужд. Сезонный коэффициент производительности SPF — это отношение общей тепловой энергии, вырабатываемой тепловым насосом в течение сезона отопления/охлаждения или за год, к его потреблению электроэнергии за тот же период. Соответственно, SPF уменьшается на 4,0% в режиме отопления помещений и на 5,7% в режиме горячего водоснабжения. Комбинированный сезонный коэффициент производительности для системы теплового насоса увеличивается с 4,2 до 6,7, если учитывать только электроэнергию, взятую из сети, и не учитывать локально вырабатываемую электроэнергию, поставляемую фотоэлектрическими установками. В [6] была спроектирована и установлена многофункциональная гибридная солнечная (PV/T) теплонасосная система для подачи энергии в жилые здания. Система могла реализовывать различные функции, работая в различных режимах, таких как отопление зимой, охлаждение летом, нагрев бытовой воды в течение всего года и часть спроса на электроэнергию для домохозяйств. Экспериментально исследовалась производительность системы. Результаты показали, что средняя общая эффективность модуля PV/T составляла более 50% для режима нагрева воды, когда солнечного излучения было достаточно, тем самым указывая на хорошую теплопроизводительность модуля PV/T. В экспериментальных условиях коэффициенты производительности (COP) режима нагрева PV/T-WSHP и режима нагрева PV/T-W&ASHP составляли 3.18 и 2.53, что было намного выше, чем COP режима нагрева ASHP, равного 2.23. Разница была связана с тем, что добавление солнечной энергии могло улучшить температуру испарения системы теплового насоса. Таким образом, можно активировать различные режимы работы, тем

самым реализуя максимально возможное энергосбережение. Система может полностью использовать солнечную энергию и реализовать выгодные взаимодополняемости между солнечной энергией и тепловым насосом путем каскадного использования энергии. Данные и анализ могут предоставить ссылку на форму комбинации между PV/T-системой и различными системами тепловых насосов. В [7] сравниваются и исследуются различные комбинации систем солнечной энергии и теплового насоса с помощью моделирования переходных систем. Основное внимание уделяется маломощному тепловому насосу (ТН) с тепловой мощностью 5.36 кВт. Здание (односемейный дом площадью 140 м²), которое рассматривается в этой статье, имеет потребность в отоплении помещения около 45 кВт·ч/м² в год. На основе обычной системы ТН с воздушным источником и параллельной системы ТН с солнечным воздушным источником определяются и анализируются последовательные решения для комбинации систем солнечных ТН. Для рассмотрения и оценки различных систем с помощью моделирования переходных систем используется полуфизическая модель ТН, которая дает возможность использовать два испарителя последовательно. С комбинированной параллельной системой ТН с солнечным воздушным источником производительность системы (SPF = 3.65) может быть значительно увеличена по сравнению с обычной системой ТН с воздушным источником (SPF = 2.55). Неостекленные солнечные коллекторы с селективным покрытием поглощающих панелей в качестве источника для ТН имеют преимущество, заключающееся в том, что коллектор может использоваться как воздушный теплообменник. При наличии солнечного излучения можно достичь более высоких температур на испарителе ТН по сравнению с обычной системой ТН с воздушным источником. Интеграция таких солнечных коллекторов в качестве источника для ТН позволяет значительно повысить его производительность (SPFHP увеличивается с 3.25 до 3.55 по сравнению с обычной системой ТН с воздушным источником).

В [8] сравниваются и исследуются с помощью моделирования различные комбинации солнечных систем и теплового насоса. Предложены решения для односемейных домов. Основное внимание уделяется маломощному тепловому насосу с тепловой мощ-

ностью 5.36 кВт. Здание (односемейный дом площадью 140 м²), которое рассматривается в этой статье, имеет потребность в отоплении помещения около 45 кВт·ч/м² в год. Широкое распространение в странах СНГ получило регулирование по температуре наружного воздуха. С точки зрения теории управления подобное регулирование реализует разомкнутый цикл управления (без обратной связи по регулируемой координате), его применение в сравнении с замкнутым циклом управления обеспечивает более низкую точность. Также регулирование по температуре наружного воздуха не учитывает влияния быстродействующих возмущений: ветра, солнца, внутренних теплопоступлений от людей и электроприборов и т.д.

Методической основой повышения качества регулирования отопления является реализация замкнутых контуров с обратной связью по регулируемой координате – температуре воздуха в помещениях здания. Теплогидравлические процессы в здании обладают большой инерционностью, имеют нелинейный и распределенный характер, подвержены большому количеству возмущающих факторов, прямое измерение которых крайне затруднительно на практике. Указанные особенности ограничивают возможность применения в системах автоматического управления отоплением зданий типовых алгоритмов регулирования с обратной связью по температуре воздуха в помещениях и компенсации действующих возмущений.

Рассмотрим влияние законов регулирования теплового режима зданий: качественного, количественного и качественно-количественного на схему ТН и его законы регулирования. Для этого рассмотрим интеграцию закона регулирования на основе оценки и отработки быстропеременных возмущений [12]. Для решения данной задачи предлагается подход, основанный на компенсации тепловой инерции здания и влияющих на здание возмущений путем формирования упреждающей оценки обобщенного возмущения на температуру воздуха в помещениях, полученной с использованием прямых и обратных моделей динамики здания.

Для оптимизации температуры теплоносителя по критерию минимума отклонения температуры воздуха в помещениях от установленного предела предложен подход к формированию эффективного температурного графика, основанный на анализе истории

процесса, накапливаемого за тестовый период и период эксплуатации. В результате кусочно-линейной аппроксимации полученного эффективного графика сформирован температурный график с двумя изломами, учитывающими повышенный уровень солнечной радиации в период начала и окончания отопительного периода. Произведена верификация данного температурного графика, которая показала повышение точности регулирования температуры воздуха в помещении и устранение статической ошибки при анализе усредненных за рассматриваемый период значений температуры воздуха в помещении, что подтверждает на практике возможность применения данного подхода. При этом сохраняется достаточно большой разброс значений температур воздуха в помещении в отдельные моменты времени, что указывает на существенное влияние на температуру воздуха в помещении различных возмущающих факторов, которые необходимо компенсировать соответствующим управляющим воздействием. Тем не менее, система не лишена общих недостатков, присущим системам отопления, а именно, отсутствие компенсации влияния солнечного излучения по фасадам, отсутствие компенсации внутренних тепловыделений в здании и др. Поэтому тепловой насос должен всегда работать в комплексе с системой автоматизации теплоснабжения здания.

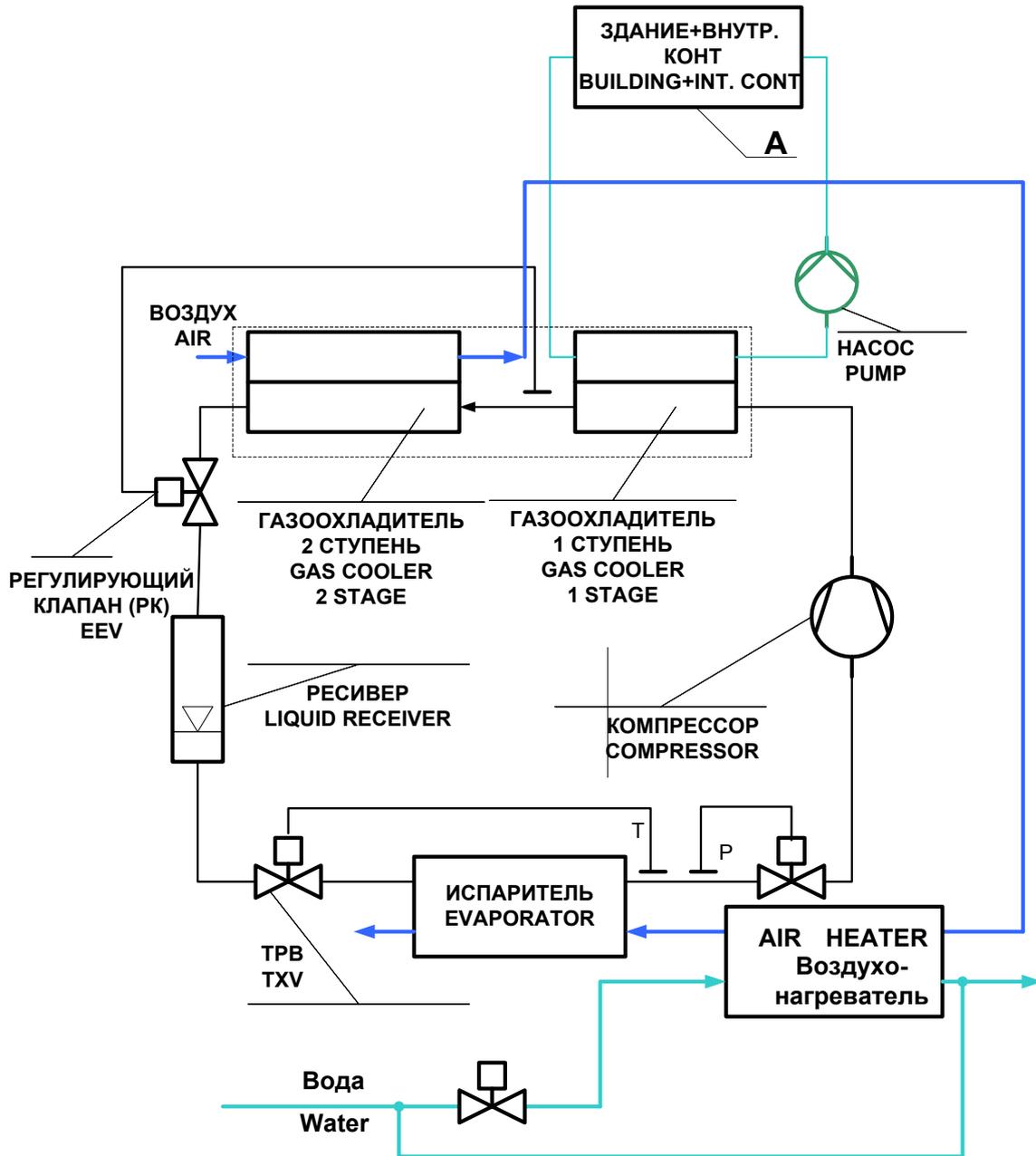
СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ТЕПЛООВОГО НАСОСА

На рис.1 приведена структурная схема теплового насоса.

Под обозначением «А» приведен внутренний контур теплового насоса, который имеет различную конфигурацию в зависимости от способа регулирования тепловой нагрузки здания: количественного, качественного или качественно-количественного.

Так, при качественном регулировании теплового режима, последний обеспечивается, в максимальной степени настройками цикла ТН с помощью совместной работы и регулирующего клапана РК (EEV), ТРВ, регулирующего клапана давления в испарителе, и подмешивающего насоса контура (рис.1).

При количественном режиме регулирования теплового режима в здании он поддерживается регулирующим электроприводом компрессора и регулирующим приводом насоса промежуточного контура.



Зеленый цвет линий – вода, синий цвет линий – воздух, черный цвет линий – хладагент.

Рис.1. Структурная схема теплового насоса.

Green lines are water, blue lines are air and black lines are coolant.

Fig.1. Block diagram of a heat pump.

При количественно-качественном регулировании тепловой режим отапливаемого здания обеспечивается как за счет изменения оборотов привода компрессора, так и за счет изменения состояния регулирующих вентилей теплового насоса. Можно предложить для использования в зданиях, отапливаемых ТН, расширенный график регулирования режима отопления, обеспечивающий максимальное использование теплового потенциала теплоносителя, заданную температуру воздуха в

отапливаемых помещениях и минимальные затраты энергии на транспортировку теплоносителя. Этот график основан на количественно-качественном законе регулирования теплового режима отапливаемых зданий. Применение расширенного графика приводит в основной части отопительного периода к снижению температуры обратной воды до 30–40°C при наличии достаточного запаса мощности системы отопления, что обеспечивает более полное охлаждение и уменьшение

расхода теплоносителя, снижает затраты электроэнергии на привод сетевых насосов источника теплоснабжения и тепловые потери в сети [9].

Рассмотрим температурный график 75/30 качественного регулирования температуры сетевой воды. Из рассмотрения графика следует, что при температуре наружного воздуха минус 16°C температура обратной сетевой воды составит 30°C.

В работе [5] предложено установить между ТРВ и компрессором регулирующий вентиль «до себя», который обеспечивает заданное давление на входе в испаритель и минимальное влияние расхода хладагента при стабилизации давления ТРВ.

Для рассматриваемого случая ТРВ должен быть электронным, с тем чтобы обеспечить ПИ-закон регулирования перегрева хладагента.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ ТЕПЛООВОГО НАСОСА

На рис.2 приведены три цикла БТН при температурах наружного воздуха минус 16°C (тг. 1-2-3-11-10), 0°C (тг. 4-5-6-11-10), 8°C (тг. 7,8,9,11,10).

Приведенные циклы предназначены для работы с температурным графиком качественного регулирования теплового режима 75-30. Точки 10-11 соответствуют испарителю, 10-1,10-4, 10-7 – компрессору, 1-2, 4-5, 7-8 – первой ступени газоохладителя, 2-3, 5-6, 8-9 – второй ступени газоохладителя.

Перегрев испарителя предлагается регулировать за счет регулирования температуры воздуха, омывающего испаритель при заданной температуре обратной сетевой воды (ОСВ). Среди работ, посвященным регулированию режима работы теплообменников отметим [15-19].

В схеме предусмотрено стабилизировать положение рабочих точек испарителя в цикле за счет: регулирования расхода ОСВ и наружного воздуха, а также за счет регулирования расхода воздуха, подаваемого на вторую ступень газоохладителя. Заданная температура хладагента на выходе второй ступени газоохладителя в зависимости от температуры наружного воздуха, в общем виде, записывается в виде уравнения:

$$t_{out_2} = f(t_{ext}, P_{GC}), \quad (1)$$

где,

t_{ext} – температура наружного воздуха,

P_{GC} – давление газоохладителя в зависимости от температуры наружного воздуха.

Передаточная функция теплообменника по координатам «расход воздуха, температура хладагента» имеет вид [10,12]:

$$W(p) = \frac{T_R(p)}{G_A(p)} = \frac{1 - e^{-p\tau_1}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (2)$$

Моделирование работы данной передаточной функции с ПИ- и ПИД-регулятором оптимально настроенными согласно методике, предлагаемой MATLAB, показало, что такая замкнутая САУ является устойчивой. Переходный процесс не обладает перерегулированием. Длительность переходного процесса составляет приблизительно три максимальные постоянные времени одночленом, стоящих в знаменателе. Задачам регулирования перегрева газа после испарителя посвящено много работ. Здесь отметим только [36-41].

Для обеспечения необходимого значения величины перегрева газа после испарителя можно использовать: дополнительный компрессор с мощностью приблизительно 25% от мощности основного компрессора, теплообменник, отбирающий теплоту от воздуха к хладагенту, выбор оптимальной температуры испарителя при максимальной температуре воды в отопительной системе, дополнительную теплоту от солнечных коллекторов для подогрева хладагента. Для температурного графика количественного регулирования 110/60 ведущего здания и температурного графика 75/30 для ведомого здания, температура хладагента в испарителе составила 15°C при давлении 5 МПа.

Выбор координат рабочих точек 10-11 испарителя определяется тем требованием, чтобы т. 11 находилась гарантированно левее линии насыщения диоксида углерода на H(P) диаграмме.

Это обосновывается тем требованием, чтобы регулирующий клапан работал на однофазной среде. Выбор P и T координат т. 10 определяется требованием, чтобы точки, лежащие на изоэнтропе 10-1 (рис.2), были расположены приблизительно эквидистантно линии температур прямой сетевой воды отапливаемого здания. Давление, под которым находится среда в испарителе определяется тем требованием, чтобы значение величины перегрева газа было в пределах 5-6°C и зна-

чение величины температуры газа в т. 10 потребовало бы минимума расхода топлива на ТЭЦ для подогрева обратной сетевой воды (ОСВ).

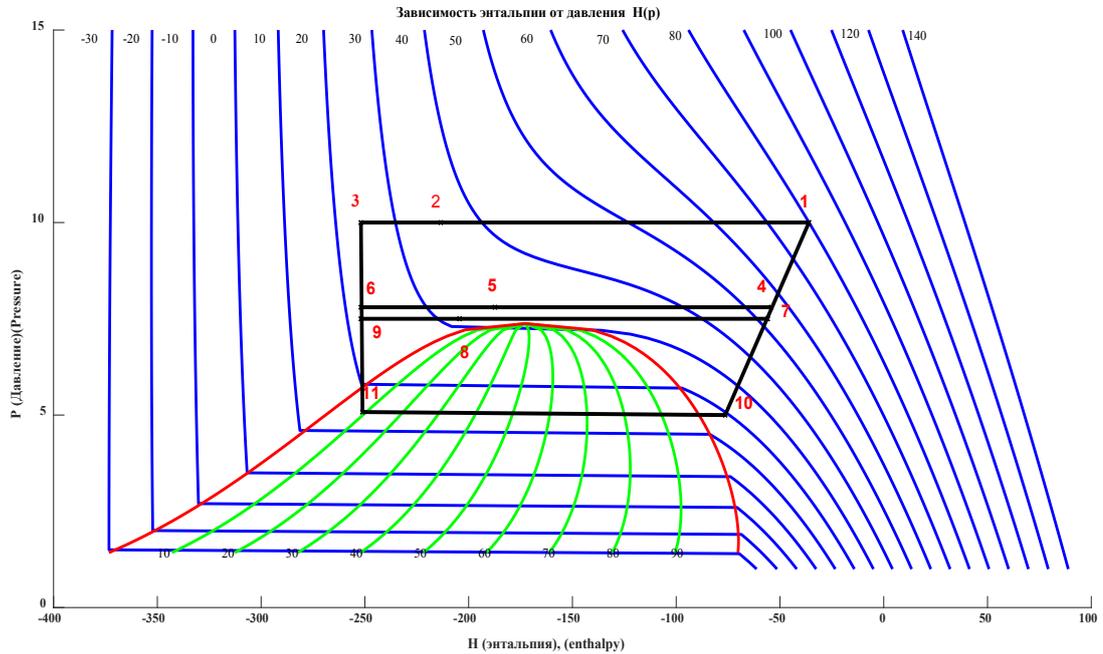


Рис. 2. Термодинамические циклы теплового насоса для отдельных температур воздуха.
Fig.2. Heat pumps thermodynamic cycles for individual air temperatures.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ГИБРИДНЫМ ТЕПЛОМ НАСОСОМ

Система теплоснабжения с тепловым насосом требует наличия двух источников энергии: источника энергии на привод теплового насоса и источников низкопотенциального тепла, используемого тепловым насосом. В обоих случаях для дополнительного энергообеспечения может быть использована солнечная энергия. Эффективность и целесообразность её использования требует отдельного анализа.

В качестве источника низкопотенциального тепла для теплового насоса рассмотрим воду, нагреваемую в солнечных коллекторах и подаваемую из них в бак-аккумулятор. Циркуляционный насос включается блоком автоматики, когда температура воды в коллекторе превышает её температуру в баке (обычно на 15-20°C с учетом того, что при отсутствии прокачки вода в коллекторе нагревается сильнее, чем при наличии прокачки), и выключается, когда температура на выходе из коллектора сравнивается с темпе-

ратурой воды в баке. Нагрузкой водонагревателя является теплообменник теплового насоса, от которого в бак приходит вода с температурой 30°C, и на который подается вода с температурой 35°C. Если температура воды в баке превышает 35°C, она разбавляется тридцатиградуной водой от теплообменника, если температура ниже 35°C, солнечный водонагреватель от нагрузки отключается. Расход воды в контуре солнечного коллектора поддерживается равным 40 кг/м²ч, в контуре нагрузки – определяется величиной нагрузки, пропорциональной разности температур в помещении (21°C) и температуры наружного воздуха. Расчетная нагрузка (при минус 16°C для г. Кишинева) с учетом наличия теплового насоса составила 700 кВт. Из-за относительно низких рабочих температур применены плоские солнечные коллекторы, типичные параметры которых определены в [25]. Коллекторы считаются ориентированными на юг и установлены под углом, примерно равным широте местности (45°), что близко к обеспечивающему максимальную годовую выработку тепла [20].

Описанная выше схема является простейшей, но позволяет оценить возможный вклад солнечной энергии в генерацию тепла для его использования тепловым насосом. Полученные моделированием в системе динамического моделирования установок возобновляемой энергетики TRNSYS [20, 26] максимальные доли покрытия тепловой нагрузки приведены на рис. 2. Необходимо отметить, что для такого покрытия нагрузки необходим бак-аккумулятор очень большого объема (до 140000 м³), однако при его уменьшении до разумных 100-120 м³, доля покрытия нагрузки снижается незначительно. Тем не менее, для покрытия хотя бы 20% нагрузки требуются солнечные коллекторы общей площадью порядка 1000 м². Для теплоснабжения одного здания это – излишне дорогое решение. Кроме того, размещение примерно 500 коллекторов на крыше здания (типичная площадь современного плоского солнечного коллектора – 2 м²) – отдельная непростая задача.

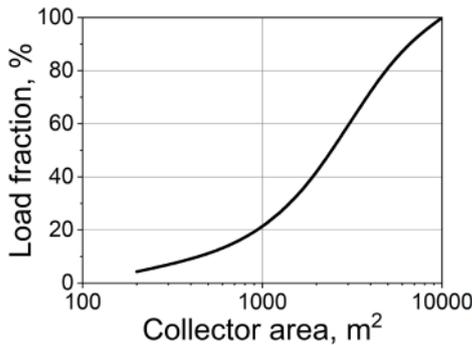


Рис. 3. Доля покрытия нагрузки в зависимости от площади солнечных коллекторов.

Fig.3. Share of load coverage depending on the area of solar collectors.

В отличие от солнечного коллектора, солнечная батарея может служить источником энергии для привода теплового насоса. В последнее время стоимость фотоэлектрических модулей (ФЭМ) сильно снизилась и продолжает снижаться [27]. Это позволяет не менее эффективно, чем с помощью солнечных коллекторов, вырабатывать из генерируемой ими электроэнергии тепло с помощью электронагревателей [28, 29]. Однако ФЭМ должны гораздо эффективнее работать в связке с тепловыми насосами, поскольку затраты энергии на привод существенно меньше количества перекачиваемого тепла. В частности, в нашем случае пиковая мощность

привода теплового насоса составляет 220 кВт, а средняя (если в первом приближении считать COP постоянным) – 125 кВт.

Расчет выработки фотоэлектрических модулей производился с применением однодиодной пятипараметрической модели ФЭМ [20, 30], хорошо описывающей наиболее распространенные кремниевые ФЭП [31] и реализованной в TRNSYS. В качестве исходных данных, как и при расчете выработки тепла солнечными коллекторами, использовались временные ряды часовых актинометрических и метеоданных в форме типичного метеогода [20] или в виде многолетних временных рядов актинометрических и метеорологических данных [32, 33]. Рассчитывался средний для 6 современных ФЭМ коэффициент использования установленной мощности (КИУМ; он очень слабо зависит от типа модуля, поэтому удобен для обобщённых оценок).

Полученные значения КИУМ для г. Кишинёва составляют 14.9–15.6% (при установке ФЭМ под углами 40–56°, оптимальными для круглогодичной и зимней работы ФЭМ) – для годовых значений, и примерно 10% – для зимней (январь–март, октябрь–декабрь) работы ФЭМ. Результаты показывают, что для обеспечения средней мощности привода теплового насоса в течение отопительного периода необходима солнечная батарея мощностью 1.25 МВт – при её работе только в зимний период – или около 850 кВт – при круглогодичной работе. Оба эти значения, как и площадь солнечных коллекторов, мало реализуемы, т.к. требуемое для этого количество ФЭМ (максимальная мощность среди рассмотренных модулей составила 665 Вт, соответственно, требуется установить 1200–1900 ФЭМ), однако, если, как и выше, сосредоточиться на частичном покрытии нагрузки, то, например, для 20% количество модулей, которые необходимо установить, составит 240–380, что уже вполне возможно.

Отдельным вопросом при использовании фотоэлектрических модулей остается аккумуляция генерируемой ими электроэнергии. Локальное аккумуляция с применением электрохимических аккумуляторов при требуемых мощностях получится очень дорогим, и сделает всю установку нерентабельной. Единственный разумный выход – взаимодействие с сетью, требующее помимо технических средств сопряжения ещё и наличия соответствующих нормативных актов, регламентирующих передачу генерируемой локальным объёмом

ектом электроэнергии в сеть (в том числе на время), особенно если генерация будет осуществляться в течение всего года. Нельзя сказать, что дополнительная генерация за счет нестабильной во времени солнечной энергии для сети однозначно полезна, однако соответствующие нормативные акты имеются во многих государствах.

Таким образом, применение солнечных коллекторов вместе с тепловыми насосами для отопления многоквартирных домов в условиях Молдовы технически и экономически нецелесообразно. В то же время фотоэлектрическая генерация может сократить электрическую нагрузку в части энергии, затрачиваемой на привод теплового насоса. Использование комбинированных PV/T систем, по-видимому, так же нецелесообразно, как и солнечных коллекторов, поскольку они столь же сложны в монтаже и обслуживании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1. Обоснован выбор параметров термодинамического цикла для теплового насоса, предназначенного для отопления здания с качественным, количественным и качественно-количественным законами управления.

2. Установлено, что для стабилизации температуры на выходе второй ступени газоохладителя «воздух-хладагент» использование ПИ-ПИД регулятора является достаточным.

3. Применение солнечных коллекторов вместе с тепловыми насосами для отопления многоквартирных домов в условиях Молдовы технически и экономически нецелесообразно. В то же время фотоэлектрическая генерация может сократить электрическую нагрузку в части энергии, затрачиваемой на привод теплового насоса. Использование комбинированных PV/T систем, по-видимому, так же нецелесообразно, как и солнечных коллекторов, поскольку они столь же сложны в монтаже и обслуживании.

Литература (References)

[1] Wang Yubo, Quan Zhenhua, Zhao Yaohua, Rosengarten Gary, Mojiri Ahmad Techno economic analysis of integrating photovoltaic-thermal systems in ground-source heat pumps for heating-dominated regions. *Applied Energy* 377 (2025)pp.1-17, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124677>.

[2] Vahidhosseini S.M.,Rashidi S., Hsu Shu-Han, Yan Wei-Mon, Rashidi A. *A heat pump coupled with photovoltaic thermal hybrid solar*

collectors: A case study of a multi-source energy system. *Journal of Energy Storage*

[3] Emmi, G., Zarrella, A., & De Carli, M. (2017). *A heat pump coupled with photovoltaic thermal hybrid solar collectors: A case study of a multi-source energy system.* *Energy Conversion and Management*, 151, 386–399. <https://doi:10.1016/j.enconman.2017.08>

[4] Shi, G.-H., Aye, L., Li, D., & Du, X.-J. (2019). *Recent advances in direct expansion solar assisted heat pump systems: A review.* *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 349–366. <https://doi:10.1016/j.rser.2019.04.044>

[5] Baraskar S.H., Gunther G., Wapler J., Lammle M. *Analysis of the performance and operation of a photovoltaic-battery heat pump based on field measurement data.* *Solar Energy Advances* 4 (2024) 100047

[6] Wang, G., Zhao, Y., Quan, Z., & Tong, J. (2018). *Application of a multi-function solar-heat pump system in residential buildings.* *Applied Thermal Engineering*, 130, 922–937. <https://doi:10.1016/j.applthermaleng.2018>

[7] Lerch, W., Heinz, A., & Heimrath, R. (2015). *Direct use of solar energy as heat source for a heat pump in comparison to a conventional parallel solar air heat pump system.* *Energy and Buildings*, 100, 34–42. <https://doi:10.1016/j.enbuild.2015.03.006>

[8] Shi, G.-H., Aye, L., Li, D., & Du, X.-J. (2019). *Recent advances in direct expansion solar assisted heat pump systems: A review.* *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 349–366. <https://doi:10.1016/j.rser.2019.04.044>

[9] Pyatin A.A., Suvorov D.M. *An Extended Heating Regulation Schedule: Definition and Assessment of Its Efficiency in Heat-Supply Systems.* *Thermal Engineering*, 2021, N4, pp.64-78, <https://doi.org/10.1134/S0040363621040068>

[10] Stermole, F. J., & Larson, M. A. (1963). *Dynamic Response of Heat Exchangers to Flow Rate Changes.* *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 2(1), 62–67. doi:10.1021/i160005a012

[11] Gao, T., Sammakia, B., & Geer, J. (2015). *Dynamic response and control analysis of cross flow heat exchangers under variable temperature and flow rate conditions.* *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81, 542–553. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.201

[12] Abdullin V.V. (2017). *Upravlenie treplovym regimom zdania s konturom otrabotki bystroperemennyh vozdeistvii.* Diss. Kand. Tehn. Nauk. [Building thermal management with a control loop fast-variable effects], https://www.susu.ru/sites/default/files/dissertation/dissertacia_abdullin.pdf. Accessed 29.11.2024

[13] Fallahsohi, H., Changenet, C., Placé, S., Ligeret, C., & Lin-Shi, X. (2010). *Predictive functional control of an expansion valve for minimizing the*

- superheat of an evaporator. *International Journal of Refrigeration*, 33(2), 409–418. <https://doi.org/10.1016/j.jirefrig.2009.10.008>
- [14] Elliott, M. S., & Rasmussen, B. P. (2010). *On reducing evaporator superheat nonlinearity with control architecture*. *International Journal of Refrigeration*, 33(3), 607–614. <https://doi.org/10.1016/j.jirefrig.2009.12>
- [15] Outtagarts, A., Haberschill, P., & Lallemand, M. (1997). *The transient response of an evaporator fed through an electronic expansion valve*. *International Journal of Energy Research*, 21(9), 793–807. doi:10.1002/(sici)1099-114x(199707)21:9<793::aid-er297>3.0.co;2-p
- [16] Zhang, H. G., Wang, E. H., & Fan, B. Y. (2013). *Heat transfer analysis of a finned-tube evaporator for engine exhaust heat recovery*. *Energy Conversion and Management*, 65, 438–447. doi:10.1016/j.enconman.2012.09.0
- [17] Chen, W., Zhijiu, C., Ruiqi, Z., & Yezheng, W. (2002). *Experimental investigation of a minimum stable superheat control system of an evaporator*. *International Journal of Refrigeration*, 25(8), 1137–1142. doi:10.1016/s0140-7007(01)00107
- [18] Zhu R.Q., Zheng X.Q., Wu Y.Z. *Fuzzy-PID Methods for Controlling Evaporator Superheat* *International Refrigeration and Air-Conditioning Conference*, Paper 500. <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/500>.
- [19] Doodman, A. R., Fesanghary, M., & Hosseini, R. (2009). *A robust stochastic approach for design optimization of air cooled heat exchangers*. *Applied Energy*, 86(7-8), 1240–1245. doi:10.1016/j.apenergy.2008.08.054–78, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.008>.
- [20] Duffie, J.A. and Beckman, W.A. (2013) *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4th Edition, Madison, New York; John Wiley & Sons, Hoboken. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.
- [21] Paksoy H.Ö. (ed.) *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption: Fundamentals, Case Studies and Design*.–Springer. 2007. – 447 p <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5290-3>
- [22] Aina, O. (2024) *Energy Storage Systems Technologies, Evolution and Applications*. *Energy and Power Engineering*, 16, 97-119. doi: [10.4236/epe.2024.162005](https://doi.org/10.4236/epe.2024.162005).
- [23] Eisenhower D.A., Runolfsson T. *System level modeling of a Transcritical vapor compression system for bistability analysis*. *Nonlinear Dyn* 55, 13–30 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11071-008-9341-7>.
- [24] Nanayakkara V.K., Ikegami Y., Uehara H. *Evolutionary design of dynamics neural networks for evaporator control*. *International Journal of Refrigeration* 25(2002), 813-826.
- [25] Frid S.E., Lisitskaya N.V. (2018). *State-of-the-Art Solar Collectors: Typical Parameters and Trends*. *Applied Solar Energy*, 54(4), 279–286.
- [26] TRNSYS. *Transient System Simulation Tool* – URL: <http://www.trnsys.com/>.
- [27] TaiyangNews PV Price Index – 2024 – CW39 – URL: <https://taiyangnews.info/price-index/taiyangnews-pv-price-index-2024-cw39>.
- [28] Meyers S., Schmitt B., Vajen K. (2018). *Renewable process heat from solar thermal and photovoltaics: The development and application of a universal methodology to determine the more economical technology*. *Applied Energy*, 212, 1537-1552.
- [29] Matuska T., Sourek B. (2017). *Performance Analysis of Photovoltaic Water Heating System*. *Int. J. Photoenergy*, 2017, vol. 2017, art. 7540250. doi:10.1155/2017/7540250.
- [30] De Soto W., Klein S.A., Beckman W.A. (2006). *Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance*. *Sol. Energy*, 80(1), 78-88.
- [31] Cotfas D.T., Cotfas P.A., Kaplanis S. (2013). *Methods to determine the dc parameters of solar cells: A critical review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 588-596.
- [32] CERES – Clouds and the Earth’s Radiant Energy System – URL: <https://ceres.larc.nasa.gov/data/#syn1deg-level-3/>.
- [33] Copernicus. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present – URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>.
- [34] Filippov S.P., Dilman M.D. (2019). *Large scale solar and wind power: systemic impact*. In: *Proc. of 2019 12th International conference “Management of large-scale system development”, MLS D 2019*. doi: 10.1109/MLSD.2019.8911104
- [35] Xu,X., Dubljevic,S.(2016).The state feedbackservo-regulator for counter-current heat-exchanger system modelled by system of hyperbolic PDEs.*Eur.J.Control*,29,51–61.
- [36] Ghousein M., Witrant E. Adaptive observer design for uncertain hyperbolic PDEs coupled with uncertain LTV ODEs; Application to refrigeration systems. *Automatica* 154(223), 111096, <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2023.111096>
- [37] Bernard, P., & Krstic, M. (2014). Adaptive output-feedback stabilization of non-local hyperbolic PDEs. *Automatica*, 50(10), 2692–2699.
- [38] Bansal P. A review e Status of CO2 as a low temperature refrigerant: Fundamentals and R&D opportunities model. *Applied Thermal Engineering* 41 (2012) 18-29.
- [39] Cai, J., Ji, J., Wang, Y., Zhou, F., & Yu, B. (2017). *A novel PV/T-air dual source heat pump water heater system: Dynamic simulation and performance characterization*. *Energy Conversion and Management*, 148, 635–645. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.036>
- [40] Shao, L.-L., Zhang, Z.-Y., & Zhang, C.-L. (2018). *Constrained optimal high pressure equation of CO 2 transcritical cycle*. *Applied Thermal*

Engineering, 128, 173–178.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng>

[41] Assaf K., Zoughaib A., Clodic D., Modelica-based modeling and simulation of

dry-expansion shell-and-tube evaporators working with alternative refrigerant mixtures, *Int. J. Refrig.* 34 (2011) 1471–1482.

Сведения об авторах.



Шит Михаил Львович – к.т.н., доцент-исследователь. Область научных интересов: тепловые насосы, автоматическое управление технологическими процессами.
E-mail: mihail_sit@mail.ru



Журавлев Анатолий Александрович – к.т.н. Область научных интересов: микропроцессорные системы управления, промышленная автоматика.
E-mail: AZhur5249@mail.ru



Фрид Семен Ефимович – к.т.н., область научных интересов: процессы тепло- и массообмена; возобновляемые источники энергии; численное моделирование.
E-mail: s_frid@jiht.ru



Тимченко Дмитрий Викторович – ведущий инженер – программист. Область научных интересов: программирование микропроцессоров.
E-mail: dimmy@bk.ru



Денисова Алла Евсеевна – доктор технических наук, профессор. Ее научные интересы включают проблемы генерации энергии с использованием возобновляемых источников энергии, интегрированные системы теплоснабжения.
Email: alladenysova@gmail.com