

Bivalent Carbon Dioxide Heat Pump for Heating of Multi-Story Buildings. Part II

Sit M.L., Juravleov A.A., Tirsu M.S., Lupu M.L., Daud V.P., Timchenko D.V.
Institute of Power Engineering of the Technical University of Moldova
Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. The use of heat pumps is one of the components of the energy transition. The article considers a scheme of a combined heat and power plant with a centralized heat supply system, in which the thermal regime of a number of buildings is ensured by installing heat pumps in them that receive low-potential heat from the return network water and from the outside air. The aim of the work is to create a scheme of a bivalent heat pump (BHP) that uses both the heat of the return network water and the heat of the outside air as sources of low-potential heat (LPH) in the normal operating mode and in an emergency mode, when there is a refusal to supply return network water. The set objective is achieved by solving the following problems: constructing BHP thermodynamic cycles and analyzing them, analyzing the operation of the scheme under random disturbances, developing an ACS of the heat pump. The most important results of the work are: a scheme of a heat pump that can function at variable pressures of the evaporator and gas cooler, the introduction of a pre-gas cooler into the BTN circuit, installed before the "coolant-water" gas cooler stage, the control system of which ensures the required temperature of the network water heated by the heat pump of the building. The significance of the obtained results consists in the creation of a BTN circuit, which allows ensuring both qualitative and quantitative laws of regulation of the thermal mode of the building in emergency modes caused by the absence of heat supply from the return network water.

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

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.3-67.13>

UDC: 621.577

Pompă de căldură cu dioxid de carbon bivalentă pentru încălzirea clădirilor cu mai multe etaje. Partea a II-a

Sit M.L., Juravleov A.A., Tîrșu M.Ș., Lupu M.L., Daud V.P., Timcenko D.V.

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

Rezumat. Utilizarea pompelor de căldură este una dintre componentele tranziției energetice, considerată una dintre direcțiile dezvoltării energiei. Se are în vedere sistemul centralizat de alimentare cu căldură bazat pe o centrală combinată de căldură și electricitate, în care regimul termic al unui număr de clădiri este asigurat prin instalarea în acestea a unor pompe de căldură bivalente, care primesc căldură cu potențial scăzut din apa din rețeaua de retur și din aerul exterior. Obiectivul lucrării este de a crea o diagramă a unei pompe de căldură bivalente (PCB) utilizând atât căldura apei din rețeaua de retur, cât și căldura aerului exterior ca surse de căldură cu potențial scăzut (PCB) în modul normal de funcționare și în modul de urgență, atunci când apare o defecțiune sub forma deconectării alimentării cu apă din rețeaua de retur. Obiectivul stabilit este atins prin rezolvarea următoarelor probleme: construirea ciclurilor termodinamice ale PCB și analiza acestora, crearea unei diagrame PCB pentru perturbațiile pompei de căldură sub forma deconectării unui număr de apartamente încălzite de la recepția căldurii, dezvoltarea elementelor SCA ale PCB, concepute pentru a compensa defecțiunile și perturbațiile specificate. Cel mai semnificativ rezultat este introducerea unui răcitor de pre-gaz instalat înainte de prima etapă a răcitorului de gaz în circuitul BTN, precum și a sistemului de control care asigură temperatura necesară a apei din rețeaua clădirii încălzite. Se propune o schemă electrică a circuitului intermediar dintre răcitorul de gaz din prima etapă și sistemul de încălzire al clădirii. Se arată că un schimbător de căldură cu manta și tuburi poate fi utilizat ca schimbător de căldură cu o suprafață de schimb de căldură variabilă.

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

© Шит М.Л., Журавлев А.А., Тыршу М.С.,
Лупу М.Л., Дауд В.П., Тимченко Д.В. 2024

Бивалентный тепловой насос на углекислом газе для отопления многоэтажных зданий. Часть II
Шит М.Л., Журавлев А.А., Тыршу М.С., Лупу М.Л., Дауд В.П., Тимченко Д.В.

Институт энергетики Технического университета Молдовы, Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Применение тепловых насосов является одной из составляющих энергетического перехода, который рассматривается, как одно из направлений развития энергетики. Рассмотрена централизованная система теплоснабжения на базе ТЭЦ, в которой происходит обеспечение теплового режима ряда зданий за счет установки в них бивалентных тепловых насосов, получающих низкопотенциальную теплоту от обратной сетевой воды и от наружного воздуха. Целью работы является создание схемы бивалентного теплового насоса (БТН), использующего в качестве источников низкопотенциальной теплоты (НПТ) как теплоту обратной сетевой воды, так и теплоту наружного воздуха в режиме нормальной работы и аварийном режиме, когда происходит отказ в виде отключения подачи обратной сетевой воды. Поставленная цель достигнута путем решения следующих задач: построение термодинамических циклов БТН и их анализа, создание схемы БТН при возмущениях на тепловой насос в виде отключения ряда отапливаемых квартир от получения теплоты, разработки элементов САУ ТН, предназначенных для компенсации указанных отказов и возмущений. Наиболее существенным результатом является введение в схему БТН предгазоохладителя, установленного перед первой ступенью газоохладителя, а также система управления которым обеспечивает требуемую температуру сетевой воды отапливаемого здания. Предложена схема промежуточного контура между газоохладителем первой ступени и системой отопления здания. Показано, что в качестве теплообменника с переменной площадью поверхности теплообмена может быть применен кожухотрубчатый теплообменник. Система управления предгазоохладителем должна содержать функциональный преобразователь параметров рабочего тела в энтальпию. Значимость полученных результатов состоит в создании схемы БТН, которая позволяет обеспечить как качественный, так и качественно-количественный законы регулирования теплового режима здания в аварийных режимах, вызванных отсутствием подачи теплоты от обратной сетевой воды. **Ключевые слова:** гибридная схема теплового насоса, автоматическое управление, случайные возмущения, надежность, централизованное теплоснабжение, углекислый газ.

ВВЕДЕНИЕ

Данное исследование посвящено разработке и применению бивалентных тепловых насосов и недостаточно исследованным проблемам управления бивалентным тепловым насосом, использующим теплоту обратной сетевой воды (ОСВ) системы теплоснабжения, работающей на базе ТЭЦ, и теплоту окружающего воздуха при ограничениях на значение величины тепловой мощности источника теплоты, отбираемой от ОСВ.

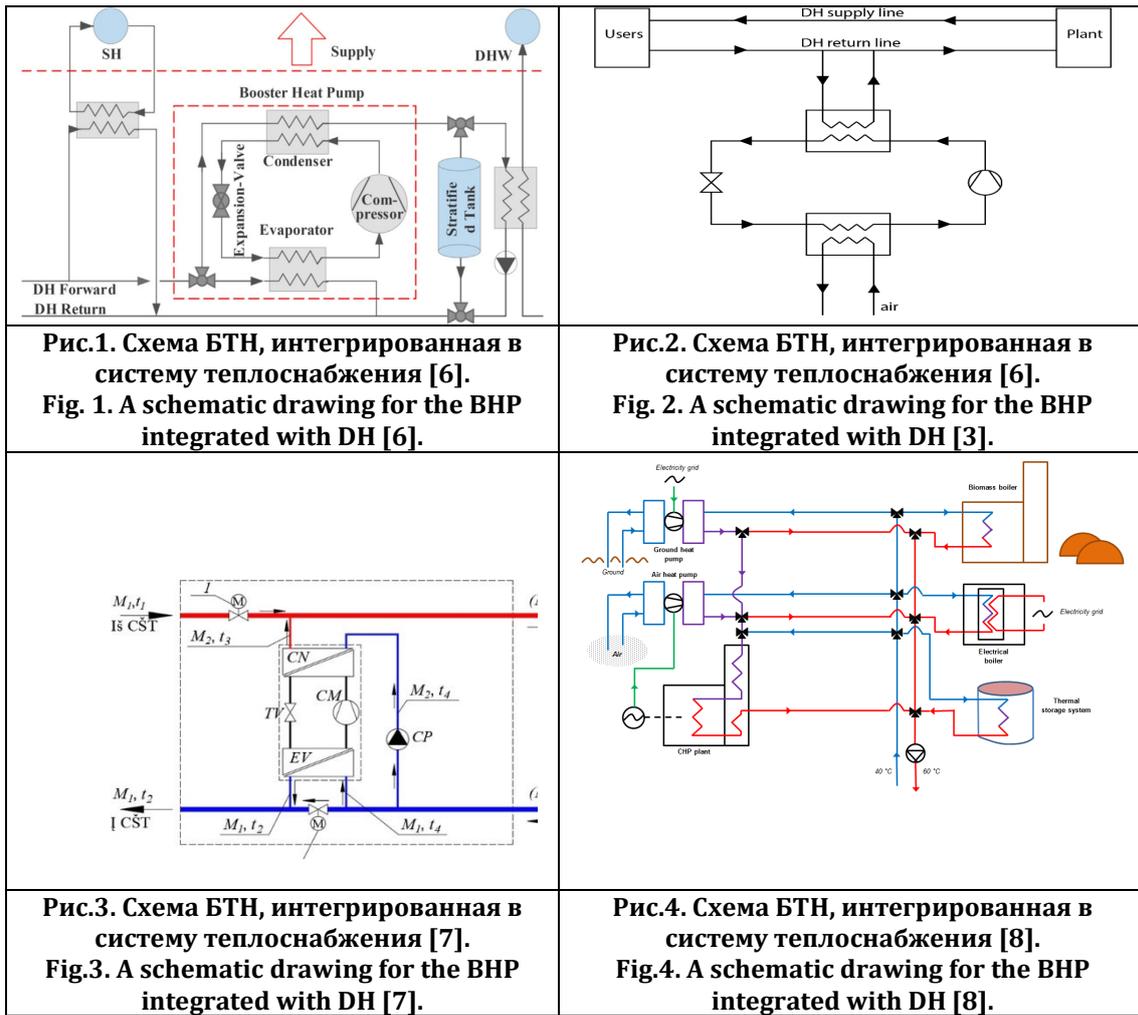
Работы, связанные с анализом применения ТН в системах теплоснабжения принадлежат авторам [1-3] и многих других. Так в [1] рассматривается применение ветряной и солнечной энергий в одной из провинций Пакистана и рассматриваются экономические и экологические показатели использования этих видов энергии. В [2] изучен обзор литературы по конфигурациям для интеграции ТН в сети централизованного теплоснабжения и охлаждения, осуществлена классификация и описание возможных конфигураций тепловых насосов в сетях централизованного теплоснабжения. Исследованы размещение и режимы подключения тепловых насосов в сетях централизованного теплоснабжения и охлаждения. Целью работы [3] является демонстрация того, как экономические и

экологические преимущества, предоставляемые установкой крупномасштабного теплового насоса в существующих системах централизованного теплоснабжения, варьируются в зависимости от места установки в различных сценариях. Для этого разрабатывается комплексная методология. Она включает в себя физическую модель терможидкостной динамики сети централизованного теплоснабжения и подробное моделирование теплового насоса.

Для сравнения различных положений, а также различных условий эксплуатации принимается подход, основанный на анализе эксергии.

Кроме того, анализируется конкретная стратегия управления массовым расходом для дальнейшего сокращения выбросов парниковых газов.

Применение к реальной крупномасштабной сети централизованного теплоснабжения показывает, что сокращение выбросов CO₂ почти на 4% может быть получено при установке одного теплового насоса мощностью около 4 МВт (при общей тепловой нагрузке около 305 МВт), в то время как этот положительный эффект может быть уменьшен до 63%, если разместить тепловой насос в неоптимальных местах.



Бивалентные тепловые насосы используют теплоту ОСВ, наружного воздуха, ветра, теплоту рек, озер, теплоту утилизируемых дымовых газов, теплоту сточных вод и т.д.

При использовании теплоты ОСВ и теплоты окружающего воздуха возможна ситуация, когда отбор тепловой мощности ОСВ ограничен.

Например, когда отбирается теплота ОСВ от одного здания или его части, а здание, в котором используется тепловой насос (ТН), требует большей тепловой мощности (в силу разных теплотехнических характеристик квартир, условий эксплуатации и т.п.).

Целью исследования является: рассмотреть схемы тепловых насосов с точки зрения их отказоустойчивости для сложившихся условий.

Вопросам исследования бивалентных тепловых насосов посвящена обширная литература. Укажем, в качестве примера, библиографические источники [6-9].

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ТЕПЛООВОГО НАСОСА

Тепловые насосы могут использоваться на ТЭЦ, а также децентрализованно. При установке на ТЭЦ их применение ограничено по времени (https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/88862/1/eir_2013_036.pdf), а именно в случаях, когда что система будет использовать электроэнергию, производимую в часы провала суточного графика нагрузки непосредственно на ТЭЦ, для дополнительного производства тепла с помощью тепловых насосов и, соответственно, снижения нагрузки пиковых котлов. Кроме циркуляционной воды в качестве низкопотенциального источника можно использовать обратную сетевую воду,

а полученную высокопотенциальную теплоту можно использовать для теплоснабжения, допустим, нового микрорайона по отдельному контуру вместо того, чтобы устанавливать новые турбо- или котлоагрегаты. При этом также на ТЭЦ вырастут отпуск теплоты на базе теплофикационных отборов, выработка электроэнергии на тепловом потреблении и несколько возрастает количество сжигаемого топлива. Наиболее выгодным будет применение в таких схемах тепловых насосов с приводом от теплового двигателя (с использованием отходящих от него тепловых потоков) или абсорбционных.

Как известно, парокompрессионные тепловые насосы бывают с электрическим и газовым приводом компрессора.

При отказе энергоснабжения одного из приводов он может быть выполнен с возможностью подключения другого (электрического или газового привода). Такое решение удорожает схему, но мы упоминаем о нем, как о возможном техническом решении. Основным требованием к тепловым насосам, предназначенным для отопления зданий, является возможность обеспечить выполнение температурного графика отопления зданий. При этом, имеется в виду как график с качественным, так и количественным законом регулирования. Для решения этой задачи одним из вариантов могут служить схемы, приведенные в [1,2,3]. Отличием от схем, предлагаемых в [1,2,3], является тот факт, что один из компрессоров может быть выполнен с регулируемым расходом (например, с регулируемым электроприводом или с байпасированием части потока вокруг компрессора). В этой схеме давление испарителя и давление газоохладителя регулируются независимо, а регулирование расхода хладагента позволяет использовать эту схему в указанных выше условиях. В работе [6] проведен обзор много температурных тепловых насосов, большинство из которых двухступенчатые. В одноступенчатых тепловых насосах, рассматриваемых в статье, независимое регулирование давление испарителя и газоохладителя не предусматривалось.

В работе [7] для повышения COP теплового насоса на диоксиде углерода предложено использовать прямое переохлаждение рабочего тела после

газоохладителя. На рис.5 приведена структурная схема теплового насоса.

Исходя из того факта, что перепад энтальпий на второй ступени газоохладителя существенно изменяется в зависимости от температуры наружного воздуха при аварийном и штатном режимах работы, становится очевидным, что расход воздуха через него должен изменяться из условия сохранения теплового баланса. Мощность компрессора выбирается из условия обеспечения максимальной производительности при аварийной ситуации при максимально низкой температуре воздуха. Перепад давлений на регулирующем клапане выбирается, исходя из условия максимального перепада давлений на нем. Испаритель выполняется с переменной площадью поверхности теплообмена исходя из условия зависимости его мощности от температуры наружного воздуха. Указанное техническое решение применено для повышения COP теплового насоса

(https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:53121360) В

https://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/177108/INTERNATIONAL_JOURNAL_OF_REFRIGERATION.pdf;jsessionid=CDD0D7A628AC1A405D30A5ED4363320A?sequence=1 проведен обзор литературы по данному вопросу [8]. В [9] рассмотрена схема, где переохладитель рабочего тела используется в качестве испарителя второго контура теплового насоса. Дополнения в схеме, по сравнению со сделанными нами ранее (см. статьи в этом же журнале): компрессор с регулируемым приводом и двухсекционный газоохладитель являются новыми и существенными элементами в схемах гибридных тепловых насосов, предназначенных для отопления зданий в условиях качественного и качественно-количественного регулирования температурного графика отопления. Рассмотрим возможные варианты управления ведомым зданием с помощью теплового насоса для случая, когда используют существующие здания.

Основной вариант: некоторое здание выбирается в качестве основного (ведущего), а здание, расположенное рядом в качестве ведомого. Здания должны иметь одинаковые удельные тепловые характеристики. Здания должны иметь близкие коэффициенты энергоэф-

фektivности. В качестве ведомого выбирается здание, которое потребляет меньшее количество теплоты.

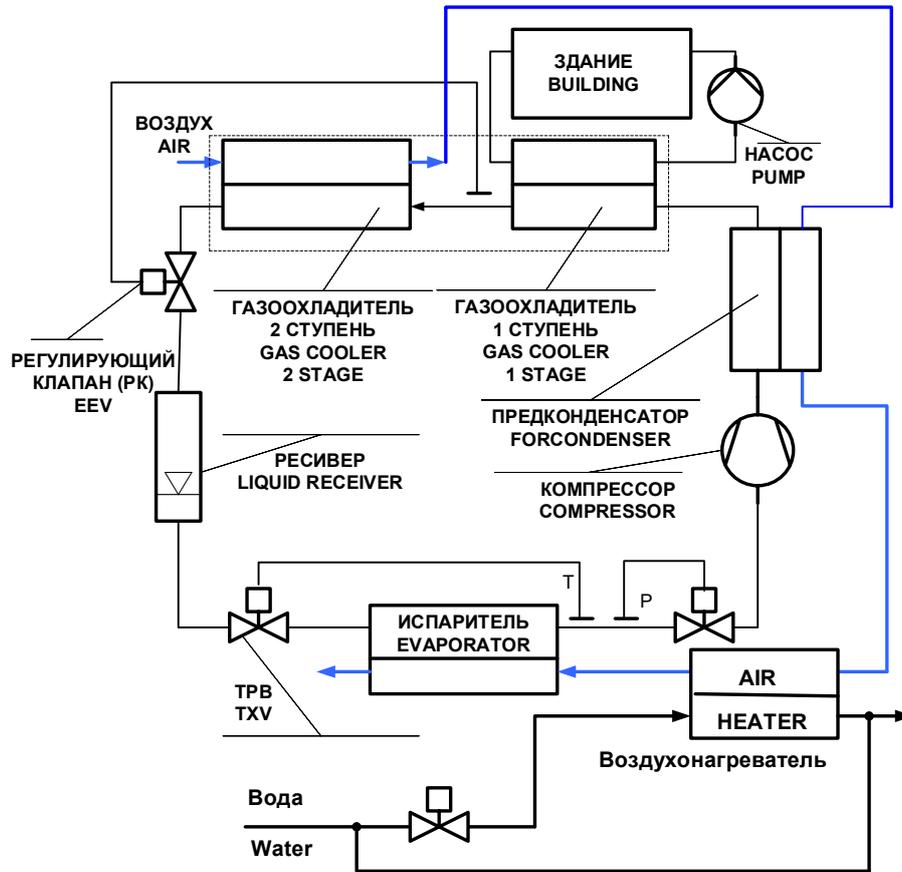
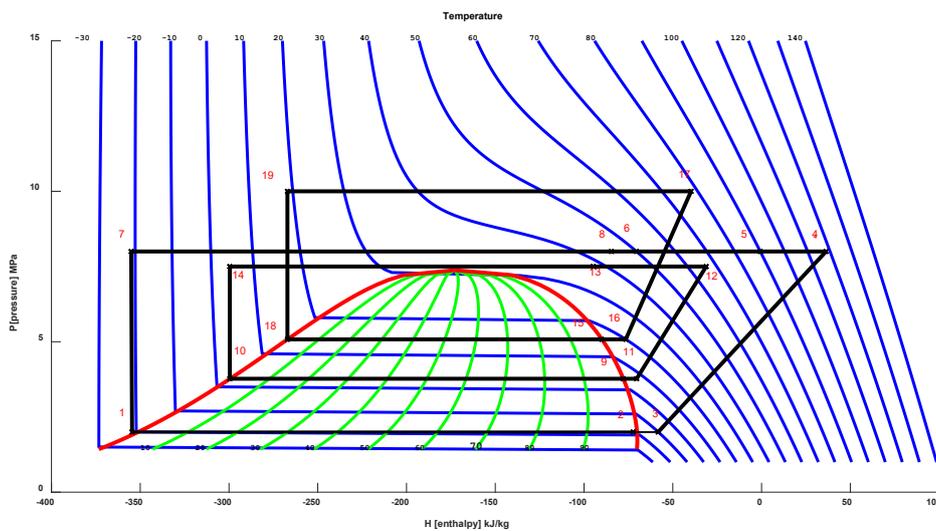


Рис.5. Структурная схема теплового насоса.
Fig.5. Block diagram of a heat pump.



Рабочее состояние теплового насоса: точки 15, 16-19
Рис. 6. Термодинамические циклы теплового насоса в рабочем и аварийных состояниях.
Operating state of the heat pump: points 15, 16-19
Fig. 6. Thermodynamic cycles of the heat pump in operating and emergency states.

Другим вариантом источника НПТ может быть вновь построенное здание, а источником низкопотенциальной теплоты может быть трубопровод обратной сетевой воды группы зданий, обладающих большей тепловой мощностью, чем ведомое здание. При выборе зданий приблизительно равных одно другому по коэффициентам энергоэффективности, COP теплового насоса будет ниже, чем для случаев, описанных ранее, из-за снижения разности температур испарителя и газоохладителя.

Одним из вариантов является подключение одного (или нескольких) зданий к трубопроводу обратной сетевой воды, принадлежащему к центральному тепловому пункту группы зданий.

В этом случае обеспечивается гарантированное значение расхода сетевой воды на испарители тепловых насосов, обслуживающих отдельные здания.

Рассмотрим температурные графики 70/40 качественного регулирования температуры сетевой воды.

Из рассмотрения графиков следует, что при температуре наружного воздуха минус 16°C температура обратной сетевой воды составит 40°C. Значит, в цепи ОСВ ведомого здания эта вода может быть охлаждена до температуры, минимум на 10°C выше температуры наружного воздуха. Хладагент после газоохладителя может быть охлажден до температуры, ориентировочно, равной 10°C.

При этом, COP теплового насоса становится равным не менее 5.

В работе [5] между ТРВ и компрессором установлен 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.

Обычно электрическая мощность вентилятора теплообменника «воздух-вода» составляет не более 10% от тепловой мощности этого теплообменника и при расчете COP теплового насоса ее можно не учитывать.

СХЕМА ПОДКЛЮЧЕНИЯ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ГАЗООХЛАДИТЕЛЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКЕ И ПЕРЕМЕННОМ РАСХОДЕ ВОДЫ

Еще одним видом отказа в системе теплоснабжения с тепловым насосом могут быть явления отключения собственниками квартир от отопления.

В нормальном режиме работы, когда включены все нагревательные приборы в здании, насосы P2 и P3 работают с одинаковой производительностью поддерживая постоянное давление в отопительных приборах за счет действия расширительного сосуда PC1.

Когда, по какой – то причине снижается расход через здания (например, за счет полного или частичного отключения отопительного прибора (отопительных приборов), необходимо при новом (уменьшенном) значении расхода насоса P3, увеличить на короткое время расход насоса P1 с тем, чтобы снизить уровень воды в ГО. При этом уровень воды в VS изменится. Расход насоса P2 будет следить за расходом насоса P3. Насос P1 будет увеличивать или уменьшать свою производительность кратковременно для обеспечения заданной площади поверхности теплообмена газоохладителя.

При этом тепловой насос начинает работать при переменной тепловой нагрузке и переменном расходе воды в системе отопления здания. В этом случае для сохранения теплового режима отапливаемых помещений необходимо обеспечить работу испарителя при переменном расходе хладагента путем регулирования производительности компрессора и при переменной площади поверхности теплообмена.

При работе газоохладителя работу его первой ступени необходимо согласовать с переменной производительностью циркуляционного насоса при сохранении напора в системе в соответствии с классическим уравнением

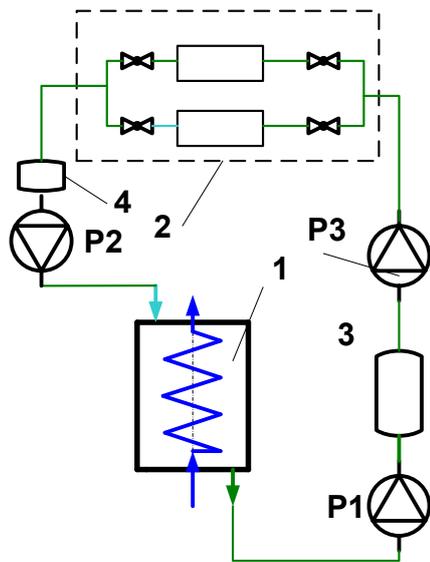
$$Q = k \cdot F \cdot \Delta T \quad (1)$$

Где, Q – теплота, передаваемая теплообменником, k – коэффициент теплопередачи,

ΔT – средне логарифмическая разность температур на концах теплообменника.

Из уравнения (1) следует, что при условии сохранения ΔT и переменном, но заданном значении величины Q , значение величины $k \cdot F$ должно стать переменным.

Этого можно достичь путем включения между тепловым насосом и нагрузкой промежуточного контура, выполненного по схеме с двумя насосами и промежуточным сосудом.



1.Первая ступень газоохладителя. 2. Система отопления здания. 3. Промежуточный сосуд. 4. Расширительный сосуд.

Рис.7. Блок-схема контура связи первой ступени газоохладителя со зданием.

1.Gas cooler first stage. 2. Building’s heating appliances. 3. Intermediate vessel. 4. Expansion vessel.

Fig.7. Block diagram of the communication circuit of the first stage of the gas cooler with the building.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДГАЗООХЛАДИТЕЛЕМ

Возмущения по температуре обратной сетевой воды (ОСВ) характеризуется периодами в десятки минут, и значительными амплитудами, и требуют при стабилизации температуры воздуха его изменения при подаче на испаритель теплового насоса. Поэтому, при моделировании влияние изменения температуры рассматривается как скачкообразное воздействие. Колебания

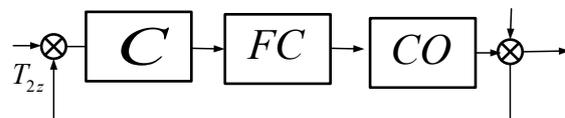
температуры воздуха в течение суток в отопительном периоде также характеризуются высокими значениями амплитуд и низкими значениями частот. Для компенсации колебаний температур наружного воздуха необходимо изменять расход ОСВ, расход подогревающего воздуха, поступающего на испаритель теплового насоса. При этом, необходимо предусмотреть байпасирование части потока воздуха вокруг испарителя ТН. При недостаточной температуре ОСВ по сравнению с заданной COP ТН может упасть.

Задача системы автоматического управления (САУ) предгазоохладителем (ПГО) состоит в поддержании температуры теплоносителя на входе в здание в соответствии уравнением температурного графика системы отопления здания.

Управляющее воздействие на вентилятор отвечает уравнению теплового баланса:

$$G_H \cdot (h_{out} - h_{in}) = G_A \cdot c_A (t_{a_out} - t_{a_in}) \quad (2)$$

Структурная схема САУ имеет следующий вид:



С- регулятор, FC-функциональный преобразователь, CO- объект управления.

Рис.8. Схема САУ предгазоохладителем.

Fig. 8. pre-gas cooler control system.

C- controller; FC- functional converter, CO- controlled object.

Функциональный преобразователь реализует уравнение (2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

1. Показано, что для компенсации влияния отключения отдельных помещений отапливаемого здания на работу теплового насоса необходим промежуточный контур, включенный между первой ступенью газоохладителя и системой отопления здания.

2. Предложено техническое решение по компенсации отказов со стороны ведущего здания системы теплоснабжения (отсутствие обратной сетевой воды с температурой, соответствующей температурному графику).

3. Для стабилизации температуры воды, поступающей в систему отопления здания

необходимо предусмотреть в схеме ТН предгазоохладитель с системой автоматического управления температурой на его выходе в зависимости от температуры наружного воздуха.

Литература (References)

- [1] Eslami Sh., Noorolhani Y., Mazband M., Moghaddam A. Integrating heat pumps into district heating systems: A multi-criteria decision analysis framework incorporating heat density and renewable energy mapping. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 98, Nov.2023, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104785>
- [2] Barco-Burgos J., Bruno J.C., Eicker U., Saldaña-Robles A.L., Alcántar-Camarena V. *Energy*, V239, pt.E., jan.2032, Review on the integration of high-temperature heat pumps in district heating and cooling networks. *Energy*, Vol.239, pt.E., 2022, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122378>.
- [3] Capone M., Guelpa E., Verda V. Optimal Installation of Heat Pumps in Large District Heating Networks. *Energies* 2023, 16, 1448. <https://doi.org/10.3390/en16031448>
- [4] Ommen, T.; Markussen, W.B.; Elmegaard, B. Heat pumps in combined heat and power systems. *Energy* 2014, 76, 989–1000.
- [5] Pieper, H.; Ommen, T.; Elmegaard, B.; Markussen, W.B. Assessment of a combination of three heat sources for heat pumps to supply district heating. *Energy* 2009, 176, 156–170
- [6] Tan Yingying, Hou Zhaoning, Wang Lin, LI Xiuzhen, Wang Zhanwei, Yuan Junfei Performance assessment of a two-stage evaporation grade compression heat pump system for double temperature level drinking water production *International Journal of Refrigeration*, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120488>.
- [7] Illán-Gómez, F.;García-Cascales, J.R.;Sánchez-Velasco, F.J.; Otón-Martínez, R.A. *Evaluation of the Use of Different Dedicated Mechanical Subcooling (DMS) Strategies in a Water Source Transcritical CO2 Heat Pump for Space Heating Applications*. *Clean Technol.* 2022, 4, 1208–1226.<https://doi.org/10.3390/cleantechnol4040074>.
- [8] Mikulandrić, R., Krajačić, G., Duić, N., Khavin, G., Lund, H., Vad Mathiesen, B., Østergaard, P., Performance Analysis of a Hybrid District Heating System: A Case Study of a Small Town in Croatia, *J. sustain. dev. energy water environ. syst.*, 3(3), pp 282-302, 2015, DOI: <http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.2015.03.0022>
- [9] Beghi A., Cecchinato L. *A simulation environment for dry-expansion evaporators with application to the design of autotuning control algorithms for electronic expansion valves*. *International Journal of Refrigeration*, 32 (2009), pp. 1765-1775, doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.06.004.
- [10] Arparagaus C., Bless F., Schiffmann J., Bertsch S.S. *Multi-temperature heat pumps: A literature review*. *International Journal of Refrigeration*, 69 (2016), pp. 437-465, doi:10.1016/j.ijrefrig.2016.05.014.
- [11] Illán-Gómez F., García-Cascales J.R., Sánchez-Velasco F.J., Otón-Martínez R.A. Evaluation of the Use of Different Dedicated Mechanical Subcooling (DMS) Strategies in a Water Source Transcritical CO2 Heat Pump for Space Heating Applications. *Clean Technol.* 2022, 4, 1208–1226. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol4040074>
- [12] Llopis R., Nebot-Andrés L., Sánchez D., Catalán-Gil J., Cabello R. Subcooling methods for CO2 refrigeration cycles. A Review. https://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/177108/INTERNATIONAL_JOURNAL_OF_REFRIGERATION.pdf;jsessionid=CDD0D7A628AC1A405D30A5ED4363320A?sequence=1 (accessed 20.03.2024).
- [13] Solanki, N., Arora, A. & Singh, R.K. Performance enhancement and environmental analysis of vapor compression refrigeration system with dedicated mechanical subcooling. *Int. J. Air-Cond. Ref.* 31, 26 (2023). <https://doi.org/10.1007/s44189-023-00042-8>.
- [14] Farhat O, Faraj J, Hachem F, Castelain C, Khaled M. A recent review on waste heat recovery methodologies and applications: comprehensive review, critical analysis and potential recommendations. *Cleaner Engineering and Technology* 2022;6:100387.
- [15] Saghafifar M, Omar A, Mohammadi K, Alashkar A, Gadalla M. A review of unconventional bottoming cycles for waste heat recovery: part I—analysis, design, and optimization. *Energy Convers Manag* 2019;198:110905.
- [16] Brückner S, Liu S, Mir' o L, Radspieler M, Cabeza LF, L'avemann E. Industrial waste heat recovery technologies: an economic analysis of heat transformation technologies. *Appl Energy* 2015;151:157–67.
- [17] Cavazzini G, Bari S, McGrail P, Benedetti V, Pavesi G, Ardizzon G. Contribution of metal-organic-heat carrier nanoparticles in a R245fa low-grade heat recovery organic rankine cycle. *Energy Convers Manag* 2019;199:111960.
- [18] Ma X, Du Y, Zhao T, Zhu T, Lei B, Wu Y. A comprehensive review of compression high-temperature heat pump steam system: status and trend. *Int J Refrig* 2024;164:218-242.
- [19] Sarkar, J., Bhattacharyya, S., & Gopal, M. R. (2006). *Simulation of a transcritical CO2 heat pump cycle for simultaneous cooling and heating applications*. *International Journal of Refrigeration*, 29(5), 735–743. doi:10.1016/j.ijrefrig.2005.12.006

- [20] Willatzen, M., Pettit, N. B. O. L., & Ploug-Sørensen, L. (1998). *A general dynamic simulation model for evaporators and condensers in refrigeration. Part I: moving-boundary formulation of two-phase flows with heat exchange. International Journal of Refrigeration, 21(5), 398–403.*
- [21] Pettit, N. B. O. L., Willatzen, M., & Ploug-Sørensen, L. (1998). *A general dynamic simulation model for evaporators and condensers in refrigeration. Part II: simulation and control of an evaporator. International Journal of Refrigeration, 21(5), 404–414. doi:10.1016/s0140-7007(97)00092-3*
- [22] Russell, N. T., Bakker, H. H. C., & Chaplin, R. I. (2000). *A Comparison of Dynamic Models for an Evaporation Process. Chemical Engineering Research and Design, 78(8), 1120–1128. doi:10.1205/026387600528274*
- [23] Borge-Diez D, Icaza D, Trujillo-Cueva DF, Açıklalp E. Renewable energy driven heat pumps decarbonization potential in existing residential buildings: roadmap and case study of Spain. *Energy* 2022; 247:123481. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123481>.
- [24] Zhang L, Jiang Y, Dong J, Yao Y. Advances in vapor compression air source heat pump system in cold regions: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;81: 353–65. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.009>.
- [25] Badiei A, Golizadeh Akhlaghi Y, Zhao X, Shittu S, Xiao X, Li J, et al. A chronological review of advances in solar-assisted heat pump technology in the 21st century. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;132:110132. <https://doi.org/10.1016/j.rser.20.110132>.

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



Тыршу Михаил Степанович, Институт энергетики, кандидат технических наук. Научные интересы связаны с диагностикой высоковольтного оборудования и силовой электроникой.

tirsu.mihai@gmail.com



Тимченко Дмитрий Викторович – ведущий инженер – программист Института энергетики АН Молдовы. Область научных интересов: программирование микропроцессоров.

E-mail: dimmy@bk.ru



Журавлев Анатолий Александрович – к. т. н. Область научных интересов: микропроцессорные системы управления, промышленная автоматика.

E-mail: AZhur5249@mail.ru



Лупу Михаил Леонидович Институт энергетики. Научные интересы связаны с энергоэффективностью, развитием возобновляемых источников энергии, уменьшением выбросов и защитой окружающей среды.

mihu.lupu@gmail.com



Дауд Василий Петрович к.т.н., научные интересы связаны с энергоэффективностью, развитием возобновляемых источников энергии, уменьшением выбросов и защитой окружающей среды.

E-mail: caporalprim@yahoo.com