

На правах рукописи

Остапенко Виталий Валериевич



**ФАЗОПЕРЕХОДНОЙ АККУМУЛЯТОР ТЕПЛОТЫ
ДЛЯ НУЖД СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Макеевка – 2015

Работа выполнена в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, г. Макеевка.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лукьянов Александр Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Белоусов Вячеслав Владимирович,
Донецкий национальный университет
заведующий кафедрой физики неравновесных
процессов, метрологии и экологии;

кандидат технических наук, доцент
Гущин Анатолий Михайлович,
Донецкий институт железнодорожного
транспорта, доцент кафедры подвижного
состава железных дорог.

Ведущая организация: Академия строительства и архитектуры ФГАОУ
ВО "КФУ им. В.И. Вернадского",
г. Симферополь.

Защита состоится «18» декабря 2015 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.005.01 Донбасской национальной академии строительства и архитектуры по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина 2, зал ученого совета. Тел. факс: +38(0623) 22-77-19, e-mail: d01.005.01@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донбасской национальной академии строительства и архитектуры по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «___» октября 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Удовиченко Злата Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Вопрос энергосбережения, рационального использования имеющихся природных ресурсов, использование возобновляемых источников энергии, снижение выбросов в окружающую среду - важнейшие вопросы для обеспечения дальнейшего существования человечества. Эти задачи могут быть объединены одним общим свойством. Все современные энергосберегающие установки имеют периодичность работы (пики и провалы по выработке и энергопотреблению) в зависимости от сферы их применения. Прямое использование энергии Солнца возможно только в световой день, энергии ветра - только при наличии ветра, тепловая энергия сточных вод имеет переменную величину во времени суток и т.д. Таким образом, составной вопроса энергосбережения стала задача выравнивания процессов потребления и генерации энергии во времени за счет ее аккумуляирования.

Относительно Украины, которая обладает значительным потенциалом атомной энергетики, вопрос энергоэффективности и энергосбережения ставится другим образом. Доля АЭС в структуре производства электроэнергии в Украине в 2013 году составила 43%. Коэффициент использования установленной мощности всех АЭС Украины снижается с 2011 г. и за девять месяцев 2013 года составляет 67,5%, тогда как среднемировой уровень - 87%. В ряде стран, в частности в Японии, США, Республике Корея, Финляндии, Чехии, КНР, этот коэффициент на АЭС достигает 91-93%.

Учитывая данную ситуацию стратегии развития и потребления энергии, появляется необходимость в создании новых буферных потребителей, которые позволили бы повысить коэффициент использования установленной мощности АЭС Украины, и при этом сгладить график среднесуточного потребления энергии. Такими потребителями-буферами могут выступить теплогенерирующие установки, которые будут работать только во время провала энергопотребления. Работа потребителей - буферов является переменной во времени, и может составлять от 6 до 11:00. В другое время работа системы генерации теплоты невозможна без участия аккумуляторов теплоты.

Наиболее перспективным и актуальным направлением развития технологии аккумуляции теплоты является аккумуляирование за счет явления фазового перехода твердых материалов, что обеспечивает высокую плотность энергии, запасаемой при использовании небольших перепадов температур, и достаточно стабильную температуру теплоносителя на выходе из аккумулятора теплоты.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Тема диссертации соответствует направлению исследований кафедры «Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.

Основные исследования теоретического и прикладного характера выполнялись в соответствии с Законом Украины "Об энергосбережении", Комплексной государственной программы энергосбережения Украины, Программы энергосбережения в жилищно-коммунальном строительстве, приоритетных

направлений развития науки и техники в Украине "Экологически чистая энергетика и энергосберегающие технологии", Программы научно-технического развития Донецкой области на период до 2020 г. "Донбасс-2020".

Исследования выполнялись в рамках госбюджетных научно-исследовательских тем по заказу Министерства образования и науки Украины: «Разработка методов и способов повышения энергетической и экологической эффективности источников теплоты для локального и индивидуального теплоснабжения» (государственный регистрационный номер 0106U002951), «Разработка теоретических и технологических основ обеспечения внедрения современных технологий систем функционирования ЖКХ» (государственный регистрационный номер 0109U003038), «Разработка теоретических моделей технических и технологических решений обеспечения эффективного функционирования инженерных сетей тепло-, водоснабжения и водоотведения» (государственный регистрационный номер 0111U001806).

Цель работы. Целью исследования является повышение эффективности систем теплоснабжения путем использования аккумуляторов теплоты на основе фазового перехода твердых материалов.

Задачи исследования:

- провести аналитические исследования существующих конструкций аккумуляторов теплоты (АТ), аккумуляторов теплоты на фазовом переходе (АТФП), теплоаккумулирующих материалов (ТАМ);
- установить влияние режима движения теплоносителя системы теплоснабжения на условия работы аккумулятора теплоты;
- разработать физико-математическую модель рабочего процесса аккумулятора теплоты в процессе фазового превращения ТАМ;
- экспериментально исследовать положения предлагаемой модели в подтверждение достоверности результатов аналитических исследований;
- разработать методику расчета конструкции натуральных аппаратов, на основе подтвержденной модели работы аккумулятора теплоты;
- разработать рекомендации по включению аккумулятора теплоты на основе фазового перехода в тепловые схемы систем теплоснабжения;
- экономически обосновать целесообразность использования фазопереходных аккумуляторов теплоты в системах теплоснабжения.

Объект исследования - теплообменные процессы, протекающие между теплоносителем системы теплоснабжения и теплоаккумулирующим материалом при его фазовом превращении.

Предмет исследования - закономерности изменения температурного поля и толщины закристаллизовавшегося теплоаккумулирующего материала в процессе фазового перехода.

Методы исследования. Поставленные задачи исследования решались с помощью аналитического метода, основанного на вариационном принципе локального потенциала, адекватность которого доказана сопоставлением результатов расчетных данных с экспериментальными.

Научная новизна полученных результатов:

- впервые получена зависимость теплофизических свойств ТАМ от режима течения теплоносителя в теплообменных трубках аккумулятора теплоты;
- впервые разработана физико-математическая модель кристаллизации бесконечного полого цилиндра ТАМ при его охлаждении теплоносителем системы теплоснабжения путем решения задачи Стефана вариационным методом, математически описан процесс роста кристаллического тела во времени;
- получили дальнейшее развитие разработки алгоритма и практической методики расчета натуральных кожухотрубных АТФП на основе разработанной математической модели, которые позволяют определить все конструктивные показатели АТ и задать режим движения теплоносителя в теплообменных трубах.

Практическое значение полученных результатов:

- результаты работы являются основой для разработки и совершенствования АТФП;
- разработана методика расчета натуральных АТФП;
- предложены схемы включения АТФП в системы теплоснабжения, использующие возобновляемые источники энергии и схемы совместной работы с котлами на органическом топливе, которые позволяют повысить КПД теплогенерирующей установки в среднем на 1,1% для природного газа;
- результаты научных исследований внедрены в систему теплоснабжения предприятия ПАО «Дружковский метизный завод» (г. Дружковка);
- созданная физическая и математическая модели АТФП внедрены в учебный процесс при чтении курса лекций по дисциплинам «Теплогенерирующие установки», «Теплоснабжение», «Нетрадиционные источники энергии» для студентов специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция».

Личный вклад соискателя. Личный вклад соискателя включает:

- постановку цели и задач исследований;
- обоснование принципов и методов проведения теоретических и экспериментальных исследований;
- разработку математической модели изменения параметров температурного поля теплоаккумулирующего материала в процессе его фазового перехода, модели движения фронта кристаллизации ТАМ во времени;
- проведение теоретических и экспериментальных исследований теплообменных процессов аккумулятора теплоты фазового перехода материалов;
- качественный и количественный анализ результатов исследований;
- разработку схем включения АТФП в работу систем теплоснабжения;
- определение и анализ экономической эффективности внедрения АТФП;
- формирование выводов по результатам исследований.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертации докладывались на: VI Международной конференции «Кинетика и механизм кристаллизации. Самоорганизация при фазообразовании» (г. Иваново, 2010 г.); IX-XIII Международных конференциях молодых ученых, аспирантов и студентов ДонНАСА (г. Макеевка, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014); 3-ей межвузовской научно-технической конференции преподавателей, молодых ученых и студентов «Энерго-

та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування» (м. Донецьк, 2011 г.); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы физико-химического материаловедения» (г. Макеевка 2013 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах, общим объемом 2,05 п.л., лично автором – 1,55 п.л., в том числе в 7 рецензируемых научных изданиях: 6 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов, утвержденный МОН Украины; 1 – в издании, входящем в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех основных разделов, выводов, списка использованных источников и приложений. Общий объем работы составляет 173 страницы, в том числе 124 страница основного текста, 5 полных страниц с рисунками и таблицами, 10 страниц использованных источников, 37 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, приведены научная новизна, достоверность и практическая значимость полученных результатов, указаны вопросы, вынесенные на защиту.

В первом разделе проведен анализ проблемы повышения энергоэффективности и энергосбережения. Предложено использование технологии аккумуляции энергии с целью выравнивания процессов генерации и использования энергии во времени и рационального использования существующих мощностей.

Выполнен обзор основных типов аккумуляторов теплоты. Установлено, что наиболее перспективным направлением развития технологии аккумуляции тепловой энергии является аккумулирование за счет явления фазового перехода твердых теплоаккумулирующих материалов (ТАМ).

Анализ конструктивных решений аккумуляторов теплоты фазового перехода (АТФП) показал, что вследствие простоты конструкции и эксплуатации большое внимание заслуживают теплообменные аппараты, использующие пассивный теплообмен. Реализация активного теплообмена технически сложна, и предполагает наличие подвижных частей, снижающих надежность аппарата. Кожухотрубные АТФП, реализующие пассивный вид теплообмена, представляются наиболее перспективными для использования в системах аккумулирования теплоты.

Теоретическому описанию теплообменных процессов, протекающих при фазовом превращении материалов, посвященные фундаментальные работы таких ученых как Г. Карслоу, Д. Егер, А.В. Лыкова, А.М. Муйрманова, А.Н. Тихонова, А.А. Самарского, Н.Н. Калиткина и др. Однако практическое применение существующих моделей для решения задачи достаточно трудоемкое по причине громоздкости вычислений и сложного анализа результатов. Наибольшее внимание при создании практической модели процесса теплообмена обращается на вариационный метод, позволяющий получить компактные математические выражения, привести простой учет граничных условий и использовать прямые методы вычисления.

На основе выполненного анализа теоретических и экспериментальных работ по теме диссертации сформулирована цель и определены задачи исследований.

Второй раздел посвящен теоретическому исследованию процесса затвердевания ТАМ и моделированию состояния аккумулятора теплоты на фазовом переходе.

С целью упрощения описания рабочего процесса аккумулятора задача сведена к рассмотрению единичного стержня (теплообменной трубки). Таким образом, рассмотрение процесса изменения температурного поля ТАМ в процессе кристаллизации преобразовано в задачу нахождения распределения температур в любой момент времени для полого цилиндра (Рис. 1).

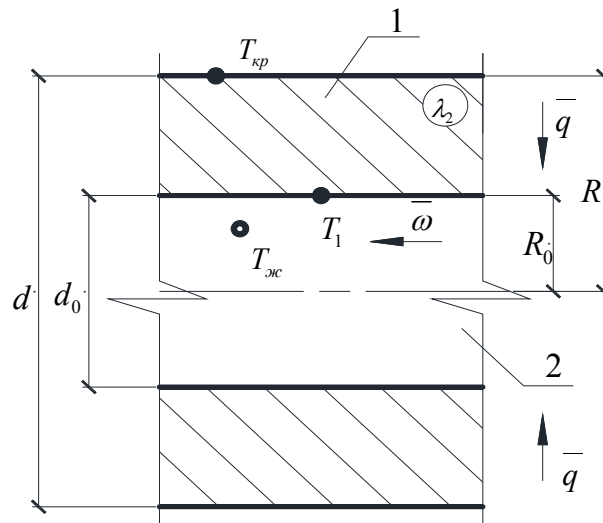


Рис. 1. Схема движения потоков в полом цилиндре:

1 - теплоаккумулирующий материал;

2 - теплоноситель;

$T_{жс}$ - средняя температура теплоносителя;

$T_{кр}$ - температура фазового перехода ТАМ;

T_1 - температура внутренней поверхности стенки полого цилиндра (теплообменной трубки);

$\vec{\omega}$ - вектор скорости движения теплоносителя в трубке;

R_0 - радиус теплообменной трубки;

R - радиус закристаллизовавшегося ТАМ на поверхности теплообменной трубки;

\vec{q} - вектор теплового потока;

λ_2 - коэффициент теплопроводности ТАМ в твердой фазе;

d_0 - диаметр канала для движения теплоносителя (внутренний диаметр трубки);

d - внешний диаметр теплообменной трубки (цилиндра).

Для определения предельных границ температурного поля определена зависимость параметра диаметра закристаллизовавшегося ТАМ d от теплового потока

$$d = d_0 \cdot e^{\frac{2\lambda_2(T_{кр}-T_1)}{Nu_{ж,d} \cdot \lambda_{ж}(T_1-T_{ж})}}, \quad (1)$$

где $\overline{Nu}_{ж,d}$ - число Нуссельта, характеризующее теплообмен между теплоносителем и ТАМ.

Дальнейший теоретический анализ уравнения (1) позволил определить, что рост диаметра закристаллизовавшегося ТАМ вокруг теплообменной трубки пропорционален увеличению ее диаметра при неизменности других переменных (Рис.2). Таким образом, с увеличением диаметра трубки возможно добиться роста тепловой мощности аккумулятора и его производительности. Однако, при определенной температуре эффект от увеличения диаметра закристаллизовавшегося ТАМ падает, происходит сближение кривых. В данном случае (исследование парафина Т-3 в качестве ТАМ) это наблюдается в области температуры стенки 44°C , при градиенте 4°C . Если обратить внимание на искривление графиков для различных диаметров, то можно сделать вывод, что оптимальное значение $d_{кр}$ для исследуемого ТАМ составляет $\approx 2d_0$.

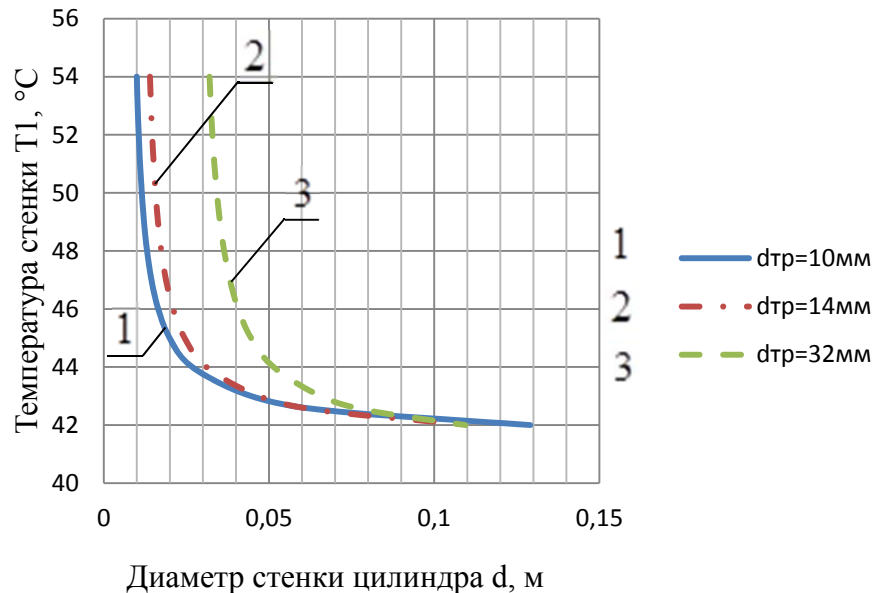


Рис. 2. График зависимости температуры стенки теплообменной трубки от роста диаметра закристаллизовавшегося ТАМ.

В результате анализа влияния скорости теплоносителя ω на процесс теплообмена (Рис.3), установлено, что увеличение скорости потока теплоносителя может не привести к интенсификации процесса теплообмена (как это наблюдается у исследуемого ТАМ), а напротив снижает температуру стенки, при этом уменьшая температурный напор. Это объясняется низкими теплопроводными свойствами ТАМ. Таким образом, по заданным значениям $d_{кр}$ и минимального температурного напора ($T_1-T_{ж}$) возможно спрогнозировать свойства необходимого ТАМ для аккумулятора. Можно сделать вывод, что для рационализации материалоемкости (увеличения $d_{кр}$) аккумулятора целесообразно использовать как турбулентный, так и ламинарный режимы движения теплоносителя в зависимости от теплофизических

свойств аккумулирующего материала - теплопроводности λ_2 и температуры кристаллизации $T_{кр}$.

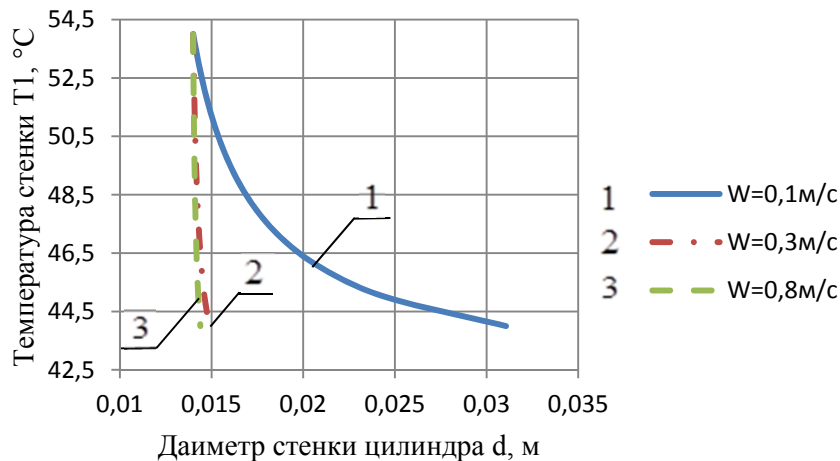


Рис. 3. График зависимости температуры стенки теплообменной трубки от роста диаметра закристаллизовавшегося ТАМ при различных режимах течения теплоносителя.

Процесс отбора теплоты от аккумулятора (разрядка) протекает с постоянным изменением значений температур теплоносителя и перераспределения температурного поля внутри закристаллизовавшегося ТАМ во времени (Рис.4).

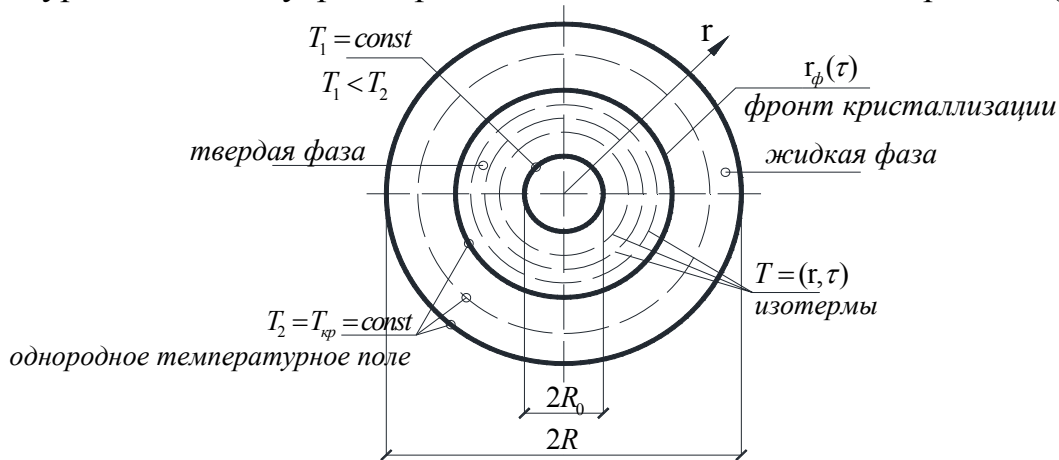


Рис. 4. Схема роста тела кристаллического цилиндра вокруг теплообменной трубки аккумулятора теплоты фазового перехода.

В результате исследований работы АТФП установлена зависимость, по которой происходит изменение параметров температурного поля материала. Для этого решена задача нестационарной теплопроводности для бесконечного полого цилиндра путем преобразования дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для цилиндра вариационным методом

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (\tau > 0; R_0 < r < R), \quad (2)$$

где τ – время;

r – координата (радиус) рассматриваемой точки

при следующих граничных условиях 1-го рода

$$T(r, 0) = T_2 = T_{kp} = const;$$

$$T(R, \tau) = T_2 = T_{kp} = const;$$

$$T(R_0, \tau) = T_1 = const.$$

Функционал для уравнения (2) записывается следующим образом

$$L = \int_R^{R_0} \int_{T_1}^{T_2} (T_r^2 - \frac{2}{r} T_r^0 \cdot T + \frac{2}{a} T_\tau^0 \cdot T) dr d\tau.$$

В результате решения уравнения (2) с использованием вариационного метода получена зависимость температуры аккумулирующего материала от координаты и времени

$$T(r, \tau) = \frac{T_1 \ln \frac{R}{r} + T_2 \ln \frac{r}{R_0}}{\ln \frac{R}{R_0}} \cdot e^{-\frac{a(A-B)}{C} \cdot \tau}, \quad (3)$$

где переменные A , B , C определяются по формулам

$$A = \frac{(T_2 - T_1)^2}{\ln^2 \frac{R}{R_0}} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right);$$

$$B = \frac{(T_2 - T_1)}{\ln^2 \frac{R}{R_0}} \left(T_1 \left(\frac{1}{R_0} \ln \frac{R_0}{R} + \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R} \right) + T_2 \left(\frac{1}{R} \ln \frac{R}{R_0} - \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R} \right) \right);$$

$$C = \frac{1}{\ln^2 \frac{R}{R_0}} \left(T_1^2 \left(R_0 \left(\ln \frac{R}{R_0} + 1 \right)^2 + R_0 - 2R \right) + 2T_1 T_2 \left(\ln \frac{R_0}{R} (R + R_0) - 2R_0 + 2R \right) + T_2^2 \left(-R \left(\ln \frac{R}{R_0} - 1 \right)^2 + 2R_0 - R \right) \right).$$

Однако, для более полного описания рабочего процесса АТФП необходимо учитывать изменение во времени радиуса кристаллического ТАМ $r_\phi(\tau)$ (Рис.4), так как этот показатель значительно влияет на изменение температуры стенки теплообменной трубки T_1 , что в свою очередь определяет температуру теплоносителя на выходе из аккумулятора.

Движение фронта кристаллизации во времени найдено из условия Стефана, который выражает тепловые потоки при переходе из одного агрегатного состояния в другое

$$\lambda_2 \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} = L_2 \rho_2 \frac{\partial r}{\partial \tau}, \quad (4)$$

где L_2 - теплота кристаллизации ТАМ;

ρ_2 - плотность ТАМ в твердой фазе.

Преобразовав уравнение (4), зависимость движения фронта кристаллизации от времени принимает вид

$$r_{\phi} = \sqrt{2(T_2 - T_1) \frac{c_2 \cdot C(1 - e^{-\frac{a(A-B)}{C} \tau})}{L_2 \ln \frac{R}{R_0} (A-B)} + R_0^2}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) получена зависимость от времени, за которое фронт достигает определенного значения r_{ϕ}

$$\tau_{\phi} = -\frac{C}{a(A-B)} \cdot \ln\left(1 - \frac{L_2 \ln \frac{R}{R_0} (A-B)(r_{\phi}^2 - R_0^2)}{2c_2 C(T_2 - T_1)}\right). \quad (6)$$

Положив в уравнении (6) $r_{\phi} = R$, можно определить полное время разрядки аккумулятора, то есть

$$\tau_{\text{разр.}} = -\frac{C}{a(A-B)} \cdot \ln\left(1 - \frac{L_2 \ln \frac{R}{R_0} (A-B)(R^2 - R_0^2)}{2c_2 C(T_2 - T_1)}\right). \quad (7)$$

В третьем разделе приводится способ и результаты экспериментальной проверки предложенной модели разрядки аккумулятора теплоты с учетом принятых допущений.

Принятый в качестве ТАМ парафин марки Т-3 был исследован на предмет изменения своих теплофизических свойств при циклических процессах плавления и кристаллизации. Исследуемыми параметрами стали: T_x – температура первого пика эндо-эффекта перед плавлением, T_L – температура плавления; T_S – температура начала кристаллизации; T_{Sm} – температура экзо-пика кристаллизации, ΔT – переохлаждение жидкой фазы относительно T_L при кристаллизации, T_m – минимальная температура переохлажденной жидкой фазы, L_2 – удельная теплота плавления. Результаты исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты исследования парафина марки Т-3 (очищенный технический) на изменение теплофизических свойств, установленных методом дифференциального термического анализа (ДТА):

№ термоциклу	T_x , °С	T_L , °С	T_S , °С	T_{Sm} , °С	T_m , °С	ΔT , К	L_2 , кДж/кг
1,2	33,0	55,5	53,0	50,0	53,0	2,5	130
620	35,0	54,5	52,5	49,0	52,5	2,0	134

Для рассмотрения работы аккумулятора, основанного на явлении фазового перехода, принимается вариант упрощенной системы отопления (рис. 5). В этом

варианте предполагается параллельное включение теплового аккумулятора с генератором теплоты.

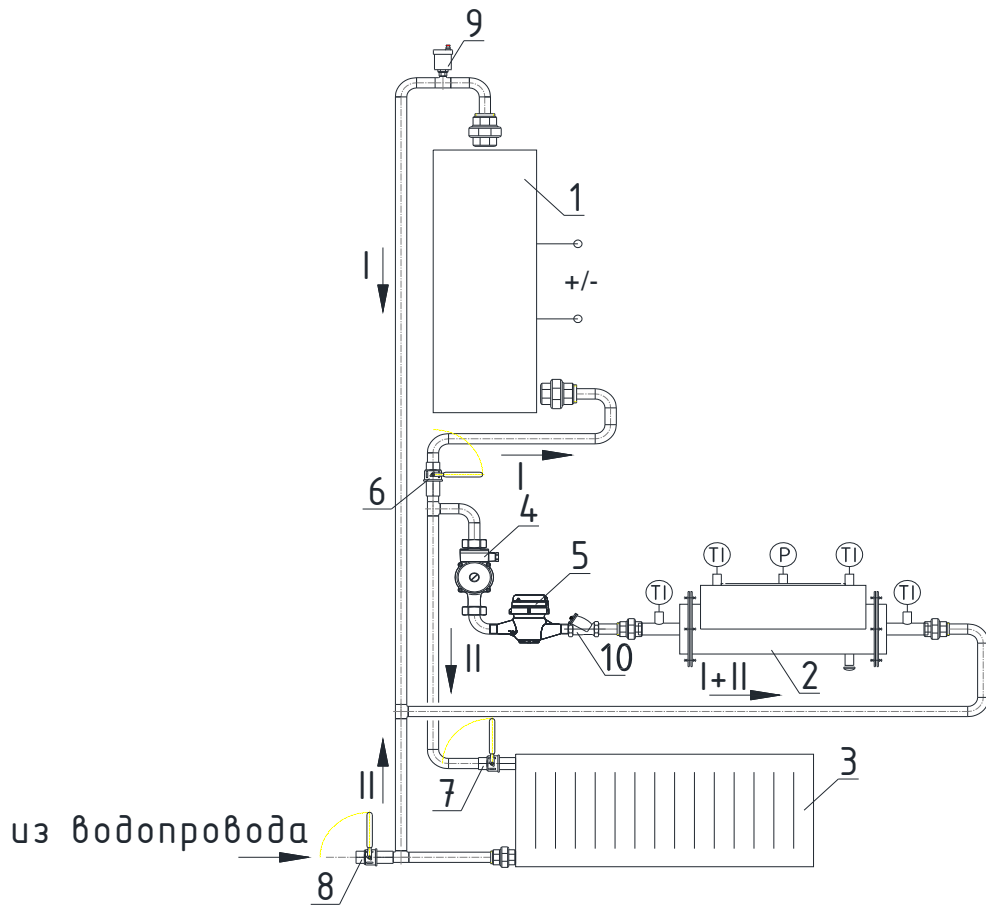


Рис. 5. Схема экспериментальной установки с аккумулятором тепловой энергии на основе фазового перехода

- 1 - генератор теплоты (электронагреватель);
- 2 - аккумулятор теплоты фазового перехода;
- 3 - потребитель теплоты (панельный радиатор);
- 4 - трехскоростной циркуляционный насос;
- 5 - расходомер;
- 6,7,8 - шаровый кран;
- 9 - воздушный клапан;
- 10 - сетчатый фильтр.

Конструктивно установка делится на два контура - контур генерации теплоты (поз. 1,2,4,5) и контур потребления II (поз. 2,3,4,5). Принцип работы схемы моделирует работу системы теплоснабжения. В процессе проведения эксперимента осуществлялось поочередное включение контура генерации I и контура потребления II.

В качестве основополагающей конструкции аккумулятора в экспериментальной установке принята модель кожухотрубного теплообменного аппарата. Такой выбор объясняется отлаженной технологией производства кожухотрубных теплообменников, а также простотой конструкции для применения в лабораторных условиях.

Циркуляционный насос в экспериментальной установке обеспечивал циркуляцию теплоносителя по контурам генерации тепла и его потребления. Применяемый насос имел возможность изменять свои скоростные характеристики для оценки влияния режима движения теплоносителя на характер протекания теплообменных процессов.

Регистрируемыми параметрами были температуры теплоносителя на входе и выходе из аккумулятора, расход теплоносителя, время, температуры ТАМ при фиксированном удалении температурного датчика от теплообменной трубки, время движения фронта кристаллизации.

Планирование эксперимента по определению времени кристаллизации ТАМ выполнено для двухфакторной линейной модели по схеме полного факторного эксперимента (ПФЭ). Для планирования эксперимента по определению температуры ТАМ на цилиндрической поверхности заданного радиуса принята ортогональная трехфакторная квадратичная модель. В результате эксперимента получены данные, обработка которых позволила получить регрессионные уравнения. После определения значимости коэффициентов уравнения аппроксимируются в следующем виде

$$\tau = 4188,89 \cdot r_{\phi} - 33,51, R = 0,95; \quad (8)$$

$$T = 58,64 - 34,13 \cdot \omega - 285,71 \cdot r - 0,26 \cdot \tau + 2730,16 \cdot \omega \cdot r + 19,44 \cdot r \cdot \tau - 0,0026 \cdot \tau^2, R = 0,95. \quad (9)$$

В результате эксперимента получен график (рис. 6), который доказывает, что увеличение скорости течения практически не увеличивает количество теплоты, воспринимаемой теплоносителем от аккумулялирующего материала.

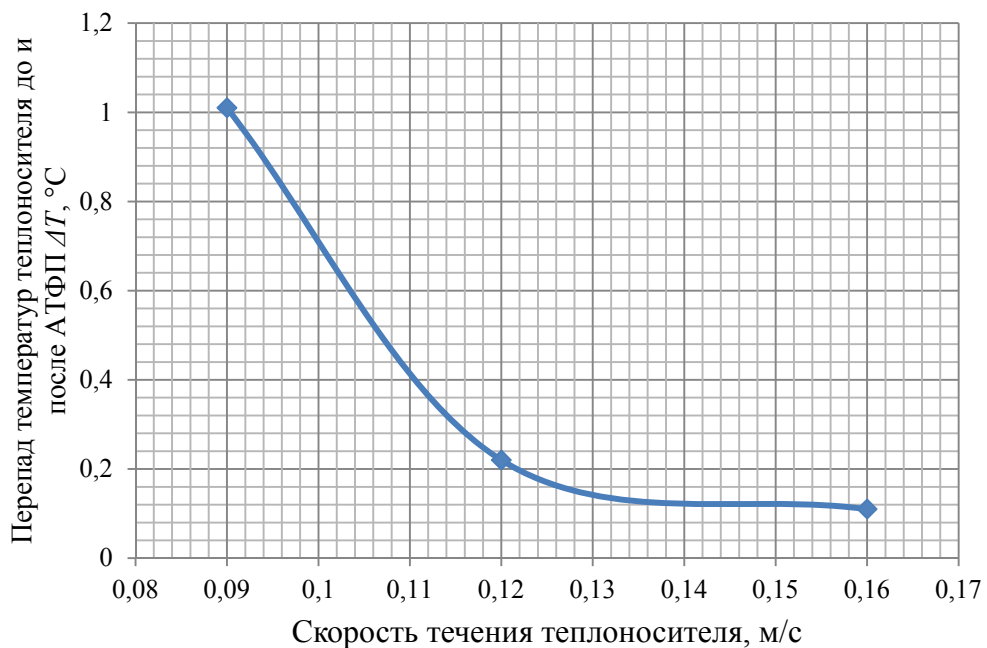


Рис. 6. Зависимость перепада температур теплоносителя на входе и выходе из аккумулятора от скорости его течения.

При этом происходит перераспределение значений в балансе теплоты воспринятой теплоносителем, то есть

$$G_1 c \Delta T_1 \approx G_2 c \Delta T_2,$$

где G_1 – массовый расход теплоносителя на первой скорости работы насоса;
 G_2 – массовый расход теплоносителя на второй скорости работы насоса;
 ΔT_1 – перепад температур теплоносителя до и после АТФП на первой скорости работы насоса;
 ΔT_2 – перепад температур теплоносителя до и после АТФП на второй скорости работы насоса;
 c – теплоемкость теплоносителя.

В такой ситуации меры по интенсификации теплообмена необходимо применять на стороне первичного контура, изменяя вид ТАМ, или увеличивая поверхность теплообмена путем внешнего оребрения теплообменной трубки.

При рассмотрении результатов экспериментальных исследований сделан вывод, что, как и было доказано теоретическими исследованиями, наиболее эффективным конечным радиусом фронта кристаллизации для исследуемого ТАМ является случай $R=2R_0$. После превышения фронтом кристаллизации значения R происходит значительное снижение градиента температур теплоносителя на входе и на выходе из АТФП. Данное наблюдение относится к парафину Т-3. Однако факт доказывает применимость формулы (1) для анализа поведения ТАМ при его кристаллизации в кожухотрубных АТФП.

Экспериментальные (точки) и теоретически определённые значения (линии) подтверждаемых параметров (ламинарный режим) расчетной формулы (6) определение времени кристаллизации ТАМ приведены на рис. 7, эксперимента по определению температуры ТАМ на цилиндрической поверхности заданного радиуса (формула 3) - на рис. 8.

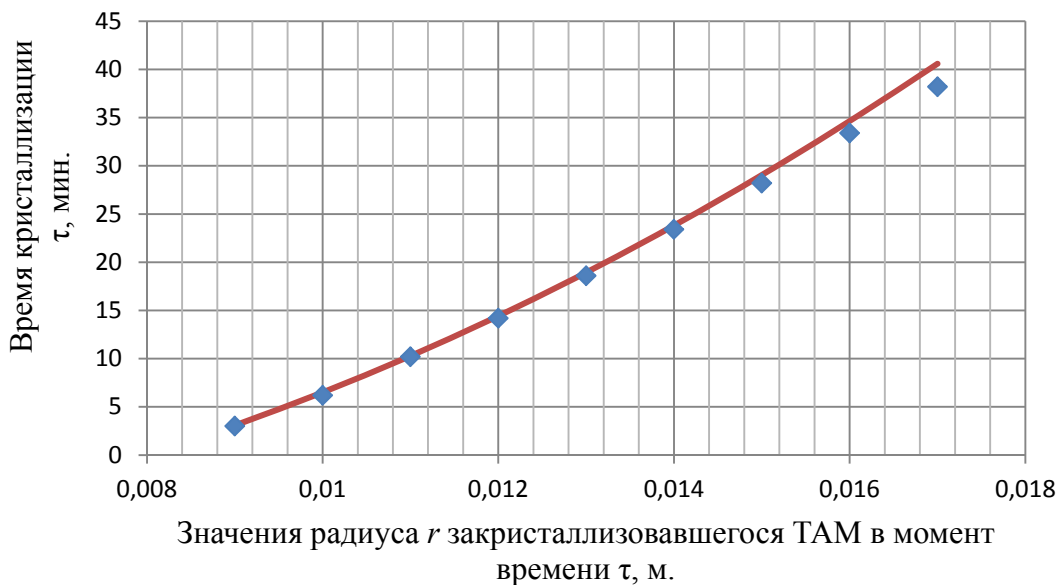


Рис. 7. Динамика роста фронта кристаллизации ТАМ вокруг теплообменной трубки во времени.

Анализ графиков на (Рис.7, Рис.8) доказывает, что максимальная погрешность полученных значений не превышает 6% в рабочем диапазоне разрядки аккумулятора говорит про сходимость данных, полученных расчетным путем и на описанной экспериментальной установке.

Данная ошибка относится к погрешности измерительных приборов и трудности со снятием показаний, и может быть сокращена за счет устранения определенных недостатков. Проведенное экспериментальное исследование подтверждает адекватность предложенной модели тепломассообменных процессов для кожухотрубных аккумуляторов фазового перехода.

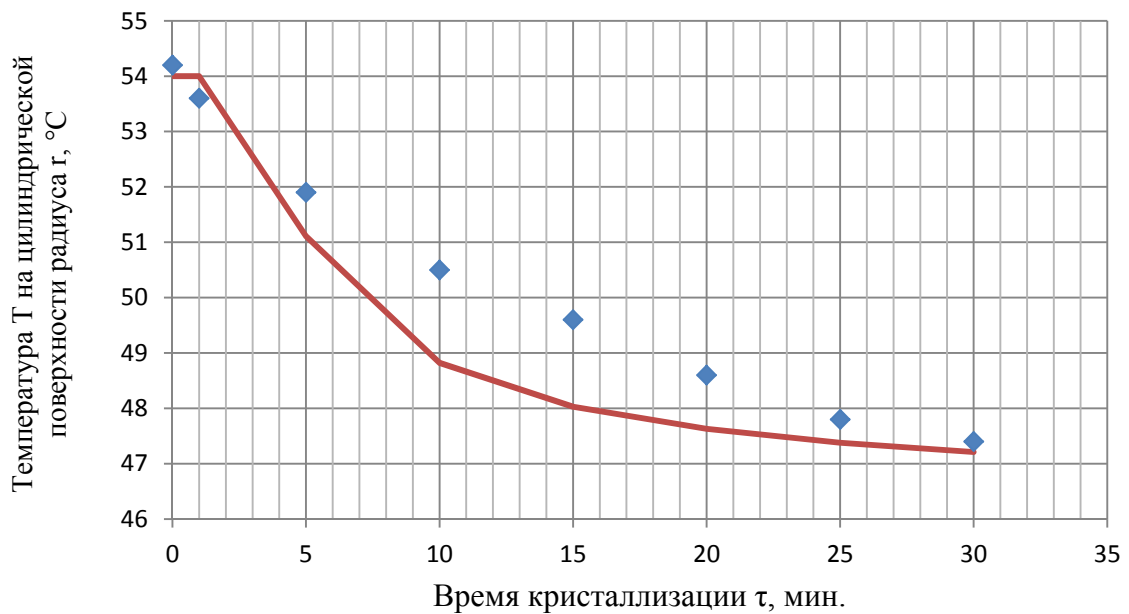


Рис. 8. Динамика изменения температурного поля ТАМ на цилиндрической поверхности заданного радиуса во времени.

В четвертом разделе работы разработана методика теплового и конструктивного расчета кожухотрубных аккумуляторов фазового перехода и схемы присоединения АТФП к системам теплоснабжения, обоснована экономическая эффективность внедрения аккумулятора.

В процессе рассмотрения и разработки схем включения АТФП в системы теплоснабжения основная задача работы тепловых аккумуляторов рассматривалась в расширении возможностей использования возобновляемых и экологически чистых источников (энергии Солнца, электроэнергии), а также в повышении КПД теплогенераторов на органических видах топлива за счет рационализации периодов их работы. Основываясь на данных принципах, учитывая существующие схемы аккумулирования тепловой энергии и особенности работы АТФП разработаны тепловые схемы систем теплоснабжения с фазопереходными аккумуляторами тепловой энергии.

Благодаря распространению котельных на органическом топливе особое внимание было уделено повышению КПД существующих теплогенерирующих

установок. Для этого были разработаны схемы параллельного (рис. 9) и последовательного включения аккумуляторов к системе теплоснабжения, позволяющие в среднем повысить КПД на 1,1% в переходный период работы системы теплоснабжения, снизить количество пусков котлов в час, что приведет к уменьшению износа оборудования и количества выбросов CO в атмосферу. Безусловным плюсом объединения АТФП с генераторами теплоты на органическом топливе является возможность работы в ночное время с меньшими затратами при использовании АТФП с электрическими элементами.

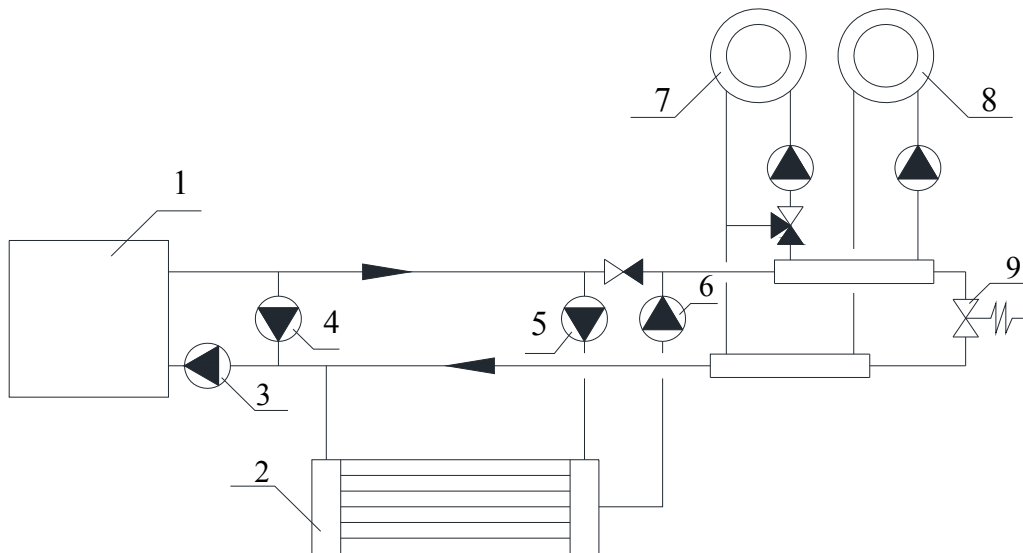


Рис. 9. Схема параллельного включения АТФП в систему теплоснабжения

- 1 - теплогенератор;
- 2 - двухконтурный аккумулятор теплоты фазового перехода;
- 3 - котловой насос;
- 4 - рециркуляционный насос;
- 5 - насос зарядки АТФП;
- 6 - насос разрядки АТФП;
- 7 - контур потребителя регулируемый;
- 8 - контур потребителя нерегулируемый;
- 9 - перепускной клапан.

Предложена конструкция кожухотрубного аккумулятора теплоты фазового перехода (Рис.10), позволяющая совместить аккумулятор и электрический генератор в одном корпусе, путем установки нагревательных элементов в «не рабочих» зонах при коридорном расположении теплообменных трубок в пучке.

Разработана методика теплового и конструктивного расчета фазопереходных аккумуляторов теплоты, позволяющая определить диаметр теплообменных труб, характер течения теплоносителя для выбранного ТАМ, площадь теплообмена, конструктивные параметры одноконтурных (формулы 10-13) и двухконтурных (формулы 14-17) конструкций аккумуляторов, рабочую и полную массу ТАМ (формулы 18,19), а также время зарядки и разрядки аккумулятора.

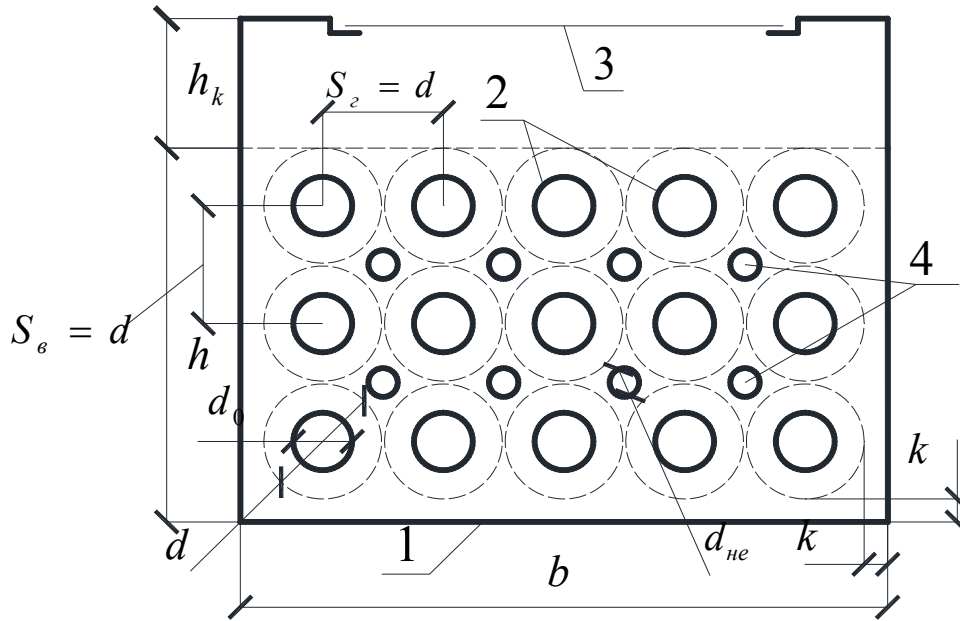


Рис. 10. Поперечный разрез АТФП с коридорным расположением теплообменных труб (двухконтурный аккумулятор)

- b - ширина аккумулятора;
 d - предельный диаметр роста закристаллизовавшегося ТАМ вокруг теплообменной трубки;
 d_0 - диаметр теплообменной трубки;
 $d_{не}$ - диаметр нагревательного элемента;
 h - высота рабочей части аккумулятора;
 h_k - высота компенсационной зоны;
 k - расстояние от крайней части закристаллизовавшегося ТАМ до корпуса АТФП;
 S_v - вертикальный шаг теплообменных труб;
 S_g - горизонтальный шаг;
 1 - корпус АТФП;
 2 - теплообменная трубка;
 3 - крышка бункера теплоаккумулятора;
 4 - греющий элемент.

$$h = n_6 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} d + k \Rightarrow n_6 = \frac{2(h-k)}{\sqrt{3}d} \quad (10)$$

$$b = n_2 \cdot d + 2k \Rightarrow n_2 = \frac{b-2k}{d} \quad (11)$$

$$n = \frac{n_6}{2} (2n_2 - 1) \quad (12)$$

$$h_k = \left(\frac{\rho_2}{\rho_2'} - 1 \right) \cdot \left(h - \frac{\pi R_0^2 n}{b} \right) \quad (13)$$

$$h = n_6 \cdot d + k \Rightarrow n_6 = \frac{h-k}{d} \quad (14)$$

$$b = n_2 \cdot d + 2k \Rightarrow n_2 = \frac{b - 2k}{d} \quad (15)$$

$$n = n_g \cdot n_2 \quad (16)$$

$$h_k = \left(\frac{\rho_2}{\rho_2'} - 1 \right) \cdot \left(h - \frac{\pi}{b} (R_0^2 n + R_{не}^2 n_{не}) \right) \quad (17)$$

$$m_p = \frac{\pi}{4} \rho_2 (d^2 - d_0^2) \cdot n \cdot l \quad (18)$$

$$m_n = \left(h \cdot b - \frac{\pi}{4} d_0^2 n \right) \cdot l \cdot \rho_2 \quad (19)$$

где n – количество теплообменных трубок в пучке;
 n_g – количество теплообменных трубок в вертикальном ряду пучка;
 n_2 – количество теплообменных трубок в горизонтальном ряду пучка;
 $n_{не}$ – количество электрических нагревательных элементов (или трубок второго контура);
 ρ_2' – плотность ТАМ в жидкой фазе;
 l – длина теплообменной трубки;
 m_p – рабочая масса ТАМ;
 m_n – полная масса ТАМ.

Выполнен экономический анализ внедрения аккумулятора теплоты фазового перехода в систему генерации тепловой энергии. Выполнен расчет показателей экономической эффективности его работы для системы с электрическими генераторами теплоты и на органическом топливе. Чистый приведенный доход проекта внедрения АТФП для котельной с электрическими котлоагрегатами на 1 МВт мощности системы теплоснабжения составляет 11975,38 тыс.грн.; для систем с котлами, использующими природный газ - 83,3 тыс.грн.

ВЫВОДЫ

1. На основании аналитических исследований в области аккумуляции тепловой энергии установлено, что наиболее перспективным направлением развития технологии аккумуляции является использование теплоты фазового перехода твердых аккумулирующих материалов.

2. В результате анализа влияния режима течения теплоносителя на условия теплообмена между средами установлено, что влияющими на интенсификацию теплообмена факторами являются теплофизические свойства аккумулирующего материала (теплопроводность, температура фазового перехода).

3. Разработана математическая модель передачи теплоты, позволяющая спрогнозировать состояние температурного поля ТАМ в процессе его фазового перехода в любой момент времени; рассмотреть динамику движения фронта кристаллизации ТАМ во времени с учетом геометрических параметров теплообменных поверхностей и теплофизических свойств ТАМ, определить время разрядки аккумулятора.

4. Проведено экспериментальное исследование, результаты которого подтверждают адекватность предлагаемой модели теплообмена в кожухотрубном АТФП с погрешностью не более 6%. Это позволило применить модель для разработки методики теплового и конструктивного расчетов натуральных аккумуляторов теплоты фазового перехода.

5. Основываясь на подтвержденной модели теплообменных процессов разработана методика теплового и конструктивного расчета натуральных АТФП.

6. Предложены схемы включения АТФП в системы генерации теплоты, позволяющие использовать возможности возобновляемых источников энергии, увеличить средний КПД теплогенерирующей установки на органическом топливе на 1,1%.

7. Предложена конструкция АТ, позволяющая совместить аккумулятор и электрический генератор теплоты в одном корпусе.

8. Результаты технико-экономического расчета подтверждают рентабельность проекта внедрения АТФП в системы с электрической генерацией теплоты на уровне 153,17%, в системы с теплогенераторами на природном газе – 114,23%. Полученный экономический эффект от внедрения аккумулятора в систему теплоснабжения ПАТ «Дружковский метизный завод» с газовыми котлами общей мощностью 400 кВт составил 17,8 тыс.грн., что в пересчете на т.у.т. составляет 3,78 т.у.т.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины:

1. Лукьянов, А.В. Аккумуляторы тепловой энергии на основе фазового перехода [Текст] / А.В. Лукьянов, **В.В. Остапенко**, В.Д. Александров // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2010. – Вип. 2010-6(86): Інженерні системи та техногенна безпека. – С.64-68. *(Выполнен анализ состояния проблемы повышения энергоэффективности за счет аккумуляирования энергии, приведены основные типы фазопереходных аккумуляторов).*

2. Лукьянов, А.В. Экспериментальная установка с аккумулятором тепловой энергии на основе фазового перехода [Текст] / А.В. Лукьянов, **В.В. Остапенко**, В.А. Постников // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2011. – Вип. 2011-5(91): Інженерні системи та техногенна безпека.– С. 38-42. *(Приведена модель экспериментальной теплоаккумулирующей установки).*

3. Александров, В.Д. Аккумуляция тепла на основе фазовых переходов в материалах для использования в устройствах формирования комфортного микроклимата на железнодорожном транспорте для работы локомотивных бригад [Текст] / В.Д. Александров, А.В. Лукьянов, В.А. Постников, **В.В. Остапенко**, И.В. Грицук, Ю.В. Прилепский // Зб.Наук. праць ДонІЗТ. – Донецьк: видавництво ДонІЗТ, 2011. – № 27. – С. 126-133. *(Рассмотрено прикладное использование аккумуляторов теплоты фазового перехода для систем теплоснабжения).*

4. Александров, В.Д. Использование органических низкомолекулярных веществ в качестве теплоаккумулирующих материалов на основе фазовых превращений [Текст] / В.Д. Александров, В.В. Дрёмов, **В.В. Остапенко**, В.А.

Постников, А.Ю.Соболев, Н.В. Щebetовская // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2012. – Вип. 2012-1(93): Сучасні будівельні матеріали. – С. 99-103. (*Анализ результатов работы экспериментальной теплоаккумулирующей установки*).

5. Александров, В.Д. Розробка теплоаккумуляторних матеріалів на основі діаграм стану [Текст] / В.Д. Александров, Ш.К. Амерханова, І.В. Грицук, Ю.В. Костанда, **В.В. Остапенко**, В.А. Постніков, О.В.Соболь, Н.В. Щebetовська // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2013. – Вип. 2013-4(102): Актуальні проблеми фізико-хімічного матеріалознавства.– С. 15-24. (*Представлены методики исследования свойств ТАМ для использования в аккумуляторах теплоты фазового перехода*).

6. **Остапенко, В.В.** Анализ систем гелиотеплоснабжения с аккумуляторами фазового перехода [Текст] / В.В. Остапенко, А.В. Лукьянов, В.Д. Александров, Ш.К. Амерханова, О.В. Соболь, С.А. Фролова // Зб.Наук. праць ДонІЗТ. – Донецьк: видавництво ДонІЗТ, 2014. – № 39. – С. 107-110.

– **публикации в рецензируемых периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

7. **Остапенко, В.В.** Модель работы кожухотрубного аккумулятора теплоты фазового перехода на основе решения задачи Стефана [Текст] / **В.В. Остапенко**, А.В. Лукьянов, В.В. Дрёмов// Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2014. – Выпуск 2014 – том 10, № 5. – С. 89-93. (*Представлено разработанное теоретическое описание процесса кристаллизации ТАМ*).

– **публикации в других изданиях:**

8. Александров, В.Д. Построение диаграмм состояния кристаллогидратов $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ - $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ / В.Д. Александров, С.А. Фролова, В.А. Постников, **В.В. Остапенко**, О.В. Соболь, С.В. Горбань, А.В. Дончук // Тезисы докл. VI Междунар. науч. конф. «Кинетика и механизм кристаллизации. Самоорганизация при фазообразовании» (21-24 сент. 2010 г.). – Иваново: ОАО «Издательство «Иваново», 2010. – С. 115.

9. Лукьянов, А.В. Экспериментальная установка для изучения особенностей эксплуатации теплового аккумулятора на основе фазовых переходов в материалах [Текст] / А.В. Лукьянов, **В.В. Остапенко**, В.А. Постников // Матер. 3-ої міжвуз. наук.-техн. конф. викл., молод. вч. та студ. «Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування» (29-30 листоп. 2011 р.). – Донецьк: ДонІЗТ, 2011. – С.45-46.

10. Александров, В.Д. Термоциклический анализ фазовых переходов органических соединений для разработки теплоаккумулирующих материалов / В.Д. Александров, В.А. Михайлик, Ю.Ф. Снежкин, Н.М. Уланов, Т.В. Коричевская, А.С. Парняков, В.А. Постников, **В.В. Остапенко**, Н.В. Щebetовская, О.В. Соболь, А.Ю. Соболев, Е.А. Покинтелица, И.В. Грицук, Д.С. Адров // Тезисы докладов Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы физико-химического материаловедения» (30 сент. – 4 окт. 2013 г.). – Донецк: «Норд Компьютер», 2013. – С. 34.

АННОТАЦИЯ

Остапенко В.В. Фазопереходной аккумулятор теплоты для нужд систем теплоснабжения.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 - теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. Макеевка, 2015.

Диссертационная работа посвящена вопросу повышения эффективности систем теплоснабжения путем использования аккумуляторов теплоты на основе фазового перехода твердых материалов (АТФП).

В работе выполнен обзор разработанных теплоаккумулирующих материалов, принципиальных конструктивных решений фазопереходных аккумуляторов теплоты. Вследствие простоты конструкции и эксплуатации большого внимания заслуживают теплообменные аппараты, использующие пассивный теплообмен. Аккумуляторы с активным теплообменом технически сложны и имеют подвижные детали, что понижает их надежность. Кожухотрубные АТФП, реализующие пассивный способ теплообмена, представляются наиболее перспективными для развития в системах аккумулирования теплоты.

Проведен анализ основных существующих численных и аналитических методов решения основополагающей задачи Стефана для описания процесса теплообмена фазопереходных аккумуляторов теплоты. Особое внимание при этом заслуживает вариационный метод, позволяющий получить компактные математических выражения, произвести простой учет граничных условий и использовать прямые методы исчисления.

Объектом исследования являются теплообменные процессы, протекающие между теплоносителем системы теплоснабжения и теплоаккумулирующим материалом при его фазовом превращении.

Предметом исследования являются закономерности изменения температурного поля и толщины закристаллизовавшегося теплоаккумулирующего материала в процессе фазового перехода.

Теоретически описана и разработана математическая модель кристаллизации бесконечного полого цилиндра при его охлаждении теплоносителем системы теплоснабжения. Вариационным методом решена задача нестационарной теплопроводности в аккумуляторе теплоты фазового перехода. Используя условие Стефана, математически описан процесс роста кристаллического тела во времени. Разработана методика определения размеров твердого тела цилиндра в зависимости от времени, методика прогнозирования динамики изменения температуры ТАМ на поверхности цилиндра заданного радиуса.

Проанализировано влияние режима течения теплоносителя на условия теплообмена между средами. Установлено, что влияющими показателями на интенсивность теплообмена являются теплофизические свойства аккумулирующего материала - $\lambda_2, T_{кр}$.

Смоделирована и создана лабораторная установка, принципиально характеризующая систему теплоснабжения; изложены экспериментальная методика

и результаты проверки основных положений математической модели работы кожухотрубного аккумулятора теплоты фазового перехода.

Опытным путем доказано, что увеличение скорости течения теплоносителя практически не увеличивает количество теплоты, воспринимаемой им от аккумулирующего материала, при этом происходит только перераспределение значений в балансе передаваемой теплоты. В такой ситуации меры по интенсификации необходимо применять на стороне первичного контура (сторона аккумулирующего материала), изменяя вид ТАМ либо применяя конструкцию наружного оребрения теплообменной трубки.

На основании рассмотрения результатов опытов изменения температуры теплоносителя и роста диаметра цилиндра закристаллизовавшегося ТАМ и теоретически полученных результатов, сделан вывод, что наиболее эффективным конечным радиусом фронта кристаллизующегося ТАМ является случай $R \approx 2R_0$. Данное наблюдение относится к парафину Т-3. Данный факт доказывает применимость теоретических заключений работы для анализа поведения ТАМ при его кристаллизации в кожухотрубных АТФП.

На основании существующих схем аккумулирования тепловой энергии, учитывая особенности фазопереходных аккумуляторов, разработаны схемы генерации теплоты с широким использованием солнечной энергии, и возобновляемых видов энергии, выработка которой переменна во времени. Для генераторов теплоты на органическом топливе предложены варианты их работы с АТФП, позволяющие повысить общий КПД выработки теплоты, что приводит к снижению выбросов вредных веществ за счет рационализации процесса горения в переходных режимах работы теплогенерирующих установок (уменьшения количества пусков).

На основании результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика теплового и конструктивного расчета натурной модели фазопереходного аккумулятора тепловой энергии.

Результаты технико-экономического расчета подтверждают рентабельность проекта внедрения АТФП.

Ключевые слова: аккумулятор теплоты, фазовый переход, теплоаккумулирующий материал, время фазового превращения, фронт кристаллизации, температурное поле, теплоснабжение, энергоэффективность.

АНОТАЦІЯ

Остапенко В.В. Фазоперехідний акумулятор теплоти для потреб систем теплопостачання.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.03 - теплопостачання, вентиляція, кондиціонування повітря, газопостачання та освітлення. Донбаська національна академія будівництва і архітектури. Макіївка, 2015.

В роботі виконано огляд розроблених теплоаккумулюючих матеріалів, принципів конструктивних рішень фазоперехідних акумуляторів теплоти, проведено аналіз основних існуючих чисельних і аналітичних методів вирішення

основоположної задачі Стефана для опису процесу теплообміну фазоперехідних акумуляторів теплоти.

Теоретично описана і створена математична модель розрахунку робочого процесу акумулятора в процесі фазового перетворення теплоакумуючого матеріалу, знайдено значення конструктивних показників кожухотрубного акумулятора.

Змодельована і виконана лабораторна установка, яка принципово характеризує систему теплопостачання. Викладено експериментальну методику і результати перевірки основних положень математичної моделі роботи кожухотрубного акумулятора теплоти фазового переходу.

На підставі розробленої моделі тепломасообмінних процесів в кожухотрубних акумуляторах розроблена методична послідовність розрахунку натурального акумулятора теплоти, а також способи та схеми включення акумуляторів в систему генерації теплоти сучасних систем теплопостачання. Виконано економічне обґрунтування доцільності впровадження АТФП в систему генерації теплової енергії.

Ключові слова: акумулятор теплоти, фазовий перехід, теплоакумуючий матеріал, час фазового перетворення, фронт кристалізації, температурне поле, теплопостачання, енергоефективність.

ABSTRACT

Ostapenko V.V. Phase-change heat accumulator for the needs of heating systems.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.23.03 - heating, ventilation, air conditioning, gas supply and illumination. Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Makiyivka 2015.

The thesis is devoted to improving the efficiency of heating systems through the use of heat accumulators based on the phase transition of solid materials.

The paper gives an overview of the developed heat storage materials, the fundamental design decisions phase-change heat accumulators, analyzes the main existing numerical and analytical methods for solving the fundamental problem of Stephen to describe the process of heat transfer phase-change heat accumulators.

Theoretically described and developed a mathematical model for calculating of accumulator work in the process of phase transformation of heat accumulating material. Found values of design of shell-and-tube accumulator.

Modeled and executed laboratory setup, essentially characterizes the heating system; presented experimental technique and the results of testing the main provisions of the mathematical model of the shell-and-tube phase-change heat accumulator.

Based on the developed model, heat and mass transfer processes in a shell and tube batteries considered methodical sequence of the full-scale calculation of the heat accumulator, as well as methods and strategies to incorporate batteries in today's generation of heat supply systems. Performed feasibility study of the implementation of phase-change accumulators in the heat generation systems.

Keywords: battery heat, phase-change transition, heat storage material, phase transformation, crystallization front, temperature field, heat, energy efficiency.