- Various Origin]. *Alternativnaya Enerhetika i Ekologiya. [Alternative Energy and Ecology]*. 2012. No. 7. pp. 105–113. (Rus.)
4. Aslanyan G.S., Reutov B.V. [Problematicity of hydrogen energy formation]. *Teploenerhetika. [Thermal power engineering]*. 2006. No. 4. pp. 66–73. (Rus.)
 5. Japan has launched one of the world's largest stations for the production of hydrogen. — <https://biz.censor.net.ua/news/3181083/> 12.03.2020. (Rus.)
 6. Challenges for Japan's Energy Transition. Basic Hydrogen Strategy. *Agency for Natural Resources and Energy (ANRE), Ministry of Economy, Trade and Industry (METI)*. Oct. 2018, Japan. 2018. 120 pp.
 7. Kyrylenko O.V. [Intellectual Electrical Networks: Elements and modes]. Kyiv : Institute of Electrical Dynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. 400 pp. (Ukr.)
 8. [Report on conformity assessment (adequacy) of generating capacity]. Kyiv : Ukrenergo, 2019. 68 p. (Ukr.).
 9. Tommy I. HyDeploy: The UK's First Hydrogen Blending Deployment Project. *Clean Energy*, 2019, Vol. 3, Iss. 2, pp. 114–125. — <https://doi.org/10.1093/ce/zkz006>.
 10. Eckert V., Revill J. Powered by hydrogen, Hyundai's trucks aim to conquer the Swiss Alps. — <https://biz.censor.net.ua/n3187934.09.04.20>.
 11. [Why is the world switching to hydrogen transport and where it works?] — <https://biz.censor.net.ua/r3184189/> (Rus.)
 12. Armaroli N., Balzani V. The Hydrogen Issue (Review). *ChemSusChem*. 2011. No. 4. pp. 21–36. DOI: 10.1002/cssc.201000182/
 13. Shentsov V. Introduction to hydrogen safety e-laboratory and education. *Presentation at Naftogas of Ukraine*. October 31, 2019. 62 pp. (ulster.ac.uk).
 14. Karp I. [Who controls the climate?]. *Zerkalo nedeli*. 2019. 27 June. No 25. (Rus.)
 15. Latynyna Y. [The Church of Global Warming]. *Novaya gazeta. [New newspaper]*. 30.11.2019. (novayagazeta.ru 019/11/30). (Rus.)
 16. Global coal capacity is booming thanks to China and Japan. *PEI*. March 27, 2020. p. 2.

Received April 21, 2020

УДК 621.57

DOI: 10.33070/etars.2.2020.02

Лобунець Ю.М., докт. техн. наук, ORCID 0000-0002-3593-1687

Інститут газу НАН України, Київ

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: yurilobunets@yahoo.co.uk

Застосування термоелектричних теплових насосів у системах централізованого теплопостачання

Наведено попередній аналіз можливостей застосування термоелектричних теплових насосів у низькотемпературних централізованих системах теплопостачання (системах 4-го та 5-го покоління). Показано, що завдяки схемним рішенням з використанням термоелектричних теплових насосів можливо забезпечити високу енергетичну ефективність низькотемпературних теплових мереж. Проведено оцінки, що підтверджують доцільність використання термоелектричних теплових насосів, інтегрованих безпосередньо у систему опалення споживачів. *Бібл. 6, рис. 5, табл. 1.*

Ключові слова: централізована система теплопостачання, ЦСТ-4, ЦСТ-5, термоелектричний тепловий насос.

Сучасні програми розвитку систем теплопостачання орієнтовані передусім на створення низькотемпературних централізованих теплових мереж з максимальним використанням можливостей спільного виробництва теплової та електричної енергії, так званих мереж 4-го та 5-го покоління [1, 2]. В основі градації теплових мереж за поколіннями лежить температура гріючого теплоносія. Вважається, що мережі першого покоління з паровим опаленням виникли у 1880 р. Наступне покоління мереж (1930-і рр.) базувалося на використанні води під тиском з температурою на

рівні 130 °C. У 1970-х рр. з'явилися мережі 3-го покоління з температурою носія нижче 100 °C, в яких почали застосовувати такі промислові технології виробництва елементів конструкцій, як попередня ізоляція труб. До четвертої генерації відносять мережі з більш низькою температурою (50 °C), що дає можливість значно зменшити капітальні витрати на будівництво теплотрас та втрати енергії під час транспортування, збільшити ресурс мереж та забезпечити можливість широкого використання відновлюваних джерел енергії та теплових відходів [3].

Системи 5-го покоління оперують з теплоносіями, температура яких близька до температури навколишнього середовища, та потребують безумовного використання теплових насосів для підтримки необхідних температурних режимів у споживача [2]. За існуючими оцінками, застосування низькотемпературних мереж дає можливість до 80 % знизити викиди вуглецевих газів порівняно з традиційними [4]. Такі системи, забезпечуючи централізоване постачання енергії, мають бути пристосовані до розподіленої генерації електричної та теплової енергії. Перехід до ЦСТ-4 та ЦСТ-5 потребує комплексного вирішення завдань генерації теплової енергії, її транспортування та споживання, що суттєво відрізняються від існуючих рішень. Перш за все це стосується систем та приладів опалення. Для сучасних систем повітряного опалення та систем поверхневого типу таких, як «тепла підлога» та їм подібних, цілком достатньо температурного потенціалу 35 °С. Для систем гарячого водопостачання стандарти ЄС встановлюють робочу температуру 43 °С. Зрозуміло, що за номінальної температури в мережі 50 °С та нижче для забезпечення індивідуальних температурних режимів кожного зі споживачів та збільшення номінальної пропускної здатності теплотрас необхідно застосовувати трансформатори теплових потоків (теплові насоси). Детальний аналіз застосування традиційних теплових насосів (ТН) у ЦСТ-4 наведено у роботі [5]. Показано, що застосування інтегрованих у будівлю ТН доцільно у разі використання у системі відпрацьованої теплоти ТЕЦ або інших теплових відходів. У інших випадках доцільність використання ТН залежить від рівня капітальних витрат та співвідношення цін на паливо, електроенергію й викиди CO₂.

Аналіз характеристик ТТН на централізованих системах теплопостачання

У статті розглядаються деякі можливості застосування термоелектричних теплових насосів (ТТН) у низькотемпературних системах теплопостачання. Перевагами ТТН є висока надійність, відсутність у їх складі рухомих частин та фреонів, компактність, незалежність від масштабного фактора. На відміну від компресійних теплових насосів ТТН дають можливість використовувати ефективні схемні рішення, що надає їм додаткові відчутні переваги. Загальною властивістю зворотних термодинамічних циклів є гіперболічна залежність коефіцієнта ефективності (COP) від різниці робочих температур (рис.1).

Рис.1. Залежність COP від перепаду температур.

Ця особливість покладена в основу ідеального зворотного циклу Лоренца, який може бути реалізований за допомогою послідовно з'єднаних теплових насосів, кожен з яких працює у невеличкому інтервалі температур з високою ефективністю, тобто загальна різниця робочих температур поділяється на велику кількість маленьких інтервалів, що забезпечує високий загальний COP, а необхідні перепад температур та продуктивність досягаються за рахунок набору відповідної кількості послідовно з'єднаних теплових насосів. Таку схему неможливо реалізувати за допомогою машинних ТН через обмеження технічного та економічного характеру. Для термоелектричних теплових насосів таких обмежень не існує, оскільки кожен термоелемент являє собою мікро-ТН, який може виконувати роль окремого ТТН. Питання реалізації подібної схеми полягає у створенні конструкції, яка може забезпечити означені вище умови за прийнятних техніко-економічних характеристик. Основою інновації, що пропонується, є технічна можливість створення інтегрованого теплообмінника, який об'єднує термоелектричні мікротеплові насоси у послідовний контур нагрівання (або охолодження) теплоносія системи опалення. Оскільки різниця температур на кожному окремому мікротепловому насосі може бути дуже мала (< 5 °С), кожна окрема одиниця працює з високим COP.

На рис.2 представлена реальна характеристика стандартного термоелектричного модуля типу МТ2.6-0.8-263 у вигляді перерізу поверхні множини Парето у координатах {Q, COP}. Характеристику розраховано для заданого перепаду температур у допустимому інтервалі щільності струму живлення $J_{\min} \leq J \leq J_{\max}$ за методами, викладеними у роботі [6]. Як видно з наведених даних, ефективність та потужність ТТН у заданому інтервалі температур можливо регулювати у широких межах, що дає мож-

Рис.2. Співвідношення теплопродуктивності Q та ефективності COP модуля ТТН.

ливість визначити оптимальні режими, які забезпечують найкращі техніко-економічні характеристики ТТН, й розробити алгоритми управління, здатні адаптувати режим ТТН до поточних умов.

Рис.3 ілюструє схему ТТН, що розглядається. Очевидно, що вона значно простіша порівняно з традиційною схемою компресійного ТН. По суті ТТН є пластинчастим теплообмінником з інтегрованими в нього термоелектричними модулями, які обтікаються теплоносіями за схемою протитоку. Згідно теорії теплообміну, в такому теплообміннику різниця температур між теплоносіями залишається постійною вздовж всієї поверхні й дорівнює $\Delta t = W/KF$. Це надає можливість вибором параметрів ТТН забезпечити необхідну потужність та оптимізувати ефективність схеми, що розглядається.

Як витікає з наведених даних, характеристики ТТН, головним чином, залежать від діапазону робочих температур, який в свою чергу визначається умовами застосування. Вище зазначалося, що для забезпечення ефективної роботи сучасних опалювальних приладів достатньо забезпечити температуру теплоносія на

вході $t_{in} = 35^\circ\text{C}$. Зазвичай у системі опалення відпрацьовується перепад температур не більш 5°C . Номінальна температура теплоносія в теплотрасі ЦСТ-4 не перевищує 50°C . Для підвищення ефективності системи у цілому температуру зворотного теплоносія на виході з теплотраси необхідно довести до мінімуму, принаймні до 10°C . Таким чином, температурні умови, що можуть бути використані як вихідні дані для аналізу ТТН, наведені у таблиці.

Температурні умови

Прилад	Вхід у ТТН	Вихід з ТТН
Контур опалення, t_h , $^\circ\text{C}$	30	35
Контур теплопостачання, t_s , $^\circ\text{C}$	10–50	5–45

Решта необхідних параметрів: розходи теплоносіїв, їх властивості, умови теплообміну тощо — визначається, виходячи з умов забезпечення необхідної потужності ТТН. Розподіл температур у такому ТТН ілюструє рис.4. У даному конкретному випадку ТТН складається з 20 термоелектричних модулів типу МТ2.6-0.8-263 виробництва НВФ «Модуль». Початкова температура гріючого теплоносія $t_s = 25^\circ\text{C}$, тобто дорівнює приблизно середній температурі з можливого діапазону; початкова температура теплоносія системи опалення на вході ТТН дорівнює $t_h = 30^\circ\text{C}$, на виході вона досягає необхідного рівня $t_{hou t} = 35^\circ\text{C}$. За цих умов ТТН забезпечує теплову потужність $Q = 1\text{ кВт}$ та $\text{COP} \approx 6,2$. Габарити такого ТТН приблизно $550 \times 150 \times 25\text{ мм}$; вартість — на рівні $G \approx 300\text{ євро}$.

Необхідно звернути увагу на надзвичайну гнучкість системи, що розглядається. Цитовані у наведеному вище прикладі параметри ТТН відповідають режиму, що позначений на рис.2 знаком*. Як витікає з наведеної на цьому

Рис.3. Схема ТТН.

Рис.4. Розподіл температур вздовж ТТН.

Рис.5. Залежність COP ТТН від температури теплоносія в теплотрасі.

графіку характеристики, у разі необхідності потужність цього конкретного ТТН при заданих температурних умовах може бути збільшена до $Q = 5$ кВт за рахунок зменшення ефективності до $COP = 2$ (на графіку цей режим позначено точкою +) або ефективність можна підвищити практично до $COP = 14$ за рахунок зменшення потужності ТТН — та все це лише за рахунок зміни струму живлення. Це відкриває нові можливості для створення «розумних» систем опалення, які дають можливість оптимізувати режими споживання теплової енергії, пристосовуючи їх до поточних потреб чисто програмними методами.

З огляду на те, що температура теплоносія у теплотрасі може бути як вище, так і нижче, ніж номінальна температура системи опалення $t_h = 35$ °C, представляє інтерес питання взаємодії ТТН із джерелом теплової енергії у різних температурних умовах. Зрозуміло, що у випадку $t_s < t_h$ ТТН працює як трансформатор теплових потоків, забезпечуючи передачу теплоти від джерела з низькою температурою до споживача з більш високою температурою. У випадку $t_s > t_h$ ТТН виконує роль інтенсифікатора теплообміну, який дає можливість передати необхідну теплову потужність через обмежену поверхню теплообміну ТТН ціною незначних витрат електроенергії. Залежність COP ТТН від температури джерела теплової енергії представлено на рис.5. Як витікає з наведених даних, за певних умов ефективність ТТН досягає значень, які навіть теоретично не досяжні для інших типів теплових насосів.

Окремо слід зупинитися на вартості ТТН. Наведена вище оцінка капітальних витрат $G \approx 300$ євро зроблена на основі фактичних даних щодо сучасного рівня вартості комплектуючих. Очевидно, що у разі масового застосування ТТН існує певний потенціал зниження капітальних витрат. У той же час цей рівень вартості цілком відповідає оцінкам цільової вартості компресійних ТН, наведеним у роботі [4], а також корелюється з оцінкою вартості сучасних компресійних теплових насосів залежно від їх ефективності [6].

Висновки

Приведені у роботі дані показують перспективність використання термоелектричних теплових насосів для підвищення енергетичної ефективності низькотемпературних централізованих систем теплопостачання 4-го та 5-го покоління. Одержані теоретичні результати для подальшого розвитку потребують проведення аналізу характеристик систем централізованого теплопостачання з ТТН у цілому, а також експериментального підтвердження та верифікації вхідних даних аналізу в лабораторних умовах та умовах, наближених до практичного використання розглянутої схеми теплопостачання.

Список літератури

1. Alessandro Dalla Rosa, Hongwei Li, Svend Svendsen, Sven Werner, Urban Persson, Karin Ruehling, Clemens Felsmann, Martin Crane, Robert Burzynski, Ciro Bevilacqua. Toward 4th Generation District Heating. Annex X Final report. IEA DHC, 2014, 250 pp. — <https://www.benuek.net/Fourth-Generation-District-Heating-Networks.html>
2. Oddgeir Gudmundsson. Distribution of district heating: 4-th Generation. Danfoss Heating Segment — Application Centre, 2016, 20 pp.
3. 4th Generation District Heating Technologies and Systems. Appendix B — Project description. 4DH Strategic Research Centre, 2014, 20 pp.
4. Heat Pumps in District Heating. UK Department of Energy & Climate Change. *Final Report*, 2016, 138 pp.
5. Lobunets Yu.M. Criteria for performance evaluation of thermoelectric energy converters. *Journal of Thermoelectricity*, 2014, No. 2, pp. 65–78.
6. Price Comparison for 3-ton (10 kW) Heat Pump System. — www.heatpumppriceguides.com/

Надійшла до редакції 24.02.20

Лобунец Ю.Н., докт. техн. наук, ORCID 0000-0002-3593-1687

Институт газа НАН Украины, Киев

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: yurilobunets@yahoo.co.uk

Использование термоэлектрических тепловых насосов в системах централизованного теплоснабжения

Приведен предварительный анализ возможностей использования термоэлектрических тепловых насосов в низкотемпературных централизованных системах теплоснабжения (системах 4-го и 5-го поколений). Показано, что благодаря схемным решениям с использованием термоэлектрических тепловых насосов можно обеспечить высокую энергетическую эффективность низкотемпературных тепловых систем. Проведены оценки, подтверждающие целесообразность использования термоэлектрических тепловых насосов, интегрированных непосредственно в систему отопления пользователей. *Библ. 6, рис. 5, табл. 1.*

Ключевые слова: централизованная система теплоснабжения, ЦСТ-4, ЦСТ-5, термоэлектрический тепловой насос.

Lobunets Yu.M., Doctor of Technical Sciences, ORCID 0000-0002-3593-1687

The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

39, Degtyarivska Str., 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail: yurilobunets@yahoo.co.uk

Application of the Thermoelectric Heat Pumps for the District Heating Systems

The article presents a preliminary analysis of the possibility of applying thermoelectric heat pumps (THP) in low-temperature district heating systems (in the 4–5 generation DH systems). The advantages of THP are the high reliability, the lack of moving parts and freons in their composition, the compactness, the independence of the scale factor. Unlike the compression heat pump, THP provides effective circuit solutions, giving them additional tangible benefits. These features make it possible to reproduce the ideal Lorentz cycle, which can be realized with series-connected thermoelectric modules. The total operating temperature difference is divided into a large number of small intervals, which ensures the high efficiency of each module, and the required temperature difference and performance are achieved by the set of a corresponding number of series-connected micro-THP. It is clear that such a scheme cannot be implemented using compression heat pumps because of a number of technical and economic constraints. There are no such restrictions for thermoelectric heat pumps since each thermoelement is a micro-HPs that can act as a separate THPs. On the example of THP with a rated power of 1kW, the characteristics of the proposed scheme were analyzed. Unlike the classic HP, it has great flexibility. Under given temperature conditions, the power of the considered THP can vary in the range from 0.5 kW to 5 kW only due to a change in the supply current. At the same time, its effectiveness varies in the range from COP = 14 to COP = 2. This opens up new opportunities for the creation of «smart» heating systems that allow optimization of heat consumption modes, adapting them to current needs by purely programmatic methods. The estimated capital cost of THP G ≈ 300 EUR/kW is based on actual data on the current level of component cost. *Ref. 6, Fig. 5, Tab. 1.*

Key words: district heating system, DH-4th, DH-5th, thermoelectric heat pump.

References

1. Alessandro Dalla Rosa, Hongwei Li, Svend Svendsen, Sven Werner, Urban Persson, Karin Ruehling, Clemens Felsmann, Martin Crane, Robert Burzynski, Ciro Bevilacqua. Toward 4th Generation District Heating. Annex X Final report. IEA DHC, 2014. 250 pp. — <https://www.benuk.net/Fourth-Generation-District-Heating-Networks.html/>
2. Oddgeir Gudmundsson. Distribution of district heating: 4-th Generation. Danfoss Heating Segment — Application Centre, 2016. 20 pp.
3. 4th Generation District Heating Technologies and Systems. Appendix B — Project description. 4DH Strategic Research Centre, 2014. 20 pp.
4. Heat Pumps in District Heating. UK Department of Energy & Climate Change. *Final Report*, 2016. 138 pp.
5. Lobunets Yu.M. Criteria for performance evaluation of thermoelectric energy converters. *Journal of Thermoelectricity*, 2014, No. 2, pp. 65–78.
6. Price Comparison for 3-ton (10 kW) Heat Pump System. — www.heatpumppriceguides.com/

Received February 24, 2020

УДК 662.69

DOI: 10.33070/etars.2.2020.03

Пикашов В.С., канд. техн. наук, **Троценко Л.Н.**, канд. техн. наук,
Виноградова Т.В., **Великодный В.А.**, канд. техн. наук
Институт газа НАН Украины, Киев
ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: t-ln@ukr.net

Исследование влияния покрытий протяженных излучающих труб на их теплоизлучение при нагреве больших объектов и отоплении производственных помещений

Показано, что для нагрева больших по длине и объему помещений и объектов наиболее целесообразно применение протяженных излучающих труб. Описан способ нагрева протяженных объектов, при котором применяется принцип радиационного излучения от излучающих труб длиной свыше 30 м. Рассмотрены способы повышения равномерности температуры и теплового излучения от труб. Приведены результаты лабораторных экспериментов по изучению зависимости теплового излучения труб от способов нанесения на них специальных покрытий. *Библ. 18, рис. 4.*

Ключевые слова: тепловое излучение, протяженные трубы, специальные покрытия.

Энергоэффективное использование топливных ресурсов является насущной проблемой в настоящее время. Большая часть этих ресурсов идет на отопление производственных помещений и нагрев крупногабаритных объектов. Одной из передовых технологий при нагреве больших объектов (протяженных и высоких производственных помещений, таких, как цеха, ангары, гаражи, фермы и другие) является применение радиационного отопления [1, 2].

Радиационное отопление имеет много преимуществ по сравнению с традиционными способами отопления: водяными радиаторами и паровыми батареями, струями горячего воздуха и продуктов сгорания. Это низкие капитальные и эксплуатационные затраты, минимальная тепловая инерция, минимум затрат на аккумуляцию тепла помещением, приемлемые санитарные условия. К тому же за счет лучистой энергии созда-

ются комфортные условия труда рабочего персонала [3–5].

Для обогрева небольших помещений используются электрические излучатели, для производственных целей их применение неэкономично. Наиболее широко для обогрева промышленных помещений и объектов используются излучающие трубы с экранами, внутри которых циркулирует газовый теплоноситель с температурой 300–650 °С [6–8]. На рынке в мире и в Украине представлено много фирм, предлагающих свои разработки и конструкции излучающих труб с экранами, горелками, вентиляторами, автоматикой: ADRIAN (Словакия), ROBERTS GORDON (США), DETROIT RADIANT (США), SOLARONICS (Франция), PACOLE (Венгрия), FRACCARO (Италия), Газпром (РФ) и др. В этих разработках используется природный газ или пропан-бутано-