

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАССЕТНОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В ИНДИВИДУАЛЬНОМ ТЕПЛОВОМ ПУНКТЕ

Пономарев Р.А., Ваньков Ю.В., Бусаров А.В.

Казанский государственный энергетический университет, 420066, Казань, Россия

e-mail: romanponomarevich@mail.ru

Рассмотрено применение кассетного аккумулятора тепла фазового перехода для сглаживания суточных пиков нагрузки горячего водоснабжения многоквартирного дома. Цель работы – разработать схему интеграции аккумулятора в индивидуальный тепловой пункт и оценить ее технико-экономическую эффективность по фактическому суточному графику теплопотребления. Геометрия промышленной секции принята на основе ранее опубликованных экспериментальных исследований поперечного оребрения: для лабораторного образца рациональной признана конфигурация с 8 ребрами и межреберным расстоянием 20–22 мм. При масштабировании длина секции увеличена с 0.2 до 1.0 м с сохранением радиальной геометрии; расчетная энергоемкость секции составляет 0.37 кВт·ч. Для рассматриваемого объекта требуется 61 секция общей энергоемкостью 22.6 кВт·ч. Часовое моделирование показало частичное покрытие суммарного дефицита утреннего и вечернего пиков и снижение максимальной нагрузки с 48.9 до 43.25 кВт утром и с 46.1 до 42.33 кВт вечером. Капитальные затраты оценены в 311 тыс. руб., годовые эксплуатационные – 11.85 тыс. руб. При расчетном экономическом эффекте 68 тыс. руб./год простой срок окупаемости составляет 5.5 года, NPV за 15 лет при ставке дисконтирования 10% – 116.1 тыс. руб., индекс доходности – 1.37. Новизна работы состоит в переходе от экспериментально обоснованной лабораторной конструкции к кассетному аккумулятору промышленного масштаба и оценке его работы в составе реального теплового пункта.

Ключевые слова: аккумулятор тепла фазового перехода, горячее водоснабжение, индивидуальный тепловой пункт, пиковая тепловая нагрузка, тепловое аккумулирование, технико-экономическая оценка.

TECHNO-ECONOMIC ASSESSMENT OF CASSETTE PHASE-CHANGE HEAT ACCUMULATOR IN INDIVIDUAL HEATING SUBSTATION

Ponomarev R.A., Vankov Yu.V., Busarov A.V.

Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

A cassette phase-change heat accumulator is considered for smoothing short-term domestic hot-water load peaks in a residential individual heating substation. The study aims to develop an integration scheme and evaluate its technical and economic performance using an actual daily heat-consumption profile. The industrial section geometry is based on previously published experiments on transverse finning, where an eight-fin configuration with a 20–22 mm fin spacing was identified as rational for the laboratory unit. The section length was scaled from 0.2 to 1.0 m while preserving the radial geometry; its calculated storage capacity is 0.37 kWh. For the case study, 61 sections with a total capacity of 22.6 kWh are required. Hourly energy-balance modelling shows partial coverage of the combined morning and evening peak deficit and a reduction of the maximum load from 48.9 to 43.25 kW in the morning and from 46.1 to 42.33 kW in the evening. Capital costs are estimated at RUB 311 thousand and annual operating costs at RUB 11.85 thousand. For the adopted economic-effect scenario of RUB 68 thousand per year, the simple payback period is 5.5 years, the 15-year NPV at a 10% discount rate is RUB 116.1 thousand, and the profitability index is 1.37. The novelty lies in transferring an experimentally substantiated laboratory design to an industrial-scale cassette system and evaluating it within a real heating-substation load profile.

Keywords: phase-change heat accumulator, hot water supply, individual heating substation, peak heat load, thermal energy storage, techno-economic assessment.

Введение

Суточная неравномерность горячего водоснабжения (ГВС) приводит к кратковременному росту нагрузки на теплообменное оборудование и расхода сетевой воды. Традиционное резервирование мощности снижает чувствительность системы к пикам, но увеличивает установленную мощность и ухудшает режимы работы оборудования при малом водоразборе [1,2]. Одним из способов перераспределения нагрузки во времени является аккумулирование теплоты. Для низкотемпературных систем практический интерес представляют аккумуляторы тепла фазового перехода (АТФП), использующие скрытую теплоту плавления и кристаллизации теплоаккумулирующего материала [3,4].

Возможность применения фазопереходных накопителей для приготовления горячей воды подтверждена экспериментальными работами [5,6,7], а вопросы их интеграции с тепловыми насосами и низкотемпературными системами теплоснабжения рассмотрены в [8,9,10]. Современные исследования также показывают значимость алгоритмов управления накоплением для перераспределения нагрузки во времени [11,12]. При этом надежность теплоснабжения остается связанной с режимами работы сетей и оборудования [13].

Ограничением парафиновых теплоаккумулирующих материалов является низкая теплопроводность, поэтому конструкция АТФП требует интенсификации теплообмена. В ранее опубликованной

работе авторов [14] экспериментально исследованы цилиндрические образцы с 6, 8 и 10 поперечными ребрами. По совокупности времени зарядки, пиковой скорости плавления, материалоемкости и полезного объема, рациональной признана конфигурация с 8 ребрами: время достижения 80% расплава составило 162.7 мин и было на 17.7% меньше, чем для базового варианта с 6 ребрами. Для 10 ребер дальнейшего сокращения времени практически не получено вследствие частичного ограничения естественной конвекции. Дополнительная интенсификация со стороны теплоносителя может быть обеспечена наномодифицированными жидкостями; соответствующие механизмы и ограничения рассмотрены в [15,16].

Таким образом, экспериментальное обоснование геометрии оребрения уже получено, однако для практического применения необходимо перейти от лабораторного образца к промышленной секции, определить количество модулей по реальному графику ГВС и оценить экономическую реализуемость системы. Цель настоящей работы – разработка схемы интеграции кассетного АТФП в индивидуальный тепловой пункт многоквартирного дома и оценка его работы и экономической эффективности по фактическому суточному графику теплопотребления.

Материалы и методы

В основу промышленной секции положена геометрия, экспериментально обоснованная в [14]. При масштабировании длина корпуса увеличена с 0.2 до 1.0 м, а радиальные размеры сохранены: внутренний диаметр корпуса 106 мм, наружный диаметр теплообменной трубки 10 мм, толщина поперечных ребер 1 мм, их радиус 45 мм и межреберное расстояние 20-22 мм. Количество ребер увеличено пропорционально длине с 8 до 40. Такое масштабирование сохраняет характерный радиальный путь

теплопереноса, тогда как увеличение длины преимущественно повышает массу теплоаккумулирующего материала.

В лабораторных образцах теплообменник и ребра изготавливались из меди, корпус – из поликарбоната. Для промышленной секции приняты алюминиевые теплообменные элементы и полипропиленовый корпус. Теплопроводность алюминия значительно выше теплопроводности парафина, поэтому вклад металлических элементов в суммарное термическое сопротивление остается малым по сравнению с сопротивлением слоя теплоаккумулирующего материала. Масса парафина в секции составляет 6.84 кг. При средней теплоемкости 2.412 кДж/(кг·К), рабочем диапазоне 40-60°C и скрытой теплоте плавления 146 кДж/кг расчетная энергоемкость секции составляет около 0.37 кВт·ч. Для инженерного расчета приняты средняя мощность зарядки 0.15 кВт и средняя мощность разрядки 0.75 кВт на секцию.

Схема интеграции предусматривает разделение сетевой воды, воды ГВС и замкнутого контура АТФП. Зарядка осуществляется через теплообменник ТО1, разрядка – через теплообменник ТО2. В аккумуляторном контуре циркулирует водная суспензия углеродных нанотрубок концентрацией 0.1 масс. %, а для ограничения агломерации предусмотрен узел периодического ультразвукового диспергирования. Такое разделение исключает контакт наночастиц с водой, подаваемой потребителю, и локализует наномодифицированный теплоноситель в малом замкнутом объеме.

Для определения требуемого количества секций использован суточный график теплопотребления многоквартирного жилого дома по адресу: г. Казань, ул. Глушко, 16, полученный по данным АО «Татэнерго» за 01.08.2025 г. Выбор неотапительного периода позволяет рассматривать тепловую

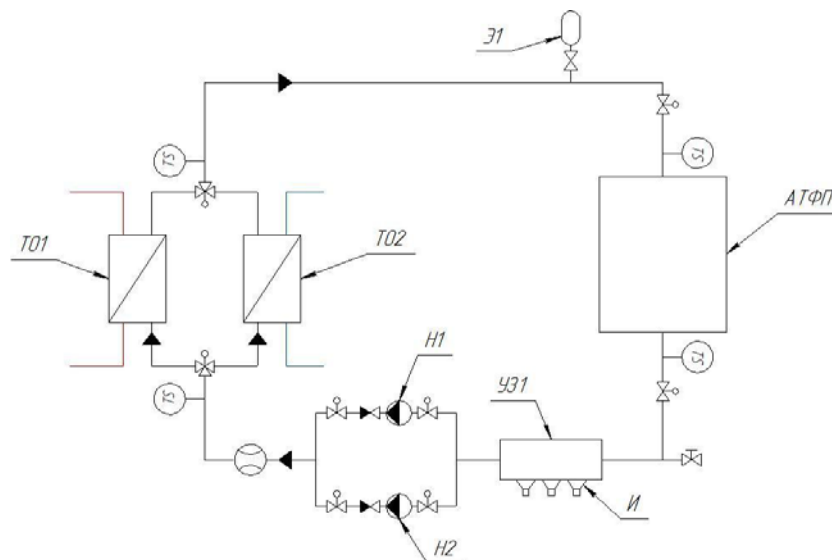


Рис. 1. Принципиальная схема интеграции кассетного АТФП: ТО1 – теплообменник зарядки; ТО2 – теплообменник разрядки; УЗ – ультразвуковой узел

нагрузку преимущественно как нагрузку системы горячего водоснабжения. Среднесуточная тепловая нагрузка составляет 35.2 кВт, максимальная часовая нагрузка достигает 48.9 кВт, минимальная – 23.4 кВт. В интервале 00:00-06:00 теплопотребление в среднем на 38% ниже, чем в остальное время суток, что позволяет использовать данный период для зарядки аккумулятора.

Дефицит тепловой энергии относительно базовой мощности 35.2 кВт составляет 15.1 кВт·ч в утренний период 07:00-09:00 и 19.4 кВт·ч в вечерний период 19:00-22:00. Расчетное количество секций определено по максимальному вечернему дефициту с коэффициентом запаса 1.15:

$$N = \frac{E_{веч} \cdot k_{зан}}{E_{секц}} = \frac{19.4 \cdot 1.15}{0.37} \approx 60.3 = 61$$

Таким образом, принято 61 секция. Полная энергоемкость кассетного АТФП составляет 22.6 кВт·ч, суммарная расчетная средняя мощность зарядки – 9.15 кВт, а мощность разрядки – 45.8 кВт.

Моделирование суточного режима показывает перераспределение части тепловой нагрузки из пиковых периодов в часы пониженного потребления. В ночном интервале осуществляется зарядка АТФП, в результате чего нагрузка на источник увеличивается не более чем на 9.15 кВт. В часы максимального водоразбора аккумулятор переходит в режим разрядки. Полученный эффект сглаживания суточного графика представлен на рис. 2.

Суммарный дефицит тепловой энергии за утренний и вечерний пики составляет 34.5 кВт·ч, что превышает полную энергоемкость кассетного АТФП, равную 22.6 кВт·ч. Следовательно, предложенная система не предназначена для полного покрытия обоих пиков за счет одной ночной зарядки, а обеспечивает их частичное сглаживание. Расчетная энергоемкость аккумулятора соответствует примерно 65% суммарного пикового дефицита.

Таким образом, кассетный АТФП позволяет перераспределить тепловую нагрузку в течение суток

и уменьшить максимальные значения нагрузки на основное теплообменное оборудование без увеличения его установленной мощности.

Результаты и обсуждение

По результатам часового баланса максимальная нагрузка на основной теплообменник уменьшается утром с 48.9 до 43.25 кВт, вечером – с 46.1 до 42.33 кВт. В ночной период нагрузка источника, напротив, возрастает за счет зарядки АТФП, однако перенос энергии происходит в интервал пониженного водоразбора. Таким образом, основным техническим эффектом является перераспределение части тепловой нагрузки из пиковых часов в период меньшего потребления.

Ориентировочные капитальные затраты на один объект составляют 311 тыс. руб. В расчет включены 61 секция АТФП (около 88.3 тыс. руб.), два пластинчатых теплообменника, циркуляционный насос, трубопроводы и арматура, теплоизоляция, автоматика и контрольно-измерительные приборы, ультразвуковой узел, монтаж и резерв непредвиденных расходов. Годовые эксплуатационные затраты по принятой смете составляют 11.85 тыс. руб./год и включают электроэнергию вспомогательного оборудования, техническое обслуживание и периодическое обновление наножилок.

Экономический эффект рассматривается с позиции теплоснабжающей организации. В условиях одноставочного тарифа суммарное потребление тепловой энергии домом практически не уменьшается, поэтому прямое снижение платежей конечного потребителя не является основным результатом проекта. Эффект формируется за счет снижения нагрузки на пиковое оборудование, перераспределения части выработки в более благоприятный режим и сценарного уменьшения ущерба, связанного с работой изношенных тепловых сетей.

По информационным данным, протяженность тепловых сетей АО «Татэнерго» в Казани составляет 704 км, норматив ежегодной замены – 6%, расчетная стоимость замены 1 км – 129.3 млн руб. Для оценки предотвращенного ущерба приняты две сценарные

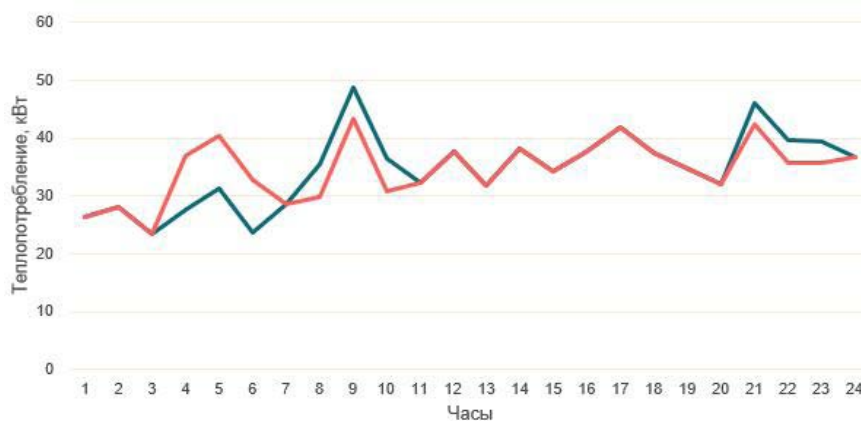


Рис. 2. Суточный график тепловой нагрузки ГВС до и после интеграции кассетного АТФП: синяя линия – исходный график теплопотребления; красная линия – сглаженный график

доли: 30% затрат на замену отнесено к аварийной составляющей, 20% этой составляющей – к авариям, усугубляемым пиковыми режимами. При 6163 многоквартирных домах оценка на один объект составляет $U=704 \cdot 0.06 \cdot 129.3 \cdot 10^6 \cdot 0.30 \cdot 0.20 / 6163 \approx 53$ тыс. руб./год. Поскольку доли 30 и 2 % являются расчетными предпосылками, величину 53 тыс. руб./год следует трактовать как сценарную, а не как непосредственно измеренный предотвращенный ущерб.

Дополнительный эффект принят в размере 9.94 тыс. руб./год за счет переноса части тепловой энергии из пикового режима в базовый и 5 тыс. руб./год за счет уменьшения износа пикового оборудования. В принятом расчетном сценарии суммарный годовой эффект составляет 68 тыс. руб. При эксплуатационных затратах 11.85 тыс. руб./год чистый годовой денежный поток равен 56.15 тыс. руб./год. Простой срок окупаемости составляет $PP=311/56.15=5.5$ года. При ставке дисконтирования 10% и горизонте 15 лет аннуитет-фактор равен 7.606, поэтому $NPV=56.15 \cdot 7.606 - 311=116.1$ тыс. руб., а $PI=(311+116.1)/311=1.37$.

Полученные показатели соответствуют положительному инвестиционному результату в принятом сценарии. Вместе с тем экономическая часть чувствительна к предпосылкам о доле аварийной составляющей и влиянии пиковых режимов. Поэтому перед промышленным внедрением необходима

опытная эксплуатация на реальном тепловом пункте с регистрацией расхода сетевой воды, фактических циклов зарядки-разрядки, энергопотребления вспомогательных устройств и эксплуатационных затрат. Такой этап позволит заменить сценарные коэффициенты наблюдаемыми данными и уточнить экономический эффект.

Выводы

1. Экспериментально обоснованная ранее конфигурация с 8 поперечными ребрами и межреберным расстоянием 20-22 мм использована как основа промышленной секции длиной 1.0 м. При сохранении радиальной геометрии расчетная энергоемкость секции составляет 0.37 кВт·ч.

2. Для фактического суточного графика ГВС рассматриваемого дома расчетное количество секций составляет 61, суммарная емкость – 22.6 кВт·ч. Аккумулятор обеспечивает частичное сглаживание совокупного пикового дефицита; максимальная нагрузка основного теплообменника снижается с 48.9 до 43.25 кВт утром и с 46.1 до 42.33 кВт вечером.

3. При капитальных затратах 311 тыс. руб., эксплуатационных затратах 11.85 тыс. руб./год и расчетном годовом эффекте 68 тыс. руб. простой срок окупаемости составляет 5.5 года, NPV за 15 лет при 10% – 116.1 тыс. руб., PI – 1.37. Экономический результат зависит от принятых сценарных предпосылок и требует уточнения по данным опытной эксплуатации.

Работа, по результатам которой выполнена статья, проведена в рамках Государственного задания №075-03-2025-458 от 17.01.2025 года.

Список литературы

1. Ваньков Ю.В., Запольская И.Н., Измайлова Е.В., Загретдинов А.Р., Валиев Р.Н. Снижение тепловых потерь энергоснабжающей организации модернизацией систем горячего водоснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. №4. С. 13-24.
2. Ротов П.В., Горшков А.В., Ротова М.А. О целесообразности изменения схемы подключения установок горячего водоснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. №5. С. 54-65.
3. Милёхин М.И., Умеренков Е.В. Тепловые аккумуляторы фазового перехода на основе парафина // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28. №3. С. 36-49.
4. Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. V. 13. No. 2. Pp. 318-345.
5. Djeflal R., Cherier M.K., Bekkouche S.M.E.A., Younsi Z., Hamdani M., Al-Saadi S. Concept development and experimentation of a Phase Change Material (PCM) enhanced domestic hot water. Journal of Energy Storage. 2022. V. 51. 104400.
6. Pakalka S., Donélien J., Rudzikas M., Valančius K., Streckienė G. Development and experimental investigation of full-scale phase change material thermal energy storage prototype for domestic hot water applications. Journal of Energy Storage. 2024. V. 80. 110283.
7. Rendall J., Elatar A., Nawaz K., Sun J. Medium-temperature phase change material integration in domestic heat pump water heaters for improved thermal energy storage. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023. V. 185. 113656.
8. Quirosa G., Torres M., Soltero V.M., Chacartegui R. Analysis of an ultra-low temperature district heating and cooling as a storage system for renewable integration. Applied Thermal Engineering. 2022. V. 216. 119052.
9. Shan L., Martin A., Chiu J.N.W. Techno-economic analysis of latent heat thermal energy storage integrated heat pump for indoor heating. Energy. 2024. V. 298. 131291.
10. Topal H.I., Arabkoohsar A. Enhancing ultra low temperature district heating systems with neighborhood-scale heat pump and tripe-pipe distribution: A techno-economic analysis. Journal of Building Engineering. 2024. V. 95. 110316.
11. Perrella S., Bisegna F., Bevilacqua P., Cirone D. Solar-assisted heat pump with electric and thermal storage: The role of appropriate control strategies for the exploitation of the solar source. Buildings. 2024. V. 14. No. 1. 296.
12. Rashid F.L., Al-Obaidi M.A., Dulaimi A., Mahmood D.M.N. A review of recent improvements, developments, and effects of using phase-change materials in buildings to store thermal energy. Designs. 2023. V. 7. No. 4. 90.
13. Akhmetova I., Zalyalova A., Nurislamova A. Reliability of heating networks as a factor of sustainable development of thermal power industry. E3S Web of Conferences. 2023. V. 461. 01018.
14. Пономарев Р.А., Ваньков Ю.В. Влияние поперечного оребрения на кинетику зарядки цилиндрического аккумулятора тепла фазового перехода // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2026. Т. 28. №4. С. 126-138. DOI: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-126-138.

15. Kolsi L., Hussein A.K., Hassen W., Ben Said L., Ayadi B., Rajhi W., Labidi T., Shawabkeh A., Ramesh K. Numerical study of a phase change material energy storage tank working with carbon nanotube-water nanofluid under Ha'il city climatic conditions. *Mathematics*. 2023. V. 11. No. 4. 1057.
16. Said Z., Sundar L.S., Tiwari A.K., Ali H.M., Sheikholeslami M., Bellos E., Babar H. Recent advances on the fundamental physical phenomena behind stability, dynamic motion, thermophysical properties, heat transport, applications, and challenges of nanofluids. *Physics Reports*. 2022. V. 946. Pp. 1-94.

References

1. Vankov Yu.V., Zapolskaya I.N., Izmailova E.V., Zagretidinov A.R., Valiev R.N. Reducing heat losses of an energy supply organization through modernization of hot water supply systems. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2018. No. 4. Pp. 13-24.
2. Rotov P.V., Gorshkov A.V., Rotova M.A. On the feasibility of changing the connection scheme for hot water supply systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2024. Vol. 26. No. 5. Pp. 54-65.
3. Milyokhin M.I., Umerenkov E.V. Thermal phase change accumulators based on paraffin. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2024. Vol. 28. No. 3. Pp. 36-49.
4. Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. V. 13. No. 2. Pp. 318-345.
5. Djeflal R., Cherier M.K., Bekkouche S.M.E.A., Younsi Z., Hamdani M., Al-Saadi S. Concept development and experimentation of a Phase Change Material (PCM) enhanced domestic hot water. *Journal of Energy Storage*. 2022. V. 51. 104400.
6. Pakalka S., Donélie J., Rudzikas M., Valančius K., Streckienė G. Development and experimental investigation of full-scale phase change material thermal energy storage prototype for domestic hot water applications. *Journal of Energy Storage*. 2024. V. 80. 110283.
7. Rendall J., Elatar A., Nawaz K., Sun J. Medium-temperature phase change material integration in domestic heat pump water heaters for improved thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. V. 185. 113656.
8. Quirosa G., Torres M., Soltero V.M., Chacartegui R. Analysis of an ultra-low temperature district heating and cooling as a storage system for renewable integration. *Applied Thermal Engineering*. 2022. V. 216. 119052.
9. Shan L., Martin A., Chiu J.N.W. Techno-economic analysis of latent heat thermal energy storage integrated heat pump for indoor heating. *Energy*. 2024. V. 298. 131291.
10. Topal H.I., Arabkoohsar A. Enhancing ultra low temperature district heating systems with neighborhood-scale heat pump and triple-pipe distribution: A techno-economic analysis. *Journal of Building Engineering*. 2024. V. 95. 110316.
11. Perrella S., Bisegna F., Bevilacqua P., Cirone D. Solar-assisted heat pump with electric and thermal storage: The role of appropriate control strategies for the exploitation of the solar source. *Buildings*. 2024. V. 14. No. 1. 296.
12. Rashid F.L., Al-Obaidi M.A., Dulaimi A., Mahmood D.M.N. A review of recent improvements, developments, and effects of using phase-change materials in buildings to store thermal energy. *Designs*. 2023. V. 7. No. 4. 90.
13. Akhmetova I., Zalyalova A., Nurislamova A. Reliability of heating networks as a factor of sustainable development of thermal power industry. *E3S Web of Conferences*. 2023. V. 461. 01018.
14. Ponomarev R.A., Vankov Yu.V. The Effect of Transverse Fins on the Charging Kinetics of a Cylindrical Phase-Change Heat Storage Tank. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2026. Vol. 28. No. 4. Pp. 126-138. DOI: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-126-138.
15. Kolsi L., Hussein A.K., Hassen W., Ben Said L., Ayadi B., Rajhi W., Labidi T., Shawabkeh A., Ramesh K. Numerical study of a phase change material energy storage tank working with carbon nanotube-water nanofluid under Ha'il city climatic conditions. *Mathematics*. 2023. V. 11. No. 4. 1057.
16. Said Z., Sundar L.S., Tiwari A.K., Ali H.M., Sheikholeslami M., Bellos E., Babar H. Recent advances on the fundamental physical phenomena behind stability, dynamic motion, thermophysical properties, heat transport, applications, and challenges of nanofluids. *Physics Reports*. 2022. V. 946. Pp. 1-94.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Пономарев Роман Андреевич

старший преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет, 420066, Казань, Россия

Ваньков Юрий Витальевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет, 420066, Казань, Россия

Бусаров Андрей Владимирович

кандидат технических наук, председатель государственной экзаменационной комиссии кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет, 420066, Казань, Россия

Information about authors

Affiliations

Ponomarev Roman Andreevich

Senior Lecturer at the Department of Industrial Heat and Power Engineering and Heat Supply Systems, Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Vankov Yuri Vitalievich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial Heat and Power Engineering and Heat Supply Systems, Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Busarov Andrey Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Chairman of the State Examination Commission of the Department of Industrial Heat and Power Engineering and Heat Supply Systems, Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Поступила в редакцию 03.08.2026 г.