

УДК 532.542, 536.24, 536.652

## ВЛИЯНИЕ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ ОРЕБРЕНИЯ НА ТЕПЛОВУЮ ЗАРЯДКУ И РАЗРЯДКУ БЛОКА ТЕРМОАККУМУЛЯТОРА

© 2022 г. L. A. Khan, M. M. Khan\*

*Capital University of Science and Technology, Islamabad, 45750, Pakistan*

*\*E-mail: mahabat83@yahoo.com*

Поступила в редакцию 06.04.2020 г.

После доработки 06.04.2020 г.

Принята к публикации 14.10.2020 г.

В работе проведены численные и экспериментальные исследования влияния ориентации ребер на тепловые характеристики горизонтального кожухотрубного накопителя скрытой теплоты, имеющего циклы зарядки и разрядки. В качестве рабочего тела, претерпевающего фазовый переход, используется стеариновая кислота, помещаемая в кольцевое пространство между кожухом и трубкой. Для анализа трех различных угловых ориентаций внешних ребер трубы адаптирован численный метод переходных процессов, регулируемых плавучестью ( $30^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ). Угол  $\theta = 90^\circ$  образует  $\lambda$ -образное ребро, в то время как угол  $\theta = 30^\circ$  дает Y-конфигурацию. Во время цикла зарядки наблюдалось значительное увеличение скорости теплопередачи для конфигурации с Y-образными ребрами из-за усиленных эффектов естественной конвекции. При 358 К конфигурация с Y-образными ребрами повысила эффективность процесса зарядки на 51%, а также увеличила общую теплоемкость накопителя на 10% по сравнению с конфигурацией с  $\lambda$ -ребрами. Накопитель с Y-образными ребрами также имеет увеличенную плотность потока тепла при зарядке и теплоотводе на 13.7 и 4.8% соответственно. Увеличение температуры рабочего тела на 7.6% повышает интенсивность зарядки и теплоотода накопителя с Y-ребрами соответственно на 80 и 12.9%. Предложены временные зависимости чисел Нуссельта от чисел Стефана и Рэлея для процессов зарядки и разрядки.

DOI: 10.31857/S0040364422020247

### ВВЕДЕНИЕ

Использование чистой и стабильной энергии имеет важное значение для решения энергетического кризиса и экологических проблем. Солнечная энергия является наиболее подходящей альтернативной природной энергией из-за ее доступности и удобства использования. Одной из наиболее эффективных систем для хранения солнечной энергии считается кожухотрубный блок хранения скрытой теплоты (КБСТ) на основе материала, претерпевающего фазовый переход, благодаря его способности сохранять высокую плотность энергии во время процесса фазового перехода в рабочем теле (РТ) [1]. КБСТ имеют разнообразные применения, такие как переключение тепловой нагрузки [2], рекуперация отработанного тепла, кондиционирование воздуха, нагрев воды, отопление зданий, охлаждение электроники, а также хранение в условиях холода [3–9].

Солнечная энергия накапливается теплоносителем, который проходит по трубке и передает тепловую энергию РТ со стороны кожуха. РТ хранит тепловую энергию как в явной, так и в скрытой форме. Сохраняемая энергия извлекается запуском теплоносителя по холодному контуру.

Однако РТ, используемые для аккумуляции тепловой энергии в КБСТ, имеют низкую теплопроводность [10], что осложняет процесс хранения и извлечения тепловой энергии. Таким образом, задача интенсификации теплопередачи важна при проектировании КБСТ. С этой целью численно и экспериментально исследовались различные методы интенсификации, такие как использование продольных, кольцевых, штифтовых ребер, внутренних и внешних ребер и локально расположенных продольных ребер [11–14]. В [15] экспериментально исследована интенсификация теплопередачи при зарядке и разрядке КБСТ концентрического трубчатого типа с использованием эритрита в качестве РТ. Процессы зарядки и разрядки КБСТ проанализированы с использованием двух практических методов повышения теплопередачи: систем с продольным и радиальным ребрением. Получено, что аккумулярующий блок с продольными ребрами увеличивает общую производительность зарядки, в то время как влияние формы ребер на процесс разрядки незначительно. Авторы [16] численно исследовали процесс разрядки вертикальный КБСТ на основе парафина с горизонтальными внутренними и внешними ребрами для кондиционирования воздуха.

Исследованы временная эволюция фронта затвердевания и влияние количества ребер на скорость затвердевания в КБСТ. Отмечена значительная роль ребер в повышении скорости теплоотдачи при разрядке. В [17] КБСТ изучается численно и экспериментально. Проанализировано влияние геометрических параметров, в том числе расстояния между кольцевыми ребрами и высоты прямоугольных ребер на зарядные характеристики. Зафиксировано сокращение времени фазового перехода на 71.5% за счет введения ребер.

В работе [18] экспериментально исследовано влияние геометрических и эксплуатационных параметров на зарядно-разрядные характеристики вертикального КБСТ. В данном исследовании проанализировано влияние продольных ребер и различных температур теплоносителя на входе на время плавления и затвердевания. Введение ребер позволило сократить время плавления на 24.12% при температуре теплоносителя на входе 85°C; время затвердевания сократилось на 43.6%. В [19] проведены экспериментальные и численные исследования системы хранения тепловой энергии с продольными ребрами. Зарядные характеристики КБСТ проанализированы для двух значений высоты ребра и числа Стефана. Результаты, полученные для фронта плавления и распределения температуры, показали, что более длинные ребра приводят к симметричному плавлению и плавному распределению температуры.

Авторы [20] работали над усовершенствованием конфигурации продольных ребер теплоаккумулятора с использованием парафина R-35 в качестве теплоносителя. Выбраны конфигурации с двумя и тремя ребрами, а углы между ребрами варьировались, чтобы получить оптимальное значение. Зафиксирована значительная роль межреберных углов в улучшении тепловых характеристик КБСТ. Авторы предложили угол наклона ребра, равный 60°, для оптимальной производительности. В [21] выполнены экспериментальные и численные исследования по ориентации концентрической трубчатой оболочки и трубчатого КБСТ. Предложена оптимальная ориентация ребра. В [22] улучшена тепловая работа кожуха и трубы КБСТ из [21] при наличии множества труб в кожухе КБСТ. Также исследовано влияние формы корпуса на характеристики КБСТ. В [23] численно исследованы зарядные характеристики КБСТ с локальным оребрением и лауриновой кислотой в качестве теплоносителя. Двумерная нестационарная модель проанализирована для локально изменяющихся углов между двумя продольными ребрами. В ходе анализа численных результатов предложен оптимальный угол между двойными ребрами. При оптимальном угле в 120° время плавления сократилось на 53.1%. В [24] экспериментально исследовано

влияние различных углов наклона КБСТ с лауриновой кислотой. Эксперименты проводились при углах 0°, 45°, 90°. В среднем время плавления для ориентаций 0° и 45° меньше на 35 и 53% соответственно по сравнению с ориентацией 90°. В [25] экспериментально исследовано влияние угла наклона на характеристики плавления и затвердевания КБСТ с теплоносителем RT-35. Угол наклона менялся последовательно в диапазоне  $\theta = 0^\circ - 90^\circ$ . Из экспериментов установлен относительно равномерный характер плавления при горизонтальной ориентации, т.е. угле 0°.

Хотя проведено множество исследований КБСТ как экспериментальных, так и численных. Однако, насколько известно авторам, роль ориентации ребер для циклов зарядки и разрядки горизонтального КБСТ, связанная с ней динамика потока, обусловленная плавучестью, и характеристики теплопередачи не рассматривались. В настоящей работе проведены численные и экспериментальные исследования трехреберного горизонтального КБСТ. Проанализированы три различные ориентации ребер КБСТ с использованием стеариновой кислоты в качестве теплоносителя. Численный метод подтвержден экспериментальным исследованием и литературными данными. Изучена физика течения РТ, вызванная переходной плавучестью, для получения детального представления о роли ориентации ребра в процессах зарядки и разрядки КБСТ. Оптимальная ориентация ребер предложена на основе увеличения максимальной тепловой мощности КБСТ, накопления тепловой энергии и скорости разрядки. Исследовано влияние изменения температуры теплоносителя на тепловую зарядку и разрядку оптимальной ориентации КБСТ. Для количественной оценки скорости передачи тепловой энергии введены два безразмерных числа. Предложены четыре корреляции этих безразмерных чисел для дальнейшей количественной оценки и прогнозирования характеристик тепловой зарядки и разрядки КБСТ при различных температурах.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

### Расчетная область и теплофизические свойства.

Расчетная область рассматривалась как двумерное поперечное сечение КБСТ (рис. 1а, 1б). Медная трубка с внутренним радиусом  $R_i = 16.05$  мм и толщиной  $t_i = 3$  мм располагалась в центре стальной оболочки с внутренним радиусом  $R_s = 60.5$  мм. На равном расстоянии друг от друга (120°) к трубке прикреплены три медных ребра радиальной длины  $l_f = 36$  мм и толщиной  $t_f = 3$  мм, как показано на рис. 1б. Стеариновая кислота (рабочее тело) помещалась в кольцевое пространство между кожухом и трубкой. Стеариновая кислота выбрана из-за нетоксичности, неагрессивности, химиче-

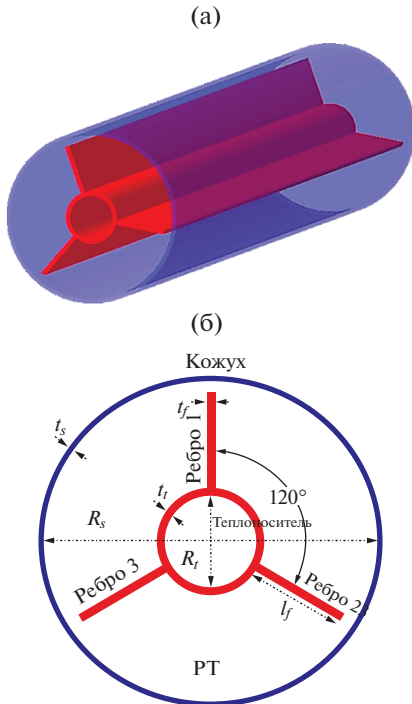


Рис. 1. Расчетная ячейка КБСТ: (а) 3D-модель, (б) 2D-модель.

ской стабильности, высокой скрытой теплоты, коммерческой доступности и экономической эффективности. О теплофизических свойствах материалов, использованных в настоящем исследовании, т.е. стеариновой кислоты, стали и меди, сообщалось в [21, 22]. На рис. 2 показаны три различные конфигурации КБСТ с учетом ориентации ребер, исследованных в данной работе. Каждый вариант ориентации связан с углом  $\theta$ , который измерялся от центральной линии ребра 1 до положительного направления оси  $x$ . Угол  $\theta$  уменьшался против часовой стрелки, чтобы изменить ориентацию ребер при сохранении фиксированного угла между ними. В случае А угол ребра к оси  $+x$  составлял  $\theta = 90^\circ$ , что дает конфигурацию  $\lambda$ -ребра. Вариант Б ( $\theta = 60^\circ$ ) дает асимметричную ориентацию ребер вдоль оси  $x$ , тогда как вариант В ( $\theta = 30^\circ$ ) соответствует Y-образной конфигурации.

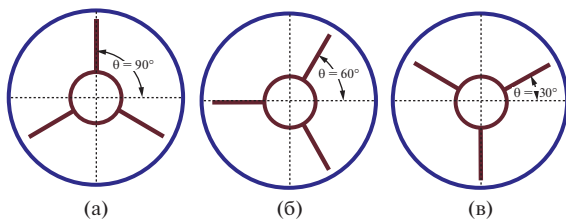


Рис. 2. Варианты конфигураций в зависимости от ориентации ребер: (а) случай А, (б) Б, (в) В.

**Предположения и допущения.** Течение жидкого РТ предполагалось ньютоновским, однородным, несжимаемым и изотропным. Теплообмен излучением был незначительным по сравнению с естественной конвекцией. Внутренняя поверхность трубы с теплоносителем рассматривалась как изотермическая, а внешняя оболочка КБСТ – адиабатическая. Граница раздела твердой и жидкой фаз РТ определялась как тонкая кашицеобразная зона из твердой и жидкой фаз. Приближение Буссинеска использовалось для моделирования изменений плотности в процессе плавления РТ, при этом в расчетах учитывалась постоянная средняя плотность. Поэтому во время фазового перехода процессом объемного расширения РТ можно было пренебречь [26]. Кроме того, недавнее исследование [27] показало очень хорошее сравнение двумерной модели постоянного объема на основе техники энтальпия–пористость для фазового изменения РТ с более сложным трехмерным моделированием VOF с объемным расширением. Поэтому в текущем исследовании использовалась двумерная вычислительная модель с постоянным объемом.

**Численное моделирование.** Формулировка в переменных энтальпия–пористость для задач фазового перехода, введенная в [28], использовалась для моделирования фазового перехода посредством единого набора основных уравнений. Уравнения неразрывности, движения и энергии для нестационарного, ламинарного, несжимаемого течения под действием сил плавучести представлены в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} &= 0, \\ \rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \\ &+ \rho \beta (T - T_l) g_i + S_{Mi}, \\ \rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i h}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_i} k \frac{\partial T}{\partial x_i}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $u$  – скорость жидкого рабочего тела,  $p$  – давление,  $\mu$  – динамическая вязкость,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\rho$  – плотность,  $k$  – теплопроводность,  $T$  и  $h$  – температура и энтальпия.

Разница плотностей, вызванная изменением температуры и гравитационным эффектом, обычно является основным фактором, определяющим конвекцию РТ. Таким образом, эффект естественной конвекции рассматривался с использованием приближения Буссинеска [29] в предположении постоянной плотности, но с учетом изменения плотности, вызванного разницей температур в слагаемом, соответствующем плавучести [30]. Использование приближения Буссинеска позволило принять постоянный объем КБСТ при со-

хранении постоянной массы РТ во время численного моделирования.

Изменение энтальпии РТ разделено на три основные стадии в зависимости от фазы РТ: 1) РТ полностью твердое, 2) РТ жидкое и твердое, 3) РТ полностью жидкое. В соответствии с данным разделением математически энтальпию можно записать так

$$h = \begin{cases} \int_{T_R}^T C_{ps} dT, & T < T_s, \\ \int_{T_R}^{T_s} C_{ps} dT + \gamma h_{\Delta}, & T_s < T < T_l, \\ \int_{T_R}^{T_s} C_{ps} dT + h_{\Delta} + \int_{T_l}^T C_{pl} dT, & T > T_l. \end{cases}$$

Здесь  $T_R$  – температура отнесения, равная 300 К;  $h_{\Delta}$  – скрытая теплота плавления, равная 0 для твердого РТ и  $L_f$  для жидкого;  $C_{ps}$ ,  $C_{pl}$  – теплоемкости твердого и жидкого РТ. Разницу  $C_p$  между твердой и жидкой стеариновой кислотой можно считать линейной, согласно [18]. Плавящаяся или жидкая фракция РТ представлена величиной  $\gamma$ , которая количественно определяет процесс фазового перехода. Доля расплава рассчитывается по соотношению

$$\gamma = \frac{h_{\Delta}}{L_f} = \begin{cases} 0, & T < T_s, \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, & T_s < T < T_l, \\ 1, & T > T_l. \end{cases} \quad (2)$$

Источниковый член в  $S_{Mi}$  в уравнении (1) учитывает изменение импульса жидкого РТ из-за естественной конвекции. Источниковое слагаемое фактически демпфирует импульс и моделируется законом Дарси [20]. Источниковый член можно рассчитать так

$$S_{Mi} = C_{Mushy} \frac{(1 - \gamma)^2}{\gamma^3 + \epsilon} u_i, \quad (3)$$

где  $C_{Mushy}$  – константа переходной зоны между жидким и твердым РТ, отвечающая за подавление скорости. Ее значения в основном меняются в диапазоне  $10^4 - 10^7$ . Чем больше  $C_{Mushy}$ , тем сильнее гасится скорость. Однако при больших значениях в решении возникают большие флуктуации. На основании детального сравнения численных и экспериментальных результатов подходящее значение константы кашеобразной зоны принято равным  $10^5$ . В уравнении (3) знаменатель содержит  $\gamma^3$ , поэтому, когда РТ полностью затвердевает ( $\gamma = 0$ ), источниковый член может стать бесконечным. Чтобы избежать этой ситуации, в знаменатель  $S_{Mi}$  добавлен коэффициент  $\epsilon = 0.001$ . Важно отметить, что влияние величины  $\epsilon$  незначительно.

**Схема дискретизации.** С помощью Ansys Fluent 19.0® выполнено моделирование несжимаемого, нестационарного двумерного ламинарного потока, движущегося под действием сил плавучести. Конвективная часть уравнений импульса и энергии решалась по схеме MUSCL третьего порядка (Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservation Laws). Схема MUSCL объединяет центрально-разностную схему и схему против ветра и, следовательно, обеспечивает лучшую пространственную точность и уменьшает числовую диффузию, что сохраняет решение стабильным для относительно большего временного шага. Для решения диффузионной части уравнения импульса использовалась центральная разностная схема второго порядка. Для временной дискретизации выбрана безусловно устойчивая неявная схема второго порядка. Критерий сходимости принят равным  $10^{-6}$ , что дало точное решение.

**Начальные и граничные условия.** Граничные условия для плавления и затвердевания для моделирования представлены в табл. 1. В процессе плавления теплоноситель поддерживался при постоянной температуре на внутренней поверхности трубы, так как перепад температуры от входа до выхода из трубы КБСТ в экспериментах был пренебрежимо мал (0.51 К). Таким образом, на

**Таблица 1.** Начальные и граничные условия

	Граничные условия	Начальные условия
Внутренняя поверхность кожуха	Теплопроводность кожуха	–
Внешняя поверхность кожуха	Адиабатическая стенка	–
Внутренняя поверхность трубы	Температура теплоносителя	–
Внешняя поверхность трубы	Двойная стенка	–
Начальная температура РТ (расплав)	300 К	300 К
Начальная температура РТ (твердого)	358 К	358 К
Начальная температура теплоносителя (расплав)	358 К	–
Начальная температура теплоносителя (твердого)	300 К	–

**Таблица 2.** Влияние размера сетки на долю расплава

Размер сетки	Доля расплава, %			
	$t = 20$ мин	$t = 40$ мин	$t = 60$ мин	$t = 70$ мин
10000	43.94	77.064	93.74	99.57
12000	43.47	75.57	91.99	99.84
15000	44.56	75.73	92.78	99.25
20000	43.57	73.98	90.875	98.81

внутренней поверхности трубы с теплоносителем обеспечивалось изотермическое граничное условие при температуре  $T_{\text{НТГ}} = 358$  К. При наличии границы между трубой с теплоносителем и РТ применялось связанное граничное условие. Соответствующая температура РТ установлена для процессов плавления и затвердевания (табл. 1). Как для плавления, так и для затвердевания теплопроводность оболочки включалась на внутренней стенке оболочки, что позволяло ей проводить тепло от РТ. Здесь важно отметить, что, даже если оболочка изолирована снаружи, проводимость оболочки все равно играет важную роль на этапе плавления. Граничное условие изолированной наружной стенки достигалось за счет наложения условия нулевого теплового потока. На внешней поверхности трубы с теплоносителем и внутренней поверхности обечайки принималось граничное условие отсутствия проскальзывания.

**Независимость от сетки и времени.** Для численного моделирования создана структурированная сетка. Проведены исследования независимости от сетки и шага по времени, чтобы устранить любые ложные эффекты разрешения сетки и временного шага. Структурированные сетки с четырьмя разрешениями – сетка 1, сетка 2, сетка 3 и сетка 4, состоящие из 10000, 12000, 15000 и 20000 расчетных ячеек соответственно, использовались для случая В. Изменение во времени доли расплава рассчитано для всех четырех сеток при трех различных временных шагах (табл. 2). Результаты показали, что между сеткой 1 и сеткой 4 наблюдалось максимальное отклонение в 4%, в то время как максимальное отклонение между сеткой 3 и сеткой 4 составляло менее 1%. Поэтому для настоящего исследования выбрана сетка 3 с разрешением 15000 расчетных ячеек. Влияние шага по времени на долю расплава исследовалось для шагов 50, 100, 200, 250 и 300 мс. Раствор оставался стабильным без каких-либо существенных изменений полного времени плавления до  $\Delta t = 200$  мс. Однако моделирование становилось неустойчивым при  $\Delta t > 250$  мс. Поэтому выбран шаг по времени  $\Delta t = 100$  мс, обеспечивающий стабильность и точность без увеличения общего времени вычислений.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка состояла из кожухотрубного накопителя скрытой теплоты, а также горячего и холодного резервуаров, как показано на рис. 3. Также в нее входили циркуляционный насос, расходомер, электронный регулятор температуры и клапаны с ручным управлением. В качестве рабочего тела использовалась стеариновая кислота, а в качестве теплоносителя – вода. Внутренняя труба для теплоносителя была расширена, чтобы обеспечить полное развитие потока на входе в КБСТ. Горячий резервуар поддерживался при постоянной температуре с помощью трех нагревательных элементов по 1500 Вт каждый. Насос мощностью 372 Вт использовался для подачи горячей воды через медную трубку с расходом 0.441 кг/с. Расход насоса определялся ротаметром. Температура КБСТ измерялась в двух разных поперечных сечениях с помощью шести термопар, расположенных на расстоянии 25 мм от корпуса между ребрами, как показано на схеме на рис. 3. Две дополнительные термопары были размещены на входе и выходе из КБСТ для измерения снижения температуры в теплоаккумуляторе.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Валидация численного метода.** Численные результаты сопоставляются с экспериментальными данными для случая А с конфигурацией  $\lambda$ -образного ребра КБСТ при температуре теплоносителя 358 К (рис. 4а). Во время моделирования в КБСТ были помещены три датчика температуры, воспроизводящие расположение термопар в экспериментальной установке, для регистрации числовых данных. Осредненные временные профили температуры и доли расплава, полученные при моделировании, хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Первоначально температура росла медленно, но линейно из-за слабых конвекционных эффектов. Экспериментальные данные для доли расплава получены с использованием уравнения (2). Доля расплава оставалась нулевой в течение первых 25 мин, так как температура была ниже температуры ликвидуса РТ в местах расположения термопар. Однако резкое повышение температуры наблюдалось как в численных, так и в экспериментальных результатах при  $t = 25$  мин из-за доминирующих эффек-

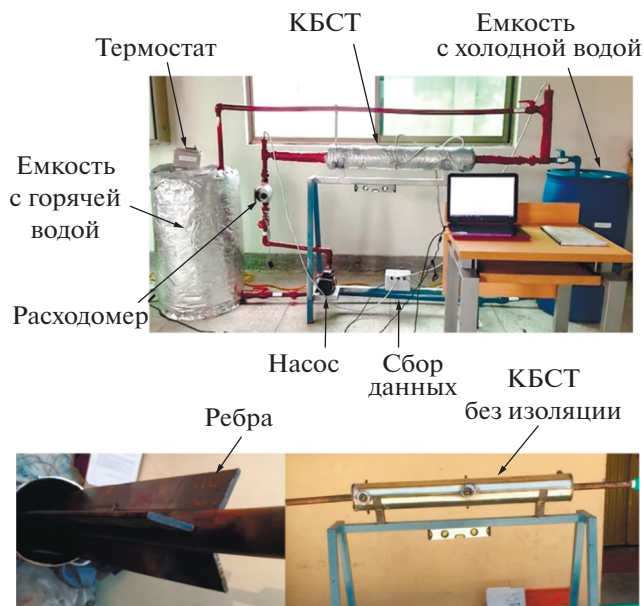


Рис. 3. Экспериментальная установка.

тов естественной конвекции в верхней половине КБСТ, которые также увеличивали скорость плавления РТ. Как только верхняя половина КБСТ достигла полного плавления, рост температуры стал линейным из-за слабых конвекционных эффектов в нижней половине КБСТ. Получено хорошее совпадение численных и экспериментальных результатов.

Профили температуры, рассчитанные во время затвердевания, сравнивались с экспериментальными и численными результатами [31] (рис. 4б). В [31] использовался горизонтальный трехтрубный аккумулятор с RT-82 в качестве рабочего тела. В начале процесса затвердевания можно было наблюдать резкое снижение температуры, но оно продолжалось недолго из-за образования твердого слоя РТ вокруг поверхности теплоносителя. После  $t > 10$  мин снижение температуры замедляется из-за доминирующего процесса теплопроводности и незначительного эффекта конвекции. Настоящие результаты хорошо согласуются с результатами [31].

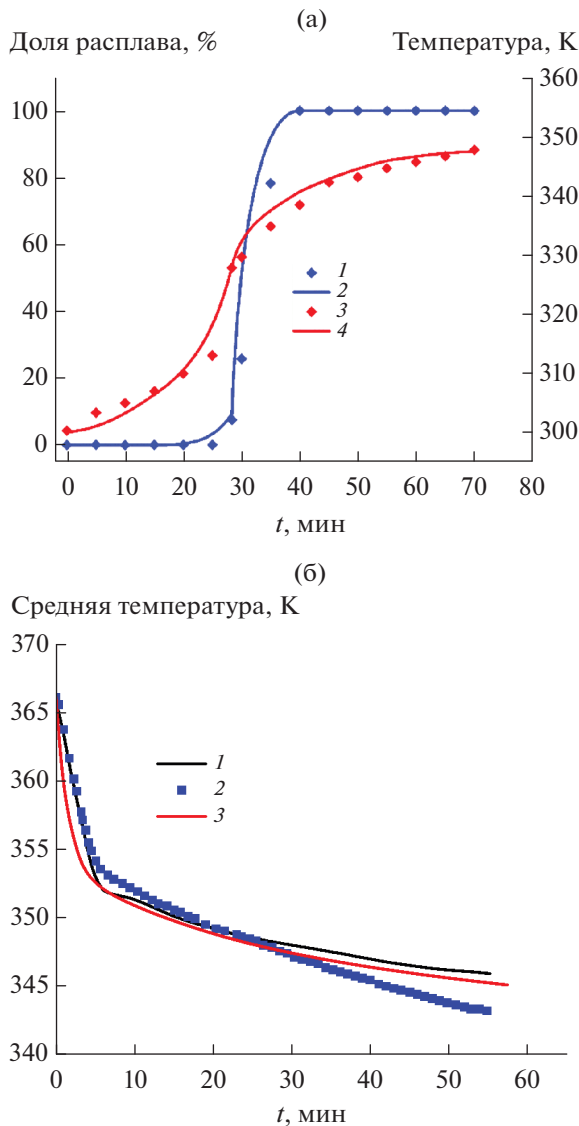
**Изменение доли расплава во времени и распределение температуры РТ в ходе зарядки и разрядки КБСТ.** Процесс зарядки КБСТ включал накопление доступной тепловой энергии в РТ в виде явной и скрытой тепловой энергии. В экспериментах передача тепловой энергии от теплоносителя к РТ осуществлялась путем пропускания контура с горячей водой во внутреннюю трубу КБСТ. Аналогично, технологическое тепло, запасенное в РТ, отбиралось через контур с холодной водой во внутреннюю трубу КБСТ. Для критического анализа исследованы изменения во времени раз-

личных параметров, связанных с производительностью КБСТ.

Изменение средней доли расплава  $\bar{\gamma}$  для трех различных конфигураций ребер представлено на рис. 5а для процессов зарядки и разрядки. Изменение доли расплава оставалось примерно одинаковым во всех трех случаях при  $t < 5$  мин, так как теплоперенос происходил в основном за счет теплопроводности, а естественная конвекция была слабой. Небольшое изменение наблюдалось через 5 мин, существенное изменение доли расплава происходило через 20 мин, когда  $\bar{\gamma} > 40\%$  во всех случаях. На этом этапе конвекция стала доминирующей, что значительно увеличило скорость теплопередачи, и ориентация ребер стала играть более заметную роль. На 20-й минуте для случая В  $\bar{\gamma} = 43\%$ , тогда как для случаев Б и А  $\bar{\gamma} = 38.1\%$  и  $41\%$  соответственно. Полное плавление ( $\gamma = 100\%$ ) было достигнуто в случае В при  $t = 83.33$  мин, в то время как в случаях А и Б удалось достичь только  $\bar{\gamma} = 86$  и  $94\%$ . Так, можно сделать вывод, что при  $t = 83.33$  мин КБСТ с ориентацией  $\lambda$  ребра имеет дефицит энергии  $14\%$  по сравнению с КБСТ с ориентацией ребра  $\Upsilon$ . Это также можно наблюдать по затвердеванию, так как в случае В выделение энергии самое медленное из-за ее большого накопления. Точно так же изменение средней температуры РТ  $\bar{T}$  во времени в процессах зарядки и разрядки представлено на рис. 5б. Первоначально повышение средней температуры во время зарядки происходило линейно и равномерно для всех случаев за счет сильной естественной конвекции в верхней области КБСТ. Однако отклонение профилей средней температуры во всех трех случаях начало проявляться после  $t = 40$  мин. Изменение средней температуры обусловлено приближением границы зоны плавления к нижней секции КБСТ. В нижней секции КБСТ фронт плавления перемещается против направления распространения естественной конвекции и, следовательно, прочность поверхности плавления становится важной. При  $t = 83.33$  мин средняя температура в случае В  $\bar{T} = 356.2$  К явно намного выше, чем в случаях А ( $351$  К) и Б ( $354.1$  К). Таким образом,  $\Upsilon$ -образная ориентация обеспечивает максимальную скорость зарядки –  $1.38$  ч, а средняя температура близка температуре теплоносителя ( $358$  К).

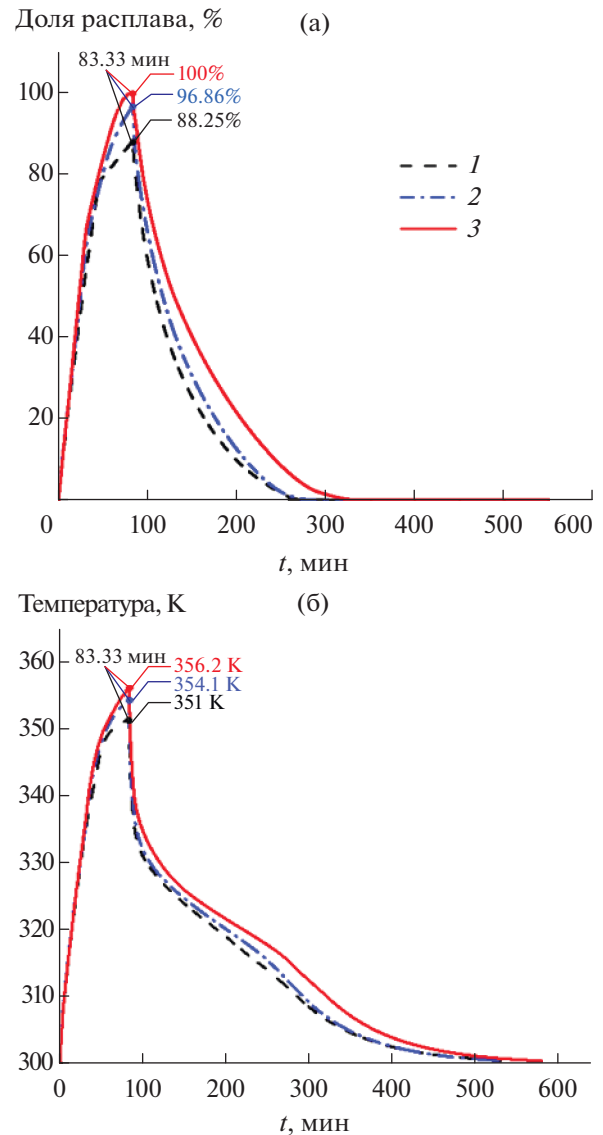
Зарядка КБСТ завершается с  $\Upsilon$ -образной ориентацией ребра (вариант В) при  $t = 83.33$  мин. Данное значение используется в качестве контрольного времени для процесса разрядки (процесса затвердевания). Процесс затвердевания моделируется обеспечением температуры теплоносителя на уровне  $300$  К для всех трех случаев из соответствующих условий при  $t = 83.33$  мин. Следует помнить, что доля расплава РТ приближается к  $0\%$  при температуре солидуса РТ  $T_s = 327$  К, после





**Рис. 4.** Сравнение результатов численного метода с (а) экспериментальными данными для процесса зарядки с  $\lambda$ -конфигурацией: 1 – доля расплава, эксперимент; 2 – доля расплава, расчет; 3 – температура, эксперимент; 4 – температура, расчет; и (б) литературными данными для процесса теплоотвода: 1 – расчет [13], 2 – эксперимент [13], 3 – расчет, данная работа.

чего оставшаяся энергия КБСТ будет ощутимой. Таким образом, процесс разрядки КБСТ также включает три основных этапа извлечения энергии: полностью конвекционная фаза, конвекционно-теплопроводностная фаза и фаза чистой теплопроводности. Почти мгновенное уменьшение средней доли расплава и средней температуры для всех случаев видно на рис. 5 из-за очень большой разницы температур. Поэтому сильная конвекция в начале процесса затвердевания приводит к резкому понижению температуры. Одна-



**Рис. 5.** Сравнение зависимостей доли расплава (а) и зависимостей температуры (б) для трех случаев: 1 – случай А, 2 – Б, 3 – В.

ко впоследствии начинает преобладать теплопроводность, что замедляет снижение  $\bar{\gamma}$  и  $\bar{T}$ . Общая тенденция во всех трех случаях была одинаковой, но ожидаемо в случае В потребовалось больше времени, чтобы достичь  $\bar{\gamma} \cong 0$ , так как в этом случае температура больше, чем в двух других. Тем не менее средняя температура достигла температуры теплоносителя почти за то же время, поскольку при застывании преобладает теплопроводность.

Линии фронтов плавления и затвердевания для всех случаев представлены на рис. 6. Ребра пронумерованы как 1, 2 и 3. Влияние естественной конвекции в ходе плавления можно наблюдать с самого начала. Плаучесть вызвала быстрый рост температуры РТ в верхней части КБСТ, что уве-

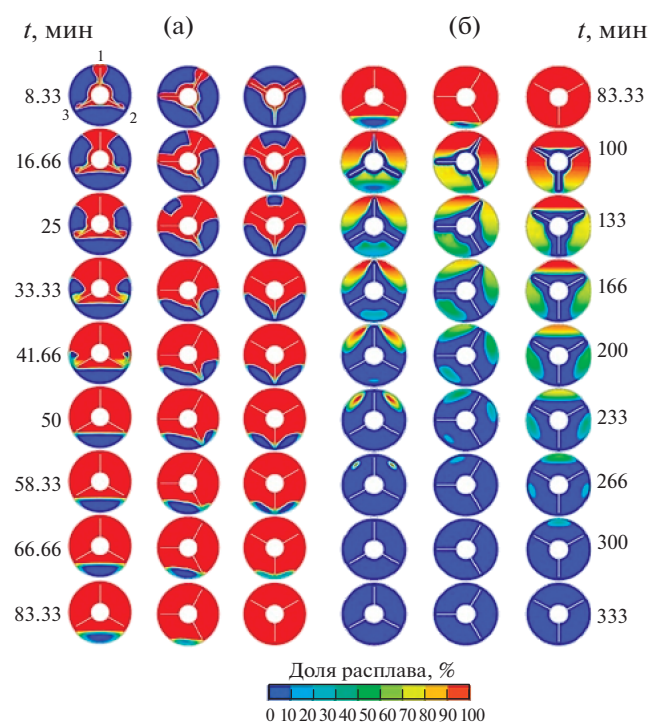


Рис. 6. Контуры плавления (а) и затвердевания (б).

лично скорость плавления во всех случаях. Тем не менее расположение Y-образных ребер в случае В демонстрирует самое быстрое плавление в верхней части КБСТ. При  $t = 25$  мин в случае В было достигнуто полное расплавление в верхней секции из-за обширного влияния естественной конвекции. В случае А ориентация  $\lambda$  ребра задержала РТ между ребрами 2 и 3, где образовалась горячая застойная зона жидкого РТ, как показано на рис. 6. Более низкая теплопроводность РТ и неблагоприятное движение фронта плавления относительно сил плавучести вызвало снижение скорости плавления в нижней части КБСТ после  $t = 45$  мин во всех случаях.

Однако сильная конвекция в случае В привела к более быстрой зарядке. Процесс затвердевания, как показано на рис. 6, демонстрирует быстрое замораживание РТ первоначально для всех трех случаев из-за сильной естественной конвекции. Тем не менее поверхности теплообмена были быстро поглощены твердым РТ, и следовательно, теплопроводность стала доминирующей в процессе разрядки. Таким образом, процесс разрядки идет намного медленнее по сравнению с плавлением. Полное затвердевание для всех трех ориентаций КБСТ достигается почти за одно и то же время, что говорит о большей эффективности процесса теплопередачи в случае В, потому как в начале процесса разрядки он был полностью заряжен в отличие от других случаев, при которых зарядка была частичной.

**Характеристики потока при фазовом переходе РТ.** Полное понимание физики течения, связанного с плавлением и затвердеванием РТ, требует глубокого исследования. На рис. 7 представлены линии тока и скорости для случаев А, Б, В. В начале, когда стали возникать эффекты конвекции, в случае А при  $t = 8.33$  мин из-за плавучести образовалась пара вихрей в форме короны в верхней области вокруг ребра 1. Небольшая пара вихрей также видна на кончике ребра 1, который расширился вместе с вихрем в форме короны. Несколько небольших вихрей образовывались в верхней части трубы с теплоносителем в районе ребра 1. Небольшие вихри обеспечивали непрерывный импульс фронту плавления РТ вокруг ребра 1. Если бы не было ребра, разница плотностей жидкого РТ могла бы создать плавучий шлейф на верхней поверхности трубы с теплоносителем. Температура РТ быстро повышалась из-за усиленного конвективного теплообмена, обусловленного совмещением вихрей в верхней области трубы с теплоносителем и ребра 1. В нижнем сечении наблюдалась высокотемпературная зона за счет ребер 2 и ребра 3, которая также способствовала плавлению РТ. График линий тока в случае А показывает, что РТ вокруг внутренней поверхности ребер 2 и 3 захватывается, и образуется лужа жидкого РТ. Температура захваченного РТ увеличилась, что привело к формированию масштабной рециркуляции в нижней половине КБСТ с ориентацией ребра  $\lambda$ . Большие вихри жидкого РТ в нижней части остановили движение фронта плавления. Таким образом, конвекционные эффекты в нижней области уменьшались, а теплообмен подавлялся. При  $t = 25$  мин фронт плавления взаимодействовал с крупными вихрями вокруг ребра 1, образованными комбинацией вихрей, которые были устойчивы по обе стороны от ребра. В ходе процесса движение фронта плавления на поверхности ребра 2 и ребра 3 замедлилось, и поверхность плавления двигалась вниз. Жидкий РТ перемещался вниз без каких-либо возмущений в верхней половине  $\lambda$ -ребра КБСТ. Однако при  $t = 41.66$  мин обнаружены большие возмущения, образующиеся, когда фронт плавления достигает зоны рециркуляции в верхней части ребер 2 и 3. Из-за этого скорость фронта таяния стала незначительной, а конвекционные эффекты уменьшились, и после этого импульс фронта таяния терялся. Также отмечено, что, поскольку не было больше вихрей в верхней части, чтобы обеспечить импульс, необходимый для фронта плавления в нижней части. По этой причине скорость плавления особенно замедлялась в нижних сечениях  $\lambda$ -ребра КБСТ.

Линии тока в случае В сильно отличались от случая А. При  $t = 8.33$  мин в верхнем сечении на верхней поверхности ребер 1 и 3 образовалось множество мелких пар вихрей и над трубой с теплоносителем появилась относительно более крупная



вихревая пара. Образовался симметричный фронт плавления между нижней поверхностью ребер 1 и 3. Фронт плавления в случае В увеличился значительно по мере усиления вихрей в верхней секции. Сильные вихри в верхней части Y-образного ребра действуют как источник импульса для плавления в нижней части. Следует отметить, что крупные вихри РТ в верхней части КБСТ также взаимодействовали с оболочкой и за счет термодиффузии внутри оболочки тепло передавалось в нижнюю часть КБСТ. Именно поэтому по сравнению с другими случаями фронт плавления Y-образной ориентации ребер сохранял импульс. В случае Б фронт плавления был асимметричным в верхней части из-за асимметричного расположения ребер. Первоначально в верхней части ребра 3 образовались три небольших вихря. При  $t = 25$  мин наблюдался рост вихрей вокруг ребра и трубы с теплоносителем. Расплавленный РТ между ребрами 2 и 3 содержал большие вихри по сравнению со случаем А, но не такие энергичные, как в случае В.

Для сравнения режимов потока проанализирован процесс выгрузки из полностью расплавленного РТ для всех случаев. В случае В крупные вихри появлялись сразу в верхней и нижней секциях КБСТ, а в случае А небольшие вихри появлялись в нижней секции. Вихри в нижней части образовывались из-за разницы температур между жидким и затвердевшим РТ вокруг холодных поверхностей. Фронт затвердевания РТ перемещался вниз и заменял жидкий РТ, что увеличивало интенсивность вихрей на нижней стороне. Первый моментальный снимок затвердевания показал, что РТ очень быстро затвердел вокруг трубы с теплоносителем, что прервало прямой контакт жидкого РТ с поверхностями теплопередачи. Теплоотдача от поверхности РТ стала только кондуктивной. Однако конвекция имела место между зонами рециркуляции жидкого и твердого РТ, но теплопередача была значительно снижена. Поэтому во всех случаях процесс разрядки занимал гораздо больше времени, чем процесс зарядки.

**Скорость накопления тепловой энергии.** Скорость накопления энергии и энергоемкость можно назвать наиболее важными характеристиками конструкции КБСТ. Энергия, накопленная в РТ, представляет собой комбинацию накопления явной энергии во время повышения температуры в твердом состоянии РТ, скрытой энергии во время процесса фазового перехода РТ и снова накопления явной энергии во время повышения температуры жидкого РТ (рис. 8). Отмечено, что во время процесса накопления энергии изначально скорость накопления энергии высока из-за большого температурного градиента между трубкой теплоносителя и РТ. В течение интервала  $5 < t < 20$  мин отмечается постоянная скорость теплопередачи 1.2 кВт для Y-образного КБСТ (вариант В), в то время как для случаев А и Б ско-

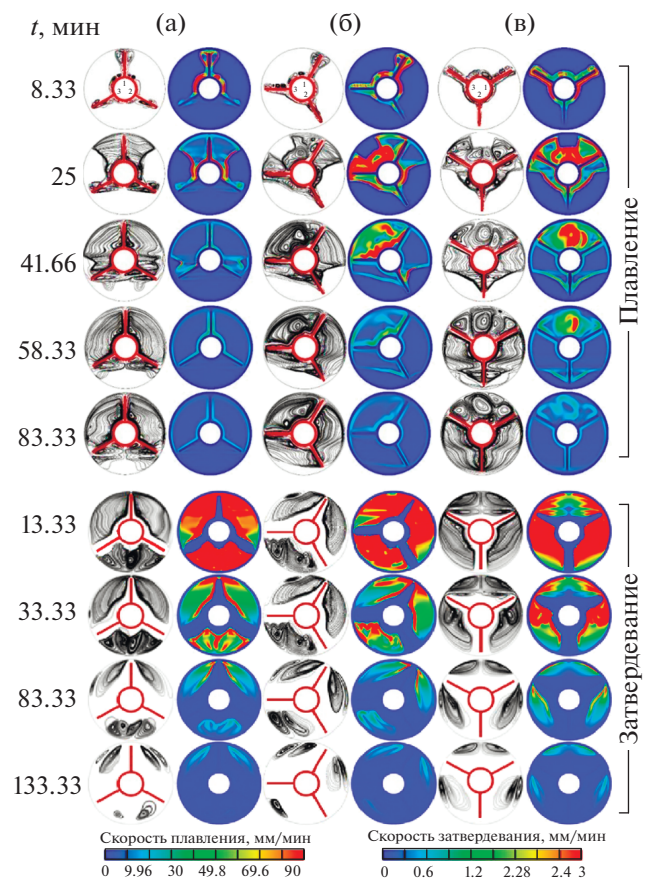


Рис. 7. Линии тока и поля скоростей для трех случаев: (а) случай А, (б) Б, (в) В.

рость накопления тепла линейно уменьшалась от 1.2 до  $\sim 0.95$  кВт и до 1.05 кВт соответственно. Как объяснялось ранее, ориентация Y-образных ребер создает большие вихри в верхней части, которые поддерживали скорость накопления тепловой энергии. Однако по мере того, как плавление РТ в верхней половине приближается к завершению, скорость накопления энергии линейно уменьшается. После  $t = 25$  мин скорость накопления энергии резко снизилась, так как градиенты температуры в верхней части уменьшились. Скорость аккумуляции энергии при  $t > 50$  мин для вариантов Б и В линейно уменьшалась с 0.5 до 0.125 кВт по мере продвижения фронта плавления к нижней половине нижней секции КБСТ. Скорость аккумуляции тепловой энергии в случае А после  $t = 45$  мин сразу же снизилась с 0.5 до 0.125 кВт и впоследствии оставалась постоянной. Причиной такого поведения является слабая конвекция в нижней части  $\lambda$ -ребра КБСТ.

Скорость отбора тепловой энергии КБСТ представлена на рис. 8б и демонстрирует совершенно другую тенденцию по сравнению со скоростью накопления тепловой энергии. Первоначально наблюдался резкий спад из-за наличия конвек-

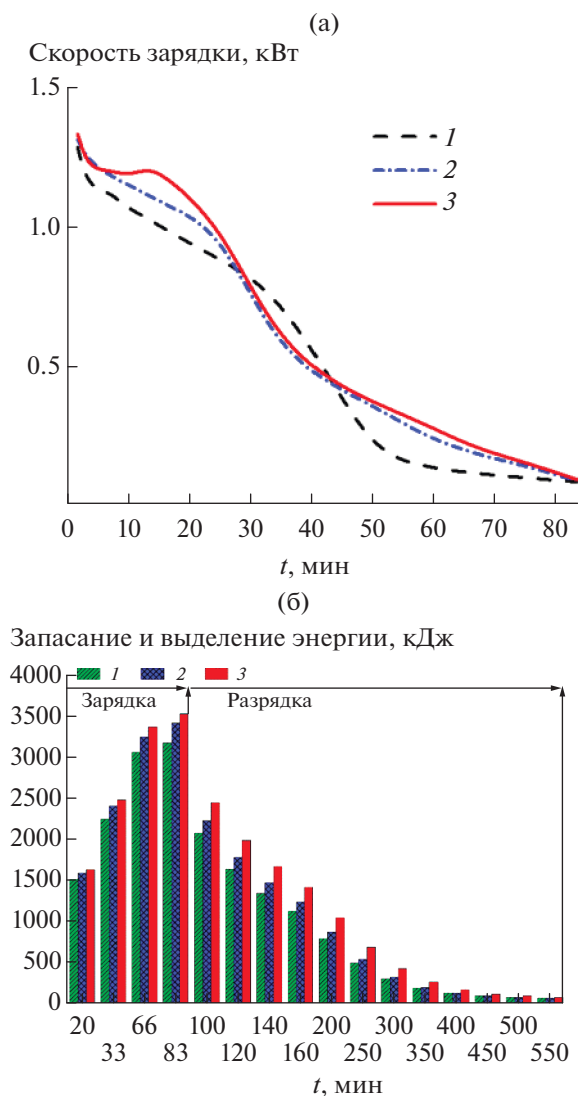


Рис. 8. Мощность (а) и полная запасенная и выделенная тепловая энергия (б): 1 – случай А, 2 – Б, 3 – В.

ционного теплообмена. Скорость отбора тепла снизилась с 2 до 0.3 кВт за первые 15 мин. Поскольку РТ затвердевает вокруг трубы, тепло передается от РТ к трубе теплоносителя в основном за счет теплопроводности. Однако внутри РТ присутствует эффект конвекции из-за зон рециркуляции в верхней и нижней части КБСТ. Эти зоны рециркуляции образовались из-за резкого градиента температуры вокруг теплообменных поверхностей. После  $t > 50$  мин наблюдалось более интенсивное извлечение тепловой энергии в случае В на протяжении всего процесса разрядки.

Временное хранение и извлечение энергии показано на рис. 8б для всех случаев. Во время цикла зарядки в случае В достигается максимальная скорость накопления энергии. Таким образом, энергоемкость КБСТ увеличивается за счет ориентации

У-образных ребер, поскольку в таком случае сохраняется наибольшее количество энергии на всех временных шагах. При  $t = 83.33$  мин (время завершения плавления КБСТ с У-образными ребрами) общая накопленная энергия составила 3518 кДж, в то время как в случае Б накоплено 3403 кДж, а в случае А только 3163 кДж. Энергоемкость в случае В была на 4.2 и 10% больше, чем в случае Б и случае А соответственно.

Процесс разрядки начался после  $t = 83.33$  мин и осуществлялся в три этапа, которые включали конвекционный, конвекционно-кондуктивный и кондуктивный процессы. От  $t = 83.33$  до  $t = 100$  мин резкое снижение энергии показывает в общей сложности 30% ее извлечения. Резкое снижение произошло из-за сильной конвекции вокруг трубы теплоносителя из-за большого градиента температуры. Впоследствии процесс отбора энергии стал линейным при конвекционно-кондуктивном теплообмене. Твердое РТ вокруг трубки и ребер теплоносителя позволяло осуществлять только кондуктивный теплообмен, но вихри в жидком РТ способствовали конвекции на границе раздела жидкого и твердого РТ. После  $t = 350$  мин отвод тепла значительно замедлился из-за процесса, в основном обусловленного теплопроводностью, поскольку эффектами конвекции можно было пренебречь. Среди всех трех вариантов случай В показал наибольшее количество энергии для одного цикла хранения и извлечения энергии. При ориентации У-ребер КБСТ накапливал и отдавал наибольшее количество энергии во время цикла зарядки–разрядки по сравнению с другими ориентациями ребер.

**Коэффициент интенсификации работы в цикле зарядки–теплоотвода.** Коэффициент повышения производительности во времени  $P_e$  КБСТ использовался для количественной оценки эффекта ориентации ребер во время цикла зарядки и разрядки. Он определялся как разница средней скорости накопления или извлечения тепловой энергии для любого конкретного случая и случая А, деленная на общую среднюю скорость накопления или извлечения тепловой энергии  $\bar{E}_A$ :

$$P_e = \frac{\bar{E}_i(t) - \bar{E}_A(t)}{\bar{E}_A} \times 100\%. \quad (4)$$

Коэффициент повышения производительности увеличивается для случая с более высокой скоростью накопления или извлечения энергии по сравнению со случаем А и наоборот. Во время цикла заряда  $P_e$  при  $t < 10$  мин оставался одинаковым для всех случаев, поскольку теплопередача происходила в основном за счет процесса теплопроводности, а эффект плавучести был незначительным. Однако при  $t > 10$  мин в жидком РТ развились сильные эффекты плавучести, и конвекция стала доминирующим видом теплообмена.

На этом этапе влияние ориентации ребер на скорость плавления РТ также стало значительным, как видно на рис. 9а. Процентное увеличение коэффициента повышения производительности показало непрерывное увеличение доли плавления для случаев Б и В до тех пор, пока не появился первый пик примерно при  $t = 18$  мин. Отмечено, что  $P_e$  на первом пике составляет 11% и 19.4% для случаев Б и В. Однако впоследствии для обоих случаев наблюдалось снижение  $P_e$ , что связано с завершением плавления РТ в верхних частях в случаях Б и В, тогда как для случая А плавление продолжалось. Следовательно, скорость накопления тепла для случаев Б и В падала по сравнению со случаем А. Но этот эффект был мгновенным, и коэффициент повышения производительности для случаев Б и В снова увеличился. Второй пик наблюдался при  $t \approx 60$  мин, когда плавление РТ приближалось к завершению в нижней части КБСТ. Максимальное значение  $P_e$ , равное 108%, было достигнуто в случае В и 77% для случая Б. Более высокий коэффициент повышения производительности приводит к общему сокращению времени зарядки. По сравнению со случаем А сокращение времени плавления в случаях Б и В составило 37 и 50.7% соответственно. Изменения во времени зарядки подтверждают влияние геометрии ребер в процессе зарядки и разрядки КБСТ.

Графики тепловых характеристик КБСТ в процессе разрядки на рис. 9б показывают, что первоначально  $P_e$  немного уменьшилось для обоих случаев по сравнению с эталонным случаем (А). Однако в случае В  $P_e$  значительно увеличился через 100 мин до значения 30%. Таким образом, из этих результатов можно сделать вывод, что Y-образные ребра значительно улучшают тепловые характеристики КБСТ.

Далее оценены средние характеристики зарядки и разрядки для ориентаций Y и  $\lambda$ . Дефицит энергии для  $\lambda$ -ребра составил 355 кДж, когда для Y КБСТ был полностью заряжен. Общее время, затраченное Y-ребрами, составило 83.33 мин, что дало прирост мощности 71.1 Вт. Полный процесс затвердевания в обоих случаях занял 466.67 мин и с Y-образными ребрами увеличил мощность на 12.67 Вт по сравнению с  $\lambda$ -ребрами. Затем процентное улучшение Y-образного КБСТ в процессе зарядки и разрядки было рассчитано путем сравнения полученных показателей энергии со средними показателями энергии для  $\lambda$ -ребер. Среднее накопление энергии и скорость разряда КБСТ с  $\lambda$ -ребрами составили 519 и 264.52 Вт. Таким образом, среднее улучшение производительности КБСТ с Y-ребрами составило 13.7% в процессе зарядки и 4.8% в процессе разрядки.

**Влияние температуры рабочего тела на накопление и отдачу энергии.** Характеристики теплопередачи в процессе хранения и извлечения энергии ис-

следованы для ориентации Y-ребер при различных температурах теплоносителя:  $340 \leq T_{HTF} \leq 368$  К. Скорость накопления энергии показала линейную зависимость с увеличением температуры теплоносителя, а также скорость разрядки для тех же температур. Однако интересно, что средняя скорость разрядки лишь незначительно зависит от температуры теплоносителя. Средняя скорость заряда увеличилась с 0.2 до 1 кВт исследованном диапазоне, но скорость разряда увеличилась только с 0.213 до 0.243 кВт. Обнаружено, что процесс плавления, как обсуждалось ранее, сильно зависит от конвекционного теплообмена, который, в свою очередь, зависит от температуры теплоносителя и ориентации ребер. Средняя скорость хранения увеличилась на 80% при изменении температуры теплоносителя всего на 7.6%, в то время как средняя скорость накопления энергии увеличилась только на 12.4%.

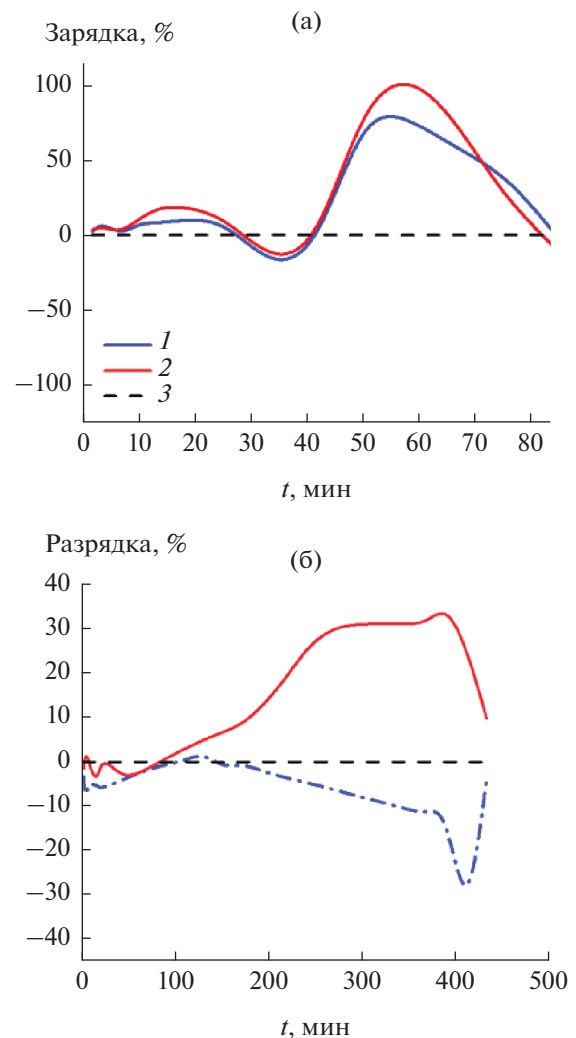


Рис. 9. Коэффициент интенсификации плавления и застывания: 1 – случай А, 2 – Б, 3 – В.

**Влияние температуры рабочего тела на характеристики теплообмена РТ.** Поскольку скорости зарядки и разрядки КБСТ зависят от конвекционной и кондуктивной теплопередачи, для дальнейшего понимания влияния температуры теплоносителя на характеристики теплопередачи введены числа Нуссельта  $Nu$ , Стефана  $Ste$  и Рэлея  $Ra$ .  $Nu$  определяется как отношение конвективной теплопередачи к кондуктивной,  $Ste$  как отношение явной теплоты к скрытой, а  $Ra$  как отношение сил плавучести к силам вязкости. Математически данные отношения можно записать так

$$\begin{aligned} Nu &= \frac{h_c D_t}{k_{PCM}}, \quad Ste = \frac{Cp_l (T_{HTF} - T_l)}{L_f}, \\ Ra &= \frac{g\beta (T_{HTF} - T_l) D_t^3}{\nu_l (a_{th})_l}. \end{aligned} \quad (5)$$

Изменения  $Ste$  и  $Ra$  для разных температур теплоносителя ( $348 \leq T_{HTF} \leq 368$  К) показаны в табл. 3. Исследованы широкие диапазоны чисел Стефана ( $0.038 \leq Ste \leq 0.395$ ) и Рэлея ( $1.29 \times 10^6 \leq Ra \leq 1.34 \times 10^7$ ) при изменении температуры теплоносителя для Y-ребер.

На рис. 10а видно, что нелинейное уменьшение времени завершения плавления РТ произошло за счет увеличения числа Стефана. Первоначально для меньшего числа Стефана время плавления было очень большим из-за меньшего температурного градиента между теплоносителем и РТ. Однако при увеличении  $Ste$  градиент температуры также увеличился, что привело к резкому нелинейному уменьшению времени плавления. Скорость плавления замедлялась при

$Ste > 0.140$ , потому что с увеличением  $Ste$  конвекционный поток в верхней части КБСТ также увеличился, однако скорость плавления в нижней части не растет, потому как фронт плавления движется против сил плавучести. В течение зарядки увеличение числа Стефана немного увеличило время затвердевания  $t_S$ . Скорость теплопередачи во время затвердевания зависела от конвекции и теплопроводности. Первоначально во время затвердевания наблюдались сильные конвекционные эффекты, но позже эффекты конвекции ослабевали. Таким образом, для разных чисел Стефана наблюдалось существенное увеличение разницы времен плавления и затвердевания.

Для дальнейшего исследования были изучены скорости теплообмена для процессов плавления и затвердевания в зависимости от среднего числа Нуссельта  $\overline{Nu}$ . Значения  $\overline{Nu}$  определяются по средней скорости накопления или извлечения энергии  $\overline{Q}_E$  так

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h_c} D_t}{k_{PCM}} = \frac{\overline{Q}_E}{\pi k_{PCM} |T_{HTF} - T_{PCM}|}.$$

Значения  $\overline{Nu}$  при разных  $Ra$  при плавлении и застывании даны в табл. 3. Первоначально при плавлении, аналогично времени завершения плавления,  $\overline{Nu}$  также резко возрастает, но после  $Ra > 4.74 \times 10^6$  меняется почти линейно. Число Нуссельта для процесса разрядки уменьшалось при больших значениях  $Ra$ . Причина такого поведения заключается в слабых эффектах естественной конвекции, поскольку скорость отбора энергии увеличивалась гораздо медленнее по сравнению

**Таблица 3.** Время плавления/затвердевания и числа Нуссельта при различных температурах рабочего тела

$T_{PT}$ , К	Ste	Время, мин			Ra	$\overline{Nu}_M$	$\overline{Nu}_S$
		$t_M$	$t_S$	$t_{cycle}$			
340	0.038	237.27	241.66	478.93	$1.29 \times 10^6$	6.28	6.17
343	0.076	175	243.46	418.46	$2.59 \times 10^6$	8.07	5.80
348	0.140	123.35	246.66	369.81	$4.75 \times 10^6$	10.50	5.25
353	0.204	98.33	248.42	346.75	$6.90 \times 10^6$	12.38	4.90
358	0.268	83.3	250	333.3	$9.06 \times 10^6$	14.15	4.57
363	0.331	68.34	253.33	321.67	$1.12 \times 10^7$	15.84	4.27
368	0.395	59.71	255	314.71	$1.34 \times 10^7$	17.26	4.04



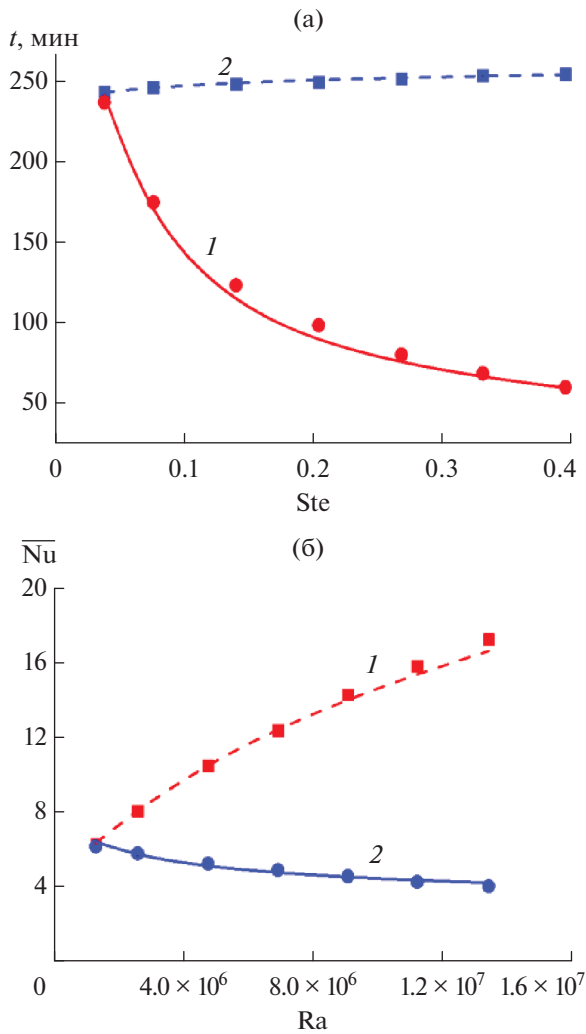


Рис. 10. Сравнение численных данных с результатами расчетов по полученным зависимостям для времени завершения плавления (а) и среднего числа Нуссельта (б): 1 – плавление, 2 – затвердевание; кривые – корреляции, маркеры – расчет.

с ростом  $Ra$ . Среднее число Нуссельта может быть представлено как  $\overline{Nu} = C\overline{Q}_E/Ra$ , где  $C = (g\beta D_i^3)/(\pi k_{PT} \nu_i (a_{th})_i)$ . Следовательно, в процессе плавления скорость увеличения  $\overline{Q}_E$  была намного выше, чем скорость увеличения  $Ra$ , что привело к росту  $\overline{Nu}$ . В то время как в процессе затвердевания скорость увеличения  $\overline{Q}_E$  была намного медленнее, чем скорость увеличения  $Ra$ , что привело к уменьшению  $\overline{Nu}$ .

**Зависимости для КБСТ на стеариновой кислоте с Y-ребрами.** Разработаны корреляции для времен плавления и затвердевания, а также для средних чисел Нуссельта. Чтобы уточнить влияние изменения температуры теплоносителя на процессы

плавления и затвердевания, времена завершения плавления были связаны с  $Ste$ . Поскольку установлено, что скорость теплообмена зависит от силы плавучести из-за разницы плотности РТ в процессе плавления и затвердевания, средние числа Нуссельта сопоставлены с  $Ra$ . Корреляции и численные результаты представлены на рис. 10. Время завершения плавления  $t_M$  и среднее число Нуссельта плавления сильно зависят от  $Ste$  и  $Ra$ , тогда как время затвердевания  $t_S$  и среднее число Нуссельта затвердевания  $\overline{Nu}_S$  зависят от них слабо. Поэтому при плавлении РТ роль плавучести была значительной, что усиливало конвективный теплообмен. Однако конвективный теплообмен во время затвердевания значительно снижен. Расхождение численных результатов с данными по коррекциям оказалась менее 10%:

$$t_M = 34.5(Ste)^{-0.6}, \quad t_S = 259(Ste)^{0.019};$$

$$\overline{Nu}_M = 0.013(Ra)^{0.44}, \quad \overline{Nu}_S = 81(Ra)^{-0.18}.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные и численные исследования интенсификации теплообмена в горизонтальном КБСТ. Проанализирована производительность зарядки и разрядки КБСТ для трех различных углов ориентации ребра, а именно  $\lambda$ -ребра с  $\theta = 90^\circ$  (случай А),  $\theta = 60^\circ$  (случай Б) и Y-ребра с  $\theta = 30^\circ$  (случай В). Рассматривались такие показатели, как эффективность для выбранных ориентаций, полное время зарядки и разрядки, емкость накопления энергии и тепловые характеристики, основанные на скорости накопления и извлечения энергии. Экспериментальные и численные результаты показали, что Y-ориентация ребра является оптимальной как для зарядки, так и для разрядки КБСТ. Ребра с Y-ориентацией ускорили процесс плавления за счет улучшения теплообмена из-за больших энергичных вихрей в зоне конвекции. Полное время зарядки КБСТ с Y-ребрами уменьшается на 51% по сравнению с ориентацией  $\lambda$ . При температуре теплоносителя 358 К, Y-ориентации ребер аккумулялирование тепловой энергии выросло на 10% за счет увеличения средней температуры рабочего тела на 1.45%. Производительность зарядки, основанная на плотности теплового потока, для Y-образного ребра по сравнению с  $\lambda$ -расположением показала максимальное локальное усиление на 19.4% при плавлении РТ в верхней части и на 108% в нижней части из-за усиления конвекционных эффектов. Общая производительность зарядки КБСТ улучшена на 13.7%, а разрядки на 4.8%. Емкость накопления тепловой энергии и скорость ее накопления увеличены на 80 и 12.9% соответственно при увеличении температуры теплоносителя всего на 7.6%. Кроме того, для сте-



ариновой кислоты при Y-образной ориентации корреляции времени плавления и затвердевания показывают зависимость от чисел Стефана, среднего числа Нуссельта и числа Рэлея. Видно, что полученные корреляции при Y-ребрах являются сильной функцией числа Стефана для процесса плавления и слабой для процесса затвердевания. Корреляция среднего числа Нуссельта подтвердила, что плавучесть была движущим фактором увеличения теплопередачи при плавлении РТ, поскольку преимущественно зависит от числа Рэлея. При этом среднее число Нуссельта при застывании было обратно пропорционально, но слабо зависело от числа Рэлея.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sheikholeslami M., Lohrasbi S., Ganji D.D.* Response Surface Method Optimization of Innovative Fin Structure for Expediting Discharging Process in Latent Heat Thermal Energy Storage System Containing Nano-enhanced Phase Change Material // *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2016. V. 67. P. 115.
2. *Agyenim F., Hewitt N.* The Development of a Finned Phase Change Material (PCM) Storage System To Take Advantage of Off-peak Electricity Tariff for Improvement in Cost of Heat Pump Operation // *Energy Build.* 2010. V. 42. P. 1552.
3. *Du K., Calautit J., Wang Z., Wu Y., Liu H.* A Review of the Applications of Phase Change Materials in Cooling, Heating and Power Generation in Different Temperature Ranges // *Appl. Energy.* 2018. V. 220. P. 242.
4. *Farid M.M., Khudhair A.M., Ali S., Razack K.* A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications // *Energy Convers. Manag.* 2004. V. 45. P. 1597.
5. *Chaabane M., Mhiri H., Bournot P.* Thermal Performance of an Integrated Collector Storage Solar Water Heater (ICSSWH) with Phase Change Materials (PCM) // *Energy Convers. Manag.* 2014. V. 78. P. 897.
6. *Ortega-fernández I., Rodríguez-aseguinolaza J.* Thermal Energy Storage for Waste Heat Recovery in the Steelworks: The Case Study of the REslag Project // *Appl. Energy.* 2019. V. 237. P. 708.
7. *Oró E., De Gracia A., Castell A., Farid M.M., Cabeza L.F.* Review on Phase Change Materials (PCMs) for Cold Thermal Energy Storage Applications // *Appl. Energy.* 2012. V. 99. P. 513.
8. *De Gracia A., Cabeza L.F.* Phase Change Materials and Thermal Energy Storage for Buildings // *Energy Build.* 2015. V. 103. P. 414.
9. *Baby R., Balaji C.* Thermal Optimization of PCM Based Pin Fin Heat Sinks: An Experimental Study // *Appl. Therm. Eng.* 2013. V. 54. P. 65.
10. *Abdulateef A.M., Mat S., Abdulateef J., Sopian K., Al-abidi A.A.* Thermal Performance Enhancement of Triplex Tube Latent Thermal Storage Using Fins-nanophase Change // *Material Technique.* 2017. V. 7632.
11. *Yang X., Lu Z., Bai Q., Zhang Q. et al.* Thermal Performance of a Shell-and-tube Latent Heat Thermal Energy Storage Unit: Role of Annular Fins // *Appl. Energy.* 2017. V. 202. P. 558.
12. *Tay N.H.S., Bruno F., Belusko M.* Comparison of pinned and Finned Tubes in a Phase Change Thermal Energy Storage System Using CFD // *Appl. Energy.* 2013. V. 104. P. 79.
13. *Al-abidi A.A., Mat S., Sopian K., Sulaiman M.Y.* Internal and External Fin Heat Transfer Enhancement Technique for Latent Heat Thermal Energy Storage in Triplex Tube Heat Exchangers // *Appl. Therm. Eng.* 2013. V. 53. P. 147.
14. *Abdulateef A.M., Mat S., Abdulateef J., Sopian K.* Geometric and Design Parameters of Fins Employed for Enhancing Thermal Energy Storage Systems: A Review // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018. V. 82. P. 1620.
15. *Agyenim F., Eames P., Smyth M.* A Comparison of Heat Transfer Enhancement in a Medium Temperature Thermal Energy Storage Heat Exchanger Using Fins // *Sol. Energy.* 2009. V. 83. P. 1509.
16. *Jmal I., Baccar M.* Numerical Study of PCM Solidification in a Finned Tube Thermal Storage Including Natural Convection // *Appl. Therm. Eng.* 2015. V. 84. P. 320.
17. *Zhai X.Q., Cheng X.W., Wang C., Wang R.Z.* Experimental Investigation and Performance Analysis of a Fin Tube Phase Change Cold Storage Unit for High Temperature Cooling Application // *Energy Build.* 2015. V. 89. P. 9.
18. *Rathod M.K., Banerjee J.* Thermal Performance Enhancement of Shell and Tube Latent Heat Storage Unit Using Longitudinal Fins // *Appl. Therm. Eng.* 2015. V. 75. P. 1084.
19. *Hosseini M.J., Ranjbar A.A., Rahimi M., Bahrampoury R.* Experimental and Numerical Evaluation of Longitudinally Finned Latent Heat Thermal Storage Systems // *Energy Build.* 2015. V. 99. P. 263.
20. *Kazemi M., Hosseini M.J., Ranjbar A.A., Bahrampoury R.* Improvement of Longitudinal Fins Configuration in Latent Heat Storage Systems // *Renew. Energy.* 2017.
21. *Khan L.A., Khan M.M.* Role of Orientation of Fins in Performance Enhancement of a Latent Thermal Energy Storage Unit // *Appl. Therm. Eng.* 2020. V. 175. P. 115408.
22. *Qaiser R., Mahabat M., Asip L., Irfan M.* Melting Performance Enhancement of PCM Based Thermal Energy Storage System Using Multiple Tubes and Modified Shell Designs // *J. Energy Storage.* 2021. V. 33. P. 102161.
23. *Deng S., Nie C., Wei G., Ye W.* Energy & Buildings Improving the Melting Performance of a Horizontal Shell-tube Latent-heat Thermal Energy Storage Unit Using Local Enhanced Finned Tube // *Energy Build.* 2019. V. 183. P. 161.
24. *Kamkari B., Shokouhmand H., Bruno F.* International Journal of Heat and Mass Transfer Experimental Investigation of the Effect of Inclination Angle on Convection-driven Melting of Phase Change Material in a Rectangular Enclosure // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2014. V. 72. P. 186.
25. *Kousha N., Hosseini M.J., Aligoodarzi M.R., Pakrouh R., Bahrampoury R.* Effect of Inclination Angle on the Performance of a Shell and Tube Heat Storage Unit – An Experimental Study // *Appl. Therm. Eng.* 2017. V. 112. P. 1497.

26. *Vogel J., Felbinger J., Johnson M.* Natural Convection in High Temperature Flat Plate Latent Heat Thermal Energy Storage Systems // *Appl. Energy*. 2016. V. 184. P. 184.
27. *Vogel J., Thess A.* Validation of a Numerical Model with a Benchmark Experiment for Melting Governed by Natural Convection in Latent Thermal Energy Storage // *Appl. Therm. Eng.* 2019. V. 148. P. 147.
28. *Voller V.R., Prakash C.* Fixed Grid Numerical Modelling Methodology for Convection Diffusion Mushy Region Phase Change Problems // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1978. V. 30. P. 1709.
29. *Pakrouh R., Hosseini M.J., Ranjbar A.A., Bahrampoury R.* Numerical Method for PCM-based Pin Fin Heat Sinks Optimization // *Energy Convers. Manag.* 2015. V. 103. P. 542.
30. *Vogel J., Felbinger J., Johnson M.* Natural Convection in High Temperature Flat Plate Latent Heat Thermal Energy Storage Systems // *Appl. Energy*. 2016. V. 184. P. 184.
31. *Al-abidi A., Mat S., Sopian K., Sulaiman Y.* Heat Transfer Enhancement for PCM Thermal Energy Storage in Triplex Tube Heat Exchanger // *Heat Transf. Eng.* 2015. V. 37. P. 705.