

УДК 658.264

А. Н. Асаул

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, e-mail: asaul@yandex.ru

Ю. А. Левин

Московский государственный институт международных отношений (университет),
Москва, e-mail: levin25@mail.ru

М. А. Асаул

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,
Санкт-Петербург, e-mail: asaul-m-a@mail.ru

О. Г. Ступакова

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, e-mail: olgan_70@mail.ru

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ЗА СЧЁТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОРАЗМЕРНЫМИ ПЕРВИЧНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Ключевые слова: энергоэффективность зданий, экономия топлива, теплоотдача, температурная эффективность, оптимизация.

Требования энергоэффективности объектов недвижимости определяют вектор развития энергетических систем и оборудования. Однако сфера теплоснабжения и отопления жилых, общественных и промышленных зданий характеризуется недостаточным масштабом внедрения ключевых энергоэффективных технологий, хотя теоретически вариантов проведения мероприятий энергосбережения и повышения эффективности теплопереноса существует достаточно много и на практике вопросы теплопереноса при реализации мероприятий энергосбережения и повышения эффективности теплоснабжения зданий всегда рассматриваются в контексте инженерно-технического обеспечения объектов недвижимости. В работе раскрывается один из вариантов технико-экономической оптимизации за счет применения нанотехнологий, способствующих повышению энергоэффективности зданий, качества теплоснабжения, оптимизации гидравлического режима тепловых сетей и интенсификации теплоотдачи в теплообменных аппаратах. Приведены основные характеристики методов регулирования тепловой нагрузки, при этом выбор наночастиц, определение их теплопроводности, концентрации и распределения по размерам являются важными условиями для снижения затрат и уменьшения теплопотерь при решении вопросов регулирования систем теплоснабжения. Показано, что применение теплоносителя, модифицированного наноразмерными первичными материалами может способствовать решению проблемы экономии топлива от теплофикации, повышению качества теплоснабжения, сокращению расхода тепловой энергии и топлива за счет существенного увеличения теплоотдачи, но только при невысоком содержании наночастиц в горячей воде как теплоносителя.

A. N. Asaul

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg,
e-mail: asaul@yandex.ru

Yu. A. Levin

Moscow state Institute of international relations (University), Moscow, e-mail: levin25@mail.ru

M. A. Asaul

Admiral Makarov State Maritime Academy, St. Petersburg, e-mail: asaul-m-a@mail.ru

O. G. Stupakova

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg,
e-mail: olgan_70@mail.ru

ON THE ISSUE OF OPTIMIZING THE OPERATION OF HEAT SUPPLY SYSTEMS THROUGH THE USE OF A HEAT CARRIER MODIFIED WITH NANOSCALE PRIMARY MATERIALS

Keywords: energy efficiency of buildings, fuel economy, heat transfer, temperature efficiency, optimization.

Energy efficiency requirements of real estate objects determine the vector of development of energy systems and equipment. However, the sphere of heat supply and heating of residential, public and industrial buildings is characterized by an insufficient scale of implementation of key energy-efficient technologies, although theoretically there are quite a lot of options for carrying out energy-saving measures and increasing the efficiency of heat transfer, and in practice heat transfer issues in the implementation of energy-saving measures and improving the efficiency of heat supply of buildings are always considered in the context of engineering and technical support of real estate objects. The paper reveals one of the options for technical and economic optimization through the use of nanotechnologies that contribute to improving the energy efficiency of buildings, the quality of heat supply, optimization of the hydraulic regime of heating networks and intensification of heat transfer in heat exchangers. The main characteristics of methods for regulating the heat load are given, while the choice of nanoparticles, determination of their thermal conductivity, concentration and size distribution are important conditions for reducing costs and reducing heat loss when solving issues of regulating heat supply systems. It is shown that the use of a heat carrier modified with nanoscale primary materials can contribute to solving the problem of fuel economy from heating, improving the quality of heat supply, reducing the consumption of thermal energy and fuel due to a significant increase in heat transfer, but only with a low content of nanoparticles in hot water as a heat carrier.

Введение

Энергосбережение является одной из задач XXI века. Мировая энергетическая конференция (МИРЭК) сформулировала проблему энергосбережения как дефицит знаний у специалистов о тепловом поведении зданий и чрезвычайно слабое использование достижений науки и техники в системах теплоснабжения и климатизации зданий [1]. Именно об этом говорится в работах представителей научной школы «Методологические проблемы эффективности региональных ИСК как самоорганизующейся и самоуправяемой системы» [2-6]. Ключевым направлением стало развитие «зеленых» технологий [7-8] и возобновляемых источников [9-10]. Стратегия опережающего развития страны [11] предусматривает формирование инновационных экосистем [12], создающих возможности формирования экономических эффектов [13], с учётом рисков, возникающих при реализации инновационных решений [14], в том числе и в секторе энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

Многочисленные исследования, проводимые за последние десятилетия, дают высокие оценки показателям теплопереноса в наноматериалах и возможностям их применения в различных видах экономической деятельности, в том числе и в строительстве. Наножидкости, как показали исследования [15-17], меняют свои теплофизические характеристики в сравнении с исходной жидкостью (увеличение теплопроводности, рост коэффициента теплоотдачи при конвективном теплопереносе, рост критического теплового потока) [18-19]. Хотя исследования теплообмена между наноконпонентами с окружающей средой, выполненные различными авторами, свидетельствуют об увели-

чении теплопроводности при сопоставлении с основной жидкостью [20-22], однако по-прежнему нет однозначного определения требуемого количества добавления наночастиц в основную жидкость, способствующую росту теплопроводности и теплоотдачи.

Вместе с тем, основываясь на подтвержденном факте повышения теплопроводности и конвективного теплообмена в наножидкостях по сравнению с базовыми теплоносителями, ограничиваясь при этом невысоким содержанием наноразмерных частиц в горячей воде как теплоносителя системы, можно полагать что системы отопления и теплоснабжения представляются перспективными потребителями наноматериалов и нанотехнологий. В ранее опубликованном труде одним из авторов настоящей статьи раскрыт ряд вопросов по применению нанотехнологий для теплоснабжения и отопления зданий [23] и, продолжая эту тему, авторы ставят целью настоящего исследования раскрыть возможности наноматериалов и нанотехнологий в контексте повышения энергоэффективности зданий за счет регулирования тепловой нагрузки, оптимизации гидравлического режима тепловых сетей и повышения качества теплоснабжения.

Материалы и методы исследования

В статье использовались следующие методы и приемы научного исследования: теоретические методы познания, системный подход для теоретического представления систем теплоснабжения и отопления как многофакторных систем; анализ и синтез как методы обобщения результатов; сравнение и измерение, метод индукции для обобщения результатов применения теплоносителя, модифицированного наноразмерными первичными материалами.

Результаты исследования и их обсуждение

Повышенные показатели теплопереноса наножидкостей, являющихся суспензиями наночастиц, можно учитывать при определении тепловой нагрузки отопительных установок, меняющейся в зависимости от температуры наружного воздуха, что предполагает изменение параметров и расхода теплоносителя в соответствии с потребностью тепла [24]. Повышение теплоёмкости жидкости, содержащей наноразмерные частицы, является достаточно известным явлением и в физической химии описывается как температура раствора (в частности, при наличии растворённых солей); с этим фактом связаны законы Рауля.

Наночастицы, как добавка к теплоносителю в системах отопления, обеспечивая рост теплоотдачи, повышают качество теплоснабжения, сокращают расход тепловой энергии и топлива. Теплоёмкость наножидкости превышает теплоёмкость теплоносителя для систем отопления в виде просто чистой воды, причем зависимость роста увеличивается при использовании нано-жидкости с углеродными нанотрубками.

В начале 80-х годов прошлого столетия при рассмотрении особенностей вклада различных энергоносителей в механизмы переноса тепла, в качестве перспективного варианта энергообеспечения низкотемпературных процессов в быту и промышленности, к которым по температурным параметрам относится отопление зданий, одним из авторов предлагаемой публикации давалась оценка электроэнергии как альтернативному энергоносителю [25]. Сейчас, при оценке возможностей электрических отопительных приборов следует признать, что применение электрических отопительных приборов, по разным причинам не обеспечивает благоприятные условия во всем отапливаемом помещении. При воздушном отоплении достигнув оптимальное соотношение тепловых конвекционных потоков и радиационного типа теплопередачи добавляя наночастицы как своеобразные «теплые молекулы» воздуха, создаются соответствующие климатические условия во всем отапливаемом помещении.

Применение наночастиц в отоплении корректирует задачи и меняет виды регулирования систем тепловой нагрузки абонентов, которая неоднородна не только по характеру теплотребления, но и по параметрам теплоносителя [26]. В традиционных

системах теплоснабжения центральное регулирование отпуска тепла дополнялось групповым, местным и индивидуальным, т.е. для синхронизации отпуска тепла и фактического теплотребления осуществляется комбинированное регулирование тепла, состоящее из нескольких ступеней, взаимно дополняющих друг друга.

Сущность многообразных методов регулирования раскрывает уравнение теплового баланса, описанного в работе [27].

К методам интенсификации теплообмена относится покрытие поверхности теплообмена слоем наночастиц. Данные, полученные экспериментально [28] свидетельствуют, что на теплопроводность наножидкостей преимущественно влияют три характеристики наночастиц: их концентрация, масса и распределение по размерам. При этом наиболее значительно влияет распределение по массе. Так как гидравлический режим зависит от расхода теплоносителя и давления в различных точках системы отопления в конкретный момент времени, то, соответственно, и теплоотдача может существенно отличаться в зависимости от выбранного гидравлического режима. Как утверждает в работе [27] «Расчеты гидравлического режима, производимые для отопительного и летнего периода времени, для открытых и закрытых систем теплоснабжения дают возможность определить перераспределение расходов и давлений в тепловой сети, и далее, основываясь на их значениях, установить пределы изменения нагрузки и характеристики нанодобавок».

Расчет гидравлического режима базируется на классических уравнениях гидродинамики. В тепловых сетях имеет место, как правило, квадратичная зависимость падения давления ΔP (Па) от расхода:

$$\Delta P = SV^2, \quad (1)$$

где S – характеристика сопротивления, представляющая собой падение давления при единице расхода теплоносителя, Па $(\text{м}^3/\text{ч})^2$;
 v – расход теплоносителя $\text{м}^3/\text{ч}$.

Гидравлический расчет производится по методу средних удельных потерь давления, согласно которому

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{\text{л}} + \Delta P_{\text{м}} = \Delta P_{\text{л}} (1 + (\Delta P_{\text{л}} / \Delta P_{\text{м}})) = \\ &= P_{\text{л}} (1 + \alpha) = P_{\text{л}} (l + l_{\text{э}}), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta P_{\text{л}}$ – гидравлические сопротивления по длине трубопровода, Па;

ΔP_m – местные гидравлические сопротивления, Па;

α – коэффициент, учитывающий долю потерь давления в местных сопротивлениях от сопротивлений по длине;

l – длина прямолинейного трубопровода, м;

$l_{\text{э}}$ – эквивалентная длина местных сопротивлений, м; $l_{\text{э}}$ является справочной величиной, зависящей от диаметра трубопровода и вида местного сопротивления;

R_d – удельное падение давления по длине, Па/м.

$$R_d = (\lambda / d) \cdot (\rho w^2 / 2) = 6,27 \cdot 10^{-\alpha} \cdot (\lambda / d) \cdot (G^2 / \rho), \quad (3)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения, зависящий от числа Рейнольдса и шероховатости трубопровода;

d – внутренний диаметр трубопровода;

ρ – плотность теплоносителя кг/м³;

w – скорость движения теплоносителя м/с.

Значение характеристики сопротивления находится из совместного решения уравнений (1, 2, 3):

$$S = \Delta P / V^2 = \frac{R_d (l + l_{\text{э}})}{V^2} = A_s \frac{(l + l_{\text{э}})}{d^{5,25}} \rho, \quad (4)$$

где A_s – постоянный коэффициент, являющийся справочной величиной, возрастающий с ростом шероховатости стенок трубопроводов:

$$A_s = 0,0894 \frac{k_3^{0,25}}{z^2} \quad (5)$$

где k_3 – эквивалентная шероховатость стенки трубы, мм;

z – задаваемая характеристика подпиточного насоса, необходимого для поддержания требуемого уровня пьезометрических линий.

«Как следует из уравнений (3) и (4), характеристика гидравлического сопротивления зависит от геометрических размеров сети, шероховатости стенок трубопроводов и плотности теплоносителя. При известных расходах и соответствующих им потерях давления характеристика гидравлического сопротивления находится из уравнения (1)» [27]. Увеличение концентрации наночастиц в теплоносителе дает возможность уменьшить площадь поверхности нагрева теплообменных аппаратов систем теплоснабже-

ния, что приведет к уменьшению массы, размеров и установки в целом за счет снижения материалоемкости, применения меньших по мощности насосов и т.д. При этом благодаря высокой стабилизации коллоида осаждение наночастиц на теплоотдающей поверхности не происходит. В результате значительно уменьшается энергопотребление и повышается надежность.

Расчетный гидравлический режим характеризуется распределением теплоносителя в соответствии с тепловой нагрузкой абонентов и вида конвекции. Как говорится в работе [29] «Степень возрастания теплоотдачи при двух гидравлических режимах вынужденной конвекции – при ламинарном и при турбулентном режимах течения – связана с квадратичной зависимостью роста теплопроводности от массы наночастиц, означая одновременно и квадратичную зависимость от плотности (концентрации)». В случае естественной, в противоположность от вынужденной конвекции, опытные данные разных авторов дают противоречивые результаты [30], поэтому вопросы теплообмена остаются открытыми, что требует дальнейших расчетных исследований гидравлических режимов при добавке наночастиц, равно как и расчета риска нештатной ситуации, связанной с кристаллообразованием, возникающим вследствие высокого содержания (по некоторым оценкам до 10-14 шт.) наноразмерных частиц в природной воде.

Взаимосвязь тепловых и гидравлических характеристик порождает необходимость дальнейшего комплексного изучения теплоотдачи, гидравлического режима и прочности покрытия из наночастиц для решения вопросов использования теплоносителя, модифицированного наноразмерными первичными материалами наночастиц, поскольку наноразмерные частицы, вследствие повышенной поверхностной энергии могут являться центрами кристаллообразования, что способно негативно влиять на эффективность систем отопления и теплоснабжения. В некоторых случаях может иметь место несоответствие масштабов объектов управления, применяемых посредством внедрения методов нанотехнологии в системах теплоснабжения. Однако эффективность управления таких систем, как правило, может достигаться аппаратными средствами, т.к. водоподготовка

влияет на эффективность функционирования систем теплоснабжения, и повышения теплоотдачи.

Применение наноструктур и нанотехнологий дает принципиальную возможность достижения повышенных рабочих параметров гидравлических режимов и реализацию конструктивных возможностей теплообменных аппаратов, влияющих на эффективность отопления зданий, интенсификацию теплообмена при решении вопросов регулирования систем теплоснабжения, однако исключительно при невысоком содержании наноразмерных частиц в горячей воде как теплоносителя. При этом выбор наночастиц, определение их теплопроводности, концентрации и распределения по размерам являются важными условиями для снижения затрат и уменьшения теплотерь при решении вопросов регулирования систем теплоснабжения.

Заключение

Изложенные в статье возможности применения нанотехнологий в контексте оптимизации гидравлических и температурных режимов способствуют повышению энергоэффективности зданий, качества теплоснабжения, оптимизации гидравлического режима тепловых сетей и интенсификации теплоотдачи в теплообменных аппаратах. Приведенные основные характеристики методов регулирования тепловой нагрузки позволяют осознать, что применение теплоносителя, модифицированного наноразмерными первичными материалами может способствовать решению проблемы экономии топлива от теплофикации, повышению качества теплоснабжения, сокращению расхода тепловой энергии и топлива за счет существенного увеличения теплоотдачи, но только при невысоком содержании наночастиц в горячей воде как теплоносителя.

Библиографический список

1. Дмитриев А.Н., Ковалев И.Н., Табунщиков Ю.А., Шилкин Н.В. Руководство по оценке эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия. М.: Авок-пресс, 2005. 120 с.
2. Асаул А.Н., Заварин Д.А. Внедрение ключевых инноваций по видам и этапам инвестиционно-строительного цикла // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 5(46). С. 133-140.
3. Асаул А.Н. Разработки и коммерциализации лучших инновационных решений – источники формирования общественных благ // Проблемы предпринимательской и инвестиционно-строительной деятельности: материалы XVII научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 30 октября 2015 г. СПб.: АНО «ИПЭВ», 2015. С. 266-283.
4. Асаул А.Н., Старинский В.Н., Асаул М.А., Грахов В.П. Оценка организации (предприятия, бизнеса). М.: Проспект, 2016. 384 с.
5. Асаул А.Н., Асаул М.А. Инновационные продукты и модели, регулируемые субъектами предпринимательства в сфере строительства и оборота недвижимости // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 3(80). С. 197-207. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-3-197-207.
6. Асаул А.Н. Взаимодействие государства и бизнеса в решении социальных проблем // Экономическое возрождение России. 2010. № 2(24). С. 4-7.
7. Асаул А.Н., Иванов С.Н. Основные направления развития «зеленого» строительства // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2015. № 1(36). С. 169-178.
8. Асаул А.Н., Загускин Н.Н. Векторы внедрения «зеленых» идей в инвестиционно-строительной сфере // Архитектура – строительство – транспорт: материалы 71-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, Санкт-Петербург, 07–09 октября 2015 г. СПб.: СПбГАСУ, 2015. С. 154-159.
9. Асаул А.Н. Возобновляемые источники энергии: состояние и перспективы // Научные труды Вольного экономического общества России. 2008. Т. 94. С. 173.
10. Асаул А.Н., Джаман М.А. Возобновляемые источники энергии: состояние и перспективы // Науковий вісник Полтавського університету споживчої кооперації України. Серія: Економічні науки. 2007. № 3 (25). С. 54.
11. Асаул М.А. Стратегия опережающего развития российской экономики как основа для радикальной смены экономического курса России // Ценность результатов научно-исследовательской деятельности заключается в отражении объективной потребности отечественной экономики: материалы региональной XXI научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 07 февраля 2020 г. СПб.: АНО «ИПЭВ», 2020. С. 309-313.

12. Асаул А.Н. Инновационная экосистема – залог эффективности процесса создания и использования инноваций // *Отечественной экономике – инновационный характер: материалы XIX научно-практической конференции*, Санкт-Петербург, 30–31 октября 2017 г. СПб.: АНО «ИПЭВ», 2017. С. 221-239.
13. Асаул А.Н., Заварин Д.А., Иванов С.Н. Основные направления формирования экономических эффектов от внедрения инноваций в инвестиционно-строительный цикл // *Вестник гражданских инженеров*. 2015. № 3(50). С. 254-261.
14. Асаул А.Н., Друзенко А.В., Щербина Г.Ф., Шведкова Т.Ю. Управление предпринимательскими рисками инвестиционно-строительного проекта. СПб.: АНО «ИПЭВ», 2017. 256 с.
15. Асаул А.Н., Звягина А.В., Литвинцев А.А. и др. 100 открытий и изобретений новой России // *Отечественной экономике – инновационный характер: материалы XIX научно-практической конференции*, Санкт-Петербург, 30–31 октября 2017 г. СПб.: АНО «ИПЭВ», 2017. С. 11-194.
16. Asaul A., Asaul M., Drozdova I. et al. The practical barriers to kickstarting the innovation and investment in the sphere of construction in Russian Federation // *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 274: 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE – 2021), Kazan, 21–28 апреля 2021 г. France: EDP Sciences, 2021. 5006 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202127405006.
17. Трубицына Г.Н., Барзенкова В.В., Фроликова В.С. Оценка возможности использования наножидкостей в системах теплоснабжения и вентиляции // *Молодой исследователь: вызовы и перспективы: сборник статей по материалам X Международной научно-практической конференции*. М.: Интернаука, 2016. № 8 (10).
18. Суртаев А.С., Сердюков В.С., Павленко А.Н. Нанотехнологии в теплофизике: теплообмен // *Российские нанотехнологии*. 2017. Т. 11. № 11-12. С. 18.
19. Дмитриев А.С., Клименко А.В. Преобразование солнечного излучения в пар – новые возможности на основе наноматериалов (обзор) // *Теплоэнергетика*. 2020. № 2. С. 3-19. DOI: 10.1134/S0040363620020010.
20. Зобов К.В., Труфанов Д.Ю., Бардаханов С.П., Прокудин В.А., Гапоненко В.Р. Исследование предельного уровня осаждения нанопорошков в жидкости и газе. В книге: *Динамика многофазных сред (ДМС-2021). Тезисы докладов XVII Всероссийского семинара с международным участием*. Новосибирск, 2021. С. 26.
21. Морозова М.А. Теплопроводность и вязкость наножидкостей: дис. ... канд. ф-м. наук: (01.04.14) / Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе сибирского отд. РАН. Новосибирск, 2019.
22. Roy S. et al. Heat transfer performance of silver/water nanofluid in a solar flat-plate collector. *Journal of Thermal Engineering*. 2014. Vol. 1(2). P. 104-112.
23. Левин Ю.А., Никитин А.А., Конопатов М.В., Иванов Л.А. Потенциал нанотехнологий: вопросы теплоснабжения и отопления зданий // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2020. Т. 12. № 2. С. 89-93. DOI: 10.15828/2075-8545-2020-12-2-89-93.
24. Минаков А.В., Гузей Д.В., Лобасов А.С., Дектерев Д.А., Пряжников М.И. Расчетно-экспериментальное исследование вынужденной конвекции наножидкости в прямоточном теплообменнике // *Журнал Сибирского федерального университета*. 2014. Т. 7. № 1. С. 32-47.
25. Левин Ю.А. Оценка эффективности электрификации средне- и низкотемпературных процессов промышленности: дис. ... канд. экон. наук: (08.00.21) / Гос. н.-и. энергет. ин-т им. Г.М. Кржижановского. М., 1986.
26. Асаул А.Н., Асаул М.А., Левин Ю.А., Платонов А.М. Энергоснабжение изолированных территорий в контексте привлечения инвестиций и развития экономики региона // *Экономка региона*. 2020. Т. 16. № 3. С. 884-895. DOI: 10.17059/ekon.reg.2020-3-16.
27. Козин В.Е., Левина Т.А., Марков А.П. и др. *Теплоснабжение: учебное пособие*. М.: Высшая школа, 1980. 407 с.
28. 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. P. 35-38.
29. Антонов В.Н., Агапитов Е.Б., Байкова Д.А. Перспективы применения жидкостей с наночастицами в теплоэнергетике // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2016. Т. 1. С. 207-210.
30. Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). *Конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика*. 2010. Т. 17. Часть 2. № 2.