

Perspective Ways of Energy-Efficient Modernization of Heat Supply Systems Based on Heat Pump Technologies

Petrash V.D., Baryshev V.P., Shevchenko L.F., Geraskina E.A., Danichenko N.V.
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture
Odessa, Ukraine

Abstract. This work is devoted to determination a generalized indicator for a preliminary assessment of the conditions for increasing the efficiency of modernized systems of centralized and decentralized heat supply using heat pump technologies. This goal is achieved through a critical analysis of the results of the actual state of pipelines and equipment, known approaches to the reconstruction of heat supply systems and the establishment of a generalized indicator of the conditions for increasing the efficiency of using primary fuel energy. This made it possible to formulate a generalized approach to the modernization of heat supply systems with the introduction of heat pump technologies. The most important result of the study is the established generalized dependence of the assessment of the increase in the efficiency of heat supply systems on the initial conditions of regime parameters with the rationale for the feasibility of modernizing district heating systems based on the diverse phased introduction of heat pump technologies at all stages: generation, transportation, distribution, conversion and controlled consumption of heat by subscriber system. The significance of the obtained research results lies in the fact that the proposed approach to the modernization of centralized and decentralized heat supply systems based on heat pump installations with real conversion factors in the range (3--5) with an increase in the available heat potential is to increase the efficiency and expand the use of heat from primary fuel with its savings of 1-2.7 times.

Keywords: heat pump, heat generator, heat recovery, heat supply, energy efficiency, system modernization, heat flows, conversion factor.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.4-56.05>

UDC 697:662.99

Modalități promițătoare de modernizare eficientă energetic a sistemelor de alimentare cu căldură bazat pe tehnologii cu pompe de căldură

Petraș V.D., Barâșev V.P., Șevcenko L.F., Gheraskina A.A., Danicenko N.V.

Academia Națională de Stat de construcții și arhitectură, Odesa, Ucraina

Rezumat. Scopul lucrării este de a determina un indicator generalizat pentru o evaluare preliminară a condițiilor de îmbunătățire a eficienței sistemelor modernizate de alimentare cu căldură centralizată și descentralizată folosind tehnologii cu pompe de căldură. Scopul este atins printr-o analiză critică a rezultatelor stării actuale a conductelor și echipamentelor, abordări cunoscute pentru reconstrucția sistemelor de alimentare cu căldură și un indicator generalizat stabilit pentru o evaluare preliminară a condițiilor de creștere a eficienței utilizării energiei combustibile. Cel mai important rezultat al studiului este dependența generalizată stabilită a evaluării creșterii eficienței față de condițiile inițiale ale parametrilor de regim cu rațiunea de fezabilitate a modernizării sistemelor, în primul rând cu termoficare de la cazane districtuale. În conformitate cu obiectivul, pe baza rezultatelor unui studiu analitic și a analizei unor evoluții bine-cunoscute pentru îmbunătățirea eficienței utilizării energiei combustibile, este fundamentată posibilitatea unei introduceri diverse în faze a tehnologiilor pompelor de căldură în toate etapele proceselor de alimentare cu căldură. : generarea, transportul, distribuția, conversia și consumul controlat al sistemelor de abonați de căldură. Se arată că utilizarea tehnologiilor pompelor de căldură în modernizarea odată cu extinderea resurselor sistemelor de alimentare cu căldură predetermina necesitatea unor dezvoltări științifice și tehnice ulterioare pentru a îmbunătăți relația dintre sursele de căldură și rețelele de încălzire, modurile lor de funcționare termo-hidraulice. cu posibilitatea de „reducere” a programului de temperatură al reglajului lor de funcționare. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că abordarea propusă a modernizării treptate cu creșterea potențialului disponibil din centrală termică și sistemele descentralizate de alimentare cu căldură asigură o creștere a eficienței și extinderea utilizării căldurii cu combustibil primar.

Cuvinte-cheie: pompa de caldura, generator de caldura, recuperare de caldura, furnizare de caldura, eficiența energetică, modernizare, fluxuri de căldura, factor de conversie.

Перспективные пути энергоэффективной модернизации систем теплоснабжения на основе теплонасосных технологий

Петраш В.Д., Барышев В.П., Шевченко Л.Ф., Гераскина Э.А., Даниченко Н.В.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Одесса, Украина

Аннотация. Целью работы является определение обобщённого показателя для предварительной оценки условий повышения эффективности модернизируемых систем централизованного и децентрализованного теплоснабжения с использованием теплонасосных технологий. Поставленная цель достигается за счёт критического анализа результатов фактического состояния трубопроводов и оборудования, известных подходов к реконструкции систем теплоснабжения и установленного обобщённого показателя предварительной оценки условий повышения эффективности использования энергии топлива. Это позволило сформулировать обобщённый подход к их модернизации с внедрением теплонасосных технологий. Наиболее важным результатом исследования является установленная обобщённая зависимость оценки повышения эффективности от исходных условий режимных параметров с обоснованием целесообразности модернизации систем, прежде всего при централизованном теплоснабжении от районных котельных. В соответствии с поставленной целью на основе результатов аналитического исследования и анализа известных разработок повышения эффективности использования энергии топлива, обоснована возможность разнопланового поэтапного внедрения теплонасосных технологий на всех стадиях процессов теплоснабжения: генерации, транспортирования, распределения, преобразования и регулируемого потребления теплоты абонентскими системами. Показано, что применение теплонасосных технологий при модернизации с расширением ресурса систем теплоснабжения предопределяет необходимость дальнейших научно-технических разработок по совершенствованию взаимосвязи источников теплоты и тепловых сетей, теплогидравлических режимов их работы с возможностью «снижения» температурного графика их эксплуатационного регулирования. Цель работы достигнута получением возможности комплексной оценки рационального подхода к модернизации систем центрального и децентрализованного теплоснабжения с поэтапным расширением генерируемой теплоты и оценкой конечного результата. Значимость полученных результатов состоит в том, что предложенный подход к поэтапной модернизации с увеличением располагаемого потенциала от РК и децентрализованных систем теплоснабжения обеспечивает повышение эффективности и расширение использования теплоты первичного топлива с его экономией в 1.1...2.7 раза при работе теплонасосных установок соответствующего назначения с действительными коэффициентами преобразования в диапазоне (3...5).

Ключевые слова: тепловой насос, теплогенератор, утилизация теплоты, теплоснабжение, энергетическая эффективность, модернизация систем, тепловые потоки, коэффициент преобразования.

ВВЕДЕНИЕ

Работа относится к области совершенствования систем как централизованного, так и децентрализованного теплоснабжения на основе внедрения теплонасосных технологий. Наряду с централизованным теплоснабжением широкое распространение получают и децентрализованные системы с внутриквартирными, крышными (домовыми) и внутриквартальными автономными теплогенераторами мощностью до 23 МВт [1, 2, 3, 4]. Одной из актуальных проблем энергосбережения является поиск рациональных путей модернизации существующих систем теплоснабжения зданий [2, 5, 6] для расширения резерва и повышения качества, надёжности их работы, энергетической эффективности, прежде всего с поэтапным внедрением теплонасосных технологий (ТНТ).

На основе анализа результатов натурного обследования физического состояния трубопроводов и оборудования, известных подходов по модернизации существующих систем

теплоснабжения, материалов официальной информации профильных организаций, а также нормативных требований по разработке [4, 5, 7, 8], эксплуатации и реконструкции тепловых сетей, приходим к следующим выводам.

Анализ существующего состояния систем с повышенной аварийностью и ненадёжностью работы центрального, а в отдельных случаях и децентрализованного теплоснабжения [8], свидетельствует о том, что температура воды подающей магистрали от соответствующих теплоисточников вынужденно поддерживается значительно ниже относительно требуемой по графику эксплуатационного регулирования тепловых сетей. Анализ существующей структуры принципиальных схем подключения абонентских систем к соответствующим трубопроводам, а также физического состояния систем централизованного теплоснабжения, показывает, что они не отвечают современным требованиям и возможностям энергоэффективного качественного теплоснабжения и не соответ-

ствуют современному уровню управления технологическими процессами регулирования распределения и учёта теплоты.

АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ И ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В вопросах выбора варианта модернизации систем теплоснабжения [8] логично учитывать расположение объектов и плотность теплоснабжения с характерными зонами, а именно, централизованного теплоснабжения от городских ТЭЦ и РК, зоны автономного теплоснабжения с поквартирными газовыми теплогенераторами, крышными (домовыми) и внутриквартальными котельными, а также смешанные зоны вышеуказанных вариантов теплоснабжения. Важное влияние на выбор рационального пути модернизации систем теплоснабжения имеют не только этажность и плотность застройки, состояние основного теплотехнологического оборудования и трубопроводов тепловых сетей, фактического состояния и физического износа, но и вида используемого топлива.

Для сравниваемых вариантов модернизации автономных систем теплоснабжения с расширением их ресурса обязательным является определение экономической эффективности для зданий, находящихся в зоне действия централизованного теплоснабжения. В этом случае финансово привлекательным выглядит устройство автономных децентрализованных источников теплоты, которые ухудшают показатели экономической эффективности существующей системы централизованного теплоснабжения ввиду снижения тепловой нагрузки на ТЭЦ либо РК с увеличением себестоимости отпускаемой тепловой энергии. Кроме того, в системах теплоснабжения от ТЭЦ дополнительно снижается доля произведенной электрической энергии и эффективности её работы.

Характерно, что однотрубные системы отопления многоэтажных жилых зданий строительства до 2000 г. не обладают возможностью их реконструкции на более рациональные двухтрубные поквартирные системы в соответствии с действующими нормативами [6, 8], в результате чего исключается возможность эффективного индивидуального регулирования нагревательных приборов и абонентского учёта потребляемой теплоты.

Организация автономного децентрализованного теплоснабжения [7, 8] на базе высокоэффективных теплогенераторов последних поколений с системами автоматического регулирования позволяет обеспечить необходимые требования эксплуатационного регулирования, как на реконструируемых объектах старой застройки, так и в зонах расположения современных зданий. Указанные факторы в пользу децентрализованных систем теплоснабжения при уменьшении магистральных теплотерь определяют его как альтернативу централизованному теплоснабжению в виду снижения капитальных и эксплуатационных инвестиций при модернизации в процессе их реконструкции. Закономерно, что в районах с малой теплоплотностью целесообразно предусматривать децентрализованные системы теплоснабжения, а при большой плотности городской застройки надлежит модернизировать системы теплоснабжения от крупных источников теплоты с устройством дополнительных «пиковых» теплогенераторов [2, 9, 10]. Из вышеизложенного очевидно, что наиболее высокий коэффициент использования топлива имеют децентрализованные поквартирные системы теплоснабжения с генераторами, работающими на газовом либо жидком топливе. Малые источники теплоты (квартирные теплогенераторы и крышные котельные) рассчитаны на использование сетевого газа. Поэтому их устройство отрицательно отражается на безопасности работы соответствующих систем, создавая экологическую угрозу здоровью и жизни людей.

Крупные источники теплоты в состоянии работать на различных видах топлива и могут быть переведены на резервное при ограниченной поставке основного топлива.

Представляется обоснованным вариант [2, 7, 8, 9, 10] модернизации систем централизованного теплоснабжения, который предусматривает покрытие основной базовой нагрузки теплоснабжения базовым источником теплоты, в качестве которого используют сетевые подогреватели теплофикационных турбин, а её переменную часть покрывают дополнительным автономным источником, выполняющим функции и резервного при аварийных и регламентно-профилактических ситуациях на ТЭЦ [11, 12, 13].

Из вышеизложенных результатов, очевидно, что проблема теплоснабжения за-

ключается не столько в централизованной системе как таковой, а в большей степени в неэффективной работе и низкой надёжности структурных элементов тепловых сетей в условиях современного их состояния при необходимости расширения ресурса потребляемой теплоты. Положительным результатом модернизации тепловых сетей, например, в Дании после многолетней их работы, явилось повышение эффективности теплоснабжения на основе укрупнения ТЭЦ со снижением стоимости обогрева до двух раз из-за применения ряда энергосберегающих технологий. К ним относятся использование высококачественных теплоизоляционных материалов, полимерных труб, современного теплообменного и насосного оборудования, а также широкое внедрение тепловых насосов, которые из кольцевого контура тепловой сети отбирают теплоту на отопление и горячее водоснабжение с пониженной температурой энергоносителя.

Не менее важным в снижении стоимости генерируемой теплоты является максимальное замещение природного газа региональным ресурсом альтернативных видов топлива при плановом переводе монотопливной на мультитопливную схему сжигания органического топлива. При этом целесообразным является использование опыта прогрессивной нормативной базы других стран и практических результатов экологически чистых технологий, адаптированных для условий Украины. Закономерно, что выбор варианты модернизации системы теплоснабжения определяется региональными условиями максимального использования потенциала местного топлива. Перспективной по энергоэкономическим условиям представляется также модернизация систем теплоснабжения с интегрированием технологий сжигания твёрдых бытовых отходов по опыту [28] с целью низкотемпературного нагрева воды для систем горячего водоснабжения. Заслуживает внимания также более широкое использование теплоаккумулирующих технологий с внедрением электродкотлов с аккумуляторами теплоты на основе ночных тарифов на электроэнергию для снижения расхода традиционного топлива.

По экологическому влиянию на окружающую среду в селитебных зонах более рациональными возможностями обладают ТЭЦ по сравнению с районными котельными,

и тем более с теплогенераторами в децентрализованных системах теплоснабжения, которые характеризуются повышенными выбросами вредных веществ с уходящими газами (CO_2 , NO_x и др.) ввиду сложности и технико-экономической нерациональности реализации процессов их локальной очистки.

Представляет интерес подход к модернизации систем теплоснабжения на основе внедрения научно-технических разработок теплонасосных технологий (ТНТ) [14, 15, 16], которые отличаются возможностью существенного снижения использования органического топлива. На единицу затраченного исходного топлива потребитель получает в 1.2...2.5 раза больше тепла, чем при прямом сжигании топлива. Их внедрение позволяет повысить температуру нагреваемой среды в процессе трансформации отбираемых энергетических потоков от многообразных низкотемпературных источников и теплового эквивалента приводной мощности в работе компрессора. Выработка теплоты с помощью ТНУ характеризуется весьма значительным энергосберегающим эффектом (20...70 % в зависимости от типа ТНУ и замещаемого теплоисточника). Кроме того, внедрение ТНТ позволяет приблизить тепловые мощности к системам потребления с минимизацией протяжённости тепловых сетей. Низкотемпературными источниками теплоты для ТНУ могут служить грунт, наружный воздух и вентиляционные выбросы, вода морей и рек, водопроводная вода, канализационные стоки и др.

В работе [17] предлагается система модернизации с предварительным подогревом сетевой воды сначала в ТНУ за счёт утилизируемой теплоты конденсации отработавшего пара в турбине, а затем в сетевых подогревателях и пиковом водогрейном котле. Система обеспечивает увеличение КПД станции, так как отработанный пар, ранее поступавший в сетевой подогреватель, направляется в турбину для дополнительной выработки электроэнергии.

Проценко В. П. [16, 18] предложил схему модернизации, в которой теплота сконденсированного пара после турбины частично либо полностью используется в качестве низкотемпературного источника в работе ТНУ. Исходная холодная вода подогревается в конденсаторе первой ТНУ до необходимой температуры для систем горячего водоснабжения, а затем по магистральному трубопро-

воду поступает к абонентским системам. Отделившаяся её часть поступает на горячее водоснабжение, а основной поток воды является низкотемпературным источником для второй ТНУ, которая подогревает воду до необходимой температуры согласно графику эксплуатационного регулирования систем отопления. Заслуживают внимания многоплановые варианты модернизации систем с использованием ТНУ в структуре магистралей тепловых сетей [14, 15, 16] с расширением потенциала теплоты для абонентского потребления. Увеличение расхода энергоносителя в тепловых сетях может быть достигнуто за счёт дополнительного отбора теплоты из обратных магистралей, принимая их как низкопотенциальный источник теплоты в работе ТНУ. Характерные варианты устройства ТНУ для повышения эффективности теплоснабжения с расширением возможностей генерируемой теплоты на основе ТНТ представлены на рис.1. Центральное теплоснабжение от РК в процессе трансформации энергетических потоков с доохлаждением воды в обратных магистралах способствует снижению затрат на транспортировку энергоносителей. При этом реализуются различные варианты модифицированных схем теплоснабжения, как для прямого повышения температуры теплоносителя в подающей магистрали, рис.1а, так и с догревом ее в «пиковых» источниках теплоты после ТНУ, рис.1,б.

В условиях ограниченных возможностей подключения абонентских систем к тепловым сетям из-за повышенного гидравлического режима при располагаемой мощности, генерируемой в РК, целесообразным представляется устройство систем последовательного (в большинстве двухступенчатого) отбора низкотемпературной теплоты из обратных магистралей с «предельно возможным» доохлаждением первичного теплоносителя, рис. 1, в.

Такие решения представляются целесообразными прежде всего для передачи теплоты в реконструируемые абонентские системы децентрализованного и местного теплоснабжения для работы с пониженным температурным режимом (например, по сравнению с традиционным температурным графиком отопительных систем. В этом случае первая система работает в зависимом либо независимом гидравлическом режиме, а вторая - в аналогичных условиях с ТНУ, обеспечивающей «предельно возможное» доохлаждение

воды в обратной магистрали тепловой сети рис. 1, в.

Закономерно, что такое решение неизбежно обуславливает увеличение греющей поверхности нагревательных приборов, а также необходимость соответствующего повышения уровня тепловой изоляции зданий, что положительно согласуется с актуальностью проблемы энергосбережения [2, 7, 8, 10].

При этом теплоснабжение от ТЭЦ и РК с доохлаждением воды в обратных магистралах в процессе парокомпрессионной трансформации энергетических потоков способствует снижению затрат на транспортировку энергоносителя и повышению энергетической эффективности традиционных источников теплоты.

В этих условиях реализуются различные варианты модернизации с поэтапным увеличением энергетического потенциала систем теплоснабжения [14, 16], как для прямого повышения температуры теплоносителя в подающей магистрали, так и после подогрева воды в «пиковых» источниках либо с применением ТНУ.

В условиях ограниченных возможностей подключения абонентских систем к тепловым сетям из-за пониженного гидравлического режима при достаточной тепловой мощности РК либо ТЭЦ целесообразным представляется устройство систем с отбором низкотемпературной теплоты из обратных магистралей тепловой сети.

Такие схемы [14, 17, 19] могут быть рекомендованы, прежде всего, как для расширения объёма абонентского теплоснабжения, так и реконструируемых абонентских систем децентрализованного теплоснабжения с переходом на централизованное с пониженным температурным перепадом теплоносителя (например, $(t_r - t_0) = (30...50) ^\circ C$) по сравнению с традиционным температурным графиком эксплуатационного регулирования систем отопления.

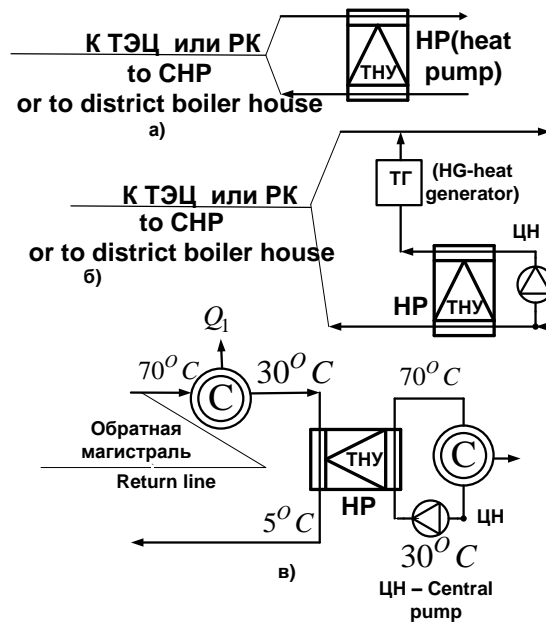
В этом варианте системы могут работать при увеличении общей выработки теплоты в зависимом либо более рациональном независимом гидравлическом режиме.

В работе [20] рассматривается система централизованного теплоснабжения с общим бойлером-теплоутилизатором, в который генерируемая теплота поступает от нескольких котлов с разными видами топлива, а также от гелиосистемы и тепловых насосов.

На основе математического моделирования авторами [21] исследовалась система теплоснабжения с центральным и вспомогательными тепловыми насосами дополнительно размещёнными в структуре абонентских систем. Предложенная модель, которая учитывала температуру воды в тепловой сети, в системе низкотемпературного отопления и горячего водоснабжения, позволила определить её общую эффективность соответствующим

коэффициентом преобразования. В [22] приведен анализ разработанных систем теплоснабжения в странах западной Европы на основе тепловых насосов с определением рациональных путей их дальнейшего развития.

В работе [23] приведен систематизированный обзор значительного количества



а) модифицированная схема теплоснабжения для прямого повышения температуры теплоносителя в подающей магистрали; б) модифицированная схема теплоснабжения с догревом ее в «пиковых» источниках теплоты после ТНУ; в) модифицированная схема системы последовательного отбора низкотемпературной теплоты из обратных магистралей с «предельно возможным» доохлаждением первичного теплоносителя.

(a) a modified heat supply scheme for direct increase of the heat carrier temperature in the supply line; b) a modified heat supply scheme with reheating of the heat carrier in "peak" heat sources after HP; c) a modified scheme of the system for the sequential selection of low-temperature heat from the return lines with the "maximum possible" post-cooling of the primary heat carrier. ТЭЦ (Теплоэлектроцентраль) – CHP (Heat and Power Plant); РК (Районная котельная) – DBH (District boiler house); ТГ (Теплогенератор) – HG (Heat Generator); ЦН (Центральный насос) – CP (Central pump); ТН (Теплонасосная установка) – HPU (Heat pump); Обратная магистраль – Return line; Q_1 – Useful heat.)¹

Рис.1. Варианты установки ТНУ на магистральных участках систем центрального теплоснабжения.¹

зарубежных вариантов совершенствования систем централизованного теплоснабжения от ТЭЦ с применением тепловых насосов в низкотемпературных системах. На основе результатов аналитических исследований авторами [19, 24] проанализирована эффективность теплонасосных систем, использующих энергетический потенциал водных и воздушных потоков. В работе [25] проанализировано влияние температуры низкопотенциального источника на эффективность

преобразования энергии нагреваемой воды с низким потреблением теплоты для отопления индивидуальных зданий отопления. Результаты исследования предложенной системы [26], которые направлены на повышение энергетической эффективности системы теплоснабжения, предусматривают совершенствование процессов реверсивной выработки парокompрессионным агрегатом теплоты и холода в виде нагреваемой воды

и охлаждённого воздуха для соответствующих абонентских систем.

В работе [27] проанализирована система интегрированной выработки тепловой и электрической энергии на ТЭЦ с глубокой утилизацией теплоты продуктов сгорания с помощью парокомпрессионного теплового насоса в подсистеме для отбора теплоты из отработанных газов в схеме мусоросжигательного комплекса (г. Мальмё). Система предусматривает возможность использования энергии в теплотехнологическом цикле очистки газов и водоподготовки в модернизированной теплогенерирующей установке. Таким образом, анализ применения теплонасосных технологий для модернизации центральных систем теплоснабжения свидетельствует о разноплановом характере научно-технических разработок, которые в решении анализируемой проблемы группируются по следующим направлениям их совершенствования:

- теплотехнологической взаимосвязи источника теплоты и тепловых сетей, в том числе с применением ТНУ в качестве основных, дополнительных, а также «пиковых» источников теплоты;
- теплогидравлических режимов работы систем теплоснабжения для «снижения» температурного графика их эксплуатационного регулирования;
- взаимосвязи и оптимизация теплогидравлических условий совместной работы тепловых сетей и систем потребления теплоты.

На основе вышеизложенного, закономерно представляет интерес аналитическое исследование по определению обобщённого показателя для оценки возможного повышения эффективности использования энергии первичного топлива в системах с расширенным ресурсом теплоснабжения при их модернизации на основе теплонасосных технологий.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Главной целью настоящего исследования явилось определение обобщённого показателя для качественной оценки возможностей повышения эффективности использования энергии сжигаемого топлива в модернизируемых системах с поэтапным увеличением генерируемой теплоты, как для централизованного, так и децентрализованного теплоснабжения, с аналитиче-

ским определением взаимосвязи теплоэнергетических характеристик анализируемых систем в результате внедрения теплонасосных технологий.

МЕТОДИКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использован комплексный метод исследования, который включает:

- анализ известных теоретических и экспериментальных работ с научным обобщением конечных результатов;
- расчётно-аналитическое и математическое моделирование, в основу которых заложены обобщённые характеристики энергетических и теплообменных процессов, а также предложенный способ аналитического решения поставленной задачи.

Определим общую эффективность возможного повышения использования теплоты сжигаемого топлива в результате модернизации систем теплоснабжения с расширением их ресурса на основе внедрения теплонасосных технологий, используя обобщённые теплоэнергетические характеристики в структурных элементах соответствующих систем.

Необходимый тепловой поток для теплоснабжения здания $Q_{от}$ на основе теплоты сгорания топлива может быть представлен в виде:

$$Q_{от} = Q_{top} \eta_{ku} \eta_{tc,1}, \quad (1)$$

где: η_{ku} — коэффициент полезного действия источника теплоты;

$\eta_{tc,1}$ — обобщённый коэффициент полезного действия тепловой сети.

Коэффициент использования энергии органического топлива в соответствующем источнике теплоты, следуя (1), представляется в виде:

$$\eta_{от,ku} = \frac{Q_{от}}{Q_{top}} = \eta_{ku} \eta_{tc}. \quad (2)$$

Логично [2, 3], что общий коэффициент полезного действия модернизируемых систем определяется произведением коэффициентов, которые характеризуют потери теплоты во всех последовательно соединённых подсистемах в общей структуре

систем теплоснабжения. Для наиболее экономичной поквартирной системы децентрализованного теплоснабжения на основе газового теплогенератора обобщенный коэффициент полезного действия $\eta_{ic,1}$ [2] представляется в виде

$$\eta_{ic,1} = \eta_1 (1 - \eta_0), \quad (3)$$

где η_0 — коэффициент, характеризующий долю сверхнормативных потерь теплоты через ограждающие конструкции. Эти потери теплоты через наружные ограждения в виде $(1 - \eta_0)$ не зависят от сравниваемых систем теплоснабжения, в связи с чем, они могут не учитываться [2, 3];

η_1 — коэффициент полезного использования топлива в поквартирной системе теплоснабжения с индивидуальным теплогенератором.

Аналогично для системы децентрализованного теплоснабжения от крышной (домовой) котельной соответствующий коэффициент полезного действия тепловой сети представляется в виде:

$$\eta_{ic,2} = \eta_1 \eta_2 (1 - \eta_0), \quad (4)$$

где η_2 — коэффициент, характеризующий потери теплоты в распределительных трубопроводах внутридомовых систем отопления и горячего водоснабжения.

Для системы децентрализованного теплоснабжения от квартальной котельной зависимость анализируемого коэффициента полезного действия тепловой сети $\eta_{ic,3}$ представляется в виде:

$$\eta_{ic,3} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 (1 - \eta_0), \quad (5)$$

где η_3 — коэффициент, характеризующий потери теплоты в трубопроводах внутриквартальной тепловой сети.

Для условий централизованного теплоснабжения от районной котельной соответствующая зависимость коэффициента полезного действия тепловой сети $\eta_{ic,4}$ имеет вид:

$$\eta_{ic,4} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 (1 - \eta_0), \quad (6)$$

где η_4 — коэффициент, характеризующий потери теплоты в магистральных трубопроводах тепловой сети от районной котельной.

При централизованном теплоснабжении от городской ТЭЦ зависимость обобщенного коэффициента полезного действия тепловой сети $\eta_{ic,5}$ дополнительно учитывает условия выработки теплоты [2, 3], которая приобретает следующий вид:

$$\eta_{ic,5} = (\mu_e / \eta_k) \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 (1 - \eta_0), \quad (7)$$

где η_k — коэффициент, определяемый величиной экономии топлива за счёт комбинированного производства тепловой и электрической энергии;

μ_e — доля экономии топлива, отнесенная на производство тепловой энергии.

Для условий работы парокомпрессионной теплонасосной системы теплоснабжения с отбором генерируемого теплового потока Q_k в конденсаторе на основе трансформации отбираемой теплоты от низкотемпературного источника и теплового эквивалента приводной мощности W в работе компрессора, зависимость действительного коэффициента преобразования φ имеет следующий вид:

$$\varphi = Q_k / W \quad (8)$$

Принимая во внимание отбор теплоты в конденсаторе теплового насоса по условию $Q_k = Q_{ot}$, а также учитывая зависимость действительного коэффициента преобразования от его значения по циклу Карно φ_k и коэффициента полезного действия η_m ТНУ в виде $\varphi = \varphi_k \eta_m$, из соотношения (3) следует зависимость для определения необходимого теплового потока Q_{ot} в виде:

$$Q_{ot} = W \varphi_k \eta_m = Q_{top} \eta_{kec} \varphi_k \eta_m \quad (9)$$

где η_{kec} — коэффициент полезного действия выработки электрической энергии на ТЭЦ и линий электропередач (ЛЭП).

Из соотношения (9) следует зависимость обобщённого коэффициента для определения эффективности использования энергии первичного топлива $\eta_{ot,mc}$ в работе теплонасосной системы теплоснабжения, которая приобретает соответствующий вид:

$$\eta_{ot,mc} = \eta_{kcc} \varphi_k \eta_m. \quad (10)$$

Из соотношения зависимостей обобщённого коэффициента определения эффективности использования энергии первичного топлива в теплонасосной системе теплоснабжения с ТНУ (10) и в соответствующей системе традиционного теплоснабжения от районной, квартальной, крышной (внутридомовой) котельной либо квартирного теплоснабжения, согласно соответствующих зависимостей на основе (2), определяются условия повышения эффективности использования теплоты с экономией первичного топлива для сравниваемых вариантов теплоснабжения $\bar{\eta}_{t,k}$ в следующем виде:

$$\bar{\eta}_{t,k} = (\eta_{kcc} \eta_m \varphi_k) / (\eta_{ku} \eta_{tc}). \quad (11)$$

Основными агрегатами большинства существующих ТЭЦ являются теплофикационные турбины с отбором пара. Турбины могут развивать полную электромеханическую мощность независимо от нагрузки теплофикационных отборов.

Снижение выработки электрической энергии на ТЭЦ за счёт увеличения выработки теплоты приводит к некоторому росту коэффициента использования теплоты топлива, ввиду уменьшения электромеханических потерь в турбогенераторной установке.

На базе теплоты из регенеративных турбин на ТЭЦ комбинированным методом дополнительно вырабатывается количество электроэнергии до 15-20% на базе внешнего потребления теплоты.

Удельный расход топлива на комбинированную выработку электроэнергии

$$b_t^e = 1 / (\eta_{kc} \cdot \eta_{em}), \quad (12)$$

где η_{kc} — КПД котельной электростанции;

η_{em} — электромеханический КПД соответствующего процесса.

Удельный расход топлива на выработку теплоты на ТЭЦ

$$b_m^m = 1 / \eta_{kc}. \quad (13)$$

Разница в расходах на теплоснабжение этой же группы тепловых потребителей теплоты от районной котельной определяется зависимостью

$$\Delta B_t = Q \cdot \eta_{ct} \left(\frac{b_k^t}{\eta_{ck}} - \frac{b_t^t}{\eta_{ct}} \right), \quad (14)$$

где Q — теплота отпущенная с ТЭЦ;
 η_{ct} — тепловой сети и ТЭЦ, учитывающий её магистральные потери;
 $\eta_{c,k}$ — КПД тепловой сети котельной равный отношению количества теплоты, отданной потребителям, к количеству теплоты, вступивший в тепловую сеть.

В работе [4] указывается, что радиус действия тепловой сети от ТЭЦ, как правило, больше, чем в районных котельных. Таким образом, при равных условиях обычно $\eta_{c,k} > \eta_{ct}$. Однако КПД котельной ТЭЦ (η_{kc}) больше КПД районной котельной (η_k).

Из анализа (2) и (3) следует, что экономия топлива при централизованном теплоснабжении при теплофикации по сравнению теплоснабжением от районной котельной имеет место в том случае, когда

$$(\eta_{ct} \cdot \eta_{kc}) / (\eta_{ck} \cdot \eta_k) > 1. \quad (15).$$

Для предварительных расчётов автор [4] даёт следующие значения соответствующих КПД источников теплоты, работающих на газообразном либо жидком топливе $\eta_{k,c} = 0.88 \dots 0.92$; $\eta_k = 0.80 \dots 0.85$ соответствующие КПД тепловых сетей $\eta_{c,t} = 0.90 \dots 0.95$; $\eta_{c,k} = 0.92 \dots 0.96$.

Удельная экономия теплоты сжигаемого топлива за счёт централизации теплоснабжения на единицу отпущенной теплоты на ТЭЦ

$$\Delta b_t = ((\eta_{ct} \cdot \eta_{kc}) / (\eta_{ck} \cdot \eta_k) - 1) / \eta_{kc}. \quad (16)$$

Для сравниваемых вариантов модернизации систем централизованного теплоснабжения от ТЭЦ на основе внедрения теплонасосных технологий, принимая во внимание зависимости (2) и (10), аналогичное соотношение для оценки повышения эффективности использования теплоты с экономией первичного топлива $\bar{\eta}_{t,tec}$ приобретает вид:

$$\bar{\eta}_{t,tec} = (\eta_{kес} \varphi_k \eta_{tn}) / ((\mu_e / \eta_k) \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4). \quad (17)$$

Для анализа взаимосвязи обобщённых теплоэнергетических показателей в установленных зависимостях (11) и (17) в качестве примера рассматривались следующие усреднённые исходные данные, базирующиеся на основе теоретических [1, 3, 4] и натуральных результатов [2,7,10,11] в работе анализируемых систем теплоснабжения, в частности:

- от поквартирных теплогенераторов:
 $\eta_{ku} = 0.95$, $\eta_{tc} = 0.98$;
- от крышной (внутридомовой) котельной: $\eta_{ku} = 0.90$, $\eta_{tc} = 0.95$;
- от внутриквартальной котельной:
 $\eta_{ku} = 0.90$, $\eta_{tc} = 0.90$;
- от районной котельной (РК):
 $\eta_{ku} = 0.85$, $\eta_{tc} = 0.85$;
- от ТЭЦ:
 $\mu_e / \eta_k = 1.6$, $\eta_{tc} = 0.85$.

Кроме того для принятых значений коэффициентов полезной выработки электроэнергии на ТЭЦ $\eta_{tec} = 0.37$ и коэффициента полезного действия линий электропередачи $\eta_{lep} = 0.90$ [4, 14], общий коэффициент её выработки и передачи равен $\eta_{kес} = 0.37 \cdot 0.90 = 0.33$.

На рис. 1 иллюстрируются результаты сопоставительных расчётов обобщённой оценки возможного повышения эффективности использования энергии сжигаемого топлива $\bar{\eta}_t$ с соответствующей его экономией в результате внедрения теплонасосных технологий в системах центрального и местного теплоснабжения в зависимости от действительного коэффициента преобразования φ в работе ТНУ.

Из сравнения анализируемых графиков следует, что повышение эффективности использования энергии первичного топлива

для всех вариантов систем центрального и децентрализованного теплоснабжения в результате модернизации их на основе теплонасосных технологий существенно зависит от действительного коэффициента преобразования. Отметим, что согласно [15], его минимальное значение для систем отопления и горячего водоснабжения находится в пределах $\varphi = 2.5 \dots 3.5$. Результатами многочисленных исследований [14, 19] обоснованы реальные условия высокоэффективной работы ТНУ в южных регионах Украины на основе низкотемпературной теплоты морской, речной воды, грунта, воздушных потоков, и воды с пониженной температурой в обратных магистралях тепловых сетей, а также других характерных источников теплоты, с действительным коэффициентом преобразования $\varphi = 3 \dots 5$.

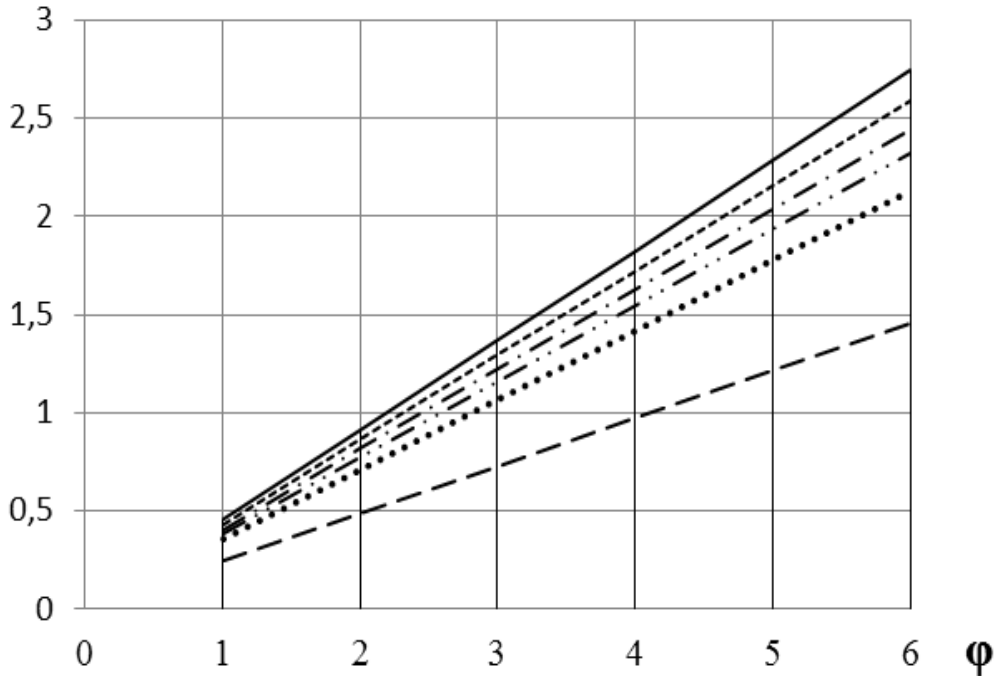
Из сравнительного анализа графических зависимостей, представленных на рис. 1, следует, что наибольшая эффективность использования энергии первичного топлива достигается в результате модернизации тепловых сетей от районной котельной, внутриквартальных и крышных котельных для анализируемых теплоэнергетических характеристик, которая в диапазоне анализируемых значений действительных коэффициентов преобразования $\varphi = 3 \dots 5$ возрастает в 1.1...2.7 раза. Вместе с тем системы теплоснабжения от ТЭЦ с анализируемыми теплоэнергетическими параметрами на основе ТНТ характеризуются низкой эффективностью экономии энергии сжигаемого топлива при поэтапной их модернизации с расширением потенциала генерируемой теплоты для рассмотренных теплоэнергетических характеристик, отличается незначительным снижением расхода топлива до 1.2 раза, даже при высоких значениях действительного коэффициента преобразования $\varphi = 3 \dots 5$.

Таким образом, на основе результатов аналитического исследования, анализа известных подходов и перспективных научно-технических разработок по модернизации систем теплоснабжения с поэтапным увеличением располагаемого теплового ресурса в условиях современного состояния, авторами сформулирован обобщённый подход к их совершенствованию:

- длительное накопление недостатков эксплуатационного обслуживания и без

надлежащей модернизации при реконструкции систем наиболее распространённого централизованного теплоснабжения с переходом на рыночный метод хозяйствования привели к неоднозначности в вопросах его общего преимуще-

ства по термодинамическим показателям в пользу менее энерго- и эколого-эффективного, децентрализованного теплоснабжения, отличающегося меньшей материалоемкостью.



••• — для системы поквартирного теплоснабжения; — · · — для системы теплоснабжения от крышной (внутридомовой) котельной; — · · · — для системы теплоснабжения от внутриквартальной котельной; - - - - для системы теплоснабжения от ТЭЦ при $\mu_e/\eta_k = 0.95$; - - - - для системы теплоснабжения от ТЭЦ при $\mu_e/\eta_k = 1.6$; — — — — для системы теплоснабжения от районной котельной.

(••• — for the apartment heating system; — · · — for the heat supply system from the roof (intra-house) boiler room; — · · · — for the heat supply system from the intra-quarter boiler house; - - - - for the heat supply system from CHP at $\mu_e/\eta_k = 0.95$; - - - - for the heat supply system from CHP at $\mu_e/\eta_k = 1.6$; — — — — for the heat supply system from the district boiler house).

Рис. 2. Зависимость повышения эффективности использования энергии первичного топлива в результате модернизации систем теплоснабжения на основе теплонасосных технологий от действительного коэффициента преобразования.²

Принимая во внимание крайне запущенное состояние систем централизованного от РК, а также многих систем децентрализованного теплоснабжения с изначально установленной расчётной температурой перегретого теплоносителя, в большинстве городов Украины невозможна их эксплуатация в изначальном расчётном теплогидравлическом режиме в ближайшие 10...20 лет;

— модернизацию систем теплоснабжения представляется целесообразным проводить комплексно на основе энергосбере-

гающих схемных решений с применением современного оборудования, трубопроводов и материалов, а также с реализацией энергосберегающих технологий, прежде всего утепления существующих зданий согласно нормативных требований [5, 6, 7], с переходом к двухтрубным горизонтальным системам отопления, отличающимся возможностью позонного и поквартирного учёта теплоты со снижением её потребления до (40...50) %;

² Appendix

- учитывая значительный физический износ трубопроводов и оборудования, морально устаревшую структуру построения и фактическое состояние систем централизованного теплоснабжения, наряду со скорейшей заменой изношенных трубопроводов и оборудования, неотложной является задача оптимизации схемно–технологических решений и рациональных режимов функционирования структурных подсистем;
- критический анализ известных подходов модернизации реконструируемых систем теплоснабжения свидетельствует о целесообразности решения возникшей проблемы на основе совместного использования положительных возможностей централизованного и децентрализованного теплоснабжения. При этом модернизация систем центрального теплоснабжения должна базироваться на сочетании покрытия базовой тепловой нагрузки с максимальной температурой на выходе РК до 100 °С с устройством дополнительных «пиковых» локальных тепловых источников, которые должны быть максимально приближены к системам потребления теплоты; такая схема структурно–функциональной модернизации систем теплоснабжения фактически предопределяет комбинированный вариант перехода централизованного на централизованно–локальное теплоснабжение, которое обладает возможностью более гибкого теплогидравлического регулирования структурных подсистем с повышенной надёжностью их работы;
- исходя из результатов аналитического исследования и анализа прогрессивных научно–технических разработок повышения эффективности использования энергии первичного топлива, представляется целесообразным с энерготехнологических позиций последовательное внедрение теплонасосных технологий с адаптацией их универсальных возможностей на всех стадиях теплотехнологических процессов теплоснабжения: генерации, транспортирования, распределения, преобразования и регулируемого потребления теплоты абонентскими системами.

Выводы

1. На основе анализа известных подходов и результатов научно–технических разработок, фактического состояния трубопроводов и оборудования, сформулирован обобщённый подход к возможному поэтапному повышению теплового ресурса модернизируемых систем теплоснабжения включая внедрение энергоэкономичных теплонасосных технологий.
2. Аналитическим исследованием взаимосвязи теплоэнергетических характеристик анализируемых систем установлен обобщённый показатель для качественной оценки возможного повышения эффективности использования энергии первичного топлива в результате модернизации систем теплоснабжения с расширением дополнительной выработки теплоты на основе внедрения теплонасосных технологий.
3. Результатами графической интерпретации установленной взаимосвязи обобщённых энергетических характеристик обоснована целесообразность модернизации систем с внедрением теплонасосных установок, прежде всего в системах централизованного теплоснабжения от районных котельных. При этом обеспечивается повышение эффективности использования теплоты первичного топлива с соответствующей экономией в 1.1...2.7 раза при дополнительной генерации теплоты в работе теплонасосных установок соответствующего назначения с действительными коэффициентами преобразования в диапазоне (3...5).
4. С позиции энергосбережения, учитывая результаты зарубежного опыта, внедрение теплонасосных технологий при модернизации систем теплоснабжения, с расширением ресурса генерируемой теплоты, является рациональным в поэтапной практической реализации с универсальными их возможностями на всех стадиях теплотехнологического процесса теплоснабжения: генерации, транспортирования, распределения, преобразования и регулируемого потребления теплоты абонентскими системами.

APPENDIX (ПРИЛОЖЕНИЕ)

1. Fig. 1. a) a modified heat supply scheme to directly obtain the temperature of the heat carrier in

the supply line; b) a modified heat supply scheme with its reheating in “peak” heat sources after HPI; c) a modified scheme for the sequential selection of low-temperature heat from the return lines with the “maximum possible” post-cooling of the nearest heat carrier.

ТЭЦ (Теплоэлектроцентраль) – CHP (Heat and Power Plant); ПК (Районная котельная) – DBH (District boiler house); ТГ (Теплогенератор) – HG (Heat Generator); ЦН (Центральный насос) – CP (Central pump); ТНУ (Теплонасосная установка) – HPU (Heat pump unit).

2. Fig. 2. Dependence of the increase in the efficiency of the use of primary fuel energy as a result of the modernization of heat supply systems based on heat pump technologies on the actual conversion factor.

(*** – for the apartment heating system; — · · — for the heat supply system from the roof (intra-house) boiler room; — · — for the heat supply system from the intra-quarter boiler house; - - - - for the heat supply system from CHP at $\mu_e/\eta_k = 0.95$; - - - - for the heat supply system from CHP at $\mu_e/\eta_k = 1.6$; — — — — for the heat supply system from the district boiler house).

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. Chistovich S.A. Avtomatizirovannyye sistemy teplosnabzheniya i otopleniya. [Automated systems of heat supply and heating.] / S. A.Chistovich, V.K. Aver'yanov, Yu. A. Tempel', S. I. Bykov. – L. – Stroyizdat [Construction publishing house], 1987. 249 p.
2. Chistovich. S. A. Tekhnologicheskie skhemy sistem teplofikatsii, teplosnabzheniya i otopleniya [Technological schemes of heating systems, heat supply and heating]. zh. AVOK, №7, 2007. pp. 10–18.
3. Melent'ev L.A. Sistemnye issledovaniya v energetike [Systems research in energy]. M.: Nauka [The science], 1979. 455 p.
4. Sokolov E.Ya. Teplofikatsiya i teplovye seti [Heating and heating networks], 7 izd. – M.: Izd-vo MEI [MEI Publishing House], 2006. 472 p.
5. DBN V. 2.6.–31: 2006,2016. Teplova izolyatsiya budivel' [Thermal insulation of buildings]. – K.: Minregionbud, Ukraïni [Ministry of Regional Construction, Ukraine], 2017. 72 p.
6. DBN V.2.5–67:2013. Opalennya, ventilyatsiya ta konditsionuvannya [Heating, ventilation and air conditioning]. – Kiïv: Ministerstvo regional'nogo rozvitku budivnitstva ta zhitlovo-komunal'nogo gospodarstva Ukraïni [Kyiv: Ministry of Regional Development of Construction and Housing and Utilities of Ukraine], 2013. 141 p.
7. Petrash V.D. Rozrakhunkovo-eksperimental'na otsinka energetichnoi efektyvnosti tsivil'nykh budivel' [Computational-experimental assessment

of the energy efficiency of civil buildings]/V. D. Petrash, Basist D. V., Geraskina E. A./ Odesa, VMV, 2020. 327 p.

8. DBN V.2.5–39:2008. Teplovi merezhi. Zovnishni merezhi ta sporudi. Inzhenerne obladnannya budinkiv i sporud. – K.: Minregionbud Ukraïni [Thermal networks. External networks and structures. Engineering equipment of buildings and structures. - K.: Ministry of Regional Development of Ukraine], 2009. 55 p. (zi zminami 2018r.) (with changes 2018)

9. Ionin A.A., Teplosnabzhenie [Heat supply]. – M.: Ekomet [Ecomet], 2011. 336 p.

10. Andrizhievskiy A.A. Analiz effektivnosti modernizatsii sistem teplosnabzheniya. Trudy BGTU [Analysis of the efficiency of modernization of heat supply systems. Proceedings of BSTU], 2006g., vyp. XIV [issue XIV], pp. 147–151.

11. Bass M.S. Metodicheskie voprosy otsenki effektivnosti sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya [Methodological issues of evaluating the efficiency of district heating systems]/ M.S. Bass, A.G. Batukhtin, S.A. Trebunskikh // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU [Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnical University]. – 2013. №2, pp. 80–84.

12. Il'in R.A. Kompleksnaya modernizatsiya teplovykh punktov v sistemakh tsentralizovannogo teplosnabzheniya. Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Simvol nauki» [Complex modernization of heat points in district heating systems. International scientific journal "Symbol of Science"], №112, 2015. pp. 42–44.

13. Batukhtin A. G. Povyshenie effektivnosti sovremennykh sistem teplosnabzheniya [Increasing the efficiency of modern heat supply systems]/ A. G. Batukhtin, S. A. Ivanov, M. V. Kobylkin, A. V. Mitkus. – Chita: Vestnik ZaBGU [Chita: Bulletin of ZaBSU]. – 2013. –№9 (100). pp. 112–120.

14. Petrash V. D. Teplonasosnyye sistemy teplosnabzheniya. VMV. Odessa [Heat pump heat supply systems. "BMB". Odessa], 2014. 576 p.

15. DSTU B V.2.5.–44 Proektuvannya sistem opalennya budivel' z teplovimi nasosami. – Kiïv.; Minregionbud Ukraïni [Design of scorching systems with heat pumps. - Kyiv.; Minregionbud of Ukraine], 2010. 57 p.

16. Stepanov O. A., Sistemy tsentralizovannogo teplosnabzheniya s primeneniem teplovykh nasosov [Systems of centralized heat supply with heat pumps] // O. A. Stepanov, P. A. Tret'yakova/ Vestnik TyumGU, Fiziko-matematicheskoe modelirovanie [Bulletin of Tyumen State University, Physics and Mathematics Modeling], 2005, Tom [Volume] 1, №4, pp. 43–51.

17. Pat. 2239129 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F24D3/08// Sposob teplosnabzheniya [Pat. 2239129 Russian Federation, MRK F24D3/08

// Heat supply method]. / Stenin V. A. № 2003102574/06; opubl. 30.01.03. Byul. №22 (publ. 30.01.03. Bull. #22), 6 p.

18. Treť'yakova P. A. Sovremennye podkhody k modernizatsii sistem tsentralizovannogo teplosnabzheniya na osnove vnedreniya teplonasosnykh ustanovok. [Modern approaches to the modernization of district heating systems based on the introduction of heat pump units]// Omskiyy nauchnyy vestnik [Omsk Scientific Bulletin]. 2014. №2 (130), pp. 178–182.

19. Petrash V. D. Effektivnost' parokompressionnoy transformatsii energeticheskikh potokov dlya teplosnabzheniya na osnove morskoy vody. [Efficiency of vapor compression transformation of energy flows for heat supply based on sea water] SCOPUS. Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy BNTU [Energy. Bulletin of higher educational institutions of BNTU] 2021, vyp [issue]. T. 64, № 6, 2021. pp. 538 – 553.

20. Red'ko A. A., Taraday A. M., Chernokrilyuk V. V., Esin T. S., Kombinirovannaya sistema teplosnabzheniya s vozobnovlyaemyimi istochnikami teploty. [Combined heat supply system with renewable heat sources] Energoberezhenie, energetika, energoaudit. [Energy saving, energy, energy audit]. №199 (29), pp. 42–46.

21. Østergaard P.A., Andersen A.N. Booster heat pumps and central heat pumps in district heating. Applied Energy, 2016, no. 184, pp. 1374–1388.

22. Sayegh M.A., Jadwiszczak P., Axcell B.P., Niemierka E., Brys K., Jouhara H. Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating. Energy & Buildings, 2018, no.166, pp. 122–144.

23. Ommen T. S. (2015). Heat Pumps in CHP Systems: High-efficiency Energy System Utilizing Combined Heat and Power and Heat Pumps. DTU Vechanical Engineering. DCAAMM Special Report, No. S187.

24. 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, 2019, no. 176, pp. 156–170.

25. Oussama Ibrahim, Farouk Fardoun, Rafic Younes, Hasna Louahlia–Gualous. Review of water-heating systems: General selection approach based on energy and environmental aspects. Building and Environment, 2014, vol. 72, pp. 259–286.

26. Strategic Research and Innovation Agenda for Renewable Heating & Cooling, European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling. RHC–Platform, Brussels, 2013. 104 p.

27. Zhovmir M.M. Utilizatsiya nyz'kotemperaturnoi teploty produktov sgoraniya palyv za dopomogoyu teplovykh nasosiv [Utilization of low-temperature heat of combustion products of fuels by means of heat pumps]. Prom. teplotekhnika [Industrial heating technology], 2008, no. 32, pp. 90–98. (In Ukrainian).

Сведения об авторах



Петраш Виталий Демьянович, д.т.н., профессор. Область научных интересов: системы обеспечения микроклимата, теплонасосные системы отопления и теплоснабжения, энергосбережение и экологически чистые технологии.

E-mail: petrant@ukr.net



Шевченко Леонид Фёдорович, к.т.н., доцент, Область научных интересов: системы обеспыливания технологических процессов, гелиосистемы горячего водоснабжения и энергетический аудит.

E-mail: bgedyx7@ukr.net



Барышев Виталий Павлович, к.т.н., доцент по кафедре физики. Область научных интересов: энергетическая эффективность и экологически чистые технологии.

E-mail: baryshev@ogasa.org.ua



Гераскина Элина Анатольевна, к.т.н., доцент. Область научных интересов: использование энергии возобновляемых и вторичных источников, теплонасосные системы отопления и теплоснабжения, энергосбережение

E-mail: poselok@te.net.ua



Даниченко Николай Владимирович, к.т.н., доцент. Область научных интересов: использование энергии низкотемпературных источников в системах теплоснабжения и отопления.

E-mail: nikolai.danichenko@gmail.com