



УДК 621.565.2

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЩЕСТВ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ ДЛЯ АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

А.В. Бараненко^a, П.А. Кузнецов^{a,b}, В.Ю. Захарова^a, А.П. Цой^{c,d}^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация^b ООО «Нексен», Санкт-Петербург, 192148, Российская Федерация^c Алматинский технологический университет, Алматы, 050012, Казахстан^d Казахская Ассоциация холодильной промышленности, Алматы, 050008, КазахстанАдрес для переписки: baranenko@mail.ifmo.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 13.09.18, принята к печати 15.10.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Бараненко А.В., Кузнецов П.А., Захарова В.Ю., Цой А.П. Применение веществ с фазовыми переходами для аккумулирования тепловой энергии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 990–1000. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000

Аннотация

Рассмотрена задача создания энергоэффективных систем хладо- и теплоснабжения с использованием накопителей тепловой энергии. Аккумулирование тепловой энергии повышает эффективность теплоэнергетических систем, включая системы охлаждения и кондиционирования, уменьшает пиковое потребление электроэнергии и мощности тепловых установок при переменных нагрузках. Показано, что для накопления тепловой энергии широко используют вещества с фазовым переходом, преимущественно типа «твердое тело–жидкость», обеспечивающие объемную и массовую плотность хранения энергии теплоты и холода в 5–14 раз выше в сравнении с аккумулирующими жидкостями. Сформулированы требования к веществам с фазовым переходом, применяемым в накопителях тепловой энергии. Рассмотрены предложенные для применения вещества с фазовым переходом, к которым относятся органические соединения (парафины, жирные кислоты), гидраты солей, эвтектики (могут включать органические и неорганические соединения). Показаны достоинства и недостатки каждой группы веществ. Представлены сведения о свойствах отдельных веществ, применяемых в системах кондиционирования воздуха. Показано, что производители скрывают состав промышленно применяемых веществ с фазовым переходом. Отмечено, что производство российских систем накопления тепловой энергии требует выполнения комплекса фундаментальных и прикладных научных исследований. Приведены примеры аккумулирования тепловой энергии с использованием веществ с фазовым переходом в системах кондиционирования воздуха. Описаны конструкции аккумуляторов тепловой энергии, отмечены их достоинства и недостатки. Проанализированы методы расчета систем с аккумуляторами тепловой энергии, включая решение задачи Стефана о нестационарном теплообмене при фазовых переходах применительно к накоплению тепловой энергии. Сделан вывод о преимуществах численного метода решения этой задачи. Сформулированы направления исследований, выполнение которых позволит разработать российские системы тепло- и хладоснабжения с накопителями тепловой энергии.

Ключевые слова

аккумулятор тепловой энергии, вещества с фазовым переходом, нестационарный теплообмен при фазовых переходах, математическое моделирование, системы кондиционирования воздуха

APPLICATION OF SUBSTANCES WITH PHASE TRANSITIONS FOR THERMAL ENERGY ACCUMULATION

A.V. Baranenko^a, P.A. Kuznetsov^{a,b}, V.Yu. Zakharova^a, A.P. Tsoy^{c,d}^aITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation^bNexen Ltd, Saint Petersburg, 192148, Russian Federation^cAlmaty Technological University, Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan^dKazakhstan Association of Refrigeration Industry, Almaty, 050008, Republic of KazakhstanCorresponding author: baranenko@mail.ifmo.ru

Article info

Received 13.09.18, accepted 15.10.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000

Article in Russian

For citation: Baranenko A.V., Kuznetsov P.A., Zakharova V.Yu., Tsoy A.P. Application of substances with phase transitions for thermal energy accumulation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 990–1000 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-990-1000

Abstract

This publication is devoted to creation of energy-efficient systems for cold supply and heat supply using heat energy accumulators. Thermal energy accumulation increases the efficiency of heat power systems including cooling and air conditioning systems, reduces peak power consumption and capacities of thermal installations at variable loads. It is shown that substances with phase transition (SPT) are widely used for thermal energy accumulation. They are mainly of the solid body-liquid type providing volume and mass density of heat storing and cold energy that is 5–14 times higher in comparison with accumulating liquids. Requirements to SPT with regard to thermal energy accumulators are formulated. We have given an overview of the SPT recommended for application to which organic compounds belong (paraffins, fatty acids), hydrates of salts, eutectics (may include organic and inorganic compounds in their structure). The advantages and disadvantages of each group of substances are shown. The information on the properties of certain SPT in relation to air conditioning systems is presented. It is shown that SPT having industrial applications are hidden under trademarks. It is noted that the creation of heat energy accumulation systems made in Russia requires carrying out a fundamental and applied research complex. We have presented application examples of thermal energy accumulation using SPT in air conditioning systems. The designs of thermal energy accumulators are described, their advantages and disadvantages are noted. We have carried out the analysis of calculation methods for systems with thermal energy accumulators available in literature including solutions of Stefan problem about non-stationary heat exchange at phase transitions in relation to the thermal energy accumulation. The conclusion is drawn on the numerical method advantages for solution of this problem. The research directions are formulated which implementation will allow for developing Russian systems of heat and cold supply with heat energy storage devices.

Keywords

thermal energy accumulator, substances with phase transition, non-stationary heat transfer at phase transitions, mathematical modeling, air conditioning systems

Введение

Аккумуляция тепловой энергии в системах охлаждения, кондиционирования и вентиляции, отопления и горячего водоснабжения обеспечивает снижение расхода энергетических ресурсов на соответствующие нужды, их пикового потребления, а также уменьшение мощности применяемых установок при переменных нагрузках [1–4].

Системы аккумуляции холода позволяют снижать потребление электроэнергии при использовании для накопления холода возобновляемых источников энергии, к которым относятся энергия солнца, энергия окружающей среды при низких температурах, энергия ночного радиационного охлаждения [5–7]. Этот процесс может иметь сезонный характер: накопление холода в зимний период и расход накопленной энергии в летние месяцы [2]. При использовании двойных тарифов на электроэнергию аккумуляцию холода можно осуществлять холодильной машиной в ночное время, что приводит к снижению стоимости потребленной электроэнергии и сокращению ее пикового расхода. Наличие аккумуляторов холода в системах охлаждения с переменными нагрузками позволяет применять холодильные машины меньшей мощности, поскольку максимальные нагрузки могут сниматься накопленной энергией охлаждения [3].

Перспективным, активно развивающимся направлением создания систем аккумуляции тепловой энергии является использование веществ с фазовым переходом (ВФП). Ряд зарубежных компаний выпускают накопители тепловой энергии с такими веществами [8]. Однако производители скрывают состав промышленно применяемых веществ под торговыми марками. Для разработки и создания отечественных эффективных и конкурентоспособных систем тепло- и хладоснабжения с аккумуляторами тепловой энергии требуется выполнение целого комплекса фундаментальных и прикладных научных исследований, опытно-конструкторских работ, испытаний промышленных образцов накопителей тепловой энергии. Научные исследования должны включать в себя систематизацию ВФП, выбор наиболее перспективных веществ, изучение их свойств, работы по улучшению отдельных свойств этих веществ, аналитические и экспериментальные исследования нестационарного теплообмена при фазовых переходах, разработку эффективных конструкций аккумуляторов тепловой энергии.

Вещества с фазовым переходом для аккумуляции тепловой энергии

Для аккумуляции энергии холода преимущественно используют жидкие среды и вещества с фазовым переходом [8–12]. В первом случае запас энергии (Q) создается понижением температуры жидкости. Его величина зависит от массы (m), удельной теплоемкости (c), разности температур аккумуляющей жидкости ($t_1 - t_2$) и определяется по формуле: $Q = mc \cdot (t_1 - t_2)$. Во втором случае в накоплении энергии основную роль играет теплота фазового перехода ВФП. При зарядке аккумулятора происходит фазовый переход «жидкость–твердое тело», при использовании запасенного холода – фазовый переход «твердое тело–жидкость». В общем случае величина запасенного холода зависит от массы, удельной теплоты фазового перехода ($\lambda_{\text{фп}}$), удельных теплоемкостей твердой и жидкой фаз ВФП и перепадов температуры. Аккумуляционная энергия определяется по формуле $Q = mc \cdot (t_1 - t_{\text{фп}}) + m\lambda_{\text{фп}} + mc \cdot (t_{\text{фп}} - t_2)$. В формуле $t_1 > t_{\text{фп}}$ и $t_2 < t_{\text{фп}}$ (рис. 1).

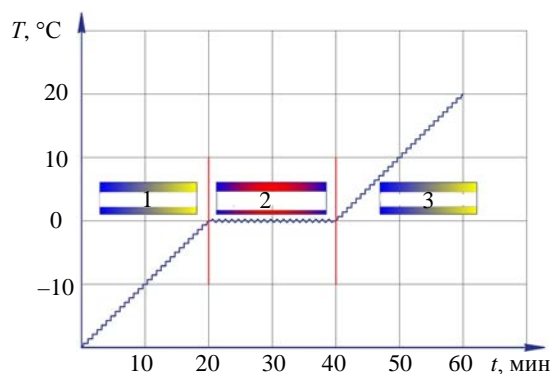


Рис. 1. Изменение температуры вещества с фазовым переходом при нагреве твердой фазы, плавлении и нагреве жидкой фазы, 1 – явная теплота, 2 – скрытая теплота, 3 – явная теплота

Аккумуляции тепловой энергии с использованием ВФП уделяется значительное внимание в последние десятилетия. Преимуществами применения ВФП являются относительно высокая объемная и массовая плотность хранения тепловой энергии (в 5–14 раз выше по сравнению с аккумулирующими жидкостями [12]), постоянная температура фазового перехода, химическая стабильность и экономическая эффективность.

В силу технико-экономической эффективности применения веществ с фазовым переходом для аккумуляции тепловой энергии в этой области активно выполняются исследования. Свойства названных веществ должны отвечать следующим требованиям [8, 11–13]:

- температура фазового перехода ВФП находится в диапазоне рабочей температуры системы охлаждения или нагрева, давление близко к атмосферному;
- высокая удельная теплота плавления;
- высокая теплопроводность;
- высокая плотность;
- незначительное изменение объема во время фазового перехода;
- низкая степень переохлаждения;
- невысокая коррозионная активность по отношению к конструкционным материалам;
- химическая стабильность, отсутствие деградации в процессе эксплуатации и стабильность циклов фазовых переходов;
- нетоксичность и негорючесть;
- экологическая безопасность, в первую очередь нулевые или близкие к нулевым потенциалы разрушения озонового слоя и глобального потепления;
- доступность и невысокая стоимость.

Безусловно, в природе не существует ВФП, которые одновременно обладали бы всеми положительными свойствами. В связи с этим при выборе ВФП, как и для любого вида рабочих сред энергетических систем, исходят из компромисса между положительными и отрицательными качествами того или иного рабочего тела. При анализе свойств ВФП и определении технико-экономической целесообразности их применения для накопления тепловой энергии следует учитывать, что параметры работы систем охлаждения или нагрева, схемные решения могут усиливать влияние на эффективность установок и свойства веществ и нивелировать их отрицательные качества.

В накопителях тепловой энергии преимущественно применяют ВФП типа «твердое тело–жидкость». Их в основном подразделяют на органические, неорганические и эвтектики (эвтектические растворы) [8–10]. К органическим ВФП относятся парафины, жирные кислоты и другие соединения. Среди неорганических сред для систем охлаждения интерес представляют вода, гидраты солей и эвтектики. Эвтектики могут состоять только из органических или неорганических соединений, а также включать в свой состав как органические, так и неорганические вещества. Известно порядка 1800 ВФП, которые были использованы для различных вариантов аккумуляции тепловой энергии, в том числе в системах охлаждения и кондиционирования воздуха.

Аккумуляция холода получает все большее распространение в системах кондиционирования воздуха (СКВ) [1, 3, 10–12], обеспечить функционирование в режиме энергосбережения которых весьма актуально, поскольку СКВ составляют 40 % мировых холодильных мощностей.

В ряде случаев в качестве аккумулирующей среды СКВ применяется вода [4, 14]. Она характеризуется большими величинами удельной теплоемкости – 4,184 кДж/(кг·К) и удельной теплоты замерзания (плавления льда) – 335 кДж/кг. Температура охлажденной воды 4–6 °C вполне приемлема для СКВ. Однако для ее хранения требуются большие объемы баков. При использовании в аккумуляторах льда, изготовленного из воды, объемы емкостей существенно уменьшаются. Но при намораживании льда

увеличивается расход электроэнергии или же требуется установка отдельных холодильных машин. Таким образом, целесообразно рассматривать для систем СКВ ВФП с температурами фазового перехода 5–12 °С. Очевидно, что для применения в кондиционировании воздуха перспективны солевые гидраты, эвтектики, парафиновые воски, жирные кислоты и гидраты хладагентов [8–10].

Гидратам солей и эвтектикам посвящено много исследований в силу относительно больших величин их удельной теплоты фазового перехода, теплопроводности (0,4–0,7 Вт/(м·К)) и плотности хранения энергии, а также приемлемым температурным диапазонам изменения фаз. Они не подвержены горению и недорого. К их главным недостаткам относятся: расслаивание на границе раздела фаз при фазовых переходах, что приводит к нестабильности циклов фазовых переходов, относительно большие значения переохлаждения (разность температур фазовых переходов «твердое тело–жидкость» и «жидкость–твердое тело») и коррозия. Наличие продуктов коррозии в композициях также может приводить к нарушению стабильности циклов. Введение в композиции различных добавок может обеспечить изменение температуры фазового перехода, стабильность границы раздела фаз при фазовом переходе, снижение переохлаждения и коррозионной активности [10].

Типичными парафиновыми восками являются насыщенные углеводородные смеси, состоящие главным образом из алканов прямой цепи, таких как $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$. Жирные кислоты обозначаются формулой $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$. Парафиновые воски и жирные кислоты главным образом химически инертны, стабильны при многократных фазовых переходах, имеют небольшие температуры переохлаждения, у этих веществ при плавлении или затвердевании стабильна граница раздела фаз без перехода одной фазы в другую. Однако они имеют относительно высокую стоимость, обладают низкой теплопроводностью (0,15–0,3 Вт/(м·К)), что снижает интенсивность теплообмена в процессах зарядки и разрядки аккумуляторов тепловой энергии, и низкую плотность (750–850 кг/м³), что увеличивает объемы аккумулирующих емкостей, кроме того, они могут воспламеняться.

Интенсифицировать перенос теплоты позволяют предложенные исследователями решения. К ним, в частности, относятся: введение в ВФП частиц материалов с высокой теплопроводностью (в том числе наночастиц), например, порошка алюминия или наночастиц графита; микрокапсулирование; использование оребренных поверхностей в теплообменных аппаратах. Теплопроводность может быть также увеличена на два порядка посредством пропитки парафином пористых графитовых и других матриц (RT-42, Rubitherm, Германия) [15].

В работе [16] представлены результаты исследования влияния числа, длины и толщины продольных ребер на интенсивность фазового перехода парафина, расположенного в средней трубе трехтрубного теплообменника, в условиях одновременной зарядки и разрядки аккумулятора. По внутренней и наружной трубам протекает теплоноситель. Наличие ребер различной конфигурации, контактирующих с ВФП, в 1,5–2 раза сокращает время фазового перехода.

Получила распространение систематизация ВФП по температуре и величине удельной теплоты фазового перехода [10–12].

В таблице представлены сведения о ряде ВФП для аккумулирования холода в СКВ (λ – теплопроводность ВФП) [10–12]. Данные о ВФП, присутствующих на рынке, можно найти в [8, 12].

Название ВФП	$t_{\text{фп}}, ^\circ\text{C}$	$\lambda_{\text{фп}}, \text{кДж/кг}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$
Эвтектики и гидраты солей			
$\text{Na}_2\text{SO}_4, \text{H}_2\text{O}, \text{NaCl}, \text{NH}_4\text{Cl}$	7,5	121	0,55(жидкость) 0,7(твердое состояние)
Тип 41	5,0–5,5	123	–
Тип 47	8–9	95,4	–
S 7	7	150	0,40
S 8	8	150	0,44
S 10	10	155	0,43
Парафины и жирные кислоты			
$\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ (<i>n</i> -Tetradecane)	6	230	0,21(твердое состояние)
$\text{C}_{15}\text{H}_{32}$ (<i>n</i> -Pentadecane)	10	212	–
Rubitherm RT5	4–6	158	–
50:50(об. %) $\text{C}_{14}\text{H}_{30}:\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ (<i>n</i> -Hexadecane)	4–6	154,8	–
HCOOH Муравьиная кислота	7,8	247	–
Dimethyl hexanedioate **	8	160	–
50:50 C-L Acid: P (об.%)*	10,2	157,8	–

* Смесь кислот 65 мол.% каприновой кислоты (C) и 35 мол.% лауриновой кислоты (L).

** Диэтиловый эфир адипиновой кислоты ($\text{C}_8\text{H}_{14}\text{O}_4$).

Некоторые свойства веществ с фазовым переходом для СКВ

Системы с аккумуляторами тепловой энергии

Схемные решения систем охлаждения и нагрева с аккумулятированием тепловой энергии могут быть реализованы в самом различном исполнении [1, 3, 17]. В системах охлаждения и кондиционирования воздуха широко используются схемы с параллельным подключением накопителя холода к циклу «холодильная машина (ХМ) – потребитель холода (ТО)».

Система охлаждения при соответствующем закрытии и открытии вентилей может работать в различных режимах: обеспечение холодом потребителя без использования аккумулятора холода, обеспечение холодом потребителя с одновременной зарядкой аккумулятора (данный вариант работы показан на рис. 2, здесь ХМ – холодильная машина, НГ – насосная группа, КД – клапан двухходовой с электроприводом, АХ – аккумулятор холода, КТ – клапан трехходовой, ТО – теплообменник), зарядка аккумулятора, охлаждение объекта холодильной машиной с использованием аккумулируемой энергии холода, использование для охлаждения только аккумулятора холода. Зарядка аккумулятора производится преимущественно в ночное время в период льготного тарифа на электроэнергию. Использование аккумулируемой энергии осуществляется при пиковых нагрузках по холоду и электроэнергии. Наличие накопителя холода в схеме системы охлаждения позволяет уменьшить мощность устанавливаемой холодильной машины.

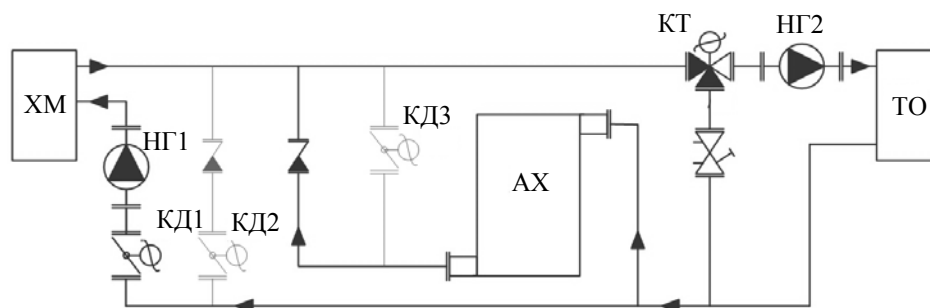


Рис. 2. Схема системы охлаждения при параллельном подключении накопителя холода в цикл «холодильная машина–потребитель»

ВФП используются в стеновых и потолочных панелях зданий и сооружений. Наиболее распространенный способ использования ВФП в жидком виде – его заправка в микропоры гранул вспомогательного материала, где оно удерживается за счет капиллярных сил и поверхностного натяжения. В процессах фазового перехода гранулы сохраняют стабильную форму и размеры, что важно для строительных ограждений. Внешне фазовый переход выглядит как «твердое тело–твердое тело». Гранулы с ВФП размещаются в стеновых и потолочных панелях. Стеновые панели, аккумулируя тепловую энергию при высокой наружной температуре, увеличивают тепловую инерцию зданий [18]. Преимущественно в ночное время, когда температура в помещении опускается ниже температуры фазового перехода вещества, затвердевая, оно отдает теплоту объему помещения. Экспериментальные и численные исследования показали [18], что применение панелей с гранулами вспомогательного материала для внутренней обшивки помещений снижает пиковые температуры в помещении летом. Температура в помещении в типичном офисном здании в течение двух летних месяцев может быть снижена на 9 °С во время эксплуатации здания (7:00–18:00).

Потолочные панели с ВФП, выполняющие функцию аккумуляторов холода в системах кондиционирования воздуха, размещаются в помещениях с зазором по отношению к перекрытию (рис. 3, здесь ПВУ – приточно-вытяжная установка). Подобная система кондиционирования воздуха может работать в следующих режимах. Без использования аккумулятора холода охлажденный воздух подается в помещение, нагретый в процессе отвода теплоты от окружающего пространства воздух через отверстия в потолочной панели, расположенные с левой стороны, по вытяжному воздухопроводу возвращается к теплообменнику для охлаждения. Зарядка аккумулятора холода в виде потолочной панели может производиться в ночное время подачей холодного воздуха в пространство между перекрытием и панелью. При пиковых нагрузках, когда используется энергия запасенного холода, теплый воздух выходит из помещения через отверстия с правой стороны панели и, проходя к вытяжному воздухопроводу в пространстве между панелью и перекрытием, частично охлаждается за счет разрядки аккумулятора холода. Снятие пиковых нагрузок за счет использования аккумулятора холода позволяет уменьшать мощности устанавливаемого оборудования и сокращать расходы на электроэнергию при льготных ночных тарифах и зарядке аккумулятора в это время.

Конструкции аккумуляторов тепловой энергии с веществами с фазовым переходом преимущественно представляют собой емкости, в которых располагается ВФП и циркулирует теплоноситель (хладоноситель) [7, 8, 17, 19]. Основное отличие конструктивного исполнения заключается в размещении ВФП в емкости аккумулятора: оно может размещаться в контейнерах в форме труб прямоугольного или круглого сечения, а также в форме шаров.



Рис. 3. Потолочная панель с веществом с фазовым переходом в системе кондиционирования воздуха [7]

Авторы [8] указывают, что трубы прямоугольного сечения обеспечивают наибольшую (до 90 % объема) плотность размещения ВФП в аккумуляторе (для шаров ~50 %). Теплоноситель циркулирует в емкости аккумулятора в пространстве между контейнерами. В другом случае теплоноситель циркулирует внутри труб теплообменника, размещенного в емкости. Для циркуляции теплоносителя также может быть предусмотрена наружная рубашка емкости аккумулятора. ВФП располагается в баке аккумулятора.

На рис. 4, а, изображен аккумулятор тепловой энергии с расположением ВФП в цилиндрических капсулах и циркуляцией теплоносителя в межтрубном пространстве (на рис. 4: L_c – высота цилиндра, V – объем хранилища; $R_{c, \text{вн}}$ – внутренний радиус цилиндра; $R_{c, \text{нар}}$ – наружный радиус цилиндра). На рис. 4, б, представлен аккумулятор, в котором ВФП размещается во внутреннем цилиндре, а теплоноситель циркулирует в зазоре между внутренним и наружным цилиндрами.

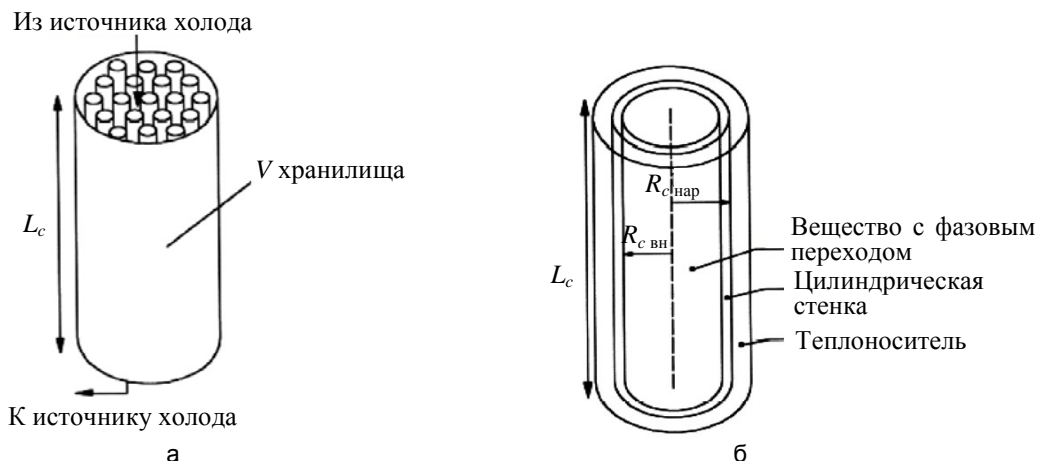


Рис. 4. Конструкции аккумуляторов тепловой энергии при размещении ВФП в цилиндрических капсулах (а) и во внутреннем цилиндре (б) [7]

На рис. 5 приведена конструкция аккумулятора тепловой энергии, в котором ВФП располагается в межтрубном пространстве, а теплоноситель циркулирует по трубам с наружными продольными ребрами, обеспечивающими более высокую интенсивность теплообмена со стороны ВФП.

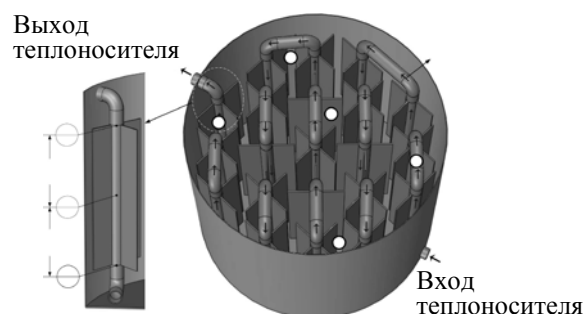


Рис. 5. Конструкция аккумулятора тепловой энергии с размещением вещества с фазовым переходом в межтрубном пространстве [17]

Решение об использовании аккумулятора той или иной конструкции может быть принято на основании всестороннего технико-экономического анализа, а также дополнительных научных исследований.

Рассмотрим примеры реализации проектов систем охлаждения с аккумулярованием холода [1].

В Шанхайском международном аэропорту Пудун (Китай) установлены емкости с холодной водой объемом 11 600 м³ для кондиционирования воздуха помещений аэропорта площадью 185 000 м². Эксплуатационные расходы хранения энергии охлаждения оценены в 0,01 долл./кВт·ч.

Система аккумулярования холода кампуса университета Denki (Токио) располагает резервуарами для хранения воды объемом 690 м³ и для хранения льда – объемом 400 м³. Важнейшая цель этого проекта обеспечить уровень ежегодных выбросов CO₂ не более 37,0 кг на 1 м² помещений кампуса.

Авторы [3] создали и исследовали систему кондиционирования воздуха офисных помещений, включающую в себя аккумулятор тепловой энергии. В зимний период система работает также на отопление. Номинальная холодопроизводительность холодильной машины составила 70 кВт. Регулирование мощности установки осуществляется в пределах 15–100 %. В качестве аккумулярующей среды использован диэтиловый эфир адипиновой кислоты (C₈H₁₄O₄), его температура плавления 8 °С, плотность 1060 кг/м³, удельная теплота плавления порядка 160 кДж/кг.

Использование аккумулятора тепловой энергии позволило снизить потребление электроэнергии с 19 до 11 кВт в летний период и с 15,2 до 8,8 кВт – в зимний. Система обеспечивает оптимальный баланс перераспределения энергии на пике спроса. По оценке авторов, среднегодовое сокращение потребления электроэнергии составляет около 18 %.

Методы расчетов систем с накопителями тепловой энергии

Методы расчетов систем с аккумуляторами холода можно разделить на три большие группы [8]. Первая направлена на получение интегральных характеристик, таких как общая тепловая мощность, теплоемкость системы. На их основе проводится расчет необходимых объемов бака, электрической мощности [2, 3, 17]. Однако данные методы не дают характеристик, связанных с конечной скоростью плавления ВФП, таких как максимальная пиковая мощность нагрузки.

Вторая группа методов направлена на оптимизацию расположения содержащих ВФП контейнеров с целью увеличения интенсивности теплообмена, при этом процессы фазового перехода в ВФП не рассматриваются напрямую [20].

Третья группа методов направлена на моделирование теплообмена при плавлении/кристаллизации ВФП, что решается задачей с подвижными границами. Здесь подвижной является граница или область раздела твердой и жидкой фаз, в которой происходит фазовый переход. В основе моделей теплообмена подобных методов лежит так называемая задача Стефана [7, 8], имеющая высокую степень нелинейности.

Задача Стефана формулируется следующим образом [21]. Рассматривается пространственная область Ω, заполненная ВФП, в которой происходит плавление вещества. Предполагается, что фазовый переход происходит при постоянной температуре t_{фп} на границе раздела твердой и жидкой фаз ∂Ω_{фп}, разделяя область Ω на две подобласти Ω_ж и Ω_т, содержащие жидкую и твердую фазу соответственно (рис. 6).

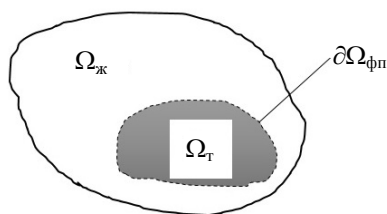


Рис. 6. Задача Стефана

Уравнение теплопроводности для твердой фазы имеет вид

$$c_t \rho_t \frac{\partial t}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda_t \text{grad}(t)) + w_t,$$

где c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; t – температура; λ – теплопроводность; w – объемная плотность мощности источников теплоты, τ – время.

Для жидкой фазы учитывается конвективный перенос теплоты

$$c_j \rho_j \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + v \cdot \text{grad}(t) \right) = \text{div}(\lambda_j \cdot \text{grad}(t)) + w_j,$$

где v – скорость.

На границе раздела твердой и жидкой фаз справедливо условие непрерывности температуры

$$t_j = t_t = t_{фп}. \tag{1}$$

Также для границы раздела фаз записывается условие теплового потока, который не является непрерывным из-за поглощения/выделения скрытой теплоты фазового перехода $\lambda_{\text{фп}}$:

$$\lambda_{\text{т}} \frac{\partial t_{\text{т}}}{\partial \mathbf{n}} - \lambda_{\text{ж}} \frac{\partial t_{\text{ж}}}{\partial \mathbf{n}} = \lambda_{\text{фп}} v_{\text{фп}}, \quad (2)$$

где $v_{\text{фп}}$ – скорость перемещения границы фазового перехода по направлению нормали \mathbf{n} к ней.

Выражения (1), (2) называют граничными условиями Стефана. Особенностью задачи Стефана является рассмотрение расположения границы фазового перехода как неизвестной величины.

Аналитические решения задачи Стефана получены для частных случаев. Обычно это одномерные случаи с рядом допущений, без учета конвективного теплообмена. Используются квазистационарное приближение, однофазное приближение, решение в лагранжевой системе координат. Классические решения приведены в [21–23]. В работе [24] конвективный теплообмен в жидкой фазе учитывается полумпирическими критериальными уравнениями, подставляемыми в аналитическое решение.

В ряде работ в качестве решения получают не температурное поле в рабочем веществе, а положение границы замороженного слоя [25–28]. Выбор именно задачи замерзания связан с тем, что при плавлении влияние естественной конвекции на температурное поле велико [29]. В работе [30] приводится расчет толщины слоя расплавленного гидрата при введении в модель критериальных уравнений для естественной конвекции. Эти решения относятся к одномерным задачам, сложная форма границы не рассматривается.

В многокомпонентных веществах, расплавах температуру фазового перехода нельзя считать постоянной. Фазовый переход происходит в интервале температур от солидуса $t_{\text{фпт}}$ до ликвидуса $t_{\text{флж}}$. Аналитические решения для данного случая представлены в [21, 31].

Численное решение задачи может быть получено для трехмерного или двумерного случая с учетом конвекции и интервала теплоты фазового перехода. Обычно для численного решения задачи используют энтальпийный подход или переход к эффективной теплоемкости [8, 23]. Данные подходы сводят задачу к однофазной без непосредственного моделирования границы фазового перехода. Однако в работе [32] задача решается численно методом конечных разностей с постоянным определением границы фазового перехода, но без учета конвекции.

При энтальпийном подходе в уравнении теплопроводности неизвестной считается не температура, а энтальпия H , которая является функцией температуры

$$H(t) = \int_{t_{\text{фп}}}^t \rho c dt + \rho f(t) \lambda_{\text{фп}},$$

где f – доля жидкой фазы, в простейшем случае

$$f = \frac{t - t_{\text{фпт}}}{t_{\text{флж}} - t_{\text{фпт}}}. \quad (3)$$

Энтальпийный подход к решению задачи плавления/затвердевания активного вещества систем с аккумуляцией тепла/холода применен в работах [9, 16, 33–35]. Альтернативой энтальпийному подходу является применение эффективной теплоемкости, в которую включается теплота фазового перехода [8]:

$$c_{\text{эф}} = \frac{\lambda_{\text{фп}}}{t_{\text{флж}} - t_{\text{фпт}}} + \frac{c_{\text{ж}} + c_{\text{т}}}{2}.$$

Данный подход применен в [19] для фазового перехода в модифицированном веществе. Особенностью вещества является переход «твердое тело–твердое тело» вместо перехода «твердое тело–жидкость» и соответственно отсутствие конвекции.

Выражение (3) для доли жидкой фазы справедливо, если фазовый переход происходит в некотором интервале температур. Если фазовый переход происходит при постоянной температуре, то во избежание проблем при численном решении вводится искусственный узкий температурный интервал.

Жидкая и твердая фазы полагаются находящимися в равновесии в зоне фазового перехода. Если моделируется конвективный перенос теплоты в жидкой фазе, необходимо учесть падение скорости жидкости с течением времени, рассмотрев [36] зону фазового перехода как пористую из жидкой и твердой

фаз. В этом случае к уравнению количества движения добавляется член Дарси $\frac{\Delta(1-f)^2}{f^3} v$ (Δ – определяемая экспериментально константа пористой зоны, обычно $\Delta = 10^5 - 10^7$), который учитывает влияние фазового перехода на подавление конвекции в зоне перехода. В твердой фазе скорость равна нулю.

Результатирующие уравнения решаются численно методом конечных объемов или конечных элементов.

Численные методы дают хорошее соответствие результатов расчетов и экспериментов для каждой отдельной конструкции систем с аккумуляторами холода. Однако они не позволяют вычислить оптимальные конструкционные параметры системы с аккумуляторами холода при заданных ВФП и теплоносителе. Разработка подобных моделей и является целью дальнейших исследований.

Заключение

Представленный в настоящей статье материал свидетельствует о том, что накопление тепловой энергии с последующим ее использованием в системах охлаждения и нагрева повышает эффективность последних, сокращая энергопотребление. Развитие подобных систем является актуальной научно-технической задачей, поскольку потребление энергетических ресурсов мировым сообществом постоянно возрастает.

В Российской Федерации и Казахстане проводится крайне мало научных исследований в области аккумуляирования тепловой энергии, в частности, для низких температур. Для решения задачи создания отечественных конкурентоспособных холодильных систем, аккумулирующих тепловую энергию, представляется необходимым организовать исследования по следующим направлениям:

- определение перспективных веществ с фазовым переходом, на основании анализа их свойств в соответствии с предъявляемыми к ним требованиями;
- аналитические и экспериментальные исследования нестационарного теплообмена при фазовых переходах в накопителях тепловой энергии;
- разработка эффективных аккумуляторов тепловой энергии на основании теоретических и экспериментальных исследований;
- создание универсального программно-технического комплекса для анализа и рационального проектирования систем охлаждения с аккумулярованием холода.

Проведение названных исследований позволит проектировать и изготавливать аккумуляторы тепловой энергии, выполнять технико-экономический анализ различных вариантов применения техники низких температур, аккумулирующей тепловую энергию.

Литература

1. Energy Storage Technology Roadmap. Technical Annex. International Energy Agency, 2014. 31 p.
2. Rabczak S. Free-cooling in seasonal cold accumulator // *International Journal of New Technology and Research*. 2015. V. 1. N 8. P. 49–52.
3. Al-Aifan B., Parameshwaran R., Mehta K., Karunakaran R. Performance evaluation of a combined variable refrigerant volume and cool thermal energy storage system for air conditioning applications // *International Journal of Refrigeration*. 2017. V. 76. P. 271–295. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.02.008
4. Kim G.T., Choi Y.U., Chung Y., Kim M.S., Park K.W., Kim M.S. Experimental study on the performance of multi-split heat pump system with thermal energy storage // *International Journal of Refrigeration*. 2018. V. 88. P. 523–537. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2018.01.021
5. Zhang S., Niu J. Cooling performance of nocturnal radiative cooling combined with microencapsulated phase change material (MPCM) slurry storage // *Energy and Buildings*. 2012. V. 54. P. 122–130. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.07.041
6. Цой А.П., Грановский А.С., Бараненко А.В., Эглит А.Я. Расчет величины эффективной холодопроизводительности холодильной системы, использующей охлаждающий эффект небосвода // *Вестник МАХ*. 2014. № 3. С. 35–40.
7. Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. V. 13. N 2. P. 318–345. doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005
8. Iten M., Liu S. A work procedure of utilising PCMs as thermal storage systems based on air- TES systems // *Energy Conversion and Management*. 2014. V. 77. P. 608–627. doi: 10.1016/j.enconman.2013.10.012
9. Bahiraei F., Fartaj A., Nazri G.A. Experimental and numerical investigation on the performance of carbonbased nanoenhanced phase change materials for thermal management applications // *Energy Conversion and Management*. 2017. V. 153. P. 115–128. doi: 10.1016/j.enconman.2017.09.065
10. Li G., Hwang Y., Radermacher R. Review of cold storage materials for air conditioning application // *International Journal of Refrigeration*. 2012. V. 35. N 8. P. 2053–2077.

References

1. *Energy Storage Technology Roadmap*. Technical Annex. International Energy Agency, 2014, 31 p.
2. Rabczak S. Free-cooling in seasonal cold accumulator. *International Journal of New Technology and Research*, 2015, vol. 1, no. 8, pp. 49–52.
3. Al-Aifan B., Parameshwaran R., Mehta K., Karunakaran R. Performance evaluation of a combined variable refrigerant volume and cool thermal energy storage system for air conditioning applications. *International Journal of Refrigeration*, 2017, vol. 76, pp. 271–295. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.02.008
4. Kim G.T., Choi Y.U., Chung Y., Kim M.S., Park K.W., Kim M.S. Experimental study on the performance of multi-split heat pump system with thermal energy storage. *International Journal of Refrigeration*, 2018, vol. 88, pp. 523–537. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2018.01.021
5. Zhang S., Niu J. Cooling performance of nocturnal radiative cooling combined with microencapsulated phase change material (MPCM) slurry storage. *Energy and Buildings*, 2012, vol. 54, pp. 122–130. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.07.041
6. Tsoy A.P., Granovsky A.S., Baranenko A.V., Eglit A.Ya. Calculation of effective refrigeration capacity for refrigeration system using night sky radiant cooling. *Journal International Academy of Refrigeration*, 2014, no. 3, pp. 35–40. (in Russian)
7. Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, vol. 13, no. 2, pp. 318–345. doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005
8. Iten M., Liu S. A work procedure of utilising PCMs as thermal storage systems based on air- TES systems. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 77, pp. 608–627. doi: 10.1016/j.enconman.2013.10.012
9. Bahiraei F., Fartaj A., Nazri G.A. Experimental and numerical investigation on the performance of carbonbased nanoenhanced phase change materials for thermal management applications. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 153, pp. 115–128. doi: 10.1016/j.enconman.2017.09.065
10. Li G., Hwang Y., Radermacher R. Review of cold storage materials for air conditioning application. *International Journal of*

- doi: 10.1016/j.ijrefrig.2012.06.003
11. Li G. Review of Thermal Energy Storage Technologies and Experimental Investigation of Adsorption Thermal Energy Storage for Residential Application. Thesis. University of Maryland, 2013. 236 p.
 12. Veerakumar C., Sreekumar A. Phase change material based cold thermal energy storage: materials, techniques and applications – A review // *International Journal of Refrigeration*. 2016. V. 67. P. 271–289. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.12.005
 13. Tyagi V., Buddhi D. PCM thermal storage in buildings: a state of art // *Renew Sustain Energy Rev.* 2007. V. 11. N 6. P. 1146–1166. doi: 10.1016/j.rser.2005.10.002
 14. Carbonell D., Battaglia M., Philippen D., Haller M.Y. Numerical and experimental evaluation of ice storages with ice on capillary mat heat exchangers for solar-ice systems // *International Journal of Refrigeration*. 2018. V. 88. P. 383–401. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2018.02.007
 15. Mills A., Farid M., Selman J.R., Al-Hallaj S. Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix // *Applied Thermal Engineering*. 2006. V. 26. P. 1652–1661. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2005.11.022
 16. Joybari M.M., Haghighat F., Seddegh S., Al-Abidi A.A. Heat transfer enhancement of phase change materials by fins under simultaneous charging and discharging // *Energy Conversion and Management*. 2017. V. 152. P. 136–156. doi: 10.1016/j.enconman.2017.09.018
 17. Khan Z., Khan Z.A. An experimental investigation of discharge/solidification cycle of paraffin in novel shell and tube with longitudinal fins based latent heat storage system // *Energy Conversion and Management*. 2017. V. 154. P. 157–167. doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.051
 18. Yao C., Konga X., Li Y., Du Y., Qi C. Numerical and experimental research of cold storage for a novel expanded perlite-based shape-stabilized phase change material wallboard used in building // *Energy Conversion and Management*. 2018. V. 155. P. 20–31. doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.052
 19. Bosholm F., Lopez-Navarro A., Gamarra M., Corberan J.M., Paya J. Reproducibility of solidification and melting processes in a latent heat thermal storage tank // *International Journal of Refrigeration*. 2016. V. 62. P. 85–96. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.10.016
 20. Семенов Е.В., Бабакин Б.С., Воронин М.И., Белозёров А.Г., Бабакин С.Б. Математическое моделирование процесса охлаждения хладоносителя системой замороженных шаров // *Вестник МАХ*. 2016. № 4. С. 74–79.
 21. Самарский А.А., Вабишевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
 22. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488 с.
 23. Мейрманов А.М. Задача Стефана. Новосибирск: Наука, 1986. 238 с.
 24. Du. Y. Cold Energy Storage: Fundamentals and Applications: PhD Thesis. Leeds, 2014. 241 p.
 25. Лобанов И.Е., Бабакин Б.С., Айткеев Р.Б., Воронин М.И., Бабакин С.Б. Математическая модель процесса намораживания льда на сферической поверхности применительно для аккумуляторов холода // *Вестник МАХ*. 2013. № 4. С. 12–15.
 26. Gaspar P.D., Silva P.D. Handbook of Research on Advances and Applications in Refrigeration Systems and Technologies. Hershey: IGI Global, 2015. 924 p.
 27. Маринюк Б.Т., Угольников М.А. Динамика намораживания водного льда на трубчатых элементах льдогенераторов // *Холодильная техника*. 2016. № 12. С. 44–47.
 28. Маринюк Б.Т. Расчеты теплообмена в аппаратах и системах низкотемпературной техники. М.: Машиностроение, 2015. 280 с.
 29. Tan F.L. Constrained and unconstrained melting inside a sphere // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2008. V. 35. N 4. P. 466–475. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.09.008
 30. Zhou H., Vasilescu C., Ferreira C.I. Heat transfer and flow characteristics during the formation of TBAB hydrate slurry in a coil heat exchanger // *International Journal of Refrigeration*. 2016. V. 64. P. 130–142. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.12.021
 31. Li G. Review of Thermal Energy Storage Technologies and Experimental Investigation of Adsorption Thermal Energy Storage for Residential Application. Thesis. University of Maryland, 2013. 236 p.
 32. Veerakumar C., Sreekumar A. Phase change material based cold thermal energy storage: materials, techniques and applications – A review. *International Journal of Refrigeration*, 2016, vol. 67, pp. 271–289. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.12.005
 33. Tyagi V., Buddhi D. PCM thermal storage in buildings: a state of art. *Renew Sustain Energy Rev.*, 2007, vol. 11, no. 6, pp. 1146–1166. doi: 10.1016/j.rser.2005.10.002
 34. Carbonell D., Battaglia M., Philippen D., Haller M.Y. Numerical and experimental evaluation of ice storages with ice on capillary mat heat exchangers for solar-ice systems. *International Journal of Refrigeration*, 2018, vol. 88, pp. 383–401. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2018.02.007
 35. Mills A., Farid M., Selman J.R., Al-Hallaj S. Thermal conductivity enhancement of phase change materials using a graphite matrix. *Applied Thermal Engineering*, 2006, vol. 26, pp. 1652–1661. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2005.11.022
 36. Joybari M.M., Haghighat F., Seddegh S., Al-Abidi A.A. Heat transfer enhancement of phase change materials by fins under simultaneous charging and discharging. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 152, pp. 136–156. doi: 10.1016/j.enconman.2017.09.018
 37. Khan Z., Khan Z.A. An experimental investigation of discharge/solidification cycle of paraffin in novel shell and tube with longitudinal fins based latent heat storage system. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 154, pp. 157–167. doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.051
 38. Yao C., Konga X., Li Y., Du Y., Qi C. Numerical and experimental research of cold storage for a novel expanded perlite-based shape-stabilized phase change material wallboard used in building. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 155, pp. 20–31. doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.052
 39. Bosholm F., Lopez-Navarro A., Gamarra M., Corberan J.M., Paya J. Reproducibility of solidification and melting processes in a latent heat thermal storage tank. *International Journal of Refrigeration*, 2016, vol. 62, pp. 85–96. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.10.016
 40. Semenov E.V., Babakin B.S., Voronin M.I., Belozherov A.G., Babakin S.B. Mathematical modeling of thermostating liquid cooling process by the system of frozen balloons. *Journal International Academy of Refrigeration*, 2016, no. 4, pp. 74–79. (in Russian)
 41. Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. *Computational Heat Transfer*. Moscow, Editorial URSS, 2003, 784 p. (in Russian)
 42. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford, Clarendon Press, 1956.
 43. Meirmanov A.M. *Stefan's Task*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986, 238 p. (in Russian)
 44. Du. Y. *Cold Energy Storage: Fundamentals and Applications*: PhD Thesis. Leeds, 2014, 241 p.
 45. Lobanov I.E., Babakin B.S., Aitkeev R.B., Voronin M.I., Babakin S.B. Mathematical model of the ice build-up process on a spherical surface for cold accumulators. *Journal International Academy of Refrigeration*, 2013, no. 4, pp. 12–15. (in Russian)
 46. Gaspar P.D., Silva P.D. *Handbook of Research on Advances and Applications in Refrigeration Systems and Technologies*. Hershey: IGI Global, 2015, 924 p.
 47. Marinyuk B.T., Ugolnikov M.A. Dynamics of water ice formation on tubular elements of ice generators. *Kholodilnaya Tekhnika*, 2016, no. 12, pp. 44–47. (in Russian)
 48. Marinyuk B.T. *Calculations of Heat Transfer in the Apparatus and Systems of Low-Temperature Equipment*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2015, 280 p. (in Russian)
 49. Tan F.L. Constrained and unconstrained melting inside a sphere. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 35, no. 4, pp. 466–475. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.09.008
 50. Zhou H., Vasilescu C., Ferreira C.I. Heat transfer and flow characteristics during the formation of TBAB hydrate slurry in a coil heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 2016, vol. 64, pp. 130–142. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.12.021

31. Авдонин Н.А. Математическое описание процессов кристаллизации. Рига: Зинатне, 1980. 180 с.
32. Зайцев А.В., Кублицкий С.Е., Пеленко В.В. Моделирование промерзания биомассы при криозаморозке // Процессы и аппараты пищевых производств. 2017. № 1. С. 9–19. doi: 10.17586/2310-1164-2017-10-1-9-19
33. Tan F.L., Hosseinizadeh S.F., Khodadadi J.M., Liwu F. Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. V. 52. N 15-16. P. 3464–3472. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.043
34. Sattari H., Mohebbi A., Afsahi M.M., Azimi Yancheshme A. CFD simulation of melting process of phase change materials (PCMs) in a spherical capsule // International Journal of Refrigeration. 2017. V. 73. P. 209–218. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2016.09.007
35. Gulfam R., Zhu W., Xu L., Cheema I.I., Sheng P., Zhao G., Deng Y. Design, fabrication and numerical analysis of compact thermal management system integrated with composite phase change material and thermal bridge // Energy Conversion and Management. 2018. V. 156. P. 25–33. doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.098
36. Voller V., Prakash C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1987. V. 30. N 8. P. 1709–1719. doi: 10.1016/0017-9310(87)90317-6
31. Avdonin N.A. *Mathematical Specification of Crystallization Processes*. Riga, Zinatne Publ., 1980, 180 p. (in Russian)
32. Zaitsev A.V., Kublitskiy S.E., Pelenko V.V. Simulation of biomass freezing at cryofreezing. *Processes and Equipment for Food Production*, 2017, no. 1, pp. 9–19. (in Russian) doi: 10.17586/2310-1164-2017-10-1-9-19
33. Tan F.L., Hosseinizadeh S.F., Khodadadi J.M., Liwu F. Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 52, no. 15-16, pp. 3464–3472. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.043
34. Sattari H., Mohebbi A., Afsahi M.M., Azimi Yancheshme A. CFD simulation of melting process of phase change materials (PCMs) in a spherical capsule. *International Journal of Refrigeration*, 2017, vol. 73, pp. 209–218. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2016.09.007
35. Gulfam R., Zhu W., Xu L., Cheema I.I., Sheng P., Zhao G., Deng Y. Design, fabrication and numerical analysis of compact thermal management system integrated with composite phase change material and thermal bridge. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 156, pp. 25–33. doi: 10.1016/j.enconman.2017.10.098
36. Voller V., Prakash C. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1987, vol. 30, no. 8, pp. 1709–1719. doi: 10.1016/0017-9310(87)90317-6

Авторы

Бараненко Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, советник при ректорате, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 6602940582, ORCID ID: 0000-0003-3675-9513, baranenko@mail.ifmo.ru

Кузнецов Павел Александрович – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; генеральный директор, ООО «Нексен», Санкт-Петербург, 192148, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-4284-3463, klimatpiter@gmail.com

Захарова Виктория Юрьевна – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-8554-3260, viktoriasju@yandex.ru

Цой Александр Петрович – кандидат технических наук, доцент, профессор, Алматинский технологический университет, Алматы, 050012, Казахстан; президент, Казахстанская Ассоциация холодильной промышленности, Алматы, 050008, Казахстан, Scopus ID: 57195570143, ORCID ID: 0000-0002-3073-6698, teniz@bk.ru

Authors

Alexandr V. Baranenko – D.Sc., Professor, Rectorate Advisor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6602940582, ORCID ID: 0000-0003-3675-9513, baranenko@mail.ifmo.ru

Pavel A. Kuznetsov – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; CEO, Nexen Ltd, Saint Petersburg, 192148, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-4284-3463, klimatpiter@gmail.com

Victoria Yu. Zakharova – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-8554-3260, viktoriasju@yandex.ru

Alexander P. Tsoy – PhD, Associate Professor, Professor, Almaty Technological University, Almaty, 050012, Republic of Kazakhstan; President, Kazakhstan Association of Refrigeration Industry, Almaty, 050008, Republic of Kazakhstan, Scopus ID: 57195570143, ORCID ID: 0000-0002-3073-6698, teniz@bk.ru