



## ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО ОРЕБРЕНИЯ НА КИНЕТИКУ ЗАРЯДКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

Пономарев Р.А., Ваньков Ю.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

romanponomarevich@mail.ru

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования обусловлена необходимостью интенсификации теплообмена в аккумуляторах тепла фазового перехода (АТФП) на основе парафиновых теплоаккумулирующих материалов. Низкая теплопроводность парафинов ( $0,15\text{--}0,30\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ) приводит к недопустимо большому времени зарядки аккумулятора. Поперечное оребрение является одним из наиболее технологичных пассивных методов интенсификации, однако в литературе отсутствуют однозначные рекомендации по выбору оптимального количества ребер для АТФП цилиндрической геометрии. ЦЕЛЬ работы — экспериментальное определение оптимального количества поперечных ребер цилиндрического АТФП с применением парафина в качестве теплоаккумулирующего материала, обеспечивающего минимальное время зарядки. МЕТОДЫ. Исследования проводились на прозрачной модели цилиндрического АТФП с медным трубчатый теплообменником и поперечными ребрами. Испытаны три конфигурации: с 6, 8 и 10 ребрами. Регистрация процесса плавления выполнялась методом оптической визуализации с последующей цифровой обработкой изображений в среде MATLAB по адаптивному пороговому алгоритму. Для каждой конфигурации проведено четыре повторных эксперимента. РЕЗУЛЬТАТЫ. Установлено, что процесс плавления характеризуется тремя стадиями: прогрев твердого парафина (0–60 мин, средняя скорость плавления  $0,22\text{ \%/мин}$ ), интенсивное плавление с развитой естественной конвекцией (60–180 мин,  $0,55\text{ \%/мин}$ ) и завершающая стадия (180–220 мин,  $0,26\text{ \%/мин}$ ). Конфигурация с 10 ребрами обеспечивает наименьшее время достижения 50% расплава (127,8 мин), однако по времени достижения 80% расплава практически не отличается от конфигурации с 8 ребрами (162,0 и 162,7 мин соответственно). Максимальную пиковую скорость плавления демонстрирует конфигурация с 8 ребрами —  $1,52\text{ \%/мин}$ , что на 55% выше, чем у 6 ребер. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. По совокупности критериев (время зарядки, пиковая скорость плавления, материалоемкость, полезный объем) оптимальной признана конфигурация с 8 поперечными ребрами. Увеличение количества ребер до 10 не приводит к дальнейшему сокращению времени зарядки из-за частичного подавления естественной конвекции в узких межреберных каналах (межреберное расстояние 15–17 мм). Полученные результаты могут быть использованы при проектировании цилиндрических АТФП для систем горячего водоснабжения, а также для верификации численных моделей.

**Ключевые слова:** аккумулятор тепла; фазовый переход; интенсификация теплообмена; оребрение; парафин; свободная конвекция.

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

**Для цитирования:** 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.

## THE EFFECT OF TRANSVERSE FINS ON THE CHARGING KINETICS OF A CYLINDRICAL PHASE TRANSITION HEAT ACCUMULATOR

Ponomarev R.A., Vankov Yu.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

romanponomarevich@mail.ru

**Abstract:** RELEVANCE of the study is due to the need to intensify heat transfer in phase change heat accumulators (PCHA) based on paraffinic heat storage materials. Low thermal conductivity of paraffins ( $0.15\text{--}0.30\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ) This leads to an unacceptably long battery charging time. Transverse finning is one of the most technologically advanced passive intensification methods, however, there are no clear recommendations in the literature on choosing the optimal number of ribs for the cylindrical geometry of accumulator. THE PURPOSE. experimental determination of the optimal number of transverse ribs of a cylindrical PCHA with a paraffin heat storage material, which ensures a minimum charging time while maintaining a sufficient useful volume. METHODS. The research was carried out on a transparent cylindrical PCHA model with a copper tubular heat exchanger and transverse fins. Three configurations have been tested: with 6, 8 and 10 ribs. The melting process was recorded using optical imaging followed by digital image processing in MATLAB using an adaptive threshold algorithm. Four repeated experiments were performed for each configuration. RESULTS. It was found that the melting process is characterized by three stages: heating of solid paraffin (0-60 min, average rate of  $0.22\%/min$ ), intensive melting with developed natural convection (60-180 min,  $0.55\%/min$ ) and the final stage (180-220 min,  $0.26\%/min$ ). The 10-rib configuration provides the shortest time to reach 50% of the melt (127.8 minutes), however, the time to reach 80% of the melt is practically the same as the 8-rib configuration (162.0 and 162.7 minutes, respectively). The maximum peak melting rate is demonstrated by the configuration with 8 fins —  $1.52\%/min$ , which is 55% higher than that of 6 fins. CONCLUSION. According to a set of criteria (charging time, peak melting rate, material consumption, useful volume), the configuration with 8 transverse ribs is considered optimal. Increasing the number of ribs to 10 does not lead to a further reduction in charging time due to partial suppression of natural convection in narrow intercostal channels (intercostal distance 15-17 mm). The results obtained can be used in the design of cylindrical PCHA for hot water supply systems, as well as for verification of numerical models.

**Keywords:** heat accumulator; phase transition; intensification of heat exchange; finning; paraffin; free convection.

**Acknowledgments:** The work that resulted in this article was carried out as part of State Assignment No. 075-03-2025-458 dated January 17, 2025.

**For citation:** Ponomarev R.A., Vankov Yu.V. The effect of transverse fins on the charging kinetics of a cylindrical phase transition heat accumulator. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2026; 28 (4): 126-138. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-126-138.

### Введение (Introduction)

Аккумуляторы тепла фазового перехода (АТФП), использующие скрытую теплоту плавления/кристаллизации теплоаккумулирующих материалов (ТАМ), являются перспективным решением для сглаживания суточной неравномерности потребления горячей воды в системах горячего водоснабжения (ГВС). Faraj с соавторами [1] систематизировали исследования по применению ТАМ в жилых и коммерческих зданиях и показали, что материалы фазового перехода выполняют функцию теплового буфера, компенсирующего неравномерность тепловой нагрузки и снижающего колебания температуры. Авторы также отметили, что большинство работ основано на численном моделировании без достаточного экспериментального подтверждения, а задача оптимизации теплофизических свойств ТАМ и геометрии аккумуляторов требует дальнейших исследований.

Ram с соавторами [2] классифицировали ТАМ по температурным диапазонам и областям применения. Авторы отметили, что выбор ТАМ определяется совокупностью факторов: рабочей температурой, плотностью, скрытой теплотой плавления, удельной теплоемкостью и теплопроводностью, а также конструкцией теплообменника. Для низкотемпературных систем ( $50\text{--}65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), характерных для ГВС, парафины являются предпочтительным выбором благодаря оптимальному сочетанию теплофизических свойств и химической стабильности.

Kahwaji и White [3] проанализировали взаимосвязь между молекулярной структурой и теплофизическими свойствами для примерно 200 органических соединений из девяти химических семейств, включая парафины, жирные кислоты, жирные спирты и сложные эфиры. Авторы установили, что соединения с четным числом атомов углерода в

алкильной цепи имеют более высокие температуры плавления и энтальпии фазового перехода за счет более эффективной упаковки молекул, а также отличаются более низкой стоимостью. Парафины с длиной цепи C18–C36 обеспечивают температуры плавления в диапазоне 28–76 °C и энтальпии плавления 150–250 кДж/кг, что делает их оптимальным выбором для низкотемпературных систем ГВС.

Милёхин и Умеренков [4] проанализировали состояние исследований тепловых аккумуляторов фазового перехода на основе парафина применительно к российским условиям. Авторы выделили три основных направления применения АТФП: системы отопления и ГВС от традиционных источников энергии, системы отопления и ГВС от возобновляемых источников, а также предпусковая подготовка двигателей внутреннего сгорания. Показано, что АТФП на основе парафина требуют усовершенствования в части снижения массы и габаритов конструкции, в том числе за счет применения полимерных материалов и оптимизации геометрии теплообменных поверхностей.

Основным фактором, сдерживающим широкое внедрение АТФП, является низкая теплопроводность большинства ТАМ. Для интенсификации теплообмена разработан ряд методов. Одним из направлений является модификация самого ТАМ путем введения высокотеплопроводных наполнителей. Baskakov с соавторами [5] экспериментально показали, что тепловая батарея на основе чистого парафина при двухминутном нагреве в микроволновой печи с добавкой восстановленного оксида графена позволило существенно ускорить процесс. Температура внутри батареи с чистым парафином поднялась до 32 °C. За то же время температура композитного аккумулятора повысилась до 74 °C, что выше температуры фазового перехода. Авторы подчеркнули, что основным ограничением остается низкая собственная теплопроводность парафина (0,14–0,30 Вт/(м·К)), и для практического применения АТФП необходима разработка методов интенсификации теплообмена.

Feng с соавторами [6] систематизировали исследования композитных ТАМ, армированных углеродными нанотрубками (УНТ), и рассмотрели три основных способа их применения: в качестве нанодобавок, в качестве пористого каркаса и в качестве вторичной теплопроводящей сети. Показано, что несмотря на значительный прогресс, теплопроводность композитных ТАМ с УНТ обычно не превышает 1 Вт/(м·К), а нерешенными проблемами остаются агломерация нанотрубок, низкая межфазная теплопроводность на границе УНТ–ТАМ и высокая стоимость нанодобавок.

Альтернативным подходом является модификация теплоносителя. Mirahmad с соавторами [7] систематизировали исследования по влиянию различных типов наночастиц (металлических, оксидных, углеродных) на теплопроводность и теплоемкость базовых жидкостей. Авторы показали, что добавление наночастиц, как правило, повышает теплопроводность, но может снижать удельную теплоемкость и увеличивать вязкость. В частности, для углеродных нанотрубок в водной основе отмечен рост теплопроводности, однако вязкость при этом может возрастать на 100%. Достижение одновременного улучшения теплопроводности и теплоемкости без значительного роста вязкости остается нерешенной задачей.

Среди пассивных (без использования внешней энергии) методов интенсификации теплообмена, оребрение теплообменных поверхностей является наиболее технологичным и экономически оправданным. Al-Mudhafar с соавторами [8] численно исследовали повышение тепловой эффективности кожухотрубного теплообменника за счет применения инновационных форм оребрения. Авторы сравнили четыре конфигурации: без ребер, с тройниковыми ребрами, с продольными ребрами и с древовидными ребрами. Использование тройных ребер сократило общее время плавления на 33% по сравнению с продольными ребрами, что подтверждает существенное влияние геометрии ребер на кинетику плавления.

Mahdi с соавторами [9] численно исследовали процесс плавления ТАМ в трехтрубном теплообменнике с продольными ребрами различной длины в верхней и нижней частях кольцевого пространства. Авторы установили, что использование удлиненных ребер в нижней части накопителя, где преобладает теплопроводность, и относительно коротких ребер в верхней части, где развивается естественная конвекция, позволяет значительно ускорить плавление. Предложенная конфигурация ребер обеспечила более высокую скорость плавления, чем применение наночастиц в том же объеме.

Zhang с соавторами [10] численно исследовали процесс плавления ТАМ в системах с различными конфигурациями оребрения, включая инновационную спирально-ребристую конструкцию. Авторы показали, что встраивание двухспирального ребра

позволило сократить время полного плавления на 31% по сравнению с традиционным оребрением при одинаковой площади теплопередающей поверхности. Установлено, что направление подачи теплоносителя, противоположное направлению гравитации, обеспечивает более равномерное распределение температуры.

Karami и Kamkari [11] впервые экспериментально исследовали влияние перфорированных поперечных ребер на тепловые характеристики вертикального кожухотрубного теплообменника с лауриновой кислотой в качестве ТАМ. Авторы показали, что перфорированные ребра обеспечивают примерно на 30% более высокое число Нуссельта по сравнению со сплошными ребрами за счет меньшего подавления естественно-конвективных потоков, а общее время плавления сокращается примерно на 7%. Эксперименты проводились с визуализацией процесса плавления через прозрачный корпус.

Qiu с соавторами [12] систематизировали исследования микро- и нанокompозитных ТАМ для солнечных тепловых приложений. Авторы отметили, что углеродные наночастицы демонстрируют эффект повышения теплопроводности по сравнению с традиционными металлическими наночастицами, а скелетные материалы (пенomатериалы и ребра), за счет формирования теплопроводящей сети, обеспечивают увеличение скорости плавления ТАМ, и соответственно уменьшение времени зарядки АТФП.

Veismoradi с соавторами [13] численно исследовали эффективность переноса энергии в кожухотрубном накопителе с парафином и вставками из медной пены. Авторы установили, что использование металлической пены значительно ускоряет фазовый переход по сравнению с чистым парафином, однако отметили, что применение пен увеличивает стоимость и массу аккумулятора, а также сокращает полезный объем ТАМ.

Ying с соавторами [14] численно исследовали теплоперенос при плавлении парафина в устройствах с металлической пеной, заполняющей верхнюю или нижнюю часть аккумулятора. Авторы установили, что наличие металлической пены подавляет естественную конвекцию в жидкой фазе ТАМ, что снижает его способность накапливать скрытую тепловую энергию. Предложенный авторами комплексный коэффициент эффективности позволил выбрать оптимальные конфигурации, однако отмечено, что данный метод увеличивает общую стоимость системы.

Практическая значимость оптимизации теплообменного оборудования для систем ГВС подтверждается исследованиями, выполненными в российских научных центрах. Ротов с соавторами [15] на примере действующей системы теплоснабжения показали, что приведение схем подключения установок ГВС к единому типу позволяет повысить эффективность централизованной системы теплоснабжения в целом. Звонарева и др. [16] на примере жилого квартала проанализировали влияние поэтапного внедрения автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов на эффективность системы теплоснабжения. Авторы выполнили оценку снижения теплопотребления и провели лабораторные эксперименты, подтвердив, что модернизация теплового оборудования потребителей приводит к существенному повышению энергоэффективности системы в целом.

Несмотря на значительное число публикаций по оребрению АТФП, в литературе отсутствуют однозначные рекомендации по выбору оптимального количества поперечных ребер для цилиндрической геометрии с парафиновым ТАМ в условиях, приближенных к реальной работе системы ГВС. Большинство экспериментальных работ выполнено для продольных ребер либо для фиксированного количества поперечных ребер, при этом систематические сравнительные испытания нескольких конфигураций поперечного оребрения с варьированием количества ребер в идентичных условиях на одном стенде в доступной литературе практически отсутствуют. Кроме того, в известных работах не исследован вопрос о влиянии количества поперечных ребер на соотношение между теплопроводным и конвективным механизмами теплопереноса на разных стадиях плавления, что затрудняет практическое проектирование АТФП для систем ГВС.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния разного количества поперечных ребер цилиндрического АТФП с парафином в качестве ТАМ, и нахождение оптимального количества ребер, обеспечивающих минимальное время зарядки при сохранении достаточного полезного объема. Для достижения цели проведены сравнительные испытания трех конфигураций АТФП — с 6, 8 и 10 поперечными ребрами — при фиксированных условиях, имитирующих реальный процесс зарядки от сетевого теплоносителя.

### Материалы и методы (Materials and methods)

Теплообменники для АТФП изготавливались из медной трубки наружным диаметром 10 мм с толщиной стенки 1 мм, на которую методом пайки наносились поперечные медные ребра толщиной 1 мм и радиусом 45 мм. Были изготовлены три варианта теплообменников: с 6, 8 и 10 ребрами (рис. 1). Расстояние между ребрами выбиралось равномерным по высоте теплообменника и составляло: для 6 ребер — 28–30 мм, для 8 ребер — 20–22 мм, для 10 ребер — 15–17 мм.

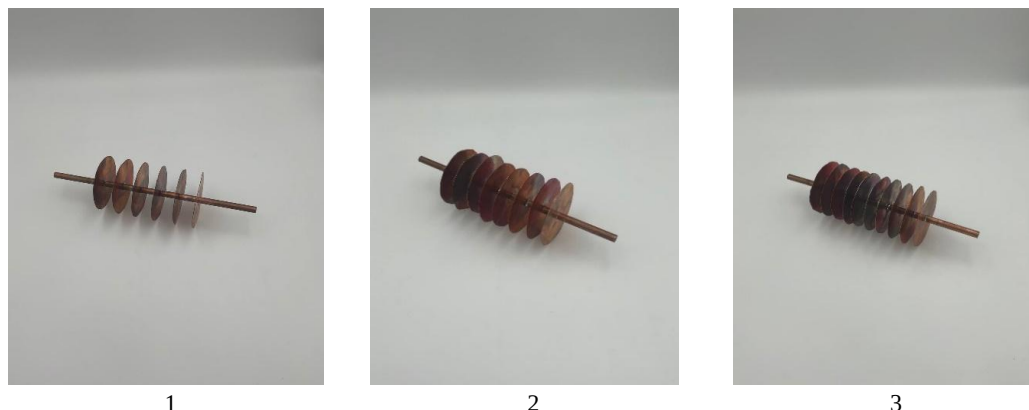


Рис.1. Медные теплообменники АТФП: 1 - 6 ребер, 2 - 8 ребер, 3 - 10 ребер  
Fig.1. PCNA copper heat exchangers: 1 - 6 fins, 2 - 8 fins, 3 - 10 fins

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исследования проводились на прозрачной модели цилиндрического АТФП, позволяющей визуально наблюдать за движением фронта плавления. Корпус аккумулятора изготовлен из поликарбонатной трубы (наружный диаметр 110 мм, толщина стенки 2 мм, длина 200 мм). Теплообменник устанавливался по центру корпуса. Готовые сборки АТФП для трех исследованных конфигураций показаны на рисунке 2. Основные геометрические параметры приведены в таблице 1.

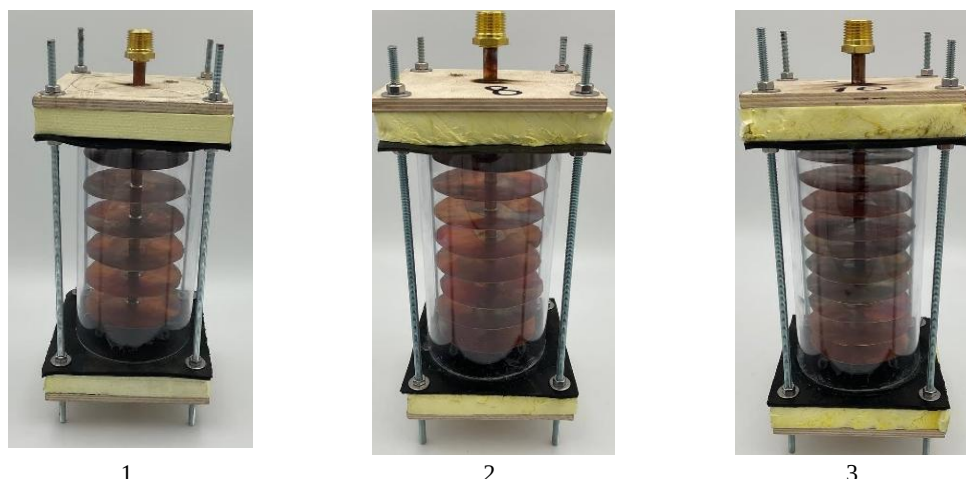


Рис. 2. Готовая сборка АТФП: 1 - 6 ребер; 2 - 8 ребер; 3 - 10 ребер  
Fig. 2. Ready-made PCNA assembly: 1 - 6 ribs; 2 - 8 ribs; 3 - 10 ribs

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 1  
Table 1

Геометрические характеристики исследуемых образцов АТФП  
Geometric characteristics of the studied PCNA samples

| Параметр                               | Обозначение      | Значение |
|----------------------------------------|------------------|----------|
| Наружный диаметр поликарбонатной трубы | D <sub>нар</sub> | 110 мм   |
| Толщина стенки трубы                   | δ <sub>ст</sub>  | 2 мм     |
| Внутренний диаметр трубы               | D <sub>вн</sub>  | 106 мм   |
| Длина трубы                            | L                | 200 мм   |

|                                                   |                      |          |
|---------------------------------------------------|----------------------|----------|
| Высота воздушной полости (компенсация расширения) | $h_{\text{пуст}}$    | 10 мм    |
| Высота парафина                                   | $h_{\text{пар}}$     | 190 мм   |
| Наружный диаметр трубки теплообменника            | $d_{\text{тр}}$      | 10 мм    |
| Толщина стенки теплообменника                     | $\delta_{\text{тр}}$ | 1 мм     |
| Материал теплообменника и ребер                   | —                    | Медь     |
| Толщина ребер                                     | $\delta_{\text{р}}$  | 1 мм     |
| Высота ребер                                      | $h_{\text{р}}$       | 45 мм    |
| Количество ребер (варианты)                       | $N$                  | 6, 8, 10 |
| Межреберное расстояние (6 ребер)                  | $s_6$                | 28–30 мм |
| Межреберное расстояние (8 ребер)                  | $s_8$                | 20–22 мм |
| Межреберное расстояние (10 ребер)                 | $s_{10}$             | 15–17 мм |

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В качестве теплоаккумулирующего материала использовался технический парафин марки П2 (температура плавления 52–58 °С, скрытая теплота плавления ~150–180 кДж/кг). Для компенсации теплового расширения в верхней части аккумулятора предусмотрена воздушная полость высотой 10 мм. Экспериментальный стенд (рис. 3) включал гидравлический контур с циркуляционным насосом, обеспечивающим расход теплоносителя 5 л/мин. В качестве теплоносителя использовалась водопроводная вода. Нагрев осуществлялся от трехфазного электродкотла до температуры 61–63 °С, что превышает температуру плавления парафина и обеспечивает необходимую движущую силу процесса зарядки. Направление потока — сверху вниз.

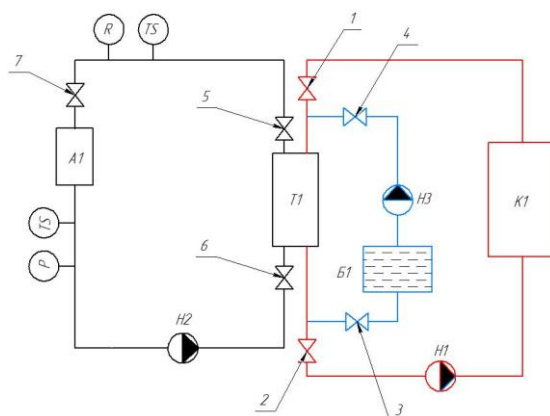


Рис. 3. Схема лабораторного стенда: K1 – электродкотел; T1 – пластинчатый теплообменник; A1 – аккумулятор тепла фазового перехода; H1, H2, H3 – циркуляционные насосы горячего, исследуемого и охлаждающего контуров соответственно; 1-7 – запорная арматура

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Регистрация процесса плавления осуществлялась методом оптической визуализации с помощью цифровой камеры Canon EOS 250D (24 Мп). Для обеспечения равномерного освещения использовался софтбокс и две светодиодные панели. Съемка велась по адаптивному графику: 0–60 мин с шагом 10 мин, 65–220 мин с шагом 5 мин (всего 39 кадров за цикл зарядки). Для каждой конфигурации проведено 4 повторных эксперимента для обеспечения статистической достоверности.

Обработка изображений выполнялась в среде MATLAB по разработанному алгоритму, учитывающему изменение оптических свойств парафина при нагреве (холодный твердый парафин имеет более темный оттенок, при нагреве светлеет, при плавлении вновь темнеет). Алгоритм включал: адаптивную гистограммную эквализацию (CLAHE), гауссову фильтрацию ( $\sigma = 1,5$ ), адаптивную пороговую бинаризацию и морфологическую очистку. Пример результата обработки приведен на рис. 4. Доля расплава определялась как отношение количества пикселей, классифицированных как расплав, к общей площади парафина. Зависимость доли расплава от времени зарядки определялась интерполяцией усредненных кинетических кривых.

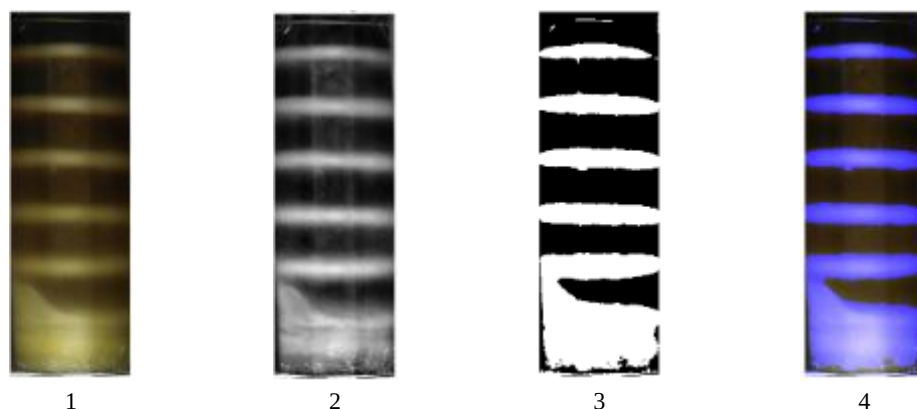
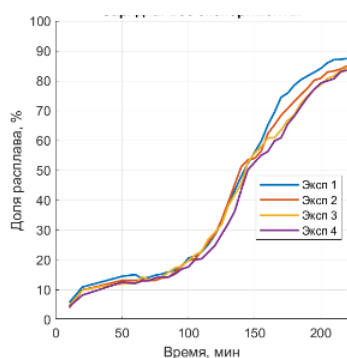


Рис.4 Этапы обработки изображения: 1 – оригинал фото; 2 – черно-белое фото с порогом седиментации 0,35; 3 – нахождение области расплавленного ТАМ; 4 – наложение на оригинал фото

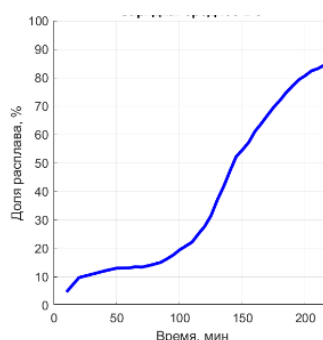
\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

### Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

На рисунке 5 представлена усредненная кинетическая кривая плавления для АТФП с 6 ребрами, построенная по результатам четырех повторных экспериментов. Разброс между экспериментами не превысил 2,5% по времени достижения 50% расплава и 9,9% по времени достижения 80% расплава (таблица 2), что свидетельствует о хорошей воспроизводимости результатов. На графиках также можно заметить немонотонный характер плавления ТАМ, что показывает изменение скорости фазового перехода в разные интервалы времени. На рисунке 6 представлена зависимость скорости плавления от времени нагрева.



1



2

Рис. 5. Кинетика плавления АТФП с 6 ребрами: 1 – результаты экспериментов; 2 – усредненная линия

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Таблица 2

Table 2

Время плавления для АТФП с 6 ребрами  
Melting time for PCNA with 6 edges

| Эксперимент    | t(50%), мин | t(80%), мин |
|----------------|-------------|-------------|
| 1              | 142,3       | 184,2       |
| 2              | 139,0       | 194,8       |
| 3              | 143,1       | 203,2       |
| 4              | 144,9       | 205,6       |
| Среднее        | 142,3       | 197,0       |
| Ст. отклонение | 2,5         | 9,9         |

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

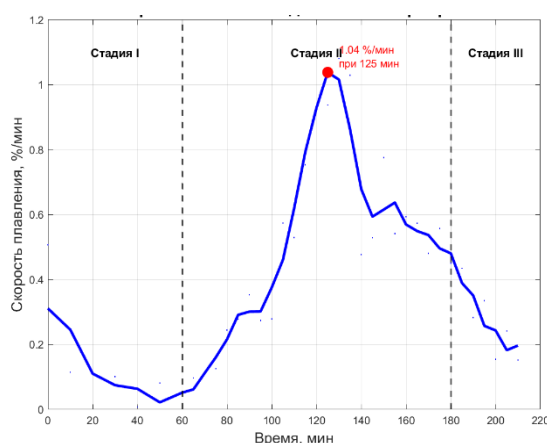


Рис. 6. Кинетика плавления АТФП с 6 ребрами: 1 - результаты экспериментов; 2 - усредненная линия

Fig. 5. Kinetics of melting of PCNA with 6 edges: 1 - experimental results; 2 - average line

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Анализ кривой позволяет выделить три характерные стадии зарядки:

- Стадия I (0–60 мин) — прогрев твердого парафина. Скорость плавления монотонно снижается от 0,3 %/мин (в интервале 0–10 мин) до 0,12 %/мин (50–60 мин). Низкая скорость обусловлена тем, что теплоперенос осуществляется преимущественно теплопроводностью через твердый материал. К 60-й минуте доля расплава достигает лишь 13,1%.

- Стадия II (60–180 мин) — интенсивное плавление. После образования достаточного объема жидкой фазы развивается естественная конвекция, которая радикально меняет характер теплопереноса. Скорость плавления возрастает с 0,09 %/мин (60 мин) до максимального значения 1,04 %/мин при  $t \approx 115\text{--}120$  мин, после чего плавно снижается до 0,51 %/мин к 180-й минуте. Средняя скорость на этой стадии составляет 0,55 %/мин. Именно на стадии II расплавляется основная часть парафина: доля расплава увеличивается с 13,1% до 72,1%.

- Стадия III (180–220 мин) — завершающая стадия. Скорость плавления продолжает монотонно снижаться с 0,55 %/мин до 0,19 %/мин. Оставшийся твердый парафин (около 15–28% объема) расположен в наименее прогреваемых зонах — нижней части аккумулятора и вблизи внешней стенки, где естественная конвекция подавлена. Теплоперенос в этих областях осуществляется преимущественно теплопроводностью, что и объясняет низкую скорость плавления на завершающем этапе.

Аналогичные эксперименты были проведены для АТФП с 8 и 10 ребрами, для сравнения эффективности конфигураций были построены кинетические кривые и графики скорости плавления. На рисунке 7 представлены усредненные кинетические кривые плавления для трех исследованных конфигураций. Временные точки  $t_{50}$  и  $t_{80}$  сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Table 3

Сравнение временных точек для различных конфигураций АТФП

Comparison of time points for different PCNA configurations

| Конфигурация | $t(50\%)$ , мин | $t(80\%)$ , мин | $\Delta t(50 \rightarrow 80)$ , мин | Скорость 50–80%, %/мин | Ускорение, % |
|--------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|------------------------|--------------|
| 6 ребер      | 143.            | 197.            | 54.3                                | 0.55                   | 0            |
| 8 ребер      | 141.            | 162.            | 20.8                                | 1.44                   | 17.7         |
| 10 ребер     | 127.            | 162             | 34.2                                | 0.88                   | 18.1         |

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Конфигурация с 10 ребрами демонстрирует наименьшее время достижения 50% расплава — 127,8 мин, что на 14,1 мин (9,9%) быстрее, чем для 8 ребер, и на 15,7 мин (10,9%) быстрее, чем для 6 ребер. Это объясняется максимальной поверхностью

теплообмена в начальный период, когда естественная конвекция еще не развита в полной мере.

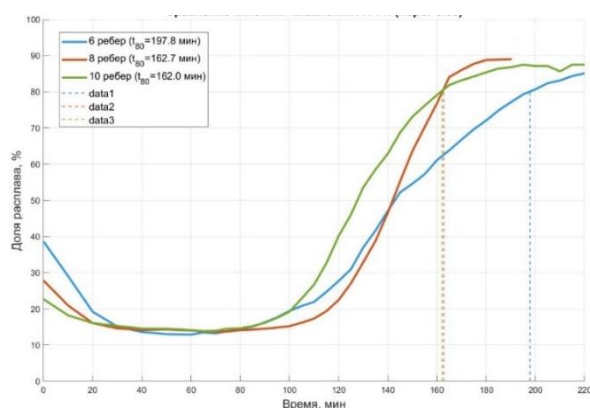


Рис. 7. Сравнение кинетики плавления для АТФП с 6, 8 и 10 ребрами: 6 ребер – синий; 8 ребер – оранжевый; 10 ребер – зеленый  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Однако на завершающей стадии (от 50% до 80% расплава) картина принципиально меняется. Конфигурация с 8 ребрами проходит этот интервал за 20,8 мин со средней скоростью 1,44 %/мин, в то время как для 10 ребер требуется 34,2 мин (скорость 0,88 %/мин), а для 6 ребер — 54,3 мин (скорость 0,55 %/мин). В результате время достижения 80% расплава для конфигураций с 8 и 10 ребрами оказывается практически одинаковым: 162,7 и 162,0 мин соответственно.

На рисунке 8 представлены кривые скорости плавления. Конфигурация с 8 ребрами демонстрирует наивысшую пиковую скорость — 1,52 %/мин, что на 46% выше, чем у 6 ребер (1,04 %/мин), и на 20% выше, чем у 10 ребер (1,27 %/мин).

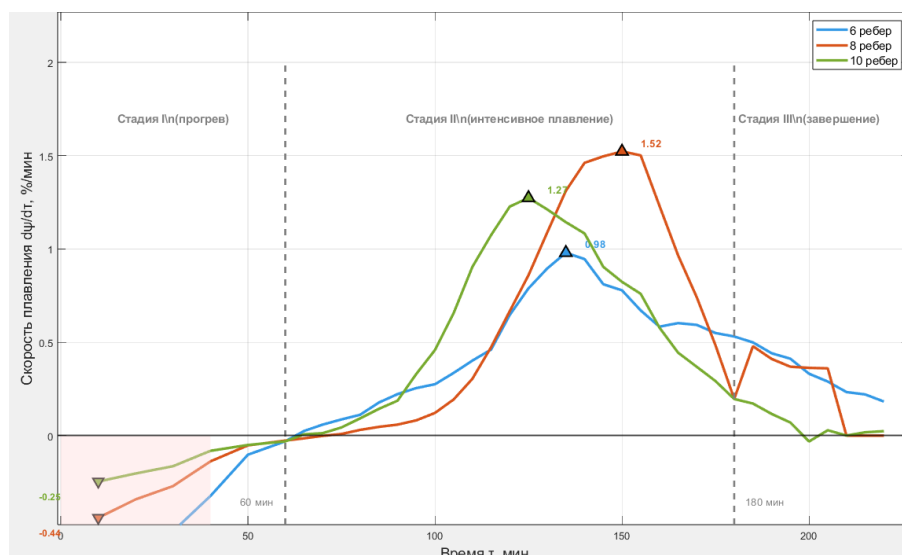


Рис. 8. - Сравнение скоростей плавления: 6, 8, и 10 ребер  
 \*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Для количественной оценки эффективности оребрения использован коэффициент интенсификации, который находится по формуле (1).

$$K = \frac{t(80\%)_{6 \text{ ребер}}}{t(80\%)_{(n) \text{ ребер}}} \quad (1)$$

Значения  $K$  составили:  $K_6 = 1,00$ ,  $K_8 = 1,22$ ,  $K_{10} = 1,22$ , что соответствует сокращению времени плавления на 18% для конфигураций с 8 и 10 ребрами по сравнению с 6 ребрами (рис. 9).

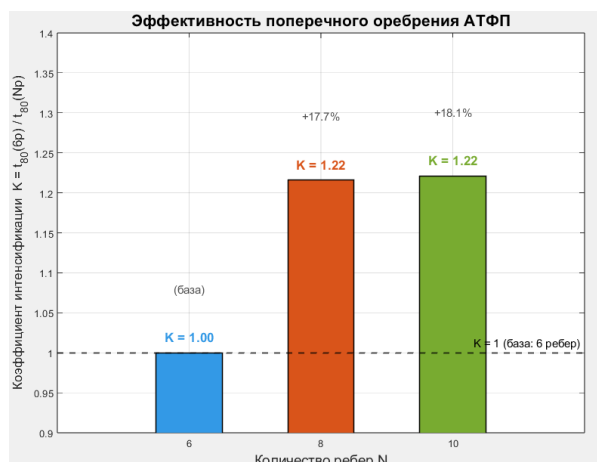


Рис. 9. – Зависимость коэффициента интенсификации от количества ребер Fig. 9. – Dependence of the intensification coefficient on the number of edges

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Однако, учитывая, что конфигурация с 8 ребрами требует на 20% меньше материала (меди), чем 10 ребер, обеспечивает больший полезный объем парафина (на 5–7%) и демонстрирует максимальную скорость плавления на завершающей стадии (1,44 %/мин против 0,88 %/мин), именно 8 ребер следует признать оптимальной конфигурацией.

Снижение эффективности при переходе от 8 к 10 ребрам объясняется частичным подавлением естественной конвекции в узких межреберных каналах. При межреберном расстоянии 15–17 мм (10 ребер) конвективные потоки ограничены, что замедляет плавление в нижней части аккумулятора. При межреберном расстоянии 20–22 мм (8 ребер) сохраняется достаточное пространство для развития устойчивых конвективных течений, обеспечивающих эффективный теплоперенос по всему объему.

Полученные результаты указывают на существование «зоны технологической нечувствительности» в диапазоне 8–10 ребер: время достижения 80% расплава практически не зависит от количества ребер, однако материалоемкость и стоимость конструкции возрастают пропорционально числу ребер. Это позволяет предположить, что межреберное расстояние является более фундаментальным параметром оптимизации, чем количество ребер само по себе. Для данной геометрии аккумулятора критическое межреберное расстояние, при котором начинается подавление естественной конвекции, составляет около 20 мм.

Качественно полученные результаты согласуются с данными других исследователей. Karami и Kamkari [11] также отметили, что перфорированные ребра эффективнее сплошных именно за счет меньшего подавления конвективных потоков. Mahdi с соавторами [9] показали, что оптимальная геометрия оребрения должна учитывать различный характер теплопереноса в верхней и нижней частях аккумулятора. Дальнейшее повышение эффективности АТФП без увеличения числа ребер может быть достигнуто за счет изменения формы ребер — например, применения перфорированных ребер, которые обеспечивают лучшее развитие конвективных течений при той же площади поверхности [11].

Следует отметить ограничения настоящего исследования. Эксперименты проводились при фиксированном расходе теплоносителя (5 л/мин) и постоянной температуре на входе (62°C). Влияние этих параметров на оптимальное количество ребер не изучалось. Кроме того, исследование ограничено одним типоразмером аккумулятора (внутренний диаметр 106 мм) и одним ТАМ (парафин П2). Масштабирование полученных результатов на аккумуляторы других размеров требует дополнительной верификации.

#### Выводы (Conclusions)

Экспериментально исследован процесс зарядки цилиндрического АТФП с парафиновым ТАМ и поперечным оребрением. Для конфигурации с 6 ребрами установлены три характерные стадии плавления: прогрев твердого парафина (0–60мин, средняя скорость 0,22 %/мин), интенсивное плавление с развитой естественной

конвекцией (60–180 мин, 0,55 %/мин) и завершающая стадия (180–220 мин, 0,26 %/мин). Время достижения 50% и 80% расплава составило 143,5 и 197,8 мин соответственно, максимальная скорость плавления — 1,04%/мин (при  $t \approx 115$ –120 мин).

Сравнительное исследование трех конфигураций (6, 8 и 10 ребер) показало немонотонный характер зависимости времени зарядки от количества ребер. Конфигурация с 10 ребрами обеспечивает наименьшее время  $t_{50}$  (127,8 мин) благодаря максимальной поверхности теплообмена, однако по времени  $t_{80}$  (162,0 мин) практически не отличается от конфигурации с 8 ребрами (162,7). Ускорение относительно 6 ребер составляет 17,7% для 8 ребер и 18,1% для 10 ребер. Конфигурация с 8 ребрами демонстрирует максимальную пиковую скорость плавления (1,52%/мин) и максимальную скорость на завершающей стадии (1,44 %/мин в интервале 50→80% расплава).

По совокупности критериев (время  $t_{80}$ , пиковая скорость плавления, материалоемкость, полезный объем) оптимальной признана конфигурация с 8 поперечными ребрами. Дальнейшее увеличение количества ребер до 10 не приводит к сокращению времени  $t_{80}$  из-за частичного подавления естественной конвекции в узких межреберных каналах (межреберное расстояние 15–17 мм). Полученные результаты могут быть использованы при проектировании цилиндрических АТФП для систем горячего водоснабжения, а также для верификации численных моделей фазопереходных аккумуляторов тепла.

### Литература

1. Faraj K., Khaled M., Faraj J., Hachem F., Castelain C. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications // *Journal of Energy Storage*. – 2021. – V. 33. – P. 101913.
2. Ram S., Prasad A.K., Hansdah D. A review on solar thermal energy storage systems using phase-change materials // *Energy Storage*. – 2024. – V. 6. – No. 1. – P. e541.
3. Kahwaji S., White M.A. Organic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: Influence of Molecular Structure on Properties // *Molecules*. – 2021. – V. 26. – No. 21. – P. 6635.
4. 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.
5. Baskakov S.A., Baskakova Y.V., Kabachkov E.N., Shibaeva V.V., Shibaev A.V. Fast Charging of a Thermal Accumulator Based on Paraffin with the Addition of 0.3 wt.% rGO // *Journal of Composites Science*. – 2023. – V. 7. – No. 5. – P. 193.
6. Feng D., Li P., Li X., Zhang Y. Multifunctional performance of carbon nanotubes in thermal energy storage materials // *Materials Today*. – 2024. – V. 75. – P. 285–308.
7. Mirahmad A., Sadrameli S.M., Mohammadi O. Beyond Thermal Conductivity: A Review of Nanofluids for Enhanced Energy Storage and Heat Transfer // *Nanomaterials*. – 2025. – V. 15. – No. 4. – P. 302.
8. Al-Mudhafar A.H.N., Nowakowski A.F., Nicolleau F.C.G.A. Enhancing the thermal performance of PCM in a shell and tube latent heat energy storage system by utilizing innovative fins // *Energy Reports*. – 2021. – V. 7. – P. 120–126.
9. Mahdi J.M., Lohrasbi S., Ganji D.D., Nsofor E.C. Accelerated melting of PCM in energy storage systems via novel configuration of fins in the triplex-tube heat exchanger // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 124. – P. 663–676.
10. Zhang S., Pu L., Xu L., Liu R., Li Y. Melting performance analysis of phase change materials in different finned thermal energy storage // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – V. 176. – P. 115425.
11. Karami R., Kamkari B. Experimental investigation of the effect of perforated fins on thermal performance enhancement of vertical shell and tube latent heat energy storage systems // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – V. 210. – P. 112679.
12. Qiu L., Ouyang Y., Feng Y., Zhang X. Review on micro/nano phase change materials for solar thermal applications // *Renewable Energy*. – 2019. – V. 140. – P. 513–538.
13. Veismoradi A., Ghalambaz M., Shirivand H., Ghalambaz M., Chamkha A.J. Study of paraffin-based composite-phase change materials for a shell and tube energy storage system: A mesh adaptation approach // *Applied Thermal Engineering*. – 2021. – V. 190. – P. 116793.
14. Ying Q., Wang H., Lichtfouse E. Numerical simulation on thermal behavior of partially filled metal foam composite phase change materials // *Applied Thermal Engineering*. – 2023. – V. 229. – P. 120573.

15. Ротов П.В., Горшков А.В., Ротова М.А. О целесообразности изменения схемы подключения установок горячего водоснабжения. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024;26(5):54-65. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-5-54-65>.

16. Звонарева Ю.Н., Ваньков Ю.В. РАБОТА СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ПОЭТАПНОМ ВНЕДРЕНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2017;19(1-2):31-40. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-1-2-31-40>.

#### Авторы публикации

**Пономарев Роман Андреевич** – ассистент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета.

**Ваньков Юрий Витальевич** – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета.

#### References

1. Faraj K., Khaled M., Faraj J., Hachem F., Castelain C. A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications // *Journal of Energy Storage*. – 2021. – V. 33. – P. 101913.
2. Ram S., Prasad A.K., Hansdah D. A review on solar thermal energy storage systems using phase-change materials // *Energy Storage*. – 2024. – V. 6. – No. 1. – P. e541.
3. Kahwaji S., White M.A. Organic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: Influence of Molecular Structure on Properties // *Molecules*. – 2021. – V. 26. – No. 21. – P. 6635.
4. 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.
5. Baskakov S.A., Baskakova Y.V., Kabachkov E.N., Shibaeva V.V., Shibaev A.V. Fast Charging of a Thermal Accumulator Based on Paraffin with the Addition of 0.3 wt.% rGO // *Journal of Composites Science*. – 2023. – V. 7. – No. 5. – P. 193.
6. Feng D., Li P., Li X., Zhang Y. Multifunctional performance of carbon nanotubes in thermal energy storage materials // *Materials Today*. – 2024. – V. 75. – P. 285–308.
7. Mirahmad A., Sadrameli S.M., Mohammadi O. Beyond Thermal Conductivity: A Review of Nanofluids for Enhanced Energy Storage and Heat Transfer // *Nanomaterials*. – 2025. – V. 15. – No. 4. – P. 302.
8. Al-Mudhafar A.H.N., Nowakowski A.F., Nicolleau F.C.G.A. Enhancing the thermal performance of PCM in a shell and tube latent heat energy storage system by utilizing innovative fins // *Energy Reports*. – 2021. – V. 7. – P. 120–126.
9. Mahdi J.M., Lohrasbi S., Ganji D.D., Nsofor E.C. Accelerated melting of PCM in energy storage systems via novel configuration of fins in the triplex-tube heat exchanger // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 124. – P. 663–676.
10. Zhang S., Pu L., Xu L., Liu R., Li Y. Melting performance analysis of phase change materials in different finned thermal energy storage // *Applied Thermal Engineering*. – 2020. – V. 176. – P. 115425.
11. Karami R., Kamkari B. Experimental investigation of the effect of perforated fins on thermal performance enhancement of vertical shell and tube latent heat energy storage systems // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – V. 210. – P. 112679.
12. Qiu L., Ouyang Y., Feng Y., Zhang X. Review on micro/nano phase change materials for solar thermal applications // *Renewable Energy*. – 2019. – V. 140. – P. 513–538.
13. Veismoradi A., Ghalambaz M., Shirivand H., Ghalambaz M., Chamkha A.J. Study of paraffin-based composite-phase change materials for a shell and tube energy storage system: A mesh adaptation approach // *Applied Thermal Engineering*. – 2021. – V. 190. – P. 116793.
14. Ying Q., Wang H., Lichtfouse E. Numerical simulation on thermal behavior of partially filled metal foam composite phase change materials // *Applied Thermal Engineering*. – 2023. – V. 229. – P. 120573.

15. Rotov P.V., Gorshkov A.V., Rotova M.A. About expediency of changing the connection diagram of hot water supply units. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024;26(5):54-65. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-5-54-65>.

16. Zvonareva J.N., Van'kov J.V. WORK OF SYSTEM OF HEAT SUPPLY AT STAGE-BY-STAGE INTRODUCTION OF THE AUTOMATED INDIVIDUAL THERMAL POINTS. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(1-2):31-40. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-1-2-31-40>.

#### **Authors of the publication**

**Roman A. Ponomarev** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Yurij. V Vankov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы*

**Получено** **19.05.2026 г.**

**Отредактировано** **29.05.2026 г.**

**Принято** **11.06.2026 г.**