



The potential of nanotechnology: issues of heat supply and heating of buildings

Y.A. Levin¹ , A. A. Nikitin² , M.V. Konotopov^{3*} , L.A. Ivanov⁴ 

¹ Moscow State Institute of International Relations (MGIMO-University), Moscow, Russia;

² Moscow Factory «Paris Commune», Moscow, Russia;

³ Russian Academy of Engineering, Moscow, Russia;

⁴ Russian Academy of Engineering, Moscow, Russia

* **Corresponding author:** mishaperedelkino@gmail.com

© Authors, 2020

ABSTRACT: The article explores the possibility of using nanotechnology to improve the efficiency of centralized and autonomous heating systems on the way to a new technological model. A logical sequence of the development of heat supply and heating is given, conservative equipment and technologies that are used to supply thermal energy to consumers is marked. In the context of the urgent tasks of heat supply and heating of buildings, the concepts of the use of nanotechnologies that meet the goals of maximum heat transfer intensification are considered. Heat conduction analysis, concentration, size, mass and velocity of nanoparticles assesses are the basis for assessing the possibility to use nanofluids as a coolant for improving heat exchangers and to reduce heat losses in heating systems to maximize efficiency of their work. It is shown that the use of nanostructures affects the saving of coolant flow as the main task of the qualitative and quantitative regulation of the heat supply system. Attention is focused on the application of nano-structured materials in low-temperature fuel cells used decentralized heating systems for heating houses.

KEYWORDS: heating plants, heat capacity, heat transfer coefficient, nanofluids, heat exchanger, carbon nanotubes, nano-structured materials, nano-modified surfaces.

FOR CITATION: Levin Y.A., Nikitin A.A., Konotopov M.V., Ivanov L.A. The potential of nanotechnology: issues of heat supply and heating of buildings. *Nanotechnologies in Construction*. 2020, Vol. 12, no.2, pp. 89–93. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-2-89-93.

INTRODUCTION

In housing and communal services, the main consumers of thermal energy are building heating systems. Until the second half of the 17th century, local heating of buildings had used, i.e. thermal energy was used at the place of its receipt. An exception was Ancient Rome, where water heating systems using thermal waters and underground fire-air heating of palaces from a local source were used. The beginning of the centralization of heating systems can be dated to 1818, when the first steam high-pressure system was installed in England, the system heated greenhouses group at the most remote distance, i.e. 127 m. In 1830 there was the first system of steam heating for buildings with the use of exhaust steam of the steam engine, which is directly connected with the beginning of the formation of the second technological stage, the core of which was the steam engine. Centralization

of heat supply using steam from steam engines and transferring steam to a group of residential buildings for heating over long distances (1–2 km) began in 1878 in the USA, and subsequently in Germany and other European countries. In the first years of the XX century due to the formation of the third technological stage, that launched mass production of electric motors, the central water heating systems for buildings started developing.

MAIN PART

In pre-revolutionary Russia, individual attempts were made to use heating plants for heating residential and public buildings. However, in reality, only a few factory-plant heat power installations that used the exhaust steam of the industrial enterprises (for example, Tryokhgornaya manufactory in Moscow) were sparsely applied. Industrialization and housing have caused a continuous in-

crease in the thermal load. At the same time, there was a process of concentration of this load in large cities and industrial areas, which created the basis for the further development of district heating in the country and allowed the USSR and modern Russia to take first place in the world in the total length of heating networks and the capacity of heating plants.

At the same time, heat supply systems are characterized by a very pronounced conservatism in terms of the equipment used and the technologies used to supply thermal energy to consumers. This explains the fact that for more than 70 years, the main sources of district heating have been heat plants of combined production of heat and electric energy with an average radius of 10–20 km. Moreover, the range of thermal systems in modern large networks can reach 30–50 km or more – up to 100 km [4]. Despite the fact that heat transport over long distances reduces the efficiency of heat supply systems, leading to large heat losses on the way to the consumer, centralization is still the main «conservative» direction for improving heat supply: concentration and combination of heat production and electric energy (heating).

This is caused to a certain extent by the fact that district heating systems based on combined production, related to the so-called large energy, are associated with certain industry standards. The system of strict standards leads to a high degree of technological and organizational regulation of heat supply, which in turn limit the development of innovative schemes [7]. The limited boundaries of economically feasible heat transfer, especially at low loads, are the main obstacle to connecting buildings to centralized heat supply systems in isolated areas. Transport of heat over long distances reduces the efficiency of heat supply systems, resulting in greater heat loss on the way to the consumer. Therefore, along with maintaining the existing positions of large-scale energy, small distributed energy, including distributed generation systems, energy management control systems, etc., is beginning to develop at an increasingly intense rate throughout the world.

Small power focuses on decentralized (autonomous) heating mainly in those areas where the construction of thermal power plants by technical and economic indicators impractical due to lack of the necessary concentration of thermal and electric loadings. A significant area of decentralized heat supply with high energy prices from isolated small-generation sources operating on imported fuel makes the search for prospects for innovative heat supply options no less relevant than in large energy. The efficiency of using the heat of large and small energy with traditional technologies is in many cases insufficient. The big problem for district heating systems are the heat losses in the networks.

Increasing the thermal insulation quality is expensive, but still high losses are inevitable, because low

hydraulic stability of heat supply systems determine the overall over-expenditure of heat and coolant when one is underheated and other consumers are overheated. The measures taken to identify and eliminate the main heat losses in combination with the formation of norms and rules for energy consumption have exhausted the potential for increasing energy efficiency [1]. Therefore, the actual tasks of heating include the development and implementation of innovative technologies in heating systems to ensure maximum efficiency of these systems, high efficiency and reliability of their operation, as well as the normal indoor climate.

The use of nanofluids in heat supply systems as a heat carrier, which, according to the obtained experimental data, gives a significant increase in heat transfer [16], is aimed at increasing the efficiency of heat use.

The heat capacity of the nanofluid is described by the expression:

$$C_p = \lambda \alpha \times \rho, \quad (1)$$

where λ is the thermal conductivity of the nanofluid, W/(m • K);

α – thermal diffusivity, m²/s;

ρ is the density of the sample, kg/m³.

There are definite prospects for using nanofluids for improved heat exchangers and reduce heat loss [21]. The results of heat conduction analysis, concentration, size, mass and velocity of nanoparticles allows to assess the possibility of using nanofluids in heating systems as a coolant, to choose the most effective nanofluids by studying the dependence of heat transfer coefficient nanofluids of the Reynolds number and the heat transfer coefficient from bulk concentration [10]. This dependence shows an increase in the heat transfer coefficient with an increase in the Reynolds number. The degree of increase substantially depends on the concentration of nanoparticles and their speed, although a significant increase in the thermal conductivity of nanofluids is possible even at low particle concentrations.

For example, when 1%, 2%, and 3% of the volume of nanofluid is added to the coolant, the heat transfer coefficient increases by 100%, 200%, and 300%, respectively [16]. The dependence of thermal conductivity on the mass of nanoparticles is quadratic and can be represented as

$$\Delta\lambda \approx (rh/p)^2, \quad (2)$$

where rh is the density of the material of the nanoparticles.

The results show that nanofluids heat capacity is significantly higher than when water heating without the addition of nano-additives in the coolant. The most effective to improve the heat transfer the use of a heat nanofluids with carbon nanotubes because of their high

heat conduction systems (for comparison – eight times higher than that of copper by more than four orders of magnitude greater than the same amount for the base liquid, which can lead to significant changes in thermophysical properties of nanofluids and enhance heat transfer processes) [12].

Another promising direction for reducing heat losses in heating networks due to nano-structured materials is low-temperature fuel cells used by autonomous (decentralized) heat supply systems in mini-thermal power plants with a built-in heating part for single-apartment and multi-apartment residential buildings.

In the development of the production of low-temperature fuel cell technology can play an important role of nano-structured materials, including catalysts based on nanoparticles, they provide high efficiency, environmental friendliness and reliability [15]. In fuel cells, the chemical energy of the fuel (hydrogen, natural gas) is converted into electrical (30–50%) and thermal (up to 40–50%) energy.

Due to the high efficiency of fuel cells, the total efficiency of mini-thermal power plants on fuel cells using catalysts consisting of 1–5 nm metal nanoparticles in a carbon matrix can reach 80%. The most promising elements are nano-manganese, nano-alanate manganese, nano-titanium.

The use of nanotechnology in heat supply systems can meet the goals of maximizing heat transfer. Heat supply systems are an interconnected complex of heat consumers, differing both in character and in heat consumption. The modes of heat consumption by multiple subscribers are not the same. The thermal load of heating systems varies depending on the outdoor temperature, which requires artificial regulation. Analysis of global trends reduce heat losses in heating systems shows reduction in the maximum temperature supplied by the heat source in the network. The temperature difference between the heating and the heated side is reduced every decade by several degrees.

Regulation of the heat load leads to a change in parameters and energy consumption in accordance with the actual need. The essence of control methods follows from the heat balance equation [4]:

$$Q = Gc(t_1 - t_2)n/3600 = kF(t_1 - t_2)n, \quad (3)$$

where Q is the amount of heat received by the device from the energy source and given to the heated medium, kW/h;

G is the energy carrier consumption kg/h;

C is the heat capacity of the energy carrier kJ/kg;

k is the heat transfer coefficient;

F is the heating surface of the heat exchanger (a device that transfers heat from one heat source to another, excluding direct contact of the heat transfer media);

t_1, t_2 – heat carrier temperature at the inlet and outlet of the heat exchanger;

n is the time.

From the heat balance equation that the change of heat transfer coefficient is inversely proportional to consumption of energy. Studies show that the value of the heat transfer coefficient on modified heaters does not depend on the height of the resulting structures. Therefore, when using modified surfaces with different heights of nanostructures, an increase in the heat transfer coefficient and an increase in the critical heat flux are possible at the same time, which leads to savings in the flow of heat carrier as the main task of the qualitative and quantitative regulation of the heat supply system.

Changing the heating capacity of a heat exchanger is derived from the general equation and describes the regulation of the dependence of the form:

$$q = Q/v, \quad (4)$$

where q is thermal performance of the device at 1° of the maximum temperature difference between the heating and heated medium at the inlet e to the heat exchanger (v), kW/°C

An increase in the thermal performance of the heat exchanger is possible due to an increase in the heating surface or due to an increase in the heat transfer coefficient due to the intensification of heat transfer. However, an increase in heat production due to an increase in the heating surface inevitably entails an increase in the cost of the heat exchanger. That is why the issue of heat transfer intensification in heat exchangers to increase the heat transfer coefficient is relevant from an economic point of view. The solution to the problem of maximum heat transfer intensification can be obtained by creating arrays of regular micro- and nanostructures of various geometries [11]. The lithography method, which is the basis of micro- and nano-electromechanical systems (MEMS/NEMS technologies), is used for layer-by-layer formation of the topological pattern of micro- and nanostructures, which allows to obtain a structured surface of the heat exchanger, characterized by the term “sub-roughness”, i.e. micro-relief of the smallest surface relief elements involved in the formation of its roughness.

One should note that although the micromechanical system does not formally meet the range of nanotechnology, many features of micromechanics can be transferred to nano-sizes [8].

Calculations show that for the structured surface of the heat exchange apparatus due sub-roughness growth characteristic value of heat transfer coefficient as compared to a smooth surface without a substantial increase of the hydraulic resistance and increasing the size of the apparatus-analogue [11].

CONCLUSION

The main incentives for the development of nanotechnology in anticipation of a new technological structure is the ability to integrate various types of nanostructures and create nanodevices based on them [9]. Since the innovative potential of nanotechnology application contains all the primary sources of energy sources, mass technical

re-equipment in the field of heat supply and heating will be accompanied by multiplier effects [5], which determine the solution to the problem of increasing the efficiency of centralized and autonomous heat supply systems due to an increase in the heat transfer coefficient and the intensification of heat transfer due to the use graphene nano-coating, the creation of nanostructures, the use of nano – liquids [18, 20], micro/nano-modified surfaces [11].

REFERENCES

1. Activation of energy saving and energy efficiency improvement in the conditions of innovative modernization of the Russian economy (2017). Editor: A.N. Melnik. Kazan: Kazan university Publ., 268 p. (In Russian).
2. Ametistov E.V., Dmitriev A.S. (2008) Nanoenergy-potential opportunities and prospects. *Energoekspert*. No. 2. P. 86. (In Russian).
3. Dmitriev A.S. (2014) Methods for converting low-potential heat based. Proceedings of the Sixth Russian national conference on heat exchange. P. 1–2. (In Russian).
4. Kozin V.E., Levina T.A., Markov A.P., et al. (1980) Heat supply: textbook. Moscow: Higher school. 407p. (In Russian).
5. Krichevskij G.E. (2015) Nanotechnology in modern energy and in the energy of the future. Available at: <http://www.nanone-wsnet.ru/articles/nanotekhnologii-v-sovremennoi-energetike-v-energetike-budushchego> (In Russian).
6. Kuzma-Kichta Yu.A., Lavrikov A.V., Shustov M.V., et al. (2014). Investigation of heat transfer intensification on a surface wit micro-and nanorelief. *Heat power engineering*. Vol. 61. № 3. P. 35. (In Russian).
7. Levin Y. A., Pavlov A.O. (2017) Innovative and technological development: theoretical basis and applied aspects: monograph. *Ruscience Publ.* 148 p. (In Russian).
8. Lukashin A.V., Eliseev A.A. (2007). Applications of functional nanomaterials Part 1: MEMS, NEMS, nanoelectronics. Moscow: Moscow state University n.a. M.V. Lomonosov. 45 p. (In Russian).
9. Nanotechnology as a key factor of the new technological order in the economy (2009). Editors: S.Y. Glazev & V.V. Haritonov. Moscow, Trovant Publ., 304 p. (In Russian).
10. Rudyak V.Y, Minakov A.V, Pryazhnikov M.I. Thermophysical properties of nanofluids and similarity criteria (2016). *Letters to the Journal of technical*. Vol. 42. № 24, P. 9–16. (In Russian).
11. Surtaev A.S., Serdyukov V.S., Pavlenko A.N. (2017). Nanotechnology in thermal physics: heat transfer. *Russian nanotechnologies*. Vol. 11. № 11–12. P. 18. (In Russian).
12. Terekhov V.I., Kalinina, S.V., Lemanov V.V. (2010) Mechanism of heat transfer in nanofluids: current state of the problem (review) part 2. Convective heat transfer. *Thermophysics and Aeromechanics*. Vol. 17. 2. P. 173–188. (In Russian).
13. Trubicyna G.N., Frolikova V.S., Barzenkova V.V. (2016) Intensification of heat and mass transfer processes in TGV systems due to the use of nanofluids. *Actual problems of modern science, technology and education*. Vol. 2. P. 78–81. (In Russian).
14. Physical basis and industrial application of heat transfer intensification: monograph (2009) Popov I.A., Mahyanov H.M., Gureev V.M. Kazan: Center for innovative technologies. 560 p. (In Russian).
15. Yaroslavcev A.B., Dobrovolskiy Y.A., Shaglaeva N.S., et al. (2012) Nanostructured materials for low- temperature fuel cells. *Advances in chemistry*. Vol. 81. № 3, P. 191–220. (In Russian).
16. Attinger D., et al. (2014). Surface engineering for phase change heat transfer: A review. *MRS Energy & Sustainability*. Vol. 1. P. 4. DOI 10/1557/mre2014.9.
17. Girfanova V.V., Gevorgyan A.G., Velkin V.I. (2018) The analysis of possibility in nanofluid application as the heat carrier for increase in efficiency of heat supply systems. *International Journal of Professional Science*. № 3. P. 35–38.
18. Kim S., et al. (2010). Effects of nano-fluid and surfaces with nano structure on the increase of CHF. *Experimental Thermal and Fluid Science*. V. 34. № 4. P. 487.
19. Kosacki I., Rouleau C.M., Becher P.F., et al (2005) Nanoscale effects on the ionic conductivity in highly textured YSZ thin films. *Solid State Ionics*. Vol. 176. № 13–14. P. 1319–1326.
20. Prakash S., Yeom J. (2014) *Nanofluidics and Microfluidics: Systems and Applications*. William Andrew Publishing, Norwich, N.Y., 312 p. DOI: 10.1016/B978-1-4377-4469-9.00001-9.

21. Wang X.Q., Mujumdar A.S. (2007) Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. International J. of Thermal Sciences. V. 46. № 1. P. 1.
22. Eastman J. A., et al. (1998) Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. Materials Research Society. Boston, Fall Meeting. P. 3–11.
23. Wang Xu.X., Choi S.U. (1999) Thermal conductivity of nanoparticle fluid mixture. Thermophys. Heat Trans. Vol. 13. № 4. P. 474.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuriy A. Levin, Doctor of Economics, Professor, Moscow State Institute of International Relations (MGIMO-University); Vernadskogo, block 76, Moscow, Russia, 119454, e-mail: levin25@mail.ru

Alexander A. Nikitin, PhD in Engineering, Doctor of Economics, Professor, Director general, Moscow factory Paris commune; Shluzovaya nab, block 6, Moscow, Russia, 115114, e-mail: pariskom@sovintel.ru

Michael V. Konotopov, Doctor of Economics, Professor, Academician Secretary of the section of New Technological Modes of the Russian Academy of Engineering; Gazetny per., block 9, bld.4, Moscow, Russia, 125009, e-mail: mishaperedelkino@gmail.com

Leonid A. Ivanov, Cand. Sci. (Eng.), Vice President of the Russian Academy of Engineering, Member of the International Journalist Federation; Gazetny per., block 9, bld.4, Moscow, Russia, 125009, e-mail: L.a.ivanov@mail.ru

Received: 02.03.2020.

Revised: 30.03.2020.

Accepted: 03.04.2020.



Потенциал нанотехнологий: вопросы теплоснабжения и отопления зданий

Ю.А. Левин¹ , А.А. Никитин² , М.В. Конотопов^{3*} , Л.А. Иванов⁴ 

¹ Московский государственный институт международных отношений (МГИМО-Университет), г. Москва, Россия;

² Московская фабрика Парижская коммуна, г. Москва, Россия;

³ Российская инженерная академия, г. Москва, Россия;

⁴ Российская инженерная академия, г. Москва, Россия

* **Контакты:** mishaperedelkino@gmail.com

© Коллектив авторов, 2020

РЕЗЮМЕ: В статье исследуются возможности применения нанотехнологий для повышения эффективности систем централизованного и автономного теплоснабжения в условиях перехода к новому технологическому укладу. Дается логическая последовательность развития теплоснабжения и отопления, указывается на консервативность в части используемого оборудования и применяемых технологий при поставке потребителям тепловой энергии. В контексте актуальных задач теплоснабжения и отопления зданий рассматриваются концептуальные основы применения нанотехнологий, отвечающих целям максимальной интенсификации теплообмена. На основе анализа теплопроводности, концентрации, размера, массы и скорости наночастиц дается оценка возможности применения наножидкостей в качестве теплоносителя для совершенствования теплообменных аппаратов и снижения теплопотерь в системах теплоснабжения, обеспечения максимальной экономичности их работы. Показано, что применение наноструктур влияет на экономию расхода теплоносителя как основной задачи качественно-количественного регулирования системы теплоснабжения. Уделено внимание вопросам применения наноструктурированных материалов в низкотемпературных топливных элементах, применяемых системами децентрализованного теплоснабжения для отопления жилых домов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теплофикационные установки, теплоемкость, коэффициент теплопередачи, наножидкости, теплообменный аппарат, углеродные нанотрубки, наноструктурированные материалы, наномодифицированные поверхности.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Левин Ю.А., Никитин А.А., Конотопов М.В., Иванов Л.А., Потенциал нанотехнологий: вопросы теплоснабжения и отопления зданий // Нанотехнологии в строительстве. – 2020. – Том 12, № 2. – С. 89–93. – DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-2-89-93.

ВВЕДЕНИЕ

В жилищно-коммунальном хозяйстве основными потребителями тепловой энергии являются системы отопления зданий. До второй половины XVII века применялось местное отопление зданий, т.е. тепловая энергия использовалась на месте ее получения. Исключение составлял Древний Рим, где применялись водяные системы отопления с использованием термальных вод и подпольное огневоздушное отопление дворцов от локального источника. Началом централизации систем теплоснабжения можно считать 1818 год, когда в Англии была смонтирована первая паровая система высокого давления, отапливающая группу оранжерей с расстоянием наиболее удален-

ным, то есть 127 м. В 1830 г. появилась первая система парового отопления зданий с использованием выхлопного пара паровой машины, что непосредственно связано с началом становления второго технологического уклада, ядром которого стал паровой двигатель.

Централизация теплоснабжения с использованием пара паровых машин и передач пара группе жилых домов для отопления на значительные расстояния (в пределах 1–2 км) началась в 1878 г. в США, а впоследствии в Германии и других европейских странах. В первые годы XX века в связи с формированием третьего технологического уклада, положившим начало серийного производства электродвигателей получает развитие центральное водяное теплоснабжение для отопления зданий.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В дореволюционной России предпринимались отдельные попытки использовать теплофикационные установки для отопления жилых и общественных зданий. Однако в реальности некоторое распространение получили только немногочисленные фабрично-заводские теплосиловые установки, использовавшие отработавший пар промышленных предприятий (например, Трехгорная мануфактура в Москве). Индустриализация и жилищное строительство вызвали непрерывный рост тепловой нагрузки. Одновременно шел процесс концентрации этой нагрузки в крупных городах и промышленных районах, что создало базу для дальнейшего развития централизованного теплоснабжения в стране и позволило СССР и современной России занять первое место в мире по общей протяженности тепловых сетей и мощности теплофикационных установок.

Вместе с тем для систем теплоснабжения характерна весьма выраженная консервативность в части используемого оборудования и применяемых технологий при поставке потребителям тепловой энергии. Этим объясняется тот факт, что на протяжении более чем 70 лет основными источниками централизованного теплоснабжения являются тепловые станции комбинированного производства тепловой и электрической энергии (ТЭЦ) со средним радиусом действия 10–20 км. При этом дальность действия тепловых систем в современных крупных сетях может достигать 30–50 км и более – до 100 км [4].

Несмотря на то, что транспорт тепла на большие расстояния понижает экономичность работы систем теплоснабжения, приводя к большим тепловым потерям на пути к потребителю, основным «консервативным» направлением совершенствования теплоснабжения по-прежнему является централизация: концентрация и комбинирование производства теплоты и электрической энергии (теплофикация). Это вызвано в определенной мере тем, что системы централизованного теплоснабжения на базе комбинированного производства, относящиеся к так называемой большой энергетике, связаны с определенными промышленными стандартами. Система жестких стандартов приводит к высокой степени технологической и организационной зарегулированности теплоснабжения, которые, в свою очередь, ограничивают развитие инновационных схем [7].

Ограниченность границ экономически обоснованной передачи теплоэнергии, особенно при малых нагрузках, является основным препятствием для подключения зданий к централизованным системам теплоснабжения на изолированных территориях. Транспорт тепла на большие расстояния понижает экономичность работы систем теплоснабжения, при-

водя к большим тепловым потерям на пути к потребителю. Поэтому наряду с сохранением сложившихся позиций большой энергетике все более интенсивными темпами во всем мире начинает развиваться малая распределенная энергетика, включающая в себя системы распределенной генерации, системы управления потреблением энергии и др.

Малая энергетика ориентирует на децентрализованное (автономное) теплоснабжение преимущественно в тех районах, где сооружение ТЭЦ по технико-экономическим показателям нецелесообразно ввиду отсутствия необходимой концентрации тепловой и электрической нагрузок. Значительная площадь территории децентрализованного теплоснабжения с высокими ценами на энергию от изолированных источников малой генерации, работающих на привозном топливе, делает актуальным, как и в сфере большой энергетике, поиск перспектив для инновационных вариантов теплоснабжения.

Эффективность использования теплоты большой и малой энергетике при традиционных технологиях во многих случаях недостаточна. Большой проблемой для систем централизованного теплоснабжения являются тепловые потери в сетях. Повышение качества тепловой изоляции обходится дорого, но при этом высокие потери все равно неизбежны, т.к. низкая гидравлическая устойчивость систем теплоснабжения обуславливают общий перерасход теплоты и теплоносителя при недогреве одних и перегреве других потребителей. Реализуемые мероприятия, направленные на выявление и устранение основных тепловых потерь в сочетании с формированием норм и правил энергопотребления, исчерпали потенциал повышения энергетической эффективности [1]. Поэтому к актуальным задачам теплоснабжения относится разработка и внедрение в системах отопления инновационных технологий, обеспечивающих максимальную экономичность работы этих систем, высокую эффективность и надежность их эксплуатации, а также нормальный микроклимат в помещениях.

На повышение эффективности использования теплоты направлено применение наножидкостей в системах теплоснабжения в качестве теплоносителя, дающих, по полученным экспериментальным данным, существенное повышение теплоотдачи [16]. Теплоемкость наножидкости описывается выражением:

$$C_p = \lambda \alpha \times \rho, \quad (1)$$

где λ – теплопроводность наножидкости, Вт/(м · К);

α – температуропроводность, м²/с;

ρ – плотность образца, кг/м³.

Имеются определенные перспективы применения наножидкостей для совершенствования теплообменных аппаратов и снижения теплопотерь [21]. Результаты анализа теплопроводности, концентрации, размера, массы и скорости наночастиц позволяют дать оценку возможности применения наножидкостей в системах теплоснабжения в качестве теплоносителя, выбрать наиболее эффективные наножидкости путем изучения зависимости коэффициента теплоотдачи наножидкости от числа Рейнольдса и коэффициента теплоотдачи от объемной концентрации [10]. Такая зависимость показывает увеличение коэффициента теплоотдачи при увеличении числа Рейнольдса. При этом степень увеличения существенно зависит от концентрации наночастиц и их скорости, хотя значительное возрастание теплопроводности наножидкостей возможно даже при небольших концентрациях частиц. Например, при добавлении в теплоноситель 1%, 2% и 3% объема наножидкости коэффициент теплоотдачи увеличивается соответственно на 100, 200 и 300% [16]. Зависимость теплопроводности от массы наночастиц является квадратичной и может быть представлена в виде

$$\Delta\lambda \approx (\rho\chi/\rho)^2, \quad (2)$$

где $\rho\chi$ — плотность материала наночастиц.

Полученные результаты показывают, что теплоемкость наножидкости существенно выше, чем при водяном отоплении без добавления нанодобавок в теплоноситель. Наиболее эффективно для повышения теплоотдачи использование в системах теплоснабжения наножидкостей с углеродными нанотрубками в силу их высокой теплопроводности (для сравнения — в восемь раз выше, чем у меди, и более чем на четыре порядка превышает аналогичную величину для базовой жидкости, что может привести к значительным изменениям теплофизических свойств наножидкостей и усилению теплообменных процессов) [12].

Другим перспективным направлением снижения теплопотерь в тепловых сетях за счет наноструктурированных материалов являются низкотемпературные топливные элементы, применяемые системами автономного (децентрализованного) теплоснабжения в установках мини-ТЭЦ с встроенной отопительной частью для многоквартирных и многоквартирных жилых домов.

В развитии технологии производства низкотемпературных топливных элементов важную роль способны сыграть наноструктурированные материалы, в т.ч. катализаторы на основе наночастиц, они обеспечивают высокую эффективность, экологичность и надежность [15]. В топливных элементах хими-

ческая энергия топлива (водород, природный газ) преобразуется в электрическую (30–50%) и тепловую (до 40–50%) энергию. Благодаря высокой эффективности топливных элементов суммарный КПД мини-ТЭЦ на топливных элементах с использованием катализаторов, состоящих из металлических наночастиц размером 1–5 нм в углеродной матрице, может достигать 80%. Наиболее перспективные элементы — наномарганец, наноаланат марганца, нанотитан.

Применение нанотехнологий в системах теплоснабжения способно отвечать целям максимальной интенсификации теплообмена. Системы теплоснабжения представляют собой взаимосвязанный комплекс потребителей тепла, отличающихся между собой как характером, так и величиной теплопотребления. Режимы расходов тепла многочисленными абонентами неодинаковы. Тепловая нагрузка отопительных установок изменяется в зависимости от температуры наружного воздуха, что требует искусственного регулирования. Анализ общемировых тенденций снижения теплопотерь в системах теплоснабжения показывает снижение максимальной температуры, подаваемой от источника в тепловые сети. Разность температур между греющей и нагреваемой стороной сокращается каждое десятилетие на несколько градусов. Регулирование тепловой нагрузки приводит к изменению параметров и расходов энергоносителей в соответствии с фактической потребностью. Сущность методов регулирования вытекает из уравнения теплового баланса [4]

$$Q = Gc(t_1 - t_2)n/3600 = kF(t_1 - t_2)n, \quad (3)$$

где Q — количество теплоты, полученное прибором от энергоносителя и отданное нагреваемой среде, кВт/ч;

G — расход энергоносителя кг/ч;

c — теплоемкость энергоносителя кДж/кг;

K — коэффициент теплопередачи;

F — поверхность нагрева теплообменного аппарата (устройства, передающего теплоэнергию от одного источника теплоты другому, исключая при этом непосредственный контакт теплоносителей);

t_1, t_2 — температура теплоносителя на входе и выходе из теплообменника;

n — время.

Из уравнения теплового баланса следует, что изменение коэффициента теплопередачи (КТП) обратно пропорционально расходу энергоносителя. Как показывают исследования, величина коэффициента теплопередачи на модифицированных нагревателях не зависит от высоты получаемых структур. Поэтому при использовании модифицированных поверхностей с различной высотой наноструктур одновремен-

но возможен рост КТП и увеличение критического теплового потока, что приводит к экономии расхода теплоносителя как основной задачи качественно-количественного регулирования системы теплоснабжения.

Характеристика теплообменного аппарата выводится из общего уравнения регулирования и описывается зависимостью вида:

$$q = Q/v, \quad (4)$$

где q – тепловая производительность аппарата на 1° максимальной разности температур греющей и нагреваемой среды на входе в теплообменник (v), кВт/ $^\circ\text{C}$.

Повышение тепловой производительности теплообменного аппарата возможно за счет увеличения поверхности нагрева или за счет роста КТП вследствие интенсификации теплообмена. Однако повышение теплопроизводительности за счет увеличения поверхности нагрева неизбежно влечет за собой удорожание теплообменного аппарата. Именно поэтому вопрос интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах для увеличения КТП является актуальным с экономической точки зрения.

Решение задачи максимальной интенсификации теплообмена может быть получено за счет создания массивов регулярных микро- и наноструктур различной геометрии [11]. Метод литографии, лежащий в основе микро- и нанoeлектромеханических систем (МЭМС/НЭМС-технологий), используется для послойного формирования топологического рисунка микро- и наноструктур, что позволяет получить структурированную поверхность теплообменного аппарата, характеризующуюся термином «субшероховатость» (от англ. «subroughness»),

т.е. микрорельефом мельчайших элементов рельефа поверхности, участвующих в формировании ее шероховатости.

Заметим, что хотя микромеханические системы формально не отвечают диапазону нанотехнологий, многие особенности микромеханики могут быть перенесены в нанодиапазон [8].

Расчеты показывают, что для структурированной поверхности теплообменного аппарата за счет субшероховатости характерен рост величины КТП по сравнению с гладкой поверхностью без существенного роста гидравлического сопротивления и увеличения размеров аппарата-аналога [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку системы теплоснабжения и отопления жилых и промышленных зданий являются наиболее значительным по расходу первичных топливно-энергетических ресурсов сегментом в энергообеспечении на территории всей России, то мультипликативные эффекты решения задач их массового технического перевооружения в формате страны выходят за пределы отраслевых задач по повышению эффективности выработки тепла [11]. Инновационный потенциал применения нанотехнологий содержит все первичные источники получения теплоносителей [6]. Становление нового технологического уклада, развитие одного из его ключевых факторов – нанотехнологий – обуславливают решение задачи повышения эффективности систем централизованного и автономного теплоснабжения за счет роста КТП и интенсификации теплообмена вследствие использования графенового нанопокрывтия, создания наноструктур, применения наножидкостей [19,21], микро/наномодифицированных поверхностей [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Активизация энергосбережения и повышения энергоэффективности в условиях инновационной модернизации российской экономики / под ред. А.Н. Мельника. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2017. – 268 с
2. Аметистов Е.В., Дмитриев А.С. Наноэнергетика – потенциальные возможности и перспективы // Энергоэксперт. – 2008. – № 2. – С. 86.
3. Дмитриев А.С. Методы преобразования низкопотенциального тепла на базе нанотехнологий // Труды Шестой Российской национальной конференции по теплообмену. – 2014. – С. 1–2.
4. Козин В.Е., Левина Т.А., Марков А.П. и др. Теплоснабжение: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1980. – 407 с.
5. Кричевский Г.Е. Нанотехнологии в современной энергетике и в энергетике будущего. – <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2015/nanotekhnologii-v-sovremennoi-energetike-v-energetike-budushchego>.
6. Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В., Шустов М.В. и др. Исследование интенсификации теплообмена на поверхности с микро- и нанорельефом // Теплоэнергетика. – 2014. – Т. 61, № 3. – С. 35.
7. Левин Ю.А., Павлов А.О. Инновационно-технологическое развитие: теоретический базис и прикладные аспекты: монография. – М.: Русайнс, 2017. – 148 с.

8. Лукашин А.В., Елисеев А.А. Применение функциональных наноматериалов. Часть 1: МЭМС, НЭМС, наноэлектроника. – Москва: МГУ им. М.В. Ломоносова. – 2007. – 45 с.
9. Нанотехнологии как ключевой фактор нового технологического уклада в экономике / Под ред. С.Ю. Глазьева и В.В. Харитонова. – М.: Тривант, 2009. – 304 с.
10. Рудяк В.Я., Минаков А.В., Пряжников М.И. Теплофизические свойства наножидкостей и критерии подобия // Письма в Журнал технической физики. – 2016. – Т. 42, № 24. – С. 9–16.
11. Суртаев А.С., Сердюков В.С., Павленко А.Н. Нанотехнологии в теплофизике: теплообмен // Российские нанотехнологии. – 2017. – Т. 11, № 11–12. – С. 18.
12. Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 2. Конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17, № 2. – С. 173–188.
13. Трубицына Г.Н., Фроликова В.С., Барзенкова В.В. Интенсификация тепломассообменных процессов в системах ТГВ за счет использования наножидкостей // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2016. – Т. 2. – С. 78–81.
14. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: монография / Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М.; под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 560 с.
15. Ярославцев А.Б., Добровольский Ю.А., Шаглаева Н.С. и др. Наноструктурированные материалы для низкотемпературных топливных элементов // Успехи химии. – 2012. – Т. 81, № 3. – С. 191–220.
16. Attinger D., et al. Surface engineering for phase change heat transfer: A review // MRS Energy & Sustainability. 2014. V. 1. P. E4.
17. Girfanova V.V., Gevorgyan A.G., Velkin V.I. The analysis of possibility in nanofluid application as the heat carrier for increase in efficiency of heat supply systems // International Journal of Professional Science. 2018. № 3. С. 35–38.
18. Kim S., et al. Effects of nano-fluid and surfaces with nano structure on the increase of CHF // Experimental Thermal and Fluid Science. 2010. V. 34. № 4. P. 487.
19. Kosacki, I., Rouleau, C.M., Becher P.F., Bentley J., & Lowndes D.H. Nanoscale effects on the ionic conductivity in highly textured YSZ thin films // Solid State. Ionics, 2005. vol. 176, no. 13–14, pp. 1319–1326.
20. Prakash S., Yeom J. Nanofluidics and Microfluidics: Systems and Applications. William Andrew Publ., N.Y., Norwich, 2014. 312 p.
21. Wang X.Q., Mujumdar A.S. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review // International J. of Thermal Sciences. 2007. V. 46. № 1. P. 1.
22. Eastman J.A., et al. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids // Materials Research Society. Boston: Fall Meeting, 1998. P. 3–11.
23. Wang X., Xu X., Choi S.U.S. Thermal conductivity of nanoparticle fluid mixture // Thermophys. Heat Trans. 1999. Vol. 13. № 4. P. 474–480.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Левин Юрий Анатольевич, д-р экон. наук, профессор, Московский государственный институт международных отношений (МГИМО-Университет), пр. Вернадского, д.76, г. Москва, Россия, 119454 e-mail: levin25@mail.ru

Никитин Александр Александрович, канд. техн. наук, д-р экон. наук, профессор, ген. директор Московской фабрики Парижская коммуна, ул. Шлюзовая, д. 6, г. Москва, Россия, 115114, e-mail: pariskom@sovintel.ru

Конотопов Михаил Васильевич, д-р экон. наук, профессор, академик-секретарь Секции новых технологических укладов Российской инженерной академии, засл. деятель науки; Газетный пер., д. 9, стр. 4, г. Москва, Россия, 125009, e-mail: mishaperedelkino@gmail.com

Иванов Леонид Алексеевич, канд. техн. наук, вице-президент Российской инженерной академии, член Международной федерации журналистов; Газетный пер., д. 9, стр. 4, г. Москва, Россия, 125009, e-mail: L.a.ivanov@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 02.03.2020.

Статья поступила в редакцию после рецензирования: 30.03.2020.

Статья принята к публикации: 03.04.2020.