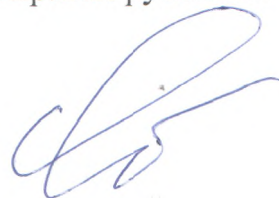


Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

На правах рукописи

ОСТАПЕНКО ВИТАЛИЙ ВАЛЕРИЕВИЧ



**ФАЗОПЕРЕХОДНЫЙ АККУМУЛЯТОР ТЕПЛОТЫ
ДЛЯ НУЖД СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

Лукьянов Александр Васильевич

д.т.н., профессор



Идентичность всех экземпляров заверяю:

Ученый секретарь специализированного

ученого совета Д 01.005.01



З.В. Удовиченко



Макеевка - 2015

СОДЕРЖАНИЕ

	C.
ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОАККУМУЛЯТОРОВ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ	10
1.1 Анализ типов теплоаккумуляторов для систем теплоснабжения. Механизмы и условия получения теплоты	12
1.2 Обзор теплоаккумулирующих материалов, применяемых в АТФП	16
1.3 Основные типы конструкций тепловых аккумуляторов фазового перехода	21
1.4 Обзор методик численного моделирования переходных процессов фазовых превращений ТАМ	27
1.5 Выводы по первому разделу. Постановка цели и задач исследований	31
РАЗДЕЛ 2. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛОТЫ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА	34
2.1 Определение шага теплообменных труб	34
2.2 Моделирование температурного режима работы АТФП	41
2.3 Определение характера движения фронта кристаллизации жидкого ТАМ и времени разрядки аккумулятора	49
2.4 Аккумулирующая емкость АТФП	53
2.5 Определение площади нагрева АТФП	54
2.6 Определение компенсационного объема температурного расширения ТАМ и полного объема бункера АТФП	54
2.7 Выводы по второму разделу	55
РАЗДЕЛ 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛО-МАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В КОЖУХОТРУБНЫХ АККУМУЛЯТОРАХ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА	57
3.1 Экспериментальная установка и методика измерений	57

	3
3.1.1 Принципиальная схема установки	57
3.1.2 Выбор элементов экспериментальной установки	59
3.1.3 Методика проведения эксперимента	66
3.2 Планирование эксперимента.	67
3.2.1 Определение времени кристаллизации	67
3.2.2 Определение температуры ТАМ на цилиндрической поверхности заданного радиуса	72
3.3 Результаты экспериментального исследования и их сопоставление с разработанной расчетной моделью	78
3.3.1 Обработка результатов эксперимента	78
3.3.2 Сопоставление экспериментальных данных с расчетной моделью тепломассообменных процессов	82
3.4 Выводы по третьему разделу	91
РАЗДЕЛ 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕПЛОВОГО И КОНСТРУКТИВНОГО РАСЧЕТОВ АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛОТЫ КОЖУХОТРУБНОГО ТИПА, ТЕПЛОВЫХ СХЕМ УСТАНОВОК ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ С АТФП	93
4.1 Схемы включения аккумуляторов теплоты в системы теплоснабжения	93
4.1.1 Схемы работы АТФП в системах теплоснабжения с солнечными коллекторами	93
4.1.2 Схемы работы АТФП в системах теплоснабжения с котлами на органическом топливе	99
4.2 Методика теплового и конструктивного расчета АТФП	103
4.3 Экономический анализ и расчет показателей экономической эффективности внедрения АТФП в работу систем теплоснабжения	113
4.3.1 Расчет затрат на генерацию тепловой энергии для систем с АТФП и без него	113
4.3.2 Экономический анализ внедрения АТФП в схемы теплогенерирующих установок	116

4.3.3 Определение эффективности внедрения АТФП в работу систем теплоснабжения	120
4.4 Выводы по четвертому разделу	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	125
Приложение А. Результаты экспериментального исследования температурного поля ТАМ при его кристаллизации	135
Приложение Б. Результаты экспериментального наблюдения за динамикой роста фронта кристаллизации ТАМ вокруг теплообменной трубки во времени	169
Приложение В. Акт внедрения результатов и выводов диссертационной работы Остапенко В.В. «Фазопереходной аккумулятор теплоты для нужд систем теплоснабжения»	171
Приложение Г. Акт про внедрение результатов диссертационного исследования Остапенко В.В. на тему «Фазопереходной аккумулятор теплоты для нужд систем теплоснабжения»	172

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Вопросы энергосбережения, рационального использования имеющихся природных ресурсов, использования возобновляемых источников энергии, снижения выбросов в окружающую среду стали важнейшими вопросами для обеспечения дальнейшего существования человечества. Они могут быть объединены одним общим свойством. Все современные энергосберегающие установки имеют периодичность работы (пики и провалы по энергопотреблению и ее выработке) в зависимости от области их применения. Например, 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 задачей вопроса энергосбережения стала задача выравнивания процессов потребления и генерации энергии во времени за счет ее аккумуляции.

Наиболее перспективным направлением развития технологии аккумуляции тепловой энергии в настоящее время рассматривается аккумулирование за счет явления фазового перехода при плавлении – кристаллизации материала. Использование теплоты плавления для аккумулирования тепла обеспечивает высокую плотность запасаемой энергии при использовании небольших перепадов температур и достаточно стабильную температуру теплоносителя на выходе из аккумулятора теплоты (АТ).

Задача оптимального теплового и конструктивного расчета аккумуляторов теплоты фазового перехода (АТФП) неразрывно связана с решением задачи Стефана [43]. Громоздкость вычислений и затруднительный анализ результатов при решении задачи Стефана численными методами заставляют искать практичное аналитическое решение. Особое внимание при этом заслуживает вариационный метод, позволяющий получить компактные математические выражения, произвести простой учет граничных условий и использовать прямые методы исчисления.

Исходя из вышесказанного, необходимо дальнейшее проведение исследований по раскрытым вопросам, в частности, разработка математической

модели и рекомендаций конструктивного расчета термоаккумуляторов на основе фазового перехода для нужд систем теплоснабжения.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Работа выполнена в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры в соответствии с темами научно – исследовательских работ 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 – повышение эффективности систем теплоснабжения путем использования аккумуляторов теплоты на основе фазового перехода твердых материалов.

Для реализации цели поставлены следующие **задачи**:

- провести аналитические исследования существующих конструкций аккумуляторов теплоты, аккумуляторов теплоты на фазовом переходе, теплоаккумулирующих материалов;
- 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 натурных 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.

Достоверность результатов. Теоретическая часть работы базируется на фундаментальных законах тепломассообмена. Адекватность физико-математической модели оценивалась сопоставлением расчетных данных с экспериментальными.

Научная новизна:

- 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 натурных 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 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 включает постановку цели и задач исследования; 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 работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих научно-технических конференциях: VI Международная научная конференция «Кинетика и механизм кристаллизации. Самоорганизация при фазообразовании», г. Иваново, 2010 г.; IX-XIII Международная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов ДонНАСА, г. Макеевка, 2010-2014 г.; «Енерго- та ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та

устаткування» 3-я міжвузівська науково-технічна конференція викладачів, молодих вчених та студентів, г. Донецьк, 2011 г.; Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы физико-химического материаловедения», г. Макеевка, 2013 г.

Публикации.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 10 печатных работах, 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

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы из 104 наименований, 4 приложений. Работа изложена на 124 страницах, в текст диссертации включено 31 рисунок, 26 таблиц.

На защиту выносятся:

- математическая модель описания тепломассообменного процесса фазового перехода ТАМ в кожухотрубных аккумуляторах с цилиндрическими трубками в качестве теплообменных поверхностей;
- результаты экспериментального исследования динамики роста фронта кристаллизации ТАМ вокруг теплообменной трубки во времени, динамики изменения температурного поля ТАМ на заданном радиусе во времени, и их сравнение с расчетными значениями, определенными с использованием разработанной модели;
- схемы включения АТФП в систему генерации теплоты современных систем теплоснабжения;
- алгоритм и методика расчета кожухотрубного аккумулятора теплоты фазового перехода с теплообменными поверхностями в виде цилиндрических трубок с коридорным и шахматным расположением для различных способов генерации теплоты;
- экономическое обоснование целесообразности внедрения АТФП.

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ТЕПЛОАККУМУЛЯТОРОВ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

По климатическим условиям Украина относится к регионам со средней интенсивностью солнечной радиации. Количество солнечной энергии, поступающей на единицу площади в течение года составляет здесь 1000-1350 кВт·ч/м². По уровню интенсивности солнечного излучения страна может быть поделена на четыре региона - Западный, Центральный, Юго-восточный и Южный. Средняя интенсивность солнечного излучения составляет около 1200 кВт·ч/м². Солнечный потенциал для производства тепла составляет около 26 млрд.кВт·ч в год [52]. Круглосуточное использование энергии Солнца возможно только за счет ее аккумуляции в дневное время.

Применительно к Украине, не имеющей отлаженной линии развития и применения энергосберегающих технологий, но обладающей значительным потенциалом атомной энергетики, вопрос энергосбережения звучит иным образом.

Доля АЭС в структуре производства электроэнергии в Украине в 2013 году составляет 43% (в январе-октябре 2012 года — 45,2%), ТЭС и ТЭЦ — 44,4% (45,2%), ГЭС и ГАЭС — 7,8% (5,4%), коммунальных ТЭЦ и блок-станций — 4,1% (3,9%), альтернативных источников — 0,7% (0,3%) [17]. Украина эксплуатирует 15 энергоблоков, оснащенных водоводяными энергетическими реакторами общей установленной электрической мощностью 13,835 ГВт [49].

По заявлению МАГАТЭ до 2050 г. планируется увеличение производственных мощностей АЭС в 3 раза, что вполне совпадает с намерением правительства Украины, планирующего увеличение установленной мощности реакторов с нынешнего уровня до 29,5 ГВт в 2030 г. [18].

Коэффициент использования установленной мощности всех АЭС Украины снижается с 2011 г. и за девять месяцев 2013-го 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% [22].

Учитывая описанную ситуацию стратегии развития и потребления энергии, появляется необходимость в создании новых буферных потребителей, которые дали бы возможность повысить коэффициент использования установленной мощности АЭС Украины, и при этом сгладить график среднесуточного потребления энергии приведенный на рис. 1.1 [22].

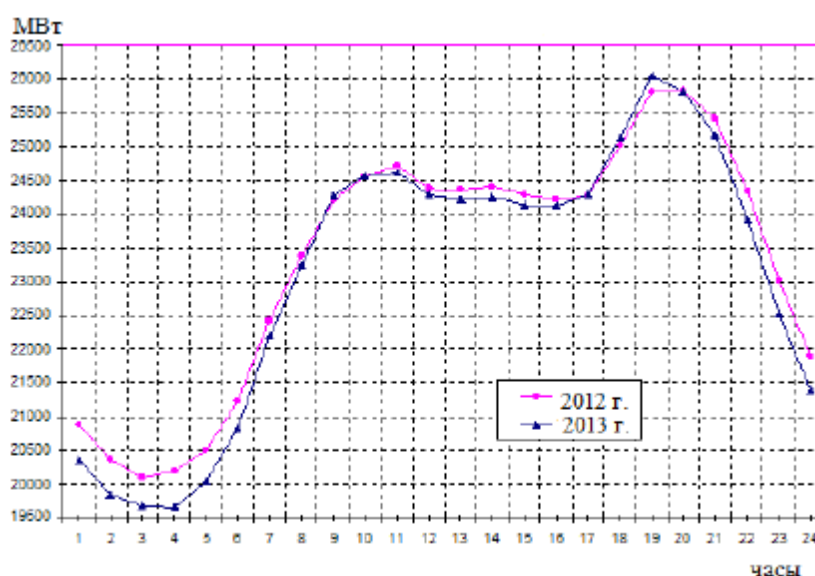


Рис. 1.1. Среднее потребление электрической мощности в Украине по часам суток в марте 2012 и 2013 годов за рабочие дни.

Анализируя график, можно убедиться в том, что поле деятельности таких буферов довольно обширное, и составляет 20-25% от всего нынешнего энергопотребления Украины. При перераспределении топливно – энергетического комплекса Украины и направлении этой энергии на нужды систем теплоснабжения в ночное время.

Идея перехода с органического топлива на электрическую энергию при генерации тепловой энергии не является новинкой. Однако такая реорганизация производства и потребления открывает большие перспективы для ТЭК Украины. При этом появляется возможность отказа от импорта большого количества природного газа, отказа от части устаревших ТЭС (работающих при пиковой

загрузке системы), что позитивно скажется на экологической обстановке в зонах работы станций.

Разница между ночной и пиковой нагрузками среднего рабочего дня объединенной энергосистемы Украины часто превышает 7000 МВт с устойчивой тенденцией роста. 70-80% этой разницы покрывают ГЭС, остальную часть – пылеугольные ТЭС с вынужденными остановками на 4–6 часов ночью до 6 блоков 150–200 МВт и до 3 корпусов блоков 300 МВт [23]. Такие ежедневные остановки для оборудования ТЭС являются непроектными, вызывают преждевременный его износ, сопровождаются потерями дефицитного топлива на остановки и пуски, резко повышают аварийность блоков. Кроме того, существует практика работы пиковых мощностей в холостую, в случае когда нет разбора энергии, а остановка блока связана с значительными трудностями. Отказ от упомянутого вклада пылеугольных ТЭС в энергетическом балансе приведет к закрытию 1400-2100 МВт мощностей.

Однако работа дополнительных потребителей энергии в часы провала потребления электроэнергии – буферов является переменной во времени, и может составлять от 6 до 11 часов в сутки. В остальное время работа системы теплоснабжения невозможна без участия аккумуляторов тепловой энергии.

На сегодняшний день в Украине уже построено некоторое количество, как индивидуальных, так и районных котельных использующих электроэнергию в периоды провала потребления.

1.1 Анализ типов теплоаккумуляторов для систем теплоснабжения. Механизмы и условия получения теплоты

В зависимости от технической реализации используется [35] прямое аккумулирование тепла, когда аккумулирующий материал является одновременно и теплоносителем, и косвенное аккумулирование — при различных теплоаккумулирующих и теплопередающих средах. Возможно применение схем с совместным использованием этих двух способов аккумулирования.

В настоящее время существует несколько направлений развития систем аккумулирования тепловой энергии. Все они находят применение в зависимости от технологических требований к системе теплоснабжения.

Можно выделить следующие основные типы аккумуляторов теплоты:

- жидкостные аккумуляторы;
- тепловые аккумуляторы с твёрдым теплоаккумулирующим материалом (ТАМ);
- аккумуляторы тепла фазового перехода (АТФП).

Жидкостные теплоаккумуляторы (АТ) относятся к числу наиболее простых и надежных устройств аккумулирования. Как правило, в их рабочем процессе реализовано прямое аккумулирование тепла за счет собственной теплоемкости теплоносителя в малом диапазоне температур 80-100°C [77,99]. Для систем теплоснабжения это связано в первую очередь с удобством использования теплоносителя - воды, как наиболее теплоемкой жидкости, в качестве ТАМ. Однако вода является лучшим жидким ТАМ только в диапазоне рабочих температур от 0 до 100°C как по комплексу теплофизических свойств, так и по экономическим показателям. Дальнейшее повышение рабочей температуры воды [82] связано с существенным ростом давления, что усложняет проектирование корпуса, повышает его стоимость. С целью обеспечения низких рабочих давлений ТАМ используются различные высокотемпературные теплоносители. При этом возникают проблемы подбора конструкционных материалов теплового аккумулятора и системы в целом, применения специальных устройств, предотвращающих отверждение ТАМ на всех режимах эксплуатации, герметизации ТА и ряд других.

Основная масса эксплуатируемых котельных в Украине с теплоаккумуляторами используют именно жидкостные ТА в своей работе. Малый температурный диапазон ТАМ – воды, в таких аккумуляторах приводит к неизбежному увеличению объема баков ТА, что ведет к увеличению занимаемой площади, сложности конструкции, росту тепловпотерь.

Второй тип АТ получил широкое распространение в странах Западной

Европы и США [77,102]. Аккумулирование тепловой энергии в аккумуляторах с твёрдым теплоаккумулирующим материалом производится косвенным аккумулированием за счет теплоемкости ТАМ находящегося в твердой фазе. В качестве ТАМ [97] используются такие материалы как гравий, песок, гранит, бетон, кирпич. Такие АТ в силу своей громоздкости устраивают в основном подземными. Разработано множество схем аккумулирования, однако их общим моментом является проблема сложности повышения температуры получаемого теплоносителя на выходе из аккумулятора более 50°C [98]. Такие АТ являются, как правило, устройствами сезонного хранения и применяются для аккумуляции тепла в течении нескольких месяцев. В период отбора теплоты температура теплоносителя от аккумулятора может быть повышена за счет тепловых насосов. Так как аккумулятор по сути является составной частью грунта (без изоляции), то при его работе присутствуют значительные теплопотери в окружающую среду. Последними пренебрегают в силу зарядки аккумулятора исключительно за счет возобновляемых источников энергии (Рис. 1.2) [77].



Рис. 1.2. Фотоснимок гелиосистемы, город Штайнфурт, Германия.

На рис. 1.2 [77] показана гелиосистема с аккумулированием тепловой энергии в подземном жидкостном теплоаккумуляторе, заполненным гравием.

Объем аккумулятора при системы составляет 1500 м^3 (Рис. 1.3). Введена в работу в 2000 г., и способна покрыть 34% теплопотерь за отопительный периода.

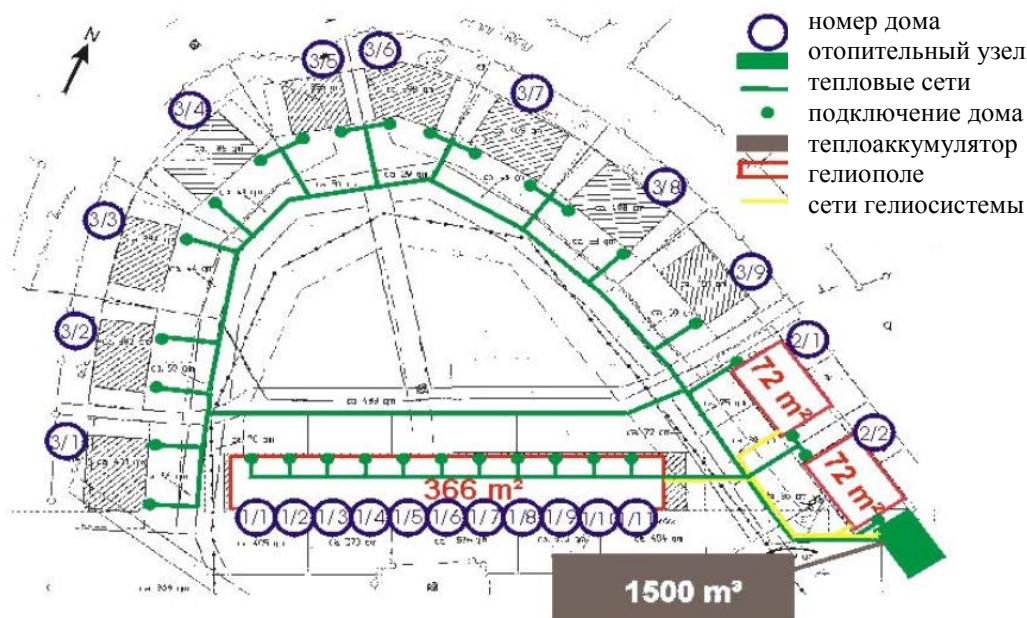


Рис. 1.3. Генплан гелиосистемы, город Штайнфурт, Германия.

Наиболее перспективным направлением развития технологии аккумуляции тепловой энергии в настоящее время рассматривается аккумулирование за счет явления фазового перехода материала. Этот тип аккумуляторов лишен некоторых проблем вышеупомянутых АТ. Использование теплоты плавления для аккумулирования тепла обеспечивает высокую плотность запасаемой энергии при использовании небольших перепадов температур и достаточно стабильную температуру на выходе из АТ.

При рассмотрении величины плотности запасаемой энергии [83] за счет теплоемкости воды и теплоты плавления стеариновой кислоты был сделан вывод, что для аккумуляции 100 кВт тепловой энергии необходимо $4,3 \text{ м}^3$ воды при температуре $80/60^\circ\text{C}$ ($2,15 \text{ м}^3$ при $80/40^\circ\text{C}$) или $1,3 \text{ м}^3$ стеариновой кислоты. Это дает возможность спроектировать АТ с меньшими габаритными размерами, что соответственно снизит теплопотери, и занимаемую площадь под АТ. Наличие

ТАМ с различными температурами плавления открывает возможности получения теплоносителя требуемых параметров без существенного влияния на конструкцию АТ. При этом при разрядке аккумулятора параметры теплоносителя на выходе из АТ колеблются незначительно.

Преимущество АТФП в сравнении с аккумуляторами других типов определяет большие перспективы дальнейшего развития этого вида аккумулирования и решения его задач.

1.2 Обзор теплоаккумулирующих материалов, применяемых в АТФП

В качестве ТАМ может быть использован любой материал имеющий возможность фазового перехода твердое – жидкое состояние. Критериями отбора наиболее практичных рабочих материалов по теплофизическим и химическим характеристикам для АТФП являются [87]: температура плавления, теплота фазового перехода, теплопроводность, устойчивость к цикличности работы, технологичность, коррозионная активность. Безусловными требованиями к ТАМ также являются его доступность, и нетоксичность.

Температура плавления и теплота фазового перехода являются главными параметрами, определяющими экономичность АТФП. Минимальная теплота фазового перехода для теплового аккумулирования предложена не менее 200 кДж/кг (500 кДж/м³) [75], однако ведутся разработки ТАМ с теплотой фазового перехода менее 200 кДж/кг, которые находят применение как добавка в бетон и другие строительные смеси для повышения тепловой инерции конструкций. Температуры кристаллизации для таких ТАМ довольно низки и лежат в диапазоне нормативной температуры помещений здания.

Температура плавления в первую очередь должна удовлетворять требованиям проектируемой установки. Известные ТАМ имеют широкий диапазон температур плавления и разделены по его значениям на: низкотемпературные ТАМ ($T_{кр} < 120^{\circ}\text{C}$), среднетемпературные ($T_{кр} = 120-400^{\circ}\text{C}$), высокотемпературные ($T_{кр} = 400-1000^{\circ}\text{C}$).

Классификация ТАМ по составу на органические и неорганические соединения, позволяет показать следующие характерные особенности аккумулирующих материалов [80], приведенные в таблице 1.1:

Таблица 1.1

Сравнение органических и неорганических ТАМ

Органические ТАМ	Неорганические ТАМ
<p>Преимущества:</p> <ul style="list-style-type: none"> - не коррозионноактивны; - химически и термически стабильны; - отсутствие или слабое переохлаждение. 	<p>Преимущества:</p> <ul style="list-style-type: none"> - высокая плотность; - высокое значение теплоты фазового перехода.
<p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> - низкая теплота фазового перехода; - низкая плотность; - горючи. 	<p>Недостатки:</p> <ul style="list-style-type: none"> - переохлаждение; - коррозионноактивны; - недостаточная циклическая стабильность.

Чаще всего в своих работах [35,12,75] разработчики разделяют ТАМ по группам веществ на: парафины, жирные кислоты, гидраты солей, соединения металлов. Также в последнее время [83] развивается группа солевых смесей. Основные параметры приведенных групп ТАМ сведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Параметры основных групп ТАМ фазового перехода

Группа ТАМ	Диапазон температур плавления, °С	Объемная плотность аккумулируемой энергии, МДж/м ³
Органические соединения	20-70	150-250
Гидраты солей и их смеси	25-80	200-400
Соли и их смеси	140-1000	300-1900
Металлы и их сплавы	270-1000	540-3000

Как видно из таблицы 1.2 диапазон рабочих температур систем теплоснабжения приходится на такие группы ТАМ как кристаллогидраты, органические соединения, жирные кислоты и соли с минимальными температурами плавления. Металлы и соли с высокими температурами плавления в качестве ТАМ могут найти применение в промышленном секторе, где

необходима выработка пара или производство теплоносителя при высоких температурах.

Наибольшее внимание ученых в начале разработок привлекли именно кристаллогидраты [87] в силу своих неоспоримых преимуществ – дешевизны, доступности, высокой энергоемкости на единицу объема, низким температурам плавления, позволяющим аккумулировать низкопотенциальное тепло. Рассматривается применение кристаллогидратов $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и для работы в диапазоне температур систем теплоснабжения 55-95°C [91]. Для повышения температуры плавления ТАМ без изменения значения теплоты кристаллизации основного вещества смеси находят варианты комбинации кристаллогидратов, например $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и 7% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [92].

Однако наряду с положительными характеристиками кристаллогидратам, как неорганическим ТАМ [80], свойственно переохлаждение. С целью обеспечения кристаллизации с малым переохлаждением жидкой фазы применяются вещества, являющиеся первичными центрами кристаллизации, в качестве которых используется асбест [25], диоксид кремния [89]. Введение глины способствует измельчению кристаллов в объеме смеси кристаллогидрата [79]. В качестве добавки к ТАМ предлагается использовать диатомит в виде смеси [30], соединяющей в себе качества асбеста, глины и SiO_2 .

Наиболее существенным недостатком кристаллогидратов является их инконгруэнтное плавление, при котором твердая фаза при расплавлении преобразуется в расплав и осаждающуюся твердую фазу в виде более низкого гидрата той же соли. Для борьбы с разделением фаз применяются загустители или перемешивание в процессе теплообмена. Коррозионная активность кристаллогидратов также должна быть учтена при проектировании АТФП.

Несмотря на свои недостатки, кристаллогидраты нашли широкое применение в системах аккумулирования тепловой энергии, в частности солнечной энергии [25].

Устойчивее кристаллогидратов к разложению при термическом цикловании процессов плавления и кристаллизации выступают органические соединения. В

таблице 1.3 приведены основные свойства некоторых плавящихся органических соединений [35, 83].

Таблица 1.3

Основные свойства плавящихся органических ТАМ

Материал	Температура плавления, °К	Теплота плавления Q_p , кДж/кг	Удельная теплоемкость	Плотность, кг/м ³		Коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{ТВ}}$, Вт/(м·К)	Вязкость 10^{-3} Па·с
				$\rho_{\text{ТВ}}$	$\rho_{\text{ж}}$		
Полиэтиленгликоль	293-298	146	2,26	-	1100	0,16	11,5
Октадекан	301	244	2,18	744	-	0,15	3,9
Пентаэритриол	460	322	-	1350	-	0,01	-
Парафин 46-48	320	209	2,08	800	-	0,34	3
Нафталин	353	-	-	1170	-	-	0,8
Ацетамин	355	-	-	1160	-	-	-
Лауриновая кислота	317	183	2,16	-	-	-	-
Стеариновая кислота - чистая -техническая	343 338	221 203	2,3	-	-	-	-

В качестве ТАМ фазопереходных аккумуляторов может применяться и полиэтилен высокой плотности [84] для гелиосистем среднего температурного напора. Низкая теплопроводность является главным недостатком полиэтилена, однако ее возможно компенсировать за счет контактного теплообмена между теплоносителем и ТАМ-полиэтиленом в форме стержней. Также возможно использование полиэтилена высокой плотности в виде гранул с усиленной структурой ТАМ [88].

Рассматривается применение в качестве ТАМ жирных кислот [12], как химически стойких веществ, слабо или совсем не переохлаждающихся. Однако в силу своего кислотного характера жирные кислоты оказывают коррозионное влияние на части корпуса АТФП.

Как основа для разработки новых теплоаккумулирующих материалов большой интерес представляют воски благодаря своему широкому диапазону температур кристаллизации. В процессе модифицирования природных и синтетических восков возможно получение новых ТАМ с большей теплотой и

температурой кристаллизации [70].

Применение органических соединений в качестве ТАМ решает вопрос коррозии корпуса теплоаккумулятора. Они обеспечивают высокую плотность запасаемой энергии. Основным недостатком органических соединений представляются их низкие коэффициенты теплопроводности, требующие увеличения поверхности теплообмена теплоносителя системы теплоснабжения и ТАМ.

Для аккумулирования теплоты при более высоких значениях температур кристаллизации (от 100 до 250°C) применимы полиэтилен, пентаэритритол, эвтектические смеси гидроокислов щелочных металлов (LiOH-NaOH, LiOH-KOH) и другие. Для получения более высоких температур теплоносителя на выходе из аккумулятора, как правило, соединения и сплавы легких металлов. Они обладают наиболее высокими значениями теплоты фазового перехода в 4-17 раз превышающих этот показатель для ранее рассмотренных групп ТАМ (парафинов, жирных кислот, кристаллогидратов).

Как и в случае с кристаллогидратами здесь широко применяется метод смешения для получения ТАМ более высоких характеристик. Так в качестве теплоаккумулирующего материала может быть использована смесь щелочи NaOH с добавкой 7-8% NaNO_2 [81]. Для снижения коррозионной активности щелочи вводится в смесь присадка MnO_2 , которая, как отмечается, не снимает проблему коррозии в полной мере.

Возможность использования в качестве накопителя скрытой тепловой энергии фтористых соединений приводится в результатах [86], где при использовании безводной смеси LiF и CaF_2 достигнута температура плавления 767°C.

Использование соединений активных металлов для получения ТАМ высоких параметров рассматривается наиболее перспективным направлением [57,78,95]. Использование различных оксидов Mg, Al, Cu, Fe, Mn, Co, Ti, Mo, Zn рассматривается как в качестве ТАМ для аккумуляторов теплоты определенных конструкций [93], так и для изготовления строительных конструкций зданий,

обладающих высокой аккумулирующей емкостью [46].

В университете Дайтона проведено исследование возможности использования в качестве ТАМ смесей окислов [100]. В частности, была предложена смесь $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3$, имеющая температуру плавления 650°C . Было показано, что удобно использовать и фтористые соединения, оценивая их по теплоте плавления.

В настоящее время известно большое количество теплоаккумулирующих материалов, обеспечивающих аккумуляцию теплоты при любом востребованном диапазоне температур. Однако разработка универсального ТАМ для нужд систем теплоснабжения продолжается. Наиболее перспективным направлением представляется поиск универсального материала среди групп органических соединений по причине своей распространенности и дешевизне по сравнению с группой металлов и полимеров. Но как уже было отмечено, органические соединения обладают низкими значениями коэффициентов теплопроводности, что значительно сказывается на конструктивных характеристиках АТФП.

1.3 Основные типы конструкций тепловых аккумуляторов фазового перехода

Основной задачей для раскрытия всего потенциала возможностей ТАМ является задача разработки конструкции теплоаккумулирующего аппарата. Основные типы конструкций АТФП уже разработаны до настоящего времени [20,35], однако процесс их совершенствования продолжается.

Все теплоаккумуляторы фазового перехода можно разделить на два типа:

- аккумуляторы теплоты, реализующие пассивный способ теплообмена;
- аккумуляторы теплоты, реализующие активный способ теплообмена.

Аккумуляторы, реализующие пассивный способ теплообмена (Рис. 1.4 а,б) конструктивно являются наиболее простыми. Они не имеют каких-либо подвижных частей, соответственно являются более надежными. Главным недостатком такого типа АТФП является значительное ухудшение процесса

теплообмена с теплоносителем системы теплоснабжения при нарастании слоя кристаллизующегося ТАМ на поверхностях теплообмена. Таким образом, габариты аккумулятора пассивного типа теплообмена значительно зависят от выбора ТАМ.

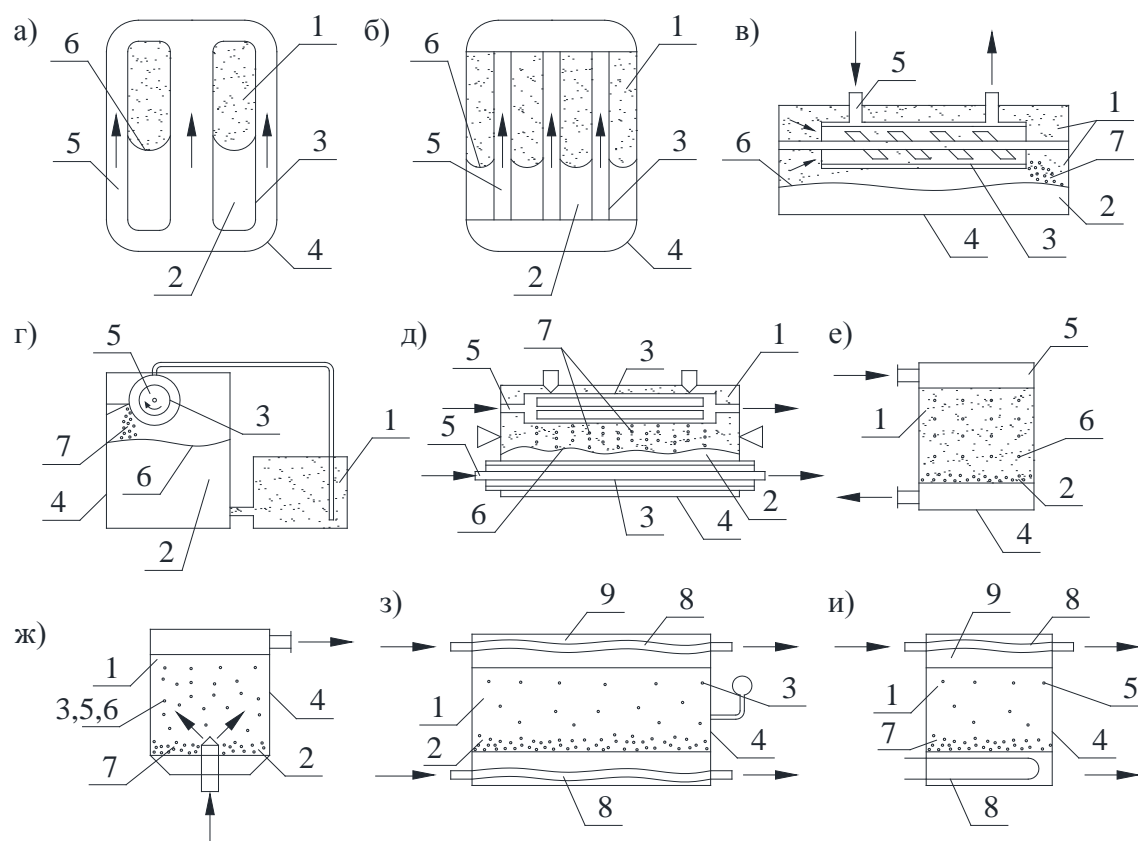


Рис. 1.4. Основные типы тепловых аккумуляторов фазового перехода:

а - капсульный; б - кожухотрубный; в, г - со скребковым удалением ТАМ; д - с ультразвуковым удалением ТАМ; е, ж - с прямым контактом и прокачкой ТАМ; з, и - с испарительно-конвективным переносом тепла;

1 - жидкий ТАМ;

2 - твердый ТАМ;

3 - поверхность теплообмена;

4 - корпус АТ;

5 - теплоноситель;

6 - граница раздела фаз;

7 - частицы твердого ТАМ;

8 - промежуточный теплообменник;

9 - паровое и жидкостное пространства для теплоносителя.

Среди АТФП пассивного типа по принципу размещения ТАМ [35] можно выделить капсульные (Рис. 1.4а) и кожухотрубные (Рис. 1.4б) аккумуляторы теплоты фазового перехода.

Размещение ТАМ в капсулах [35] (Рис. 1.4а) обеспечивает высокую надежность конструкции, позволяет создавать развитую поверхность теплообмена, компенсировать (при использовании гибких капсул) изменения объема в процессе фазовых переходов. Однако вследствие низкой теплопроводности ТАМ необходимо большое число капсул малого размера, что приводит к большой трудоемкости изготовления АТ, недостаточно рациональному использованию объема (для цилиндрических капсул), малой жесткости конструкции (для плоских капсул). Особенно целесообразно применение капсульных АТ в случаях малых тепловых потоков с теплообменной поверхности [50].

Капсульные аккумуляторы в силу отсутствия дорогостоящих поверхностей теплообмена из высокотеплопроводных металлов привлекают значительное внимание разработчиков [19,63].

Явным недостатком капсульного АТФП является уменьшение площади контакта твердой и жидкой фазы ТАМ при его кристаллизации, что сказывается на скорости замедления теплообмена с теплоносителем. Этого недостатка лишен кожухотрубный тип. В нем при кристаллизации ТАМ происходит увеличение поверхности контакта твердой – закристаллизовавшейся части с расплавом ТАМ.

Кожухотрубные АТФП конструктивно напоминают рекуперативный теплообменник (Рис. 1.4б). Расположение ТАМ в межтрубном пространстве [35] кожухотрубного теплообменника способствует рациональному использованию внутреннего объема АТ и применению традиционной технологии изготовления теплообменных аппаратов. Однако при такой конструкции затруднено обеспечение свободного расширения ТАМ, вследствие чего понижается надежность аккумулятора в целом [58].

Задача интенсификации процесса теплообмена кожухотрубных АТ решается за счет развития поверхности теплообмена. При этом цель достигается

либо увеличением протяженности теплообменных труб (выполнение ее в виде змеевика для экономии пространства) [81, 103], либо за счет совершенствования оребрения теплообменных труб [28,101].

Еще одним современным направлением вопроса интенсификации процесса теплообмена является применение высокотеплопроводных инклюзивов [11,69,104] в объеме теплоаккумулирующего материала аккумулятора (Рис.1.5) [6]. Такие инклюзивы за счет собственной теплопроводности способствуют росту величины теплового потока через объем ТАМ, увеличивая при этом общий коэффициент теплопередачи.

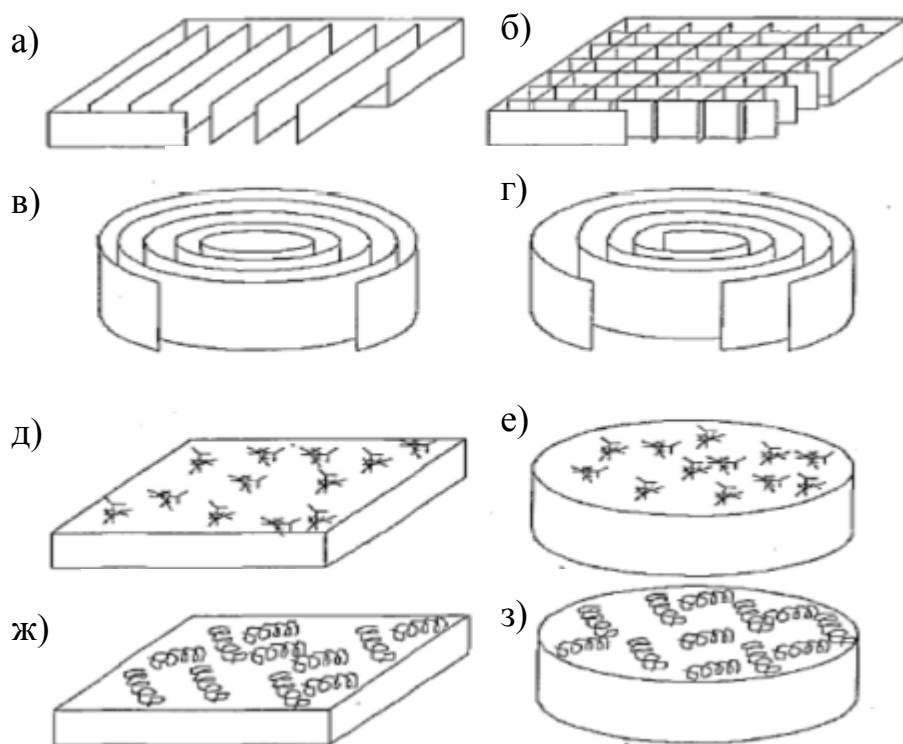


Рис. 1.5. Форма инклюзивов в плоском элементе теплового аккумулятора:

а – плоские прямоугольные пластины;

б – плоские прямоугольные пластины в форме решетки;

в – пластины в форме концентрических цилиндров;

г – пластины в форме спирали;

д, е – колючкообразные элементы;

ж, з – спиралевидные элементы.

АТФП пассивного типа имеют довольно большие по площади поверхности теплообмена, что сказывается на металлоемкости и стоимости аппарата. Уменьшение площади теплообмена возможно за счет применения активного способа теплообмена. При этом конструкция аккумулятора усложняется и получает подвижные элементы, требующие обслуживания, что соответственно сказывается на эксплуатационных затратах и надежности аккумулятора, увеличиваются динамические нагрузки на конструктивные элементы АТФП.

В настоящее время предложены различные способы уменьшения поверхности теплообмена путем соскабливания (Рис. 1.4в, Рис. 1.4г), ультразвукового либо электрогидравлического (Рис. 1.4д) разрушения закристаллизовавшегося ТАМ, вибрации теплообменных трубок и др.

При рассмотрении различных типов активного теплообмена [67] было сделано заключение, что затраты на аккумуляторы, использующие активный способ теплообмена, практически сопоставимы (70-90% от стоимости пассивного АТФП) по своей стоимости с аккумуляторами пассивного теплообмена, а в некоторых случаях могут превосходить стоимость аналогичного АТ пассивного теплообмена в 1,7 раза.

Стремление разработчиков к уменьшению поверхности теплообмена привело к развитию направления на разработку контактного АТ [76,88]. Однако при непосредственном контакте теплоносителя и ТАМ следует обеспечить отсутствие каких-либо их взаимодействий. Теплоаккумулирующие материалы в этом случае должны отвечать следующим требованиям: кристаллизоваться отдельными кристаллами; иметь большую разность плотностей твердой и жидкой фаз; быть химически стабильными; не образовывать эмульсий с теплоносителем. К теплоносителю также предъявляются определенные требования: химическая стабильность в смеси с ТАМ; большая разница плотностей по отношению к ТАМ; малая способность к вспениванию. Возможно появление и других признаков, вытекающих из особенностей конструкции аккумулятора.

При использовании жидкого теплоносителя более плотного, чем твердый

ТАМ, реализуется схема, изображенная на рис. 1.4е [35]. В процессе работы аккумулятор заполнен смесью теплоаккумулирующего материала и теплоносителя. В верхнюю часть ТА подается жидкий теплоноситель, который попадает на поверхность ТАМ, охлаждает (нагревает) его и отводится из нижней части аккумулятора. За счет меньшей плотности жидкой фазы ТАМ по сравнению с твердой его закристаллизовавшиеся частицы опускаются в нижнюю часть аккумулятора. В процессе работы АТ происходит постепенное заполнение всего объема закристаллизовавшимся ТАМ. При использовании теплоносителя с плотностью, меньшей плотности ТАМ, реализуется схема, изображенная на рис. 1.4ж [35]. Распыл теплоносителя происходит в нижней части аккумулятора. В процессе всплытия капель теплоносителя ТАМ нагревается либо охлаждается и одновременно интенсивно перемешивается.

Основными недостатками [35] приведенных способов контакта ТАМ и теплоносителя считаются потребности в постороннем источнике энергии для прокачки и необходимость тщательной фильтрации теплоносителя с целью препятствия уносу частиц ТАМ.

Указанные недостатки отсутствуют в конструкции, использующей принцип испарительно-конвективного переноса тепла при непосредственном контакте ТАМ и теплоносителя (Рис. 1.4з) [35]. В этом случае помимо названных свойств теплоносителя требуется, чтобы температура кипения теплоносителя при атмосферном давлении была несколько ниже температуры плавления ТАМ. Для заряда аккумулятора давление и соответственно температура кипения теплоносителя в нем устанавливаются выше температуры плавления ТАМ. В зарядном теплообменнике осуществляется подвод тепла. Теплоноситель закипает и пузырьки пара при температуре выше температуры плавления ТАМ поднимаются вверх и подогревают ТАМ. При этом происходит плавление ТАМ и конденсация теплоносителя. Расплавленный ТАМ поднимается вверх, а конденсат теплоносителя опускается вниз. По мере плавления ТАМ пузырьки теплоносителя выходят в паровое пространство АТ и в конце процесса зарядки весь теплоноситель в паровой фазе находится в паровом пространстве. На этапе отвода

тепла от ТА давление в нем снижается так, что температура конденсации теплоносителя становится ниже температуры плавления ТАМ. При отводе тепла на поверхности разрядного теплообменника происходит конденсация теплоносителя, который стекает на расплавленный ТАМ. Происходит испарение капель теплоносителя и кристаллизация частиц ТАМ. Затвердевший ТАМ опускается в нижнюю часть АТ, а пар теплоносителя поднимается вверх.

По мере охлаждения ТАМ капли теплоносителя опускаются все ниже и ниже и в конце процесса разрядки весь теплоноситель оказывается в нижней части ТА.

Таким образом, АТФП реализующие активный способ теплообмена отличаются большей сложностью конструкции и технологического процесса. В совокупности экономический эффект, получаемый от реализации активного теплообмена на нынешнем этапе развития, сопоставим с таковым при пассивном теплообмене [67]. Несомненным превосходством пассивного теплообмена выступает отсутствие постоянного контроля процесса, так как пассивные АТФП не требуют обслуживания. Такие причины послужили привлечению большего внимания в настоящее время к направлению развития именно пассивных АТ.

1.4. Обзор методик численного моделирования переходных процессов фазовых превращений ТАМ

Для обеспечения работы АТФП с заданными параметрами системы теплоснабжения необходимо выполнение его теплового и конструктивного расчетов. Иными словами, необходимо наличие математической модели, оптимально описывающей процессы теплообмена при фазовых превращениях ТАМ с учетом геометрии теплообменных поверхностей аккумулятора. Выполнение такого расчета усложняется наличием пространственно-временных изменений температурного поля ТАМ при его фазовом переходе.

Теоретическое описание процесса фазового перехода ТАМ довольно сложное, так как носит нелинейный характер, и сводится к решению задачи

Стефана [43], аналитическое решение которой он получил для расчета глубины промерзания грунта. Стефан показал, что условие на подвижной границе раздела фаз обуславливает нелинейность задачи из-за усеченности температурного поля среды, описываемого функцией линейной задачи.

Задача Стефана сводится к определению температурного поля и движения границы фазового перехода во времени. Учитывается, что изменение агрегатного состояния происходит только вследствие теплопроводности среды при влиянии внутренних и внешних источников теплоты. Теплопередача в твердой и жидкой фазе материала описывается уравнением теплопроводности, а движение границы фазового перехода – условием Стефана, которое выражает тепловой баланс при фазовом превращении вещества [53,68].

Несмотря на множество работ по решению задачи Стефана, известно только одно точное решение, полученное для полуограниченной области при постоянной температуре на ее поверхности [38], остальные алгоритмы решения основаны на численных и приближенных аналитических методах [3,29,37,51]. Г. Карслоу, Д. Егер [29], А.В. Лыков [38] в своих фундаментальных монографиях по теории теплопроводности рассматривали задачи промерзания (протаивания) влажных тел различной геометрии. Прикладное использование на практике известных решений усложняется применением рядов Бесселя при их разработке, поэтому поиск практичных рабочих моделей процесса фазового превращения для проектирования натурных аппаратов продолжается.

А.М. Муирманов в своей монографии [43] исследовал классическое решение задачи Стефана в случае двух и более пространственных переменных. При этом все исследования задачи Стефана он разделил на следующие направления: существование и единственность решения в случае одной пространственной переменной и в случае многих пространственных переменных; изучение структуры и качественных свойств решения, в том числе его поведение при неограниченном возрастании времени; квазистационарная многомерная задача Стефана; численные методы решения; оптимальное управление процессами фазового перехода.

В настоящее время в связи с бурным развитием вычислительной техники наиболее эффективными при решении задач теплопроводности для сложных тел выступают численные методы. Они также являются основными для решения задачи Стефана, только в некоторых случаях возможно применение аналитического метода.

Численные методы решения обеспечивают значительную точность результатов, при учете большого количества параметров и отсутствия грубых допущений. Недостатком численных методов можно назвать громоздкость, и затруднительный анализ результатов из-за сложности выделения определяющих параметров, что связано с большими затратами времени.

Основы методов конечных разностей подробно изложены в монографиях А.Н. Тихонова, А.А. Самарского [64], Н.Н. Калиткина [27], Г.И. Марчука [40], Л.И. Турчака [66], Н.Н. Яненко [93], а также в работах [45,54-56]. Значительный вклад в разработку конечно-разностных методов решения задач теплопереноса внесли Б.М. Будак [10], П.Н. Вабищевич [13,14], Ф.П. Васильев [15], а также другие ученые.

В настоящее время известны следующие разностные методы решения задач типа Стефана: метод ловли фронта в узел разностной сетки, метод выпрямления фронтов, метод сглаживания коэффициентов и схемы сквозного счета. С применением их к различным конкретным задачам можно ознакомиться в работах [12,36].

Метод ловли фронта в узел сетки применяется только для одномерных однофронтных задач, а метод выпрямления фронтов - многофронтных задач. Характерная особенность этих методов состоит в том, что разностные схемы строятся с явным выделением искомого фронта фазового превращения. Следует отметить, что методы с явным выделением неизвестной границы фазового превращения для случая циклического изменения температуры на границе не подходят, т.к. число немонотонно движущихся фронтов может быть несколько, при этом некоторые из них могут сливаться друг с другом или исчезать.

Наиболее подходящим для численного решения прикладных задач типа Стефана, которые в основном бывают многомерными и характеризуются наличием несколько немонотонно движущихся фронтов фазового превращения, являются методы, основанные на подходе А.Н. Тихонова и А.А. Самарского [64]. Используя этот подход, А.А. Самарский и Б.Д. Моисеенко [54] разработали экономичную схему сквозного счета со сглаживанием разрывных коэффициентов в уравнении теплопроводности по температуре в окрестности фазового превращения. Схемы со сглаживанием коэффициентов предложены и в работе Б.М. Будака, Е.Н. Соловьевой, А.Б. Успенского [10]. Обе работы основаны на одной и той же идее сглаживания. Схема сквозного счета характеризуется тем, что граница раздела фаз явно не выделяется, и используются однородные разностные схемы. При этом теплота фазового превращения вводится с применением δ -функции Дирака как сосредоточенная теплоемкость в коэффициент теплоемкости [31]. Получаемая таким образом разрывная функция затем «размазывается» по температуре, и не зависит от числа измерений и фаз. Практически аналогичный подход [10] использован R.Alloncle [2] применительно к одномерной сферической геометрии (ТАМ представляет собой шарики из парафина, заключенные в неплавящуюся оболочку) и E.Vrignaud [16] для плоской геометрии. Удельная теплота плавления учитывается введением эквивалентной теплоемкости.

Широко используется подход [65,73] к решению задачи с использованием, так называемого, квазистационарного приближения, когда распределение температуры в одной из фаз заменяется установившимся (стационарным) для каждого момента времени [8]. При этом задача существенно упрощается, так как сводится к нахождению зависимости движения фронта кристаллизации от времени путем решения уравнения теплового баланса на межфазной границе. Такой подход с дополнениями был реализован в работе [67] для цилиндрической трубки кожухотрубного АТ. Однако она является довольно сложной с практической точки зрения, так как итог и анализ результатов сводится к безразмерным критериям.

Аналитические решения, реализуемые приближенными методами, обычно недостаточно точны, так как строятся на определенных допущениях и упрощениях, т.е. учитывают меньшее число физически значимых факторов. Тем не менее, полученные аналитические выражения наглядны и довольно удобны для анализа. Они четко отражают основные тенденции и закономерности рассматриваемых процессов - выявляют качественную картину и могут служить «эталоном» для оценки численных решений [48].

Особое внимание заслуживает вариационный метод решения задачи Стефана [21,41]. Суть метода основывается на вариационном принципе локального потенциала [96]. Он выходит за рамки классического вариационного исчисления и не позволяет оценивать точность приближения, но сохраняет важные черты вариационного метода, такие как компактность математических выражений, простой учет граничных условий и использование прямых методов исчисления. Достаточно подробно применение метода рассмотрено при решении задач для сплошной среды в [72]. В связи с этим представляется актуальным разработка модели работы АТФП с помощью вариационного метода и проверка ее адекватности на натурной модели с целью разработки оптимального практичного теплового и конструктивного расчета фазопереходного аккумулятора.

1.5 Выводы по первому разделу. Постановка цели и задач исследований

1. Эффективное использование энергетических ресурсов напрямую зависит от равномерности потребления энергии. Решение данного вопроса неразрывно связано с проблемой аккумуляции теплоты. Перспектива развития установок с аккумуляторами теплоты внесет значительный вклад в решение экологического вопроса при генерации тепловой энергии, что даст возможность развития нетрадиционных источников энергии и рациональному использованию существующих мощностей ОЭС Украины.
2. Наиболее перспективным направлением развития технологии аккумуляции

тепловой энергии в настоящее время рассматривается аккумулярование за счет явления фазового перехода твердого материала. Использование теплоты плавления для аккумулярования тепла обеспечивает высокую плотность запасаемой энергии при использовании небольших перепадов температур и достаточно стабильную температуру теплоносителя на выходе из АТ.

3. Наиболее перспективным направлением представляется поиск универсального теплоаккумулирующего материала среди групп органических соединений по причине своей распространенности и дешевизне по сравнению с группой металлов и полимеров. Органические соединения обладают высокой плотностью запасаемой энергии и температурами фазового перехода, приближенными к рабочим температурам систем теплоснабжения. Однако, идеального материала, отвечающего всем требованиям по теплофизическим, химическим и экономическим критериям, не найдено.
4. Вследствие простоты конструкции и эксплуатации большее внимание 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 использования в системах аккумулярования теплоты.
5. Задача оптимального теплового и конструктивного расчета АТФП неразрывно связана с решением задачи Стефана [43]. Громоздкость вычислений и затруднительный анализ результатов при решении задачи Стефана численными методами заставляет искать практичное аналитическое решение. Особое внимание при этом заслуживает вариационный метод, позволяющий получить компактные математических выражения, произвести простой учет граничных условий и использовать прямые методы исчисления.

Исходя из вышесказанного, необходимо проведение исследований по поставленным вопросам, в частности, разработке математической модели и рекомендаций конструктивного расчета термоаккумуляторов на основе фазового перехода для нужд систем теплоснабжения.

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

Для реализации цели поставлены следующие **задачи**:

- провести аналитические исследования существующих конструкций аккумуляторов теплоты, аккумуляторов теплоты на фазовом переходе, теплоаккумулирующих материалов;
- 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.

РАЗДЕЛ 2

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛОТЫ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

В соответствии с выводами по первому разделу можно говорить о том, что в настоящее время законченной практической методики для теплового и конструктивного расчетов аккумуляторов теплоты фазового перехода (АТФП) кожухотрубного типа не разработано.

При этом наибольшего внимания заслуживают АТФП кожухотрубного типа в связи с простотой конструкции и надежностью работы. В данной работе рассматривается кожухотрубный АТФП, в котором межтрубное пространство заполняется аккумулялирующим материалом, подвод и отвод теплоты от которого производится теплоносителем системы теплоснабжения через поверхности теплообмена в виде горизонтально расположенного пучка труб.

Задача конструктивного расчета любого аккумулятора теплоты сводится к нахождению его основных конструктивных параметров, а именно: шага расположения теплообменных поверхностей (труб), площади поверхности теплообмена, оптимального диаметра теплообменных труб, тепловой емкости аккумулятора. Также необходимо знать порядок и зависимость взаимного влияния параметров работы системы теплоснабжения и аккумулятора.

2.1 Определение шага теплообменных труб

Предварительные наблюдения за процессами зарядки и разрядки аккумулятора показали, что зарядка аккумулятора (расплавление твердого ТАМ) протекает без существенных затруднений, и по времени является более кратковременной, чем процесс разрядки (при кристаллизации ТАМ). Это связано с наличием большего температурного напора от греющей среды к ТАМ, а также с возникновением явления свободной конвекции в объеме расплава, что интенсифицирует процесс теплообмена. Таким образом, в качестве расчетного

принимается процесс отбора тепла от ТАМ. При этом поставленная задача является симметричной относительно оси кристаллизации – теплообменной трубки.

С целью упрощения описания рабочего процесса аккумулятора сведем задачу к рассмотрению единичного стержня (теплообменной трубки). Таким образом, рассмотрение процесса изменения температурного поля кристаллизующегося ТАМ преобразуется в задачу нахождения распределения температур в любой момент времени для полого цилиндра.

Однако необходимо четко определить рассматриваемые границы температурного поля. В процессе разрядки происходит нарастание твердой фазы ТАМ на теплообменных трубках в виде цилиндра, уменьшается объем жидкой фазы ТАМ, сопротивление теплопередаче увеличивается, а значит уменьшается количество теплоты, воспринимаемое теплоносителем системы теплоснабжения от расплава через стенку кристаллизующегося ТАМ. Рассмотрим зависимость величины теплового потока от диаметра кристаллизующегося ТАМ (Рис. 2.1).

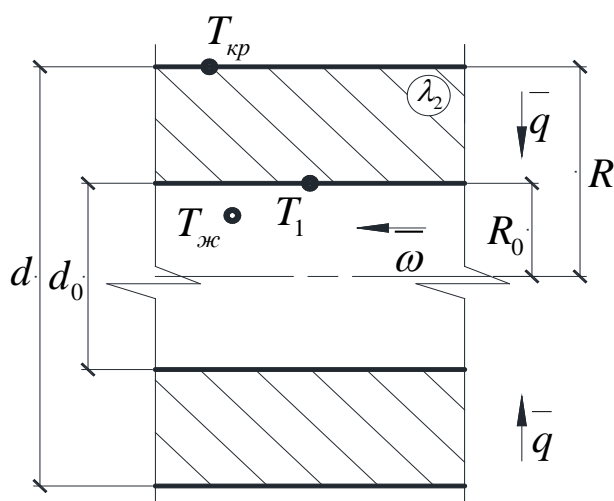


Рис. 2.1. Схема движения потоков в полом цилиндре:

\vec{q} - вектор теплового потока;

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

R_0 - радиус теплообменной трубки;

R - радиус закристаллизовавшегося ТАМ на теплообменной трубке;

d_0 - диаметр канала для теплоносителя, внутренний диаметр трубки;

d - наружный диаметр теплообменной трубки (цилиндра).

Составим уравнение теплового баланса для приведенного узла на рис. 2.1. Все единицы приводятся в системе СИ. Так как предусматривается, что теплообменная трубка будет находится в окружении других аналогичных трубок, а теплопотери в окружающую среду возможны только по периметру теплоизолированного бункера, то этими потерями можно пренебречь в силу их незначительности. Также пренебрежем толщиной стенки трубки из-за ее малой толщины и высокой теплопроводности. Количество теплоты Q_1 , воспринятое теплоносителем, равно количеству теплоты, отданного ТАМ Q_2 , или

$$Q_1 \approx Q_2; \quad (2.1)$$

$$Q_1 = \pi d_0 l \alpha_1 (T_1 - T_{жс});$$

$$Q_2 = \frac{2\pi\lambda_2 l}{\ln \frac{d}{d_0}} (T_{кр} - T_1),$$

где Q_1 , Q_2 - соответственно отведенная и подведенная теплота к теплоносителю;

α_1 - коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки цилиндра к теплоносителю;

l -длина цилиндра;

λ_2 -коэффициент теплопроводности ТАМ в твердой фазе;

$T_{жс}$ -средняя температура теплоносителя, $T_{жс} = \frac{T_{вх} + T_{вых}}{2}$;

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

T_1 -температура внутренней стенки полого цилиндра. T_1 принимается как среднелогарифмическая температура между $T_{жс}$ теплоносителя и $T_{кр}$, или

$$T_1 = \frac{(T_{кр} - T_{жс})}{\ln \frac{T_{кр}}{T_{жс}}}. \quad (2.2)$$

Преобразовав соотношение (2.1) относительно d , получаем

$$d = d_0 \cdot e^{\frac{2\lambda_2 (T_{кр} - T_1)}{d_0 \alpha_1 (T_1 - T_{жс})}}. \quad (2.3)$$

Введем в уравнение (2.3) зависимость конвективного теплообмена между теплоносителем и внутренней стенкой цилиндра от влияющих факторов. Т.к.

$\overline{Nu}_{ж,d} = \frac{\alpha_1 \cdot d_0}{\lambda_{жс}} \Rightarrow \alpha_1 = \frac{\overline{Nu}_{ж,d} \cdot \lambda_{жс}}{d_0}$, имеем следующее соотношение

$$d = d_0 \cdot e^{\frac{2\lambda_2(T_{кр}-T_1)}{\overline{Nu}_{ж,d} \cdot \lambda_{жс}(T_1-T_{жс})}}. \quad (2.4)$$

Как видно из формулы (2.4), каждому значению температуры T_1 стенки теплообменной трубки будет соответствовать определенный диаметр закристаллизовавшегося ТАМ в форме цилиндра. В условиях увеличения диаметра закристаллизовавшегося в твердой фазе ТАМ происходит падение температуры стенки $T_1 \rightarrow T_{жс}$. Таким образом, достигается такая величина d , при которой отбор тепла становится нецелесообразным, т.к. $q \rightarrow 0$. Такой предельный диаметр цилиндра, при котором наблюдается минимальный расчетный температурный напор между стенкой теплообменной трубки и теплоносителем, назовем критическим $d_{кр}$.

Математически определить минимальное значение температуры стенки T_1 функций $d(T_1)$ и $q(T_1)$ не представляется возможным, т.к. функции не имеют экстремумов и являются бесконечно убывающими. В таких условиях, определение минимального температурного напора (минимальной T_1) становится индивидуальным выбором конструктора АТФП.

Диаметр $d_{кр}$ закристаллизовавшегося ТАМ вокруг цилиндрической трубки определяет шаг расположения трубок в трубной решетке (Рис. 2.2). Как видно из уравнения (2.4) d является функцией следующих величин $d = f(d_0, \lambda_2, \lambda_{жс}, T, Re, Gr)$. Таким образом, при анализе уравнения (2.4) можно сделать вывод, что для рационализации материалоемкости (увеличения $d_{кр}$) аккумулятора целесообразно использовать как турбулентный, так и ламинарный (в частности вязкостно-гравитационный и вязкостный режим при движении в горизонтальных трубах) режимы движения теплоносителя в зависимости от теплофизических свойств аккумулирующего материала – $\lambda_2, T_{кр}$. А именно для увеличения скорости теплоносителя (а значит α), необходимо применять более теплопроводный ТАМ с более высокой температурой плавления $T_{кр}$ для сохранения конструктивных

параметров аккумулятора - $d_{кр}$.

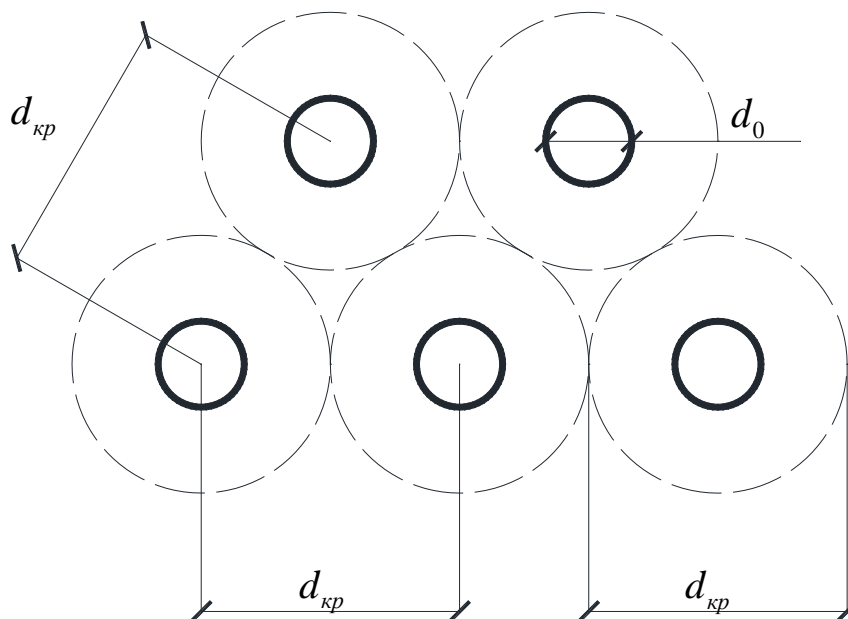


Рис. 2.2. Схема трубной решетки при шахматном расположении трубок:

$d_{кр}$ - предельный диаметр закристаллизовавшегося ТАМ вокруг теплообменной трубки.

Для ламинарного режима движения теплоносителя (при $Re < 2 \cdot 10^3$, $l_0/d_0 > 50$) в прямых гладких горизонтальных трубах при определении среднего коэффициента теплоотдачи ак. М.А.Михеев [42] рекомендует использовать следующую формулу [44]

$$\overline{Nu}_{ж,d} = 0,15 \cdot Re_{ж,d}^{0,33} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot Gr_{ж,d}^{0,1} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (2.5)$$

где $Re_{ж,d} = \frac{\omega \cdot d_0}{\nu_{ж}}$ - число Рейнольдса, определяющее режим течения;

$Gr_{ж,d} = \frac{\beta g d_0^3 \Delta T}{\nu_{ж}}$ - число Грасгофа, характеризующее соотношение

подъемной силы, возникающей от разности плотностей жидкости и силы молекулярного трения.

ω - скорость течения теплоносителя в трубке;

$\nu_{ж}$ - кинематическая вязкость теплоносителя при $T_{ж}$;

$\beta = \frac{1}{T_{жс}}$ - коэффициент объемного расширения теплоносителя;

$\Delta T = T_1 - T_{жс}$ - разность температур, определяющих диапазон изменения плотности теплоносителя.

Для определения среднего коэффициента теплоотдачи при развитом турбулентном движении теплоносителя ($Re > 10^4$, $l_0/d_0 > 50$)[44]

$$\overline{Nu}_{жс,d} = 0,021 \cdot Re_{жс,d}^{0,8} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (2.6)$$

При $2 \cdot 10^3 < Re < 10^4$ наблюдается переходной режим течения жидкости. Теплоотдача при этом режиме зависит от многих величин и не может быть описана одним уравнением подобия. В связи с этим при переходном режиме течения рекомендуется [44] использовать уравнение (2.6) для приближенных расчетов.

Используя полученные соотношения, проведем анализ влияния различных параметров на конструктивные характеристики аккумулятора. Построим график зависимости $d(T_1)$ с использованием парафина Т-3 ($T_{кр} = 54^\circ\text{C}$) в качестве ТАМ и теплоносителя - воды с температурой на входе в аккумулятор 35°C и температурой на выходе 45°C , $\omega = 0,1 \text{ м/с}$ для теплообменных труб различного диаметра.

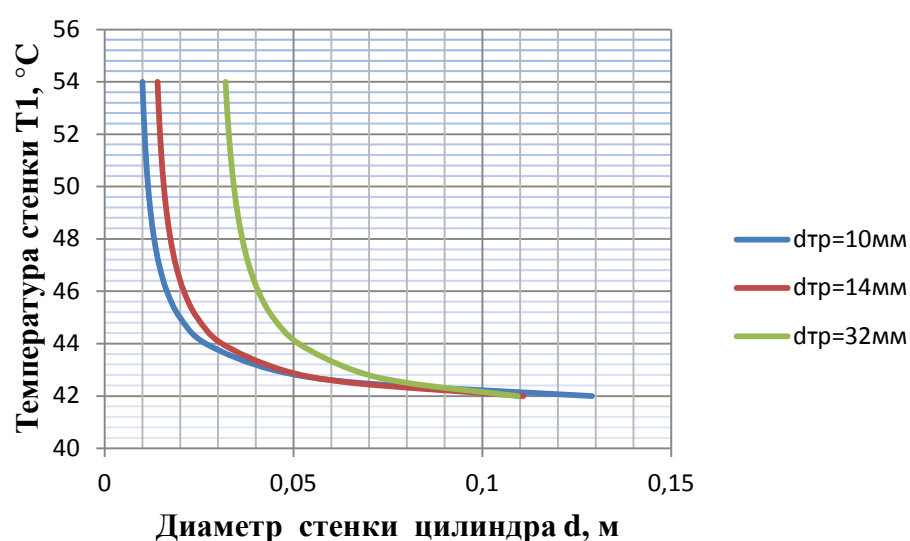


Рис. 2.3. График зависимости температуры стенки теплообменной трубки от роста диаметра закристаллизовавшегося ТАМ.

Как видно из рис. 2.3, рост диаметра закристаллизовавшегося ТАМ вокруг теплообменной трубки пропорционален увеличению диаметра при неизменности остальных переменных. Таким образом, с увеличением диаметра возможно достичь роста тепловой мощности аккумулятора, и его производительности. Однако, при определенной температуре эффект от увеличения диаметра падает, происходит сближение кривых. В данном случае это наблюдается в области температуры стенки равной 44°C , при градиенте 4°C . Если обратить внимание на искривление графиков для различных диаметров, то можно сделать вывод, что оптимальное значение $d_{кр}$ составляет $\approx 2d_0$.

Проанализируем влияние скорости теплоносителя на процесс теплообмена (T_1 , α , влияющих на q). Построим для трубки $d=14$ мм график зависимости $d(T_1)$ с использованием парафина Т-3 в качестве ТАМ и теплоносителя - воды с температурой на входе в аккумулятор 35°C и температурой на выходе 45°C , при скоростях потока $\omega=0,1$ м/с (ламинарный режим); $0,3$ м/с (переходной режим); $0,8$ м/с (турбулентный режим).

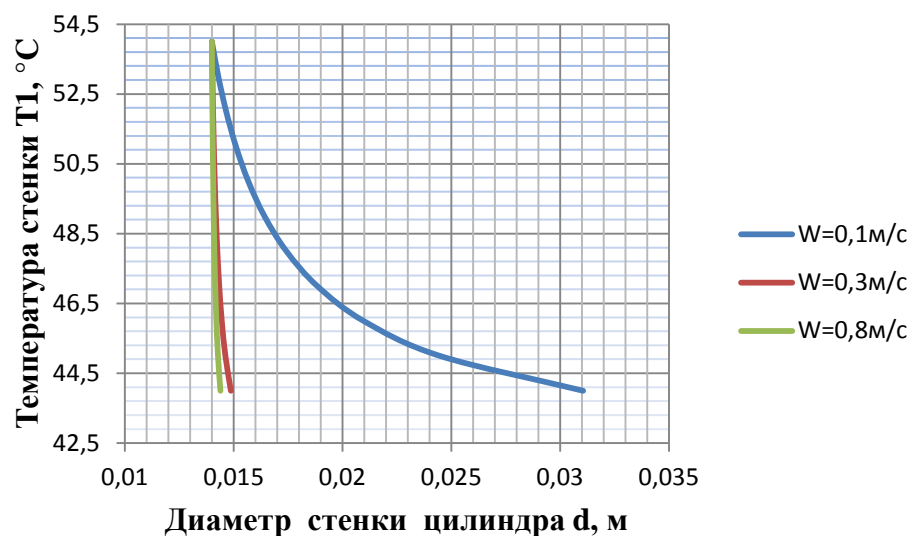


Рис. 2.4. График зависимости температуры стенки теплообменной трубки от роста диаметра закристаллизовавшегося ТАМ при различных режимах течения теплоносителя.

На рис. 2.4 видно, что увеличение скорости потока теплоносителя не приводит к интенсификации процесса теплообмена для исследуемого ТАМ, а

напротив снижает температуру стенки, при этом уменьшая температурный напор. Это объясняется низкими теплопроводными свойствами кристаллизующегося ТАМ. Таким образом, по заданному значению d и минимальному температурному напору ($T_1 - T_{ж}$) возможно спрогнозировать свойства необходимого ТАМ для аккумулятора при ограничении геометрических размеров АТФП в стесненных условиях, или необходимости увеличения тепловой мощности существующего аккумулятора.

2.2 Моделирование температурного режима работы АТФП

Процесс отбора теплоты от аккумулятора (разрядка) протекает с постоянным изменением значений температур теплоносителя и перераспределения температурного поля внутри кристаллизующегося ТАМ во времени. Для описания работы АТФП необходимо установить зависимость, по которой происходит изменение параметров температурного поля материала. Для этого решим задачу нестационарной теплопроводности для бесконечного полого цилиндра (Рис.2.5).

Учитывая, что теплоемкость расплавленного ТАМ довольно низка, при рассмотрении задачи примем нагрев ТАМ до температуры фазового перехода без его дальнейшего перегрева. Т.е. в начальный момент времени температура в расчетной области кристаллизации принимается равномерной и равной $T_{кр}$. Таким образом на значения температур теплоносителя будет оказывать влияние только распределение температур в твердой фазе закристаллизовавшегося ТАМ.

При кристаллизации ТАМ уменьшается объем жидкой фазы, вследствие чего происходит перетекание жидкого ТАМ из областей, предназначенных для компенсации его расширений. Движущийся фронт кристаллизации ТАМ находится при температуре фазового перехода, что не влияет на перераспределение температурного поля.

Приняв значение $d = 2R$ за предельное расчетное значение роста закристаллизовавшегося ТАМ в форме цилиндра, рассмотрим задачу изменения

его температурного поля во времени.

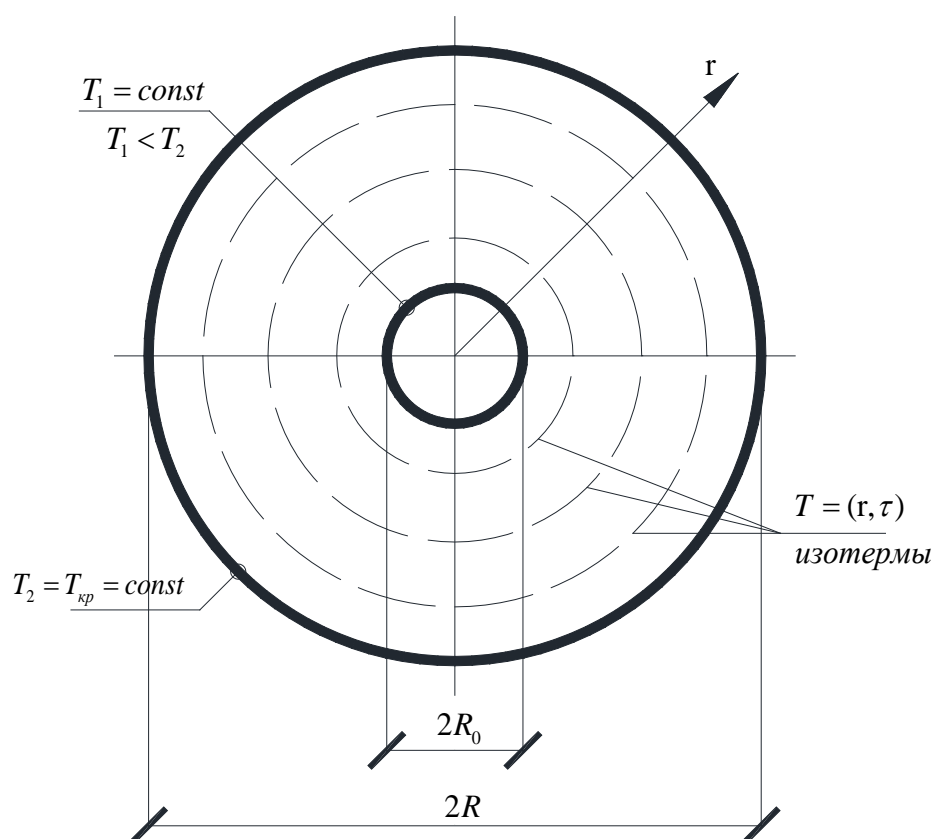


Рис. 2.5. Температурное поле в полем цилиндре.

Дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности для цилиндра запишется в виде [26,38]

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (\tau > 0; R_0 < r < R). \quad (2.7)$$

Граничные условия принимаются следующие:

$$T(r, 0) = T_2 = T_{кр} = const, \quad (2.8)$$

$$T(R, \tau) = T_2 = T_{кр} = const, \quad (2.9)$$

$$T(R_0, \tau) = T_1 = const. \quad (2.10)$$

Найдем распределение температур в сечении (Рис.2.5) в фиксированный момент времени. При этом согласно уравнению (2.7) функция $T(r)$ должна удовлетворять дифференциальному уравнению

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \quad (2.11)$$

и граничным условиям

$$T(R_0) = T_1, \quad T(R) = T_2. \quad (2.12)$$

Для решения уравнения (2.11) введем новую переменную $\frac{dT}{dr} = z$. Тогда (2.11) примет вид

$$\frac{dz}{dr} + \frac{1}{r} z = 0. \quad (2.13)$$

Интегрируя по z , решение уравнения (2.13) примет вид

$$z = \frac{B}{r} = \frac{dT}{dr}. \quad (2.14)$$

Интегрируя еще раз, получим

$$T(r) = B \ln r + C. \quad (2.15)$$

Постоянные B и C определим из граничных условий (2.12)

$$B = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{R}{R_0}}, \quad C = \frac{T_2 \ln R - T_1 \ln R_0}{\ln \frac{R}{R_0}}. \quad (2.16)$$

Подставляя (2.16) в (2.15), получим

$$T(r) = \frac{T_1 \ln \frac{R}{r} + T_2 \ln \frac{r}{R_0}}{\ln \frac{R}{R_0}}. \quad (2.17)$$

Функция $T(r)$ представляет собой распределение температуры в полом цилиндре в фиксированный момент времени. Она определяет распределение температур как в жидкой фазе, так и в твердой.

Чтобы найти функцию $T(r, \tau)$, воспользуемся вариационным принципом локального потенциала [24,96]. Введем следующие обозначения:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = T_\tau; \quad \frac{\partial T^2(r, \tau)}{\partial r^2} = T_{rr}; \quad \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} = T_r. \quad (2.18)$$

Тогда уравнение (2.7) запишется следующим образом:

$$T_{rr} + \frac{1}{r} T_r - \frac{1}{a} T_\tau = 0. \quad (2.19)$$

Умножим обе части уравнения (2.19) на искомую функцию $T(r, \tau) = T$, и используя рекомендации [24], запишем функционал

$$L = \int_R^{R_0} \int_{T_1}^{T_2} (T_r^2 - \frac{2}{r} T_r^0 \cdot T + \frac{2}{a} T_\tau^0 \cdot T) dr d\tau, \quad (2.20)$$

где T_r^0, T_τ^0 - неварьируемые производные от температуры.

Проверим, дает ли вариация функционала (2.20) искомое дифференциальное уравнение (2.19). Для этого запишем уравнение Эйлера – Лагранжа

$$\frac{\partial L}{\partial T} - \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial L}{\partial T_r} - \frac{\partial}{\partial \tau} \frac{\partial L}{\partial T_\tau} = 0. \quad (2.21)$$

Найдем производные (2.21):

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial T} &= -\frac{2}{r} T_r^0 + \frac{2}{a} T_\tau^0; \\ \frac{\partial L}{\partial T_r} &= 2T_r; \quad \frac{\partial}{\partial r} \frac{\partial L}{\partial T_r} = 2T_{rr}; \\ \frac{\partial L}{\partial T_\tau} &= 0. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Подставим полученные выражения в (2.21), получим

$$-\frac{2}{r} T_r^0 + \frac{2}{a} T_\tau^0 - 2T_{rr} = 0. \quad (2.23)$$

Умножая (2.23) на -1, и сокращая на 2, получаем уравнение (2.19). Функционал (2.20) записан верно, следовательно функция минимизирующая функционал будет наилучшим приближением решения уравнения (2.19).

Найдем функцию минимизирующую функционал (2.20). Решение данной задачи будем искать в виде:

$$T(r, \tau) = T(r) \cdot f(\tau). \quad (2.24)$$

Вычислим производную по r от (2.17)

$$T_r = \frac{T_2 - T_1}{r \ln \frac{R}{R_0}}. \quad (2.25)$$

Учитывая (2.24), подставляем (2.25) в (2.20), тогда

$$\begin{aligned}
L = & \int_R^{R_0} \int_{T_1}^{T_2} \left(\frac{(T_2 - T_1)^2}{r^2 \ln^2 \frac{R}{R_0}} f^2(\tau) - \frac{2}{r} \frac{T_2 - T_1}{r \ln \frac{R}{R_0}} \cdot \frac{T_1 \ln \frac{R}{r} + T_2 \ln \frac{r}{R_0}}{\ln \frac{R}{R_0}} f^0(\tau) f(\tau) + \right. \\
& \left. + \frac{2}{a} \frac{(T_1 \ln \frac{R}{r} + T_2 \ln \frac{r}{R_0})^2}{\ln^2 \frac{R}{R_0}} [f'(\tau)]^0 f(\tau) \right) dr d\tau.
\end{aligned} \tag{2.26}$$

Введем обозначения:

$$\begin{aligned}
A = & \int_R^{R_0} \frac{(T_2 - T_1)^2}{r^2 \ln^2 \frac{R}{R_0}} dr; \quad B = \int_R^{R_0} \frac{1}{r} \frac{T_2 - T_1}{r \ln \frac{R}{R_0}} \cdot \frac{T_1 \ln \frac{R}{r} + T_2 \ln \frac{r}{R_0}}{\ln \frac{R}{R_0}} dr; \\
C = & \int_R^{R_0} \frac{(T_1 \ln \frac{R}{r} + T_2 \ln \frac{r}{R_0})^2}{\ln^2 \frac{R}{R_0}} dr.
\end{aligned} \tag{2.27}$$

Тогда уравнение (2.26) запишется следующим образом

$$L = \int_{T_1}^{T_2} (A \cdot f^2(\tau) - 2Bf^0(\tau)f(\tau) + \frac{2}{a}C[f'(\tau)]^0 f(\tau)) d\tau. \tag{2.28}$$

Определим константы A , B , C интегрируя по r соответствующие выражения (2.27)

$$\begin{aligned}
A = & \int_R^{R_0} \frac{(T_2 - T_1)^2}{r^2 \ln^2 \frac{R}{R_0}} dr = \frac{(T_2 - T_1)^2}{\ln^2 \frac{R}{R_0}} \left(-\frac{1}{r} \right) \Big|_R^{R_0} = \frac{(T_2 - T_1)^2}{\ln^2 \frac{R}{R_0}} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right); \\
B = & \int_R^{R_0} \frac{1}{r} \frac{T_2 - T_1}{r \ln \frac{R}{R_0}} \cdot \frac{T_1 \ln \frac{R}{r} + T_2 \ln \frac{r}{R_0}}{\ln \frac{R}{R_0}} dr = \frac{(T_2 - T_1)}{\ln^2 \frac{R}{R_0}} \int_R^{R_0} \frac{1}{r^2} (T_1 \ln \frac{R}{r} + T_2 \ln \frac{r}{R_0}) dr.
\end{aligned} \tag{2.29}$$

Воспользуемся методом разложения:

$$B_1 = \int_R^{R_0} T_1 \frac{1}{r^2} \ln \frac{R}{r} dr = T_1 \left(\int_R^{R_0} \frac{1}{r^2} \ln R dr - \int_R^{R_0} \frac{1}{r^2} \ln r dr \right).$$

Интегрируя B_1 по частям, получим:

$$\begin{cases} dU = \frac{1}{r^2} dr; & U = -\frac{1}{r}; \\ v = \ln r; & dv = \frac{1}{r} dr. \end{cases}$$

$$B_1 = T_1 \left(\ln R \left(-\frac{1}{r} \right) \Big|_R^{R_0} + \frac{\ln r}{r} \Big|_R^{R_0} + \int_R^{R_0} \frac{1}{r^2} dr \right) = T_1 \left(\ln R \left(-\frac{1}{r} \right) \Big|_R^{R_0} + \frac{\ln r}{r} \Big|_R^{R_0} + \frac{1}{r} \Big|_R^{R_0} \right) = T_1 \left(\frac{1}{R_0} \ln \frac{R_0}{R} + \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R} \right).$$

Аналогично определим B_2 :

$$B_1 = \int_R^{R_0} T_2 \frac{1}{r^2} \ln \frac{r}{R_0} dr = T_2 \left(-\frac{1}{r} \ln \frac{r}{R_0} \Big|_R^{R_0} - \int_R^{R_0} \left(-\frac{1}{r^2} \right) dr \right) = T_2 \left(-\frac{1}{r} \ln \frac{r}{R_0} \Big|_R^{R_0} - \frac{1}{r} \Big|_R^{R_0} \right) = T_2 \left(\frac{1}{R} \ln \frac{R}{R_0} - \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R} \right);$$

$$\begin{cases} dU = \frac{1}{r^2} dr; & U = -\frac{1}{r}; \\ v = \ln \frac{r}{R_0}; & dv = \frac{R_0}{r} \cdot \frac{1}{R_0} = \frac{1}{r} dr. \end{cases}$$

Таким образом постоянная B будет равна $(B_1 + B_2)$

$$B = \frac{(T_2 - T_1)}{\ln^2 \frac{R}{R_0}} \left(T_1 \left(\frac{1}{R_0} \ln \frac{R_0}{R} + \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R} \right) + T_2 \left(\frac{1}{R} \ln \frac{R}{R_0} - \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R} \right) \right). \quad (2.30)$$

Найдем постоянную C

$$C = \int_R^{R_0} \frac{(T_1 \ln \frac{R}{r} + T_2 \ln \frac{r}{R_0})^2}{\ln^2 \frac{R}{R_0}} dr = \int_R^{R_0} \frac{1}{\ln^2 \frac{R}{R_0}} (T_1^2 \ln^2 \frac{R}{r} + 2T_1 T_2 \ln \frac{R}{r} \ln \frac{r}{R_0} + T_2^2 \ln^2 \frac{r}{R_0}) dr.$$

Воспользуемся методом разложения

$$C_1 = \int_R^{R_0} T_1^2 \ln^2 \frac{R}{r} dr = \int_R^{R_0} T_1^2 \ln \frac{R}{r} \ln \frac{R}{r} dr;$$

$$\begin{cases} v = \ln \frac{R}{r}; & dv = \frac{r}{R} \cdot \frac{-R}{r^2} = -\frac{1}{r} dr; \\ dU = \ln \frac{R}{r} dr; & U = \int \ln \frac{R}{r} dr = \int (\ln R - \ln r) dr = \ln R \int dr - \int \ln r dr = \ln R \cdot r - (r \ln r - r). \end{cases}$$

$$\begin{aligned} C_1 &= \int_R^{R_0} T_1^2 \ln^2 \frac{R}{r} dr = T_1^2 \left(\ln \frac{R}{r} (\ln R \cdot r - (r \ln r - r)) \right) \Big|_R^{R_0} - \int_R^{R_0} (\ln R \cdot r - (r \ln r - r)) \left(-\frac{1}{r} \right) dr = \\ &= T_1^2 \left(\ln \frac{R}{r} (\ln R \cdot r - (r \ln r - r)) \right) \Big|_R^{R_0} + \ln R \cdot r \Big|_R^{R_0} - (r \ln r - r) \Big|_R^{R_0} + r \Big|_R^{R_0} = T_1^2 (R_0 (\ln \frac{R}{R_0} + 1)^2 + R_0 - 2R); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_2 &= \int_R^{R_0} 2T_1 T_2 \ln \frac{R}{r} \ln \frac{r}{R_0} dr = 2T_1 T_2 \int_R^{R_0} (\ln R - \ln r) (\ln r - \ln R_0) dr = 2T_1 T_2 \left(\ln R \int_R^{R_0} \ln r dr - \ln R \cdot \ln R_0 \int_R^{R_0} dr - \right. \\ &\quad \left. - \int_R^{R_0} \ln^2 r dr + \ln R_0 \int_R^{R_0} \ln r dr \right); \end{aligned}$$

$$\begin{cases} v = \ln r; & dv = \frac{1}{r} dr; \\ dU = \ln r dr; & U = \int_R^{R_0} \ln r dr = (r \ln r - r) \Big|_R^{R_0}; \end{cases}$$

$$C_2 = 2T_1 T_2 (\ln R \int_R^{R_0} \ln r dr - \ln R \cdot \ln R_0 \int_R^{R_0} dr - \int_R^{R_0} \ln^2 r dr + \ln R_0 \int_R^{R_0} \ln r dr) = 2T_1 T_2 ((\ln R + \ln R_0)(r \ln r - r) \Big|_R^{R_0} - \ln R \cdot \ln R_0 \cdot r \Big|_R^{R_0} - (r \ln^2 r - r \ln r) \Big|_R^{R_0} - (r \ln r - r) \Big|_R^{R_0} + r \Big|_R^{R_0}) = 2T_1 T_2 (\ln \frac{R_0}{R} (R + R_0) - 2R_0 + 2R);$$

$$C_3 = \int_R^{R_0} T_2^2 \ln^2 \frac{r}{R_0} = \int_R^{R_0} T_2^2 \ln \frac{r}{R_0} \ln \frac{r}{R_0} dr;$$

$$\begin{cases} v = \ln \frac{r}{R_0}; & dv = \frac{R_0}{r} \cdot \frac{1}{R_0} = \frac{1}{r} dr; \\ dU = \ln \frac{r}{R_0} dr; & U = \int \ln \frac{r}{R_0} dr = \int (\ln r - \ln R_0) dr = \int \ln r dr - \ln R_0 \int dr = (r \ln r - r) - \ln R_0 \cdot r. \end{cases}$$

$$C_3 = \int_R^{R_0} T_2^2 \ln^2 \frac{r}{R_0} = T_2^2 (\ln \frac{r}{R_0} ((r \ln r - r) - \ln R_0 \cdot r) \Big|_R^{R_0} - \int_R^{R_0} ((r \ln r - r) - \ln R_0 \cdot r) \frac{1}{r} dr) =$$

$$= T_2^2 (\ln \frac{r}{R_0} ((r \ln r - r) - \ln R_0 \cdot r) \Big|_R^{R_0} + \ln R_0 \cdot r \Big|_R^{R_0} - (r \ln r - r) \Big|_R^{R_0} + r \Big|_R^{R_0}) = T_2^2 (-R (\ln \frac{R}{R_0} - 1)^2 + 2R_0 - R).$$

Таким образом постоянная C будет равна $(C_1 + C_2 + C_3)$

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

$$+ T_2^2 (-R (\ln \frac{R}{R_0} - 1)^2 + 2R_0 - R)). \quad (2.31)$$

Вернемся к уравнению (2.28). Функция $f(\tau)$ выбирается таким образом, чтобы функционал (2.28) имел минимальное значение. Такому условию удовлетворяет функция, обращающая вариацию в ноль

$$\frac{\partial L}{\partial f'(\tau)} = (2A \cdot f(\tau) - 2B f^0(\tau) + \frac{2C}{a} [f'(\tau)]^0) = 0. \quad (2.32)$$

Взяв вариацию (2.32), получим

$$(A - B)f(\tau) + \frac{C}{a} f'(\tau) = 0. \quad (2.33)$$

Преобразуем полученное выражение следующим образом

$$f'(\tau) = \frac{df(\tau)}{d\tau} = -\frac{a(A - B)}{C} f(\tau). \quad (2.34)$$

Проинтегрировав уравнение (2.33) относительно переменных получим:

$$\int \frac{df(\tau)}{f(\tau)} = \int -\frac{a(A-B)}{C} d\tau + const, \quad (2.35)$$

$$\ln f(\tau) = -\frac{a(A-B)}{C} \tau + const. \quad (2.36)$$

Тогда функция, характеризующая зависимость от времени имеет вид

$$f(\tau) = C_4 \cdot e^{-\frac{a(A-B)}{C} \tau}. \quad (2.37)$$

В соответствии с уравнением (2.24) функция, описывающая распределение температуры во времени по сечению цилиндра твердого ТАМ

$$T(r, \tau) = T(r) \cdot f(\tau) = C_4 \cdot T(r) \cdot e^{-\frac{a(A-B)}{C} \tau}. \quad (2.38)$$

Постоянную C_4 определим из граничного условия (2.8), тогда

$$T(r, 0) = T_{кр} = C_4 \cdot T_{кр} \cdot e^{-\frac{a(A-B)}{C} \cdot 0} \Rightarrow C_4 = 1. \quad (2.39)$$

Отсюда окончательно получаем

$$T(r, \tau) = \frac{T_1 \ln \frac{R}{r} + T_2 \ln \frac{r}{R_0}}{\ln \frac{R}{R_0}} \cdot e^{-\frac{a(A-B)}{C} \tau}. \quad (2.40)$$

Где постоянные A , B , C описываются зависимостями соответственно по уравнениями (2.29), (2.30), (2.31).

Уравнение (2.40) справедливо для однофазного состояния аккумулирующего материала, и может быть использовано в нашем случае для нахождения температур только в закристаллизовавшемся цилиндре радиуса R . Для нахождения динамики изменения температуры по фиксированному радиусу r необходимо учесть нарастание твердой фазы во времени.

Используя уравнение (2.40), построим графическое отображение температурного поля в сечении полностью закристаллизовавшегося цилиндра (Рис. 2.6)

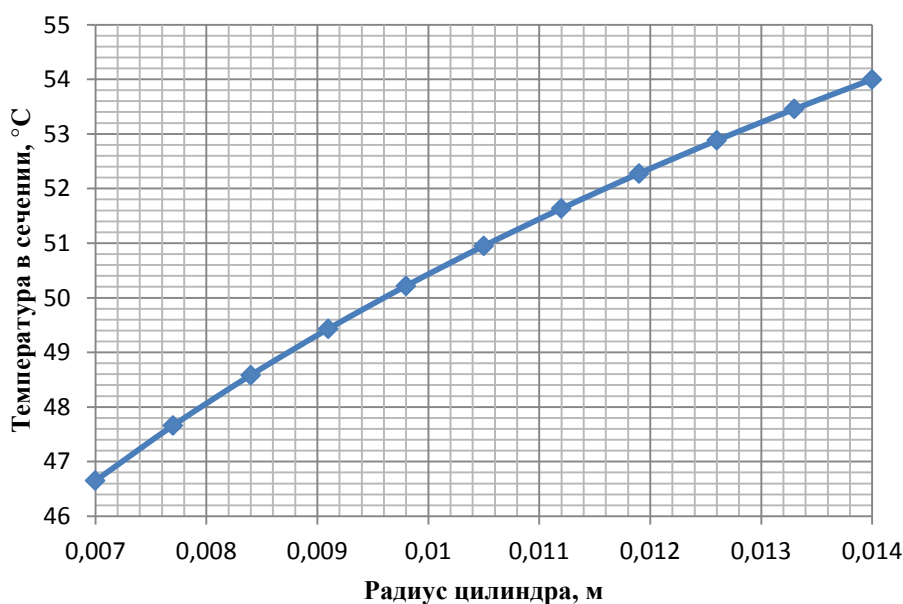


Рис. 2.6. График распределения температур в сечении закристаллизовавшегося в форме цилиндра парафина Т-3 $d=28$ мм; $d_0=14$ мм

График на рис. 2.6 характеризует закономерность изменения значений температурного поля при изменении радиуса в полностью закристаллизовавшемся теле полого цилиндра. Каждому моменту времени процесса кристаллизации будет соответствовать свой график распределения температур, так как при кристаллизации происходит постоянное изменение радиуса цилиндра.

2.3 Определение характера движения фронта кристаллизации жидкого ТАМ и времени разрядки аккумулятора

Для более полного описания рабочего процесса АТФП необходимо учитывать изменение во времени радиуса закристаллизовавшегося ТАМ, так как этот показатель значительно влияет на изменение температуры стенки теплообменной трубки, что в свою очередь определяет температуру теплоносителя на выходе из аккумулятора.

Движение фронта кристаллизации во времени (Рис. 2.7) найдем из условия Стефана [34,43], выразив баланс энергий при переходе из одного агрегатного

состояния в другое.

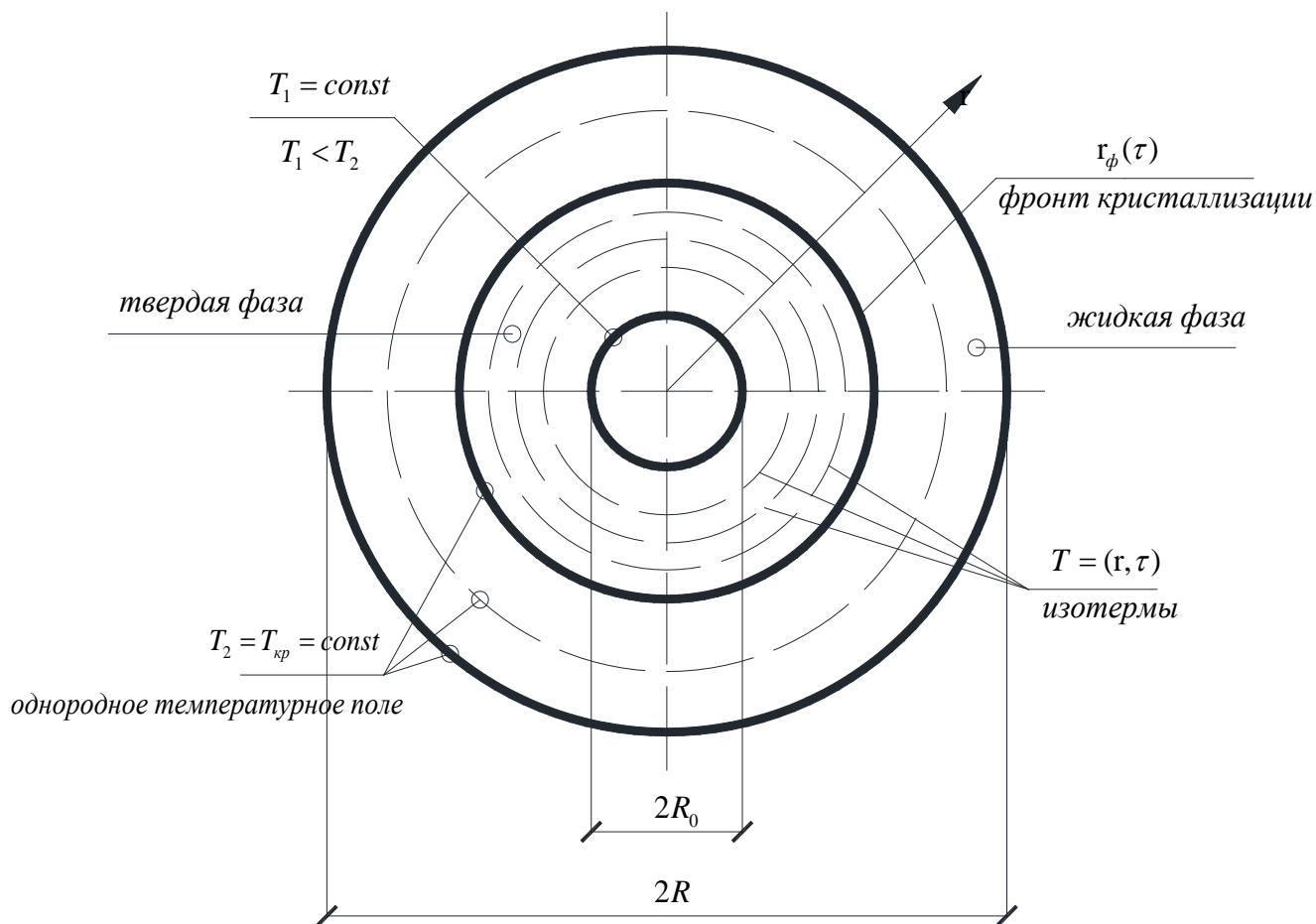


Рис. 2.7. Схема роста тела кристаллического цилиндра вокруг теплообменной трубки АТФП.

На движущемся фронте фазового перехода выделяется теплота кристаллизации L_2 , которая отводится через твердую фазу в общем случае [24]

$$\lambda_2 \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} = L_2 \rho_2 \frac{\partial r}{\partial \tau}, \quad (2.41)$$

где L_2 - теплота кристаллизации ТАМ;

ρ_2 - плотность ТАМ в твердой фазе.

Взяв производную от $T(r, \tau)$ по r , получим

$$\frac{\lambda_2 (T_2 - T_1)}{r \ln \frac{R}{R_0}} \cdot e^{\frac{a(A-B)}{c} \tau} = L_2 \rho_2 \frac{\partial r}{\partial \tau}. \quad (2.42)$$

Преобразуем (2.42) разделяя переменные

$$\frac{\lambda_2}{L_2 \rho_2 \ln \frac{R}{R_0}} \cdot e^{-\frac{a(A-B)}{C} \tau} d\tau = \frac{dr}{r(T_2 - T_1)}. \quad (2.43)$$

Проинтегрировав уравнение (2.42), получим

$$\frac{\lambda_2 \cdot e^{-\frac{a(A-B)}{C} \tau}}{-\frac{a(A-B)}{C} \cdot L_2 \rho_2 \ln \frac{R}{R_0}} = \frac{r_\phi^2}{2(T_2 - T_1)} + C_5. \quad (2.44)$$

Постоянную C_5 найдем из граничных условий при $\tau = 0$, тогда $r_\phi = R_0$

$$C_5 = -\left(\frac{c_2 \cdot C}{L_2 \cdot \ln \frac{R}{R_0} (A - B)} + \frac{R_0^2}{2(T_2 - T_1)}\right). \quad (2.45)$$

Выражая r_ϕ из уравнения (2.44), и подставляя в него значение C_5 из (2.45), получаем уравнение движения фронта кристаллизации в зависимости от времени

$$r_\phi = \sqrt{2(T_2 - T_1) \frac{c_2 \cdot C (1 - e^{-\frac{a(A-B)}{C} \tau})}{L_2 \ln \frac{R}{R_0} (A - B)} + R_0^2}. \quad (2.46)$$

Используя уравнение (2.46), построим график движения фронта кристаллизации для теплообменных трубок различных диаметров, учитывая что $d_{кр} \approx 2d_0$ (Рис. 2.8).

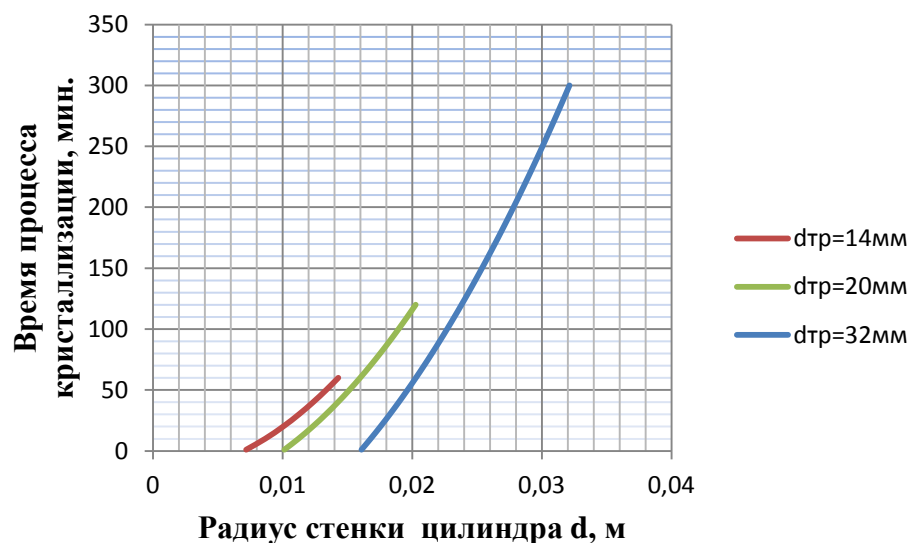


Рис. 2.8. График роста тела закристаллизовавшегося парафина Т-3 во времени для теплообменных труб различного сечения.

Рис. 2.8 показывает характер (динамику) движения фронта кристаллизации ТАМ вокруг теплообменных труб аккумулятора. Как видно, скорость движения фронта для трубок различного диаметра отличается незначительно по времени. Следует отметить значительную роль температуры стенки T_1 на угол наклона кривой. При уменьшении значения T_1 происходит сокращение времени процесса. Поэтому усреднение температуры стенки не рекомендуется проводить при большом диапазоне ее изменений, так как это может привести к значительной погрешности.

Выражая из уравнения (2.44) τ , получаем уравнение зависимости времени, за которое фронт достигнет координаты r_ϕ :

$$\tau_\phi = -\frac{C}{a(A-B)} \cdot \ln\left(1 - \frac{L_2 \ln \frac{R}{R_0} (A-B)(r_\phi^2 - R_0^2)}{2c_2 C(T_2 - T_1)}\right). \quad (2.47)$$

Положив в уравнении (2.47) $r_\phi = R$, можем определить полное время разрядки аккумулятора, т.е.

$$\tau_{\text{разр.}} = -\frac{C}{a(A-B)} \cdot \ln\left(1 - \frac{L_2 \ln \frac{R}{R_0} (A-B)(R^2 - R_0^2)}{2c_2 C(T_2 - T_1)}\right). \quad (2.48)$$

Учитывая $R = r_\phi$ в уравнении (2.40), можно построить график изменения температуры на произвольном радиусе r во времени (Рис. 2.9).

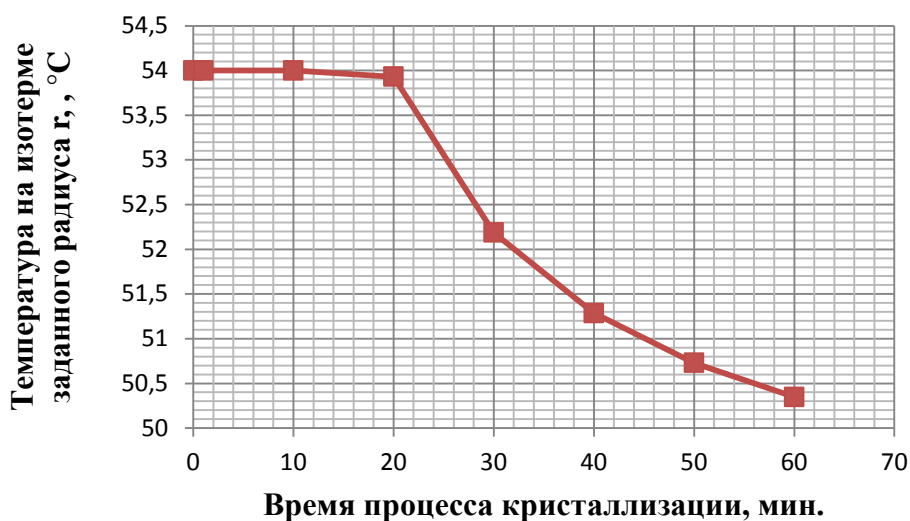


Рис.2.9. График изменения температуры на цилиндрической поверхности $r=0,01$ м. при кристаллизации парафина вокруг теплообменной трубки $d_0=14$ мм.

Рис. 2.9 отображает динамику изменения температур на окружности с зафиксированным радиусом (неподвижная точка) во времени. Как и в случае температуры стенки на рис. 2.3 здесь наблюдается падение температуры за счет увеличения радиуса твердой фазы, что в свою очередь ведет к увеличению сопротивления передаче теплоты. Стоит заметить, что уравнение (2.46) справедливо только для однофазной среды, поэтому для диапазона $r > r_{\phi}$ следует полагать $T = T_{кр}$, т.к. в данном диапазоне фиксированная точка находится в среде расплава.

Решенная задача является обратимой и может быть использована для случая зарядки аккумулятора (расплавления ТАМ) путем замены теплофизических параметров и иных влияющих значений в твердой фазе на соответствующие в жидкой фазе.

2.4 Аккумулирующая емкость АТФП

Аккумулирующая емкость выражается в способности аккумулятора запастись определенное количество теплоты. В случае с аккумулятором фазового перехода аккумуляция производится за счет сохранения тепловой энергии в виде теплоты фазового перехода, т.е.

$$Q = L_2 \cdot m_2, \quad (2.49)$$

где L_2 - теплота фазового перехода;

m_2 – масса твердого ТАМ, и может быть выражена через известные величины

$$m_2 = \rho_2 \cdot (V_2 - V_0) = \pi \rho_2 l (R^2 - R_0^2) n, \quad (2.50)$$

где l – длина теплообменной трубки;

n – количество теплообменных трубок в пучке;

V_0 – объем, занятый теплообменными трубками в аккумуляторе;

V_2 – объем кристаллизовавшегося ТАМ.

В случае, если теплота запасается дополнительно за счет теплоемкости жидкой фазы (перегрева расплава), уравнение (2.49) запишется следующим

образом

$$Q = L_2 \cdot m_2 + c_2' m_2 (T_3 - T_{кр}), \quad (2.51)$$

где c_2' - теплоемкость ТАМ в жидкой фазе;

T_3 - температура перегрева жидкой фазы выше температуры фазового перехода.

2.5 Определение площади нагрева АТФП

Теплота фазового перехода отводится за счет конвективного теплообмена. Площадь теплообмена между разнородными средами выразим закона Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha_1 F \Delta T, \quad (2.52)$$

где F – площадь теплообмена;

ΔT - среднелогарифмический температурный напор

$$\Delta T = \frac{(T_1 - T_{ex}) - (T_1 - T_{блх})}{\ln \frac{(T_1 - T_{ex})}{(T_1 - T_{блх})}} = \frac{T_{блх} - T_{ex}}{\ln \frac{(T_1 - T_{ex})}{(T_1 - T_{блх})}}; \quad (2.53)$$

α_1 - коэффициент теплоотдачи от трубки к теплоносителю. Определяется по формулам (2.5), (2.6) в зависимости от режима течения теплоносителя.

$$F = \frac{Q}{\alpha_1 \Delta T}. \quad (2.54)$$

Общее число теплообменных труб

$$n = \frac{F}{d_0 l}. \quad (2.55)$$

2.6 Определение компенсационного объема температурного расширения ТАМ и полного объема бункера АТФП

В процессе работы аккумулятора фазового перехода происходит постоянное изменение объемных соотношений жидкой и твердой фаз аккумулирующего материала. Загрузка ТАМ в аккумулятор производится в твердом состоянии, но

при его плавлении происходит увеличение объёма жидкой фазы над объемом твердой фазы. В случае отсутствия компенсации таких расширений, возникает опасность механического повреждения корпуса и нарушения его герметичности. Также следует учитывать повышение давления вокруг теплообменной трубки в начальное время процесса плавления при больших объемах загрузки, что может вызвать механическое повреждение теплообменной поверхности при ее недостаточной прочности.

Рассчитаем избыточный объем для некоторой массы ТАМ. Он будет равняться разности объемов ТАМ в жидком V_2' и твердом V_2 состояниях

$$\Delta V = V_2' - V_2. \quad (2.56)$$

Выражая объем V_2 через полученные выше геометрические значения R и R_0 , получим

$$V_2 = \frac{Q}{L_2} = \pi(R^2 - R_0^2)\rho_2 l \cdot n. \quad (2.57)$$

Тогда объем жидкого ТАМ составит

$$V_2' = \frac{m_2}{\rho_2'} = \frac{Q}{\rho_2' L_2} = \pi(R^2 - R_0^2)\frac{\rho_2}{\rho_2'} l \cdot n. \quad (2.58)$$

Отсюда, компенсационный объем будет равен

$$\Delta V = \frac{Q}{L_2} \left(\frac{1}{\rho_2'} - 1 \right) = \pi l \cdot n (R^2 - R_0^2) \left(\frac{\rho_2}{\rho_2'} - 1 \right). \quad (2.59)$$

Учитывая ΔV полный объем бункера аккумулятора теплоты составит

$$V = V_0 + V_2 + \Delta V = \pi l \cdot n \left(\frac{\rho_2}{\rho_2'} (R^2 - R_0^2) + R_0^2 \right). \quad (2.60)$$

2.7 Выводы по второму разделу

1. В разделе предложена математическая модель кристаллизации бесконечного полого цилиндра при его охлаждении теплоносителем системы теплоснабжения. Учитывая ряд допущений, решена задача нестационарной теплопроводности в аккумуляторе теплоты фазового перехода. Используя

условие Стефана, математически описан процесс роста кристаллического тела во времени. На основании модели построено графическое отображение температурного поля в сечении закристаллизовавшегося ТАМ. Разработана методика определения размеров твердого тела цилиндра в зависимости от времени, методика прогнозирования динамики изменения температуры ТАМ на поверхности цилиндра заданного радиуса.

2. Предложена математическая модель для расчета конструкции кожухотрубного аккумулятора тепла фазового перехода. Показана зависимость температуры стенки теплообменной трубки от величины тела закристаллизовавшегося цилиндра. Такая зависимость указывает предельные расчетные показатели температурного напора при критических диаметрах ТАМ в твердой фазе, что определяет шаг теплообменных труб и емкость аккумулятора.
3. Проанализировано влияние режима течения теплоносителя на условия теплообмена между средами. Установлено, что влияющими показателями на интенсивность теплообмена являются теплофизические свойства аккумулирующего материала - $\lambda_2, T_{кр}$. Это дает возможность спрогнозировать свойства ТАМ для аккумулятора заданной тепловой мощности и его конечных размеров.
4. Решен вопрос компенсации температурного расширения аккумулирующего материала за счет создания избыточного объема бункера аккумулятора. Предложена методика его расчета.

РАЗДЕЛ 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В КОЖУХОТРУБНЫХ АККУМУЛЯТОРАХ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

В настоящем разделе излагается экспериментальная методика и результаты проверки основных положений модели работы кожухотрубного аккумулятора теплоты фазового перехода. Для проведения эксперимента смоделирована лабораторная установка, принципиально характеризующая систему теплоснабжения с источником теплоты, потребителем и аккумулятором.

1.1 Экспериментальная установка и методика измерений

3.1.1 Принципиальная схема установки

Для рассмотрения работы аккумулятора, основанного на явлении фазового перехода, принимается вариант упрощенной системы отопления (Рис. 3.1). В этом варианте предполагается параллельное включение теплового аккумулятора с генератором теплоты.

Конструктивно схема делится на два контура – контур генерации теплоты I (поз. 1,2,4,5) и контур потребления II (поз. 2,3,4,5). В случае работы контура генерации, потребитель не получает тепла, поэтому в реальных условиях необходимо предусмотреть возможность работы системы теплоснабжения в режиме аккумуляции теплоты.

Общей частью двух контуров является рассматриваемый теплообменный аппарат 2, на линии с которым предусмотрен циркуляционный насос 4 и расходомер 5. Расходомер 5 в сочетании с датчиками температуры на входе и выходе теплоносителя из аккумулятора теплоты позволяет рассчитать величину переданной (полученной) АТФП тепловой энергии.

Заполнение системы водой производится из городского водопровода через шаровый кран 8, находящийся в нижней части установки, при полном открытии

запорных кранов двух контуров 6,7.

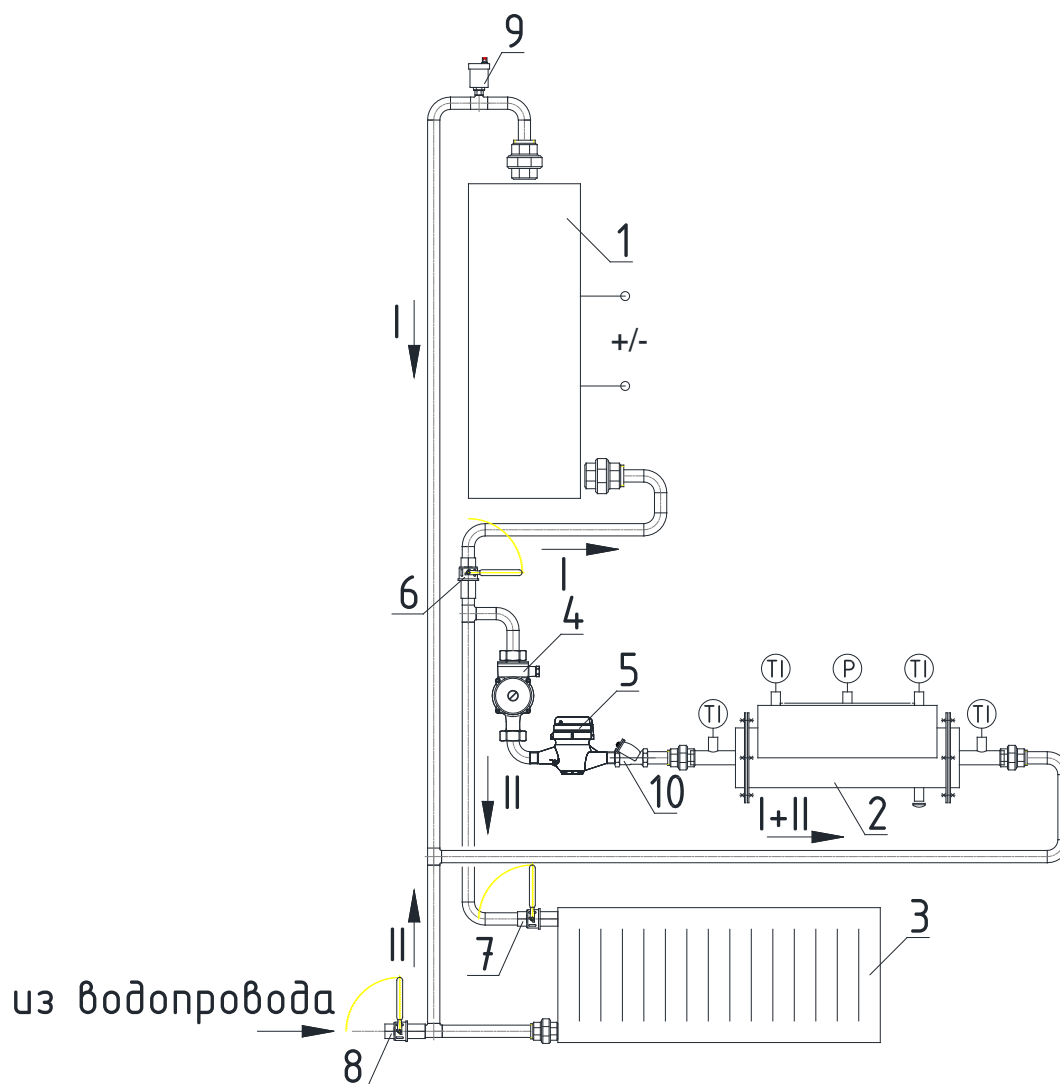


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки с аккумулятором тепловой энергии на основе фазового перехода:

- 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

Сброс воздуха, проникающего при заполнении системы, и выделяющихся газов в процессе разогрева установки, производится через воздушный клапан 9 (верхняя точка контура генерации тепла), а также воздушный клапан, установленный на насосе 4 (верхняя точка контура потребления).

Для защиты крыльчатки расходомера от заклинивания при попадании твердых частиц перед ним устанавливается сетчатый фильтр 10.

Принцип работы схемы моделирует работу системы теплоснабжения. В процессе проведения эксперимента производится попеременное включение контуров генерации I и контура потребления II. Это выполняется для более точного отслеживания направления тепловых потоков на плавление и кристаллизацию ТАМ. В случае работы контура I происходит накопление тепловой энергии аккумулятором. Шаровый кран 7 перекрывается, кран 6 открывается. Терморегулятор на электронагревателе 1 устанавливается в требуемое по условиям опыта положение. Фиксируются данные процесса зарядки АТФП. После полного расплавления ТАМ электронагреватель выключается, кран 7 открывается, а кран 6 перекрывается. Начинается процесс разрядки аккумулятора. После чего снимаются опытные данные. Порядок и методика получения результатов работы ТА рассматривается в последующем разделе.

1.1.2 Выбор элементов экспериментальной установки

3.1.2.1 Твердый аккумулирующий материал

Предложенная физико-математическая модель работы кожухотрубного аккумулятора теплоты предполагает использование любого ТАМ с заданными теплофизическими свойствами в качестве загрузки для аккумулятора, удовлетворяющего температурным требованиям системы теплоснабжения.

Для проведения экспериментального исследования в качестве аккумуляционной загрузки установки используется ТАМ на основе группы парафинов. Они удовлетворяют многим требованиям, предъявляемым к ТАМ [61,90]. Несомненным плюсом такого выбора является полная нейтральность

группы парафинов по отношению к стали, а также отсутствие возможности перемешивания ТАМ с теплоносителем в случае разгерметизации установки. Использование парафинов практически снимает вопросы коррозионного разрушения корпуса аппарата.

Выбранный ТАМ выдерживает достаточное количество термоциклов для использования его в системах теплоснабжения более одного отопительного сезона, что подтверждается в ходе проведенных опытов в соответствии с методикой [71] по определению удельной теплоты плавления L_2 плавления парафина в начале и в конце термоциклирования.

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. Данные по температурным параметрам плавления и кристаллизации, а также по величинам L_2 для 2-го и 620-го термоциклов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Параметры плавления и кристаллизации парафина марки Т-3 (очищенный технический), установленные методом ДТА:

№ термоцикла	$T_x, ^\circ\text{C}$	$T_L, ^\circ\text{C}$	$T_S, ^\circ\text{C}$	$T_{Sm}, ^\circ\text{C}$	$T_m, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, \text{K}$	$L_2, \text{кДж/кг}$
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

Как видно из таблицы 3.1, разница в температурах и удельной теплоте фазового перехода в начале и в конце термоциклирования незначительна. В частности, относительное изменение величины L_2 не превышает ~3%.

Моделирование теплообменных процессов в установке предполагает учет теплофизических характеристик применяемого аккумулирующего материала, которые приведены в таблице 3.2.

Теплофизические свойства парафина Т-3

Параметр	Твердая фаза	Жидкая фаза
Плотность, кг/м ³	800	720
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	2,08	2,48
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,34	0,27
Теплота фазового перехода, кДж/кг	209	

3.1.2.2 Аккумулятор теплоты фазового перехода

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

На рисунке 3.2 приведен чертеж экспериментального аккумулятора теплоты на основе фазового перехода. Визуально он представляет собой бункер 1 из листовой стали $\delta = 3$ мм, основанием которого служит полутруба $d_n \times \delta = 159 \times 3$ мм. Внутри бункера горизонтально располагается пучок теплообменных трубок из латуни $d_n \times \delta = 16 \times 1$ мм, длиной 0,5 м, внутри которых протекает теплоноситель. Шаг трубок выбран на основании заключения при рассмотрении критического диаметра закристаллизовавшегося парафина Т-3 (см. подраздел 2.1) и составляет $2d_n + k_1 = 24$ мм, где k_1 - свободное пространство для перетока жидкого парафина из компенсационных областей. Длина теплообменных трубок принята произвольно, как параметр, не влияющий на работу аккумулятора и имеющий возможность быть отмасштабированным. Пространство бункера между трубками заполняется парафином марки Т-3.

Для визуального наблюдения за процессом кристаллизации и проведения части замеров в верхней части бункера выполнено смотровое окно 6. Патрубки 4,5 служат для погружения температурных датчиков в стеклянных гильзах в объем кристаллизующегося ТАМ для наблюдения за процессом кристаллизации в различных сечениях по длине теплообменных труб. Поступающий теплоноситель по трубопроводу $2 d_n \times \delta = 15 \times 2,8$ мм распределяется по теплообменным трубкам

в распределительной камере $3 d_{н \times \delta} = 159 \times 3$ мм. Температуры на входе и выходе из аккумулятора фиксируются температурными датчиками, установленными в латунных гильзах в патрубках 8. При необходимости увеличения скорости некоторые каналы могут быть перекрыты путем установки заглушек в камере.

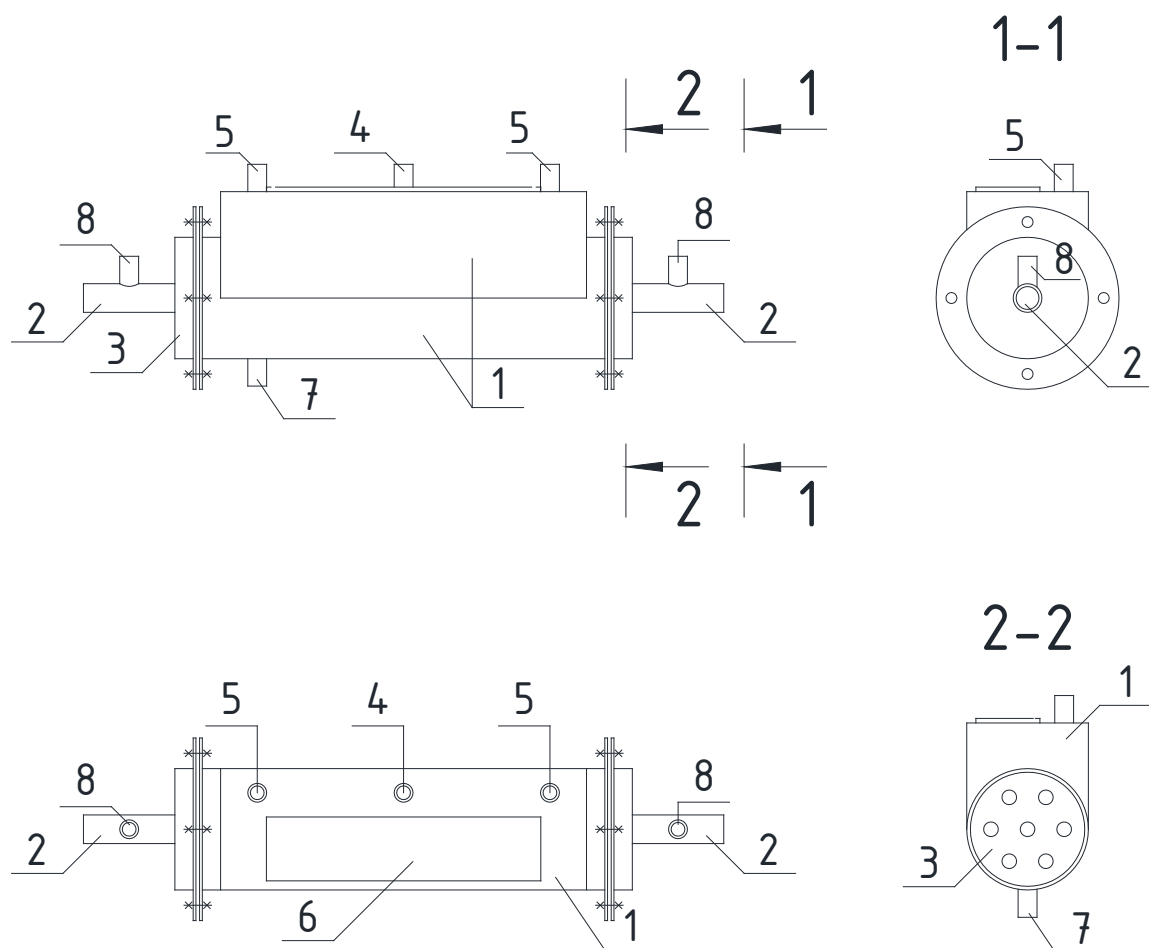


Рис. 3.2. Экспериментальный аккумулятор теплоты фазового перехода:

- 1 - бункер с ТАМ;
- 2 - подводящие патрубки контура с теплоносителем;
- 3 - распределительная камера;
- 4,5,8 - патрубки для датчиков температуры;
- 6 - смотровое окно;
- 7 - сливной патрубков.

Одним из недостатков такого аппарата является удаление отработанного ТАМ, которое возможно только в состоянии расплава, для чего и предусмотрен

спускной патрубком $7\ d_{в} \times \delta = 15 \times 2,8$ мм в нижней части бункера. Для компенсации расширения ТАМ при переходе из твердой в жидкую фазу в верхней части бункера над теплообменными трубками создано свободное пространство. По объему бункер рассчитан на загрузку материала от 2 до 4 кг.

В процессе проведения опыта предусматривается наблюдение за движением фронта кристаллизации ТАМ и учета температур на различных расстояниях от поверхности теплообменных трубок в условиях разрядки аккумулятора. Для этого на верхней крышке бункера предусматривается установка измерительных устройств, изображенных на рис. 3.3.

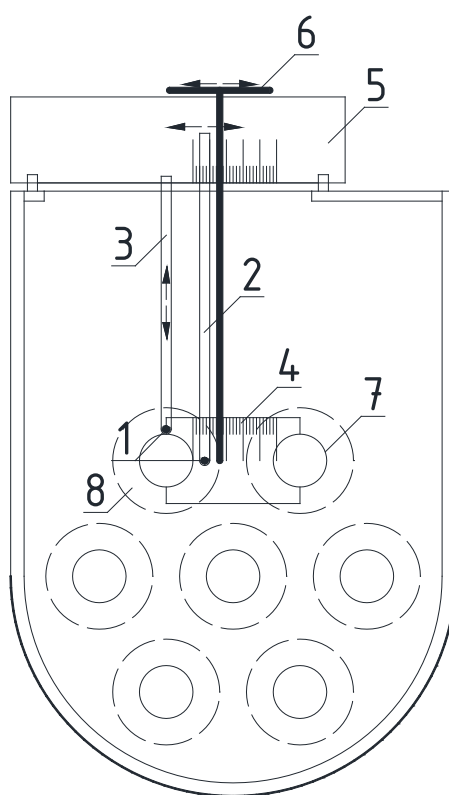


Рис. 3.3. Схема установки измерительных устройств в среднем сечении бункера аккумулятора теплоты фазового перехода:

- 1-датчик температуры;
- 2,3-стеклянная погружная трубка для датчика;
- 4,5-мерная линейка;
- 6-измеритель радиуса;
- 7-теплообменная трубка;
- 8-область закристаллизовавшегося ТАМ.

Как видно на рис. 3.3 для фиксации изменения температуры ТАМ в процессе его кристаллизации в бункер устанавливаются температурный датчик 1. Он помещается в стеклянную трубку 2 или 3, которые имеют возможность перемещаться в горизонтальной и вертикальной плоскостях по направляющим. Расстояние датчика в трубке 2 от поверхности теплообменной трубки устанавливается по измерительной линейке 5. Расстояние датчика в трубке 3 также измеряется. Эти расстояния не изменяются в ходе одного опыта.

Для фиксации продвижения фронта кристаллизации ТАМ во времени между двумя теплообменными трубками устанавливается измерительная линейка 4, в одной плоскости с ней на крышке бункера размещается линейка 5, перпендикулярно которой перемещается измеритель радиуса 6. С периодичностью 30 с производится замер прироста твердой фазы.

Недостатком данной системы являются довольно значительные размеры датчика температуры, диаметр которого в стеклянной гильзе составляет 5 мм.

3.1.2.3 Нагреватель

Для генерации тепловой энергии в экспериментальной установке и зарядки аккумулятора предусмотрен электрический нагреватель.

Масса парафина, необходимая для загрузки в теплообменник, составляет 3,5 кг. Если учесть, что ТАМ разогревается в начале опыта от комнатной температуры, то необходимое количество теплоты для перехода в жидкую фазу составит

$$Q = m_2 \cdot c_2 \cdot (T_3 - T_4) + m \cdot L_2, \quad (3.1)$$

где m_2 - масса парафина в твердой фазе;

c_2 - теплоемкость парафина в твердой фазе;

T_3 - конечная температура разогрева;

T_4 - начальная температура нагрева;

L_2 - теплота фазового перехода.

Таким образом $Q = 993,58$ кДж.

Для передачи такого количества тепла в течении часа необходим генератор мощностью 276 Вт. К установке принят электрический отопительный котел «Днепр» с максимальной мощностью 3 кВт.

Генератор теплоты имеет встроенный терморегулятор и автоматический выключатель, что позволяет держать установленную температуру нагрева в диапазоне $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

3.1.2.4 Расходомер

Для учета расхода теплоносителя, прошедшего через аккумулятор, используется бытовой счетчик воды КВ-1,5, соответствующий требованиям норм ISO 4064-1:1993(E), имеющий в соответствии со стандартом погрешность 5% в условиях работы $q < q_{\text{ном}} = 1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$, что соответствует режиму работы установки.

3.1.2.5 Циркуляционный насос

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

Скорости движения теплоносителя в трубках приводятся в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Скорости движения теплоносителя в зависимости от
установленного режима насоса.

Режим работы насоса	Режим движения теплоносителя в теплообменных трубках	Скорость движения теплоносителя в системе, м/с	Скорость движения теплоносителя в теплообменных трубках, м/с
1	ламинарный ($Re=1915$)	0,4	0,09
2	переходной ($Re=2553$)	0,55	0,12
3	переходной ($Re=3404$)	0,75	0,16

3.1.2.6 Термометр

В качестве термометра для снятия показания датчиков применялся многоточечный USB Термометр с поддержкой до 64-х датчиков DS18B20.

Термометр позволяет производить измерение температуры с дискретностью $0,1^{\circ}\text{C}$ в диапазоне от -60°C до $+127^{\circ}\text{C}$ с минимальной частотой измерений 1 секунда. Датчики не требуют калибровки. Питание термометра происходит от USB порта. Термометр укомплектован программами для работы с двумя и четырьмя датчиками, что позволяет записывать данные на компьютер. Погрешность измерений, согласно технической документации составляет $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ в диапазоне измерений от -10°C до $+85^{\circ}\text{C}$.

На начальной стадии опыта показания датчиков проверялись лабораторным термометром путем погружения всех датчиков и термометра в один сосуд с жидкостью. Различия показаний выявлено не было.

3.1.3 Методика проведения эксперимента

Экспериментальное исследование тепломассообменных процессов в условиях разрядки аккумулятора на вышеописанной установке проводилось в следующей последовательности:

- заполнение бункера аккумулятора ТАМ в твердом состоянии,
- расплавление парафина до жидкого состояния. Установка датчиков температуры на определенные опытом расстояния. После того как парафин плотно занимает объем бункера производится его охлаждение;
- переключение насоса в режим 1;
- разогрев ТАМ в аккумуляторе до жидкого состояния. В ходе разогрева предусматривается незначительный перегрев жидкого ТАМ для полного расплавления ТАМ в бункере;
- переключение установки в режим разрядки;
- регистрация показаний температурных датчиков на входе и выходе теплоносителя в режиме разрядки, расхода теплоносителя по расходомеру, показаний датчика температуры в заданной точке в объеме ТАМ, фиксация

прироста закристаллизовавшегося ТАМ во времени;

- при достижении твердой фазой ТАМ критического диаметра эксперимент прекращается;

- отключение электропитания установки.

Эксперимент повторяется для режимов работы насоса 2 и 3 при различных положениях датчика в объеме ТАМ относительно поверхности теплообменной трубки. Результаты фиксируются автоматически компьютерной программой и в журнале эксперимента. Производится обработка данных.

3.2 Планирование эксперимента

3.2.1 Определение времени кристаллизации

Планирование эксперимента выполнено по схеме полного факторного эксперимента (ПФЭ) [1,5,9,36,47,59]. Метод дает возможность получить математическое описание исследуемого процесса в некоторой локальной области факторного пространства, лежащей в окрестности выбранной точки с координатами (x_{01}, x_{02}) (при $n = 2$) – нулевого уровня.

Координаты нулевого уровня вычисляются по формуле

$$x_{0i} = \frac{x_i^{\max} + x_i^{\min}}{2}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3.2)$$

Интервал варьирования вычисляется по формуле

$$\Delta x_i = \frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{2}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3.3)$$

Перенесем начало координат факторного пространства на нулевой уровень. С этой целью введем новые кодированные переменные

$$X_i = \frac{x_i - x_{0i}}{\Delta x_i}, \quad (i = \overline{1, n}). \quad (3.4)$$

Для планирования эксперимента по определению времени роста фронта кристаллизации принимается двухфакторная ($n = 2$) линейная модель. Варьируемыми параметрами являются скорость движения теплоносителя ω и значение радиуса фронта кристаллизации r_ϕ в искомый момент времени τ .

Для удобства вычислений коэффициентов регрессии все факторы в ходе ПФЭ варьируют на двух уровнях, соответствующих значениям кодированных переменных $+1$ и -1 . Следовательно, число опытов ПФЭ $N = 2^n$. Номера опытов $j = \overline{1, N}$.

Основные характеристики плана экспериментов сводим в таблицу 3.4.

Таблица 3.4

Основные характеристики плана эксперимента

Характеристика	$\omega, м/с$	$r_\phi, м$
Основной уровень фактора	0,0125	0,0125
Интервал варьирования фактора	0,035	0,0045
Верхний уровень фактора	0,16	0,017
Нижний уровень фактора	0,09	0,008
Число опытов ПФЭ	$N = 2^2 = 4$	
Номер опыта	$j = \overline{1, 4}$	
Число параллельных опытов, проведенных при одинаковых условиях	$k = \overline{1, 5}$	

Выполним проверку воспроизводимости опыта. Для этой цели проведем несколько серий параллельных опытов в рассматриваемой области изменения влияющих факторов.

Для каждой серии параллельных опытов вычисляется среднее арифметическое функции отклика

$$\overline{y_j} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_{ji}, \quad j = \overline{1, N}. \quad (3.5)$$

Оценка дисперсии для каждой серии параллельных опытов

$$s_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (y_{ji} - \overline{y_j})^2, \quad j = \overline{1, N}. \quad (3.6)$$

Результаты опытов и вычислений сводим в таблицу 3.5.

Значение искомого фактора времени кристаллизации

№ серии опытов	Результаты параллельных опытов					\bar{y}_j	s_j^2
	1	2	3	4	5		
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	36	38	39	39	39	38,2	1,7
4	36	36	38	38	38	37,2	1,2

Расчётное значение критерия Кохрена составляет

$$G_p = \frac{\max S_j^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} = \frac{1,7}{0+0+1,7+1,2} = \frac{1,7}{2,9} = 0,59. \quad (3.7)$$

Табличное значение критерия Кохрена G [60] находится при общем количестве оценок дисперсий N и числе степеней свободы $f = k-1$. В данном случае $N = 4$, $f = 5-1 = 4$, уровень значимости 5% (доверительная вероятность 0,95), тогда $G = 0,629$. Условие $G_p \leq G$ [9,47] выполнено, следовательно, опыты можно считать воспроизводимыми.

Для вычисления погрешности эксперимента оценки однородных дисперсий нескольких серий параллельных опытов можно усреднить и найти величину оценки дисперсии воспроизводимости опыта

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2 = \frac{0+0+1,7+1,2}{4} = \frac{2,9}{4} = 0,725, \quad (3.8)$$

при числе степеней свободы $f = 4(5-1) = 16$.

Оценка дисперсии среднего значения составляет

$$S_{\bar{y}}^2 = \frac{S_y^2}{k} = \frac{0,725}{5} = 0,145, \quad (3.9)$$

при аналогичном числе степеней свободы $f = 4(5-1) = 16$.

Уравнение линейной регрессии в случае двухфакторного эксперимента имеет следующий вид [59]

$$y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2. \quad (3.10)$$

Произведем вычисление коэффициентов регрессии b_0 , b_1 , b_2 . Составим расширенную матрицу планирования двухфакторного эксперимента в виде

таблицы 3.6.

Таблица 3.6

Расширенная матрица планирования двухфакторного эксперимента

№ опыта	Факторы		Функция отклика \bar{y}_j
	X_1	X_2	
1	-1	-1	0
2	+1	-1	0
3	-1	+1	38,2
4	+1	+1	37,2

Коэффициенты регрессии вычисляем на основании полного факторного эксперимента, пользуясь следующими формулами [59]:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j; \quad (3.11)$$

$$b_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{j1} \cdot \bar{y}_j; \quad (3.12)$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{j2} \cdot \bar{y}_j. \quad (3.13)$$

Полученные коэффициенты регрессии сводим в таблицу 3.7.

Таблица 3.7

Значения коэффициентов регрессии двухфакторного эксперимента.

b_0	b_1	b_2
18,85	-0,25	18,85

Следовательно, с учетом коэффициентов регрессии в таблице 3.7 уравнение линейной регрессии 3.10 приобретет следующий вид

$$y = 18,85 - 0,25 \cdot X_1 + 18,85 \cdot X_2. \quad (3.14)$$

Для определения значимости коэффициента, необходимо вычислить оценку дисперсии, с которой он определяется по формуле

$$S_b^2 = \frac{S_{\bar{y}}^2}{N}. \quad (3.15)$$

Вычислим оценку дисперсии для коэффициентов регрессии

$$S_b^2 = \frac{0,145}{4} = 0,03625 \Rightarrow S_b = \sqrt{0,03625} = 0,19.$$

Для доверительной вероятности $P = 0,95$ и степеней свободы $f = 16$ значение критерия Стьюдента $t = 2,12$ [28]. Тогда $S_b \cdot t = 0,19 \cdot 2,12 = 0,4028$.

Для оценки значимости коэффициентов регрессии рассмотрим следующее соотношение

$$|b_0| = 18,85 > S_b \cdot t, |b_1| = 0,25 < S_b \cdot t, |b_2| = 18,85 > S_b \cdot t.$$

Видно, что коэффициент b_1 является незначимым. Тогда уравнение 3.11 преобразуется следующим образом

$$y = 18,85 + 18,85 \cdot X_2. \quad (3.16)$$

Для проверки адекватности уравнения регрессии найдем расчетные значения функции отклика:

$$y_1^p = 18,85 + 18,85 \cdot (-1) = 0;$$

$$y_2^p = 18,85 + 18,85 \cdot (-1) = 0;$$

$$y_3^p = 18,85 + 18,85 \cdot (+1) = 37,7;$$

$$y_4^p = 18,85 + 18,85 \cdot (+1) = 37,7.$$

Вычисляем оценку дисперсии адекватности при $N=4$ и $B=2$

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{N-B} \sum_{j=1}^N (y_j^a - y_j^p)^2, \quad (3.17)$$

где B – число коэффициентов регрессии искомого уравнения, включая и свободный член;

y_j^a, y_j^p – экспериментальное и расчетное значение функции отклика в j -м опыте.

$$S_{ad}^2 = \frac{(0+0)^2 + (0+0)^2 + (38,2-37,7)^2 + (37,2-37,7)^2}{4-2} = 0,25.$$

С ней связано число степеней свободы $f_{ad} = 4-2 = 2$.

Расчетное значение критерия Фишера находим по формуле

$$F_p = \frac{\max(S_{ad}^2, S_y^2)}{\min(S_{ad}^2, S_y^2)} = \frac{0,25}{0,145} = 1,72 \quad (3.18)$$

Число степеней свободы большей дисперсии $f_1 = 1$.

Число степеней свободы меньшей дисперсии $f_2 = 16$.

По таблице значений критерия Фишера [32] для уровня значимости $q = 1\%$ находим $F = 8,53$. Условие $F_p \leq F$ [9] выполняется, следовательно, уравнение регрессии адекватно.

Чтобы представить уравнение регрессии в виде удобном для непосредственной подстановки физических значений факторов, нужно вместо кодированных переменных подставить их выражения через физические переменные

$$X_2 = \frac{r_\phi - 0,0125}{0,0045}. \quad (3.19)$$

Тогда уравнение регрессии для нахождения времени кристаллизации ТАМ имеет вид

$$\tau = -33,51 + 4188,89 \cdot r_\phi. \quad (3.20)$$

3.2.2 Определение температуры ТАМ на цилиндрической поверхности заданного радиуса

Так как при помощи ПФЭ не удалось получить адекватного математического описания в виде линейной модели, планирование данного эксперимента выполнено по схеме центрального композиционного планирования эксперимента (ЦКП) [59, 60]. Для планирования эксперимента по определению температуры ТАМ на цилиндрической поверхности заданного радиуса принимается ортогональная трехфакторная ($n=3$) квадратичная модель. Варьируемыми параметрами являются скорость движения теплоносителя ω , значение радиуса рассматриваемой изотермы r и время τ .

Количество опытов при ортогональном ЦКП определяется по формуле

$$N = N_0 + 2n + n_0, \quad (3.21)$$

где $N_0 = 2^n$ – количество опытов, образующих ПФЭ;

$2n$ – количество звездных точек в факторном пространстве, отстоящих от центра плана на величину α ;

n_0 – количество опытов в центре планирования.

Значения α выбираются таким образом, чтобы матрица планирования была ортогональной.

Величина «звездного плеча» находится по формуле

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sqrt{N_0 \cdot N} - N_0}{2}}. \quad (3.22)$$

Для трёхфакторного эксперимента ($n=3$) и при одном опыте в центре плана ($n_0=1$) получаем $N=15$ и $\alpha=1,215$.

Основные характеристики плана экспериментов сведены в таблицу 3.8.

Таблица 3.8

Основные характеристики плана эксперимента

Характеристика	$\omega, \text{ м/с}$	$r_\phi, \text{ м}$	$\tau, \text{ мин}$
Основной уровень	0,125	0,0125	20
Интервал варьирования	0,035	0,0045	20
Верхний уровень	0,16	0,017	40
Нижний уровень	0,09	0,008	0
Номер опыта	$j = \overline{1,15}$		

Выполним проверку воспроизводимости опыта аналогично пункту 3.2.1. Среднее арифметическое функции отклика $\overline{y_j}$ и оценки дисперсии для каждой серии параллельных опытов s_j^2 находим по уравнениям соответственно 3.5 и 3.6. Результаты опытов и вычислений сводим в таблицу 3.9.

Таблица 3.9

Значение искомого фактора температуры.

№ серии опытов	Результаты параллельных опытов					$\overline{y_j}$	s_j^2
	1	2	3	4	5		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	54,1	54,3	54,2	54,1	54,3	54,2	0,01
2	54,1	54	54,2	53,9	53,8	54	0,025
3	54,2	54,1	54,3	54,1	54,3	54,2	0,01
4	57,2	56,9	56,8	57,1	57	57	0,025
5	45,6	45,5	45,9	45,7	45,8	45,7	0,025

Продолжение таблицы 3.9

1	2	3	4	5	6	7	8
6	45,1	45,5	45,4	45,2	45,3	45,3	0,025
7	54	54,1	54,2	53,8	53,9	54	0,025
8	54,2	53,9	54,1	54	53,8	54	0,025

Расчётное значение критерия Кохрена находим из уравнения 3.7

$$G_p = \frac{0,025}{0,025 \cdot 6 + 0,01 \cdot 2} = \frac{0,025}{0,17} = 0,147.$$

Табличное значение критерия Кохрена G [60] находится при общем количестве оценок дисперсий N и числе степеней свободы $f = k-1$. В данном случае $N = 8$, $f = 5-1 = 4$, уровень значимости 5% (доверительная вероятность 0,95), тогда $G = 0,391$. Условие $G_p \leq G$ [9, 47] выполнено, следовательно, опыты можно считать воспроизводимыми.

Для оценки воспроизводимости были выполнены $k_0 = 5$ параллельных опытов в центре плана (при нулевых значениях факторов).

Оценка дисперсии воспроизводимости формула (3.8) составляет

$$S_y^2 = \frac{0,81 + 1 + 0 + 1 + 0,81}{5 - 1} = \frac{3,62}{4} = 0,905.$$

Оценка дисперсии среднего значения формула (3.9) $S_{\bar{y}}^2 = \frac{0,905}{5} = 0,181$.

Число степеней свободы $f = 5-1 = 4$.

Уравнение квадратичной регрессии для трёхфакторного эксперимента имеет вид [59]

$$y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{13} \cdot X_1 \cdot X_3 + b_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + b_{11} \cdot X_1^2 + b_{22} \cdot X_2^2 + b_{33} \cdot X_3^2. \quad (3.23)$$

Для того чтобы матрица планирования была ортогональна и коэффициенты регрессии определялись независимо друг от друга по результатам опытов, вводятся переменные величины

$$X_{ji}^* = X_{ji}^2 - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ji}^2, \quad (3.24)$$

где j – номер опыта;

i – номер фактора.

Произведем вычисление коэффициентов регрессии. Составим расширенную матрицу планирования двухфакторного эксперимента в виде таблицы 3.10.

Таблица 3.10

Расширенная матрица планирования трёхфакторного эксперимента

Системы опытов	Номер опыта	X_1	X_2	X_3	X_1 X_2	X_1 X_3	X_2 X_3	X_1^*	X_2^*	X_3^*	Функция отклика y
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Полный факторный эксперимент	1	-1	-1	-1	1	1	1	0,33	0,33	0,33	54,2
	2	1	-1	-1	-1	-1	1	0,33	0,33	0,33	54
	3	-1	1	-1	-1	1	-1	0,33	0,33	0,33	54,2
	4	1	1	-1	1	-1	-1	0,33	0,33	0,33	57
	5	-1	-1	1	1	-1	-1	0,33	0,33	0,33	45,7
	6	1	-1	1	-1	1	-1	0,33	0,33	0,33	45,3
	7	-1	1	1	-1	-1	1	0,33	0,33	0,33	54
	8	1	1	1	1	1	1	0,33	0,33	0,33	54
Опыт в центре плана	9	0	0	0	0	0	0	-0,67	-0,67	-0,67	52,8
Опыты в звездных точках	10	1	0	0	0	0	0	0,33	-0,67	-0,67	52,7
	11	-1	0	0	0	0	0	0,33	-0,67	-0,67	53,1
	12	0	1	0	0	0	0	-0,67	0,33	-0,67	54
	13	0	-1	0	0	0	0	-0,67	0,33	-0,67	54
	14	0	0	1	0	0	0	-0,67	-0,67	0,33	50,4
	15	0	0	-1	0	0	0	-0,67	-0,67	0,33	54

Коэффициенты регрессии при ортогональном ЦКП рассчитываются по следующим формулам [59]:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ji} \cdot y_j}{\sum_{j=1}^N X_{ji}^2}, \quad (i \neq 0); \quad (3.25)$$

$$b_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ji} \cdot X_{jk} \cdot y_j}{\sum_{j=1}^N X_{ji}^2 \cdot X_{jk}^2}, \quad (i \neq k); \quad (3.26)$$

$$b_{ii} = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ji}^* \cdot y_j}{\sum_{j=1}^N (X_{ji}^*)^2}; \quad (3.27)$$

$$b_0^* = \frac{\sum_{j=1}^N y_j}{N}; \quad (3.28)$$

$$b_0 = b_0^* - \frac{b_{11}}{N} \sum_{j=1}^N X_{j1}^2 - \frac{b_{22}}{N} \sum_{j=1}^N X_{j2}^2. \quad (3.29)$$

Для расчета оценок дисперсий в определении коэффициентов регрессии используют следующие выражения [59]:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{j=1}^N X_{ji}^2}, \quad (i \neq 0); \quad (3.30)$$

$$S_{b_{ik}}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{j=1}^N X_{ji}^2 \cdot X_{jk}^2}, \quad (i \neq k); \quad (3.31)$$

$$S_{b_{ii}}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{j=1}^N (X_{ji}^*)^2}; \quad (3.32)$$

$$S_{b_0^*}^2 = \frac{S_y^2}{N}; \quad (3.33)$$

$$S_{b_0}^2 = S_{b_0^*}^2 + \frac{n \cdot S_{b_{ii}}^2}{N} \sum_{j=1}^N X_{ji}^2. \quad (3.34)$$

Пользуясь таблицей 3.10 и формулами 3.25-3.29, вычисляем коэффициенты регрессии. Результаты расчетов, сводим в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Коэффициенты регрессии квадратичного уравнения

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
53,71	0,18	2	-2,4	0,43	-0,38	1,75	-0,62	0,04	-1,04

Уравнение квадратичной регрессии с учетом результатов в таблице 3.11 имеет вид

$$y = 53,71 + 0,18 \cdot X_1 + 2 \cdot X_2 - 2,4 \cdot X_3 + 0,43 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,38 \cdot X_1 \cdot X_3 + 1,75 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,62 \cdot X_1^2 + 0,04 \cdot X_2^2 - 1,04 \cdot X_3^2. \quad (3.35)$$

По формулам 3.30-3.34 вычислим оценки дисперсий для коэффициентов регрессии и сведем их значения в таблицу 3.12.

Таблица 3.12

Оценки дисперсий для коэффициентов регрессии квадратичного уравнения

$S_{b_1}^2 = S_{b_2}^2 = S_{b_3}^2$	$S_{b_{12}}^2 = S_{b_{13}}^2 = S_{b_{23}}^2$	$S_{b_{11}}^2 = S_{b_{22}}^2 = S_{b_{33}}^2$	$S_{b_0}^2$	$S_{b_0}^2$
0,0181	0,022625	0,0543	0,0121	0,1207

Для доверительной вероятности $P = 0,95$ и степеней свободы $f = 4$ значение критерия Стьюдента $t = 2,7764$ [60]. Вычислим величины

$$S_{b_1} \cdot t = S_{b_2} \cdot t = S_{b_3} \cdot t = \sqrt{0,0181} \cdot 2,7764 = 0,3735;$$

$$S_{b_{12}} \cdot t = \sqrt{0,022625} \cdot 2,7764 = 0,4176;$$

$$S_{b_{11}} \cdot t = S_{b_{22}} \cdot t = \sqrt{0,0543} \cdot 2,7764 = 0,647;$$

$$S_{b_0} \cdot t = \sqrt{0,1207} \cdot 2,7764 = 0,9646.$$

Для оценки значимости коэффициентов регрессии рассмотрим соотношения: $|b_0| > S_{b_0} \cdot t$; $|b_1| < S_{b_1} \cdot t$; $|b_2| > S_{b_2} \cdot t$; $|b_3| > S_{b_3} \cdot t$; $|b_{12}| > S_{b_{12}} \cdot t$; $|b_{13}| < S_{b_{13}} \cdot t$; $|b_{23}| > S_{b_{23}} \cdot t$; $|b_{11}| < S_{b_{11}} \cdot t$; $|b_{22}| < S_{b_{22}} \cdot t$; $|b_{33}| > S_{b_{33}} \cdot t$.

Видно, что значимыми являются коэффициенты регрессии b_0 , b_2 , b_3 , b_{12} , b_{23} , b_{33} , незначимыми – коэффициенты b_1 , b_{13} , b_{11} , b_{22} . Следовательно, искомое уравнение 3.35 преобразуется в

$$y = 53,71 + 2 \cdot X_2 - 2,4 \cdot X_3 + 0,43 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1,75 \cdot X_2 \cdot X_3 - 1,04 \cdot X_3^2. \quad (3.36)$$

Для проверки адекватности уравнения регрессии найдем расчетные значения функции отклика, результаты расчетов сводим в таблицу 3.13.

Таблица 3.13

Расчетные значения функции отклика

Номер опыта	y_j^p	Номер опыта	y_j^p	Номер опыта	y_j^p
1	55,24	6	46,09	11	53,71
2	54,39	7	53,59	12	55,71
3	54,89	8	54,44	13	51,71
4	55,74	9	53,71	14	50,27
5	46,94	10	53,71	15	55,07

Вычисляем оценку дисперсии адекватности формула (3.12) при $N=15$ и $B=6$:

$$S_{ad}^2 = \frac{17,3617}{15-6} = 1,9291.$$

С ней связано число степеней свободы $f_{ad}=15-6=9$.

Расчетное значение критерия Фишера формула (3.18) находим по формуле

$$F_p = \frac{\max(S_{ad}^2, S_y^2)}{\min(S_{ad}^2, S_y^2)} = \frac{1,9291}{0,181} = 10,66.$$

Число степеней свободы большей дисперсии $f_1 = 9$.

Число степеней свободы меньшей дисперсии $f_2 = 4$.

По таблице значений критерия Фишера [32] для уровня значимости $q=1\%$ находим $F=14,66$. Условие $F_p \leq F$ выполняется, следовательно, уравнение регрессии адекватно.

Выразим кодированные переменные в уравнении 3.36 через их физические значения, учитывая что:

$$X_1 = \frac{\omega - 0,125}{0,035}, \quad (3.37)$$

$$X_2 = \frac{r - 0,0125}{0,0045}, \quad (3.38)$$

$$X_3 = \frac{\tau - 20}{20}. \quad (3.39)$$

Тогда окончательно имеем следующее уравнение определения температуры ТАМ на цилиндрической поверхности заданного радиуса

$$T = 58,64 - 34,13 \cdot \omega - 285,71 \cdot r - 0,26 \cdot \tau + 2730,16 \cdot \omega \cdot r + 19,44 \cdot r \cdot \tau - 0,0026 \cdot \tau^2. \quad (3.40)$$

3.3 Результаты экспериментального исследования и их сопоставление с разработанной расчетной моделью

3.3.1 Обработка результатов эксперимента

В соответствии с описанной методикой работы на экспериментальной установке была проведена серия опытов с регистрацией теплофизических

характеристик работы системы.

Первая часть экспериментов заключалась в регистрации температурных изменений в объеме затвердевающего ТАМ и изучении влияния режима течения теплоносителя на процесс теплообмена. Запись данных производилась с помощью компьютерной программы, после чего результаты обрабатывались и преобразовывались в графики. Количество реализаций для усреднения составляло по 5 раз для каждого из условия. Усреднение данных производилось по температуре ТАМ в задаваемой точке, т.к. изменение данной величины в ходе проведения опыта не выходило за рамки погрешности прибора, и имело неизменную закономерность при соблюдении постоянства других влияющих факторов.

По усредненным температурам (Приложение А) были построены графики 3.4, 3.5, 3.6.

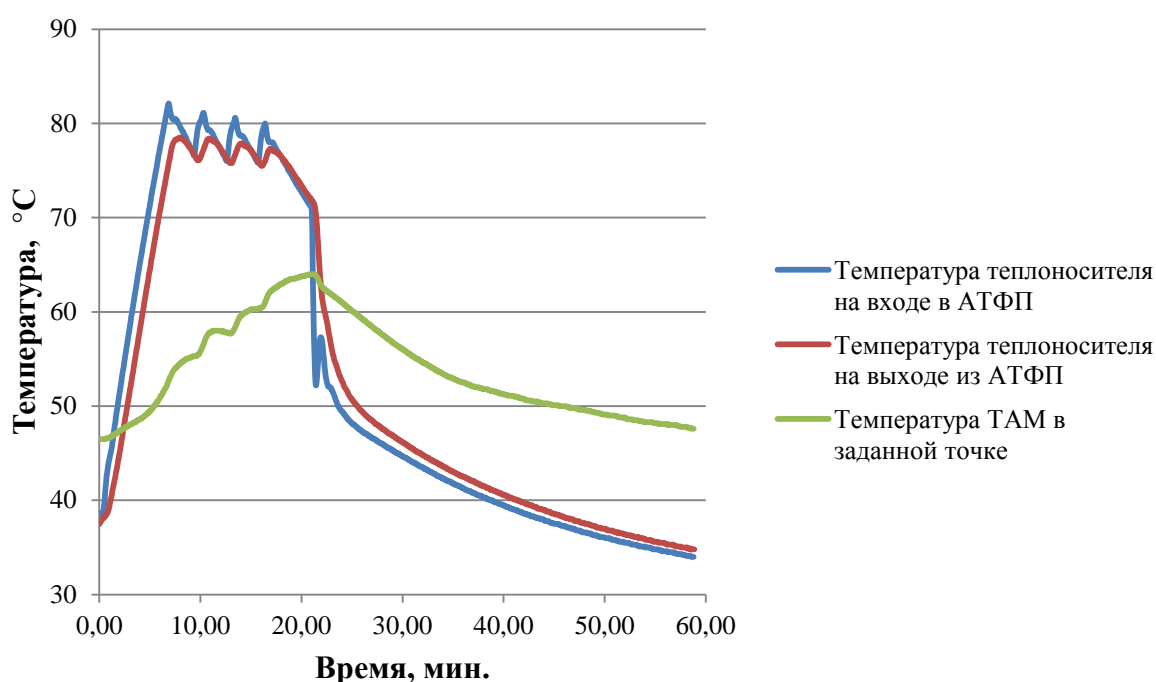


Рис. 3.4. Характеристика работы аккумулятора фазового перехода при скорости теплоносителя в теплообменной трубке 0,09 м/с (ламинарный режим). Удаление датчика от поверхности трубки – 1 мм.

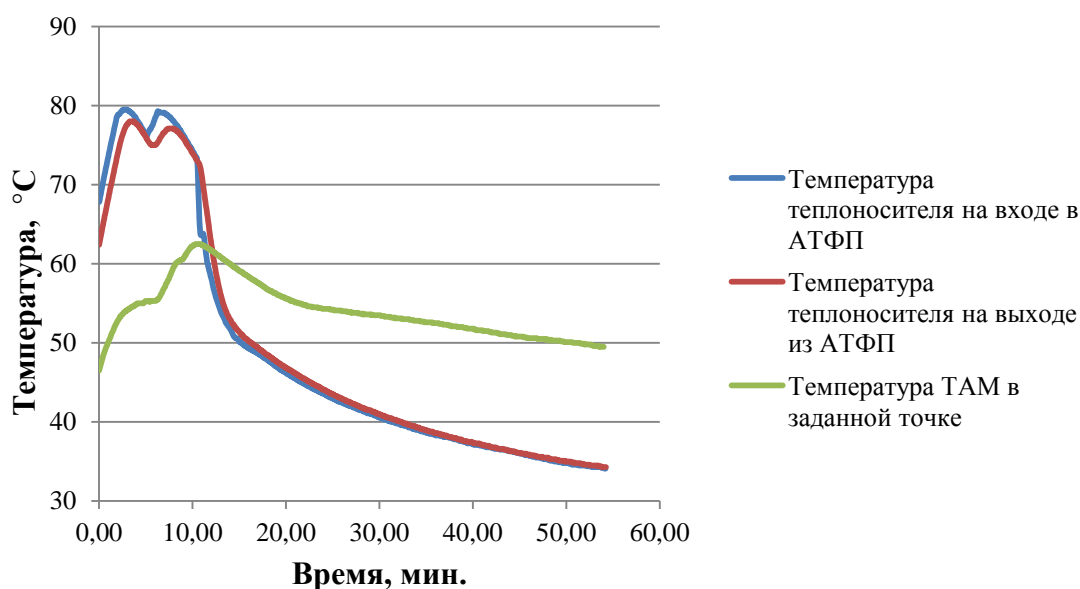


Рис. 3.5. Характеристика работы аккумулятора фазового перехода при скорости теплоносителя в теплообменной трубке 0,12 м/с (переходный режим). Удаление датчика от поверхности трубки – 6 мм.

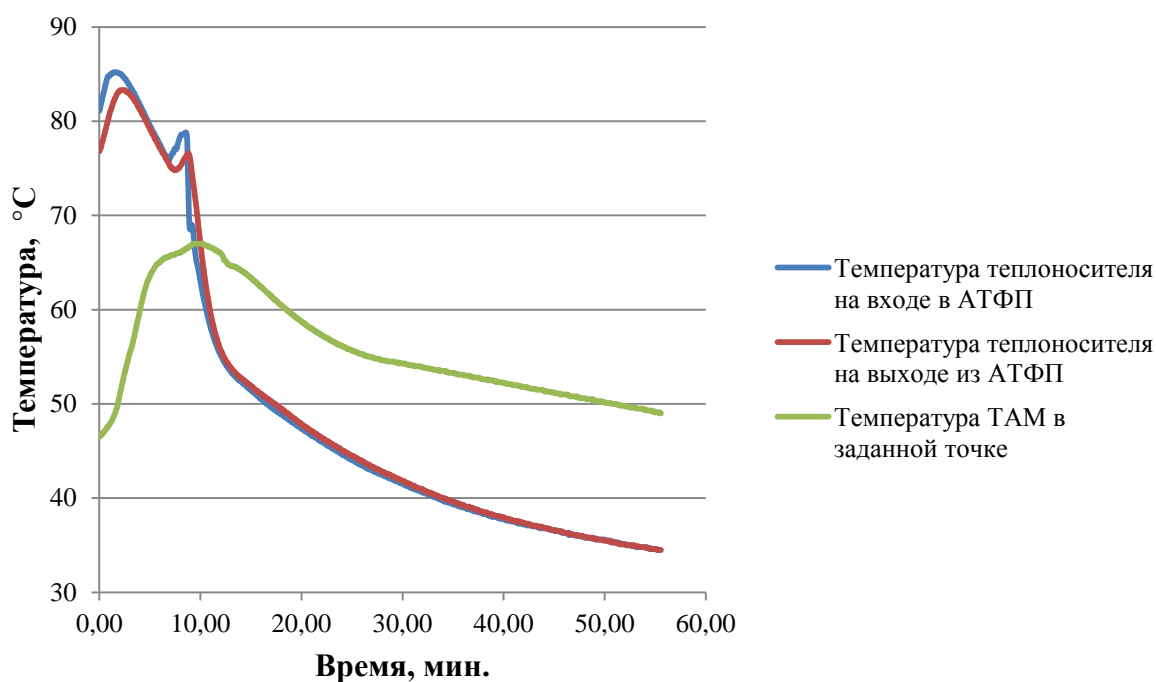


Рис. 3.6. Характеристика работы аккумулятора фазового перехода при скорости теплоносителя в теплообменной трубке 0,16 м/с (переходный режим). Удаление датчика от поверхности трубки – 4 мм.

Кривые кристаллизации на рис. 3.4-3.6 аппроксимируются логарифмическим уравнением $T(\tau)=a \cdot \ln \tau + b$. Характер изменения температуры стенки теплообменной трубки при этом также должен иметь логарифмический характер.

Анализируя графики на рис. 3.4-3.6, можно отметить, что увеличение скорости теплоносителя при зарядке аккумулятора (расплавлении ТАМ) приводит к заметному ускорению процесса теплообмена, что обусловлено большим температурным напором и возникновением процесса свободной конвекции в жидкой фазе парафина. Однако, увеличение скорости теплоносителя при разрядке АТФП, как это уже предполагалось в разделе 2, эффекта интенсификации не дает. Напротив, заметно сокращается разница температур теплоносителя на входе и выходе из аккумулятора.

Учитывая, что в ходе опыта предусматривался перегрев ТАМ на величину не более 8-10°C, рассматриваемая область приведенных графиков начиналась только с достижения аккумулялирующим материалом температуры плавления 55,5-54,5°C у теплообменной поверхности в процессе разрядки. Следует отметить, что при ламинарном движении теплоносителя отбор тепловой энергии перегрева ТАМ носит равномерный характер и температурное поле жидкого расплава практически однородное. Кристаллизация на поверхности теплообменной трубки начинается при незначительной разности температур в объеме аккумулялирующего материала.

Время начала процесса кристаллизации фиксировалось и являлось началом отсчета для наблюдений во второй части эксперимента. В этой части производилось наблюдение за движением фронта кристаллизации во времени. По усредненным значениям времени прироста толщины 1 мм закристаллизовавшегося ТАМ вокруг теплообменной трубки (Приложение Б) построен график на рис. 3.7.

На рис. 3.7 можно видеть, что увеличение скорости теплоносителя практически не приводит к ускорению процесса кристаллизации ТАМ вокруг теплообменной трубки. Это по-видимому связано с уменьшением температуры

стенки трубки, которое должно приводить к увеличению теплового потока через толщу закристаллизовавшегося парафина.

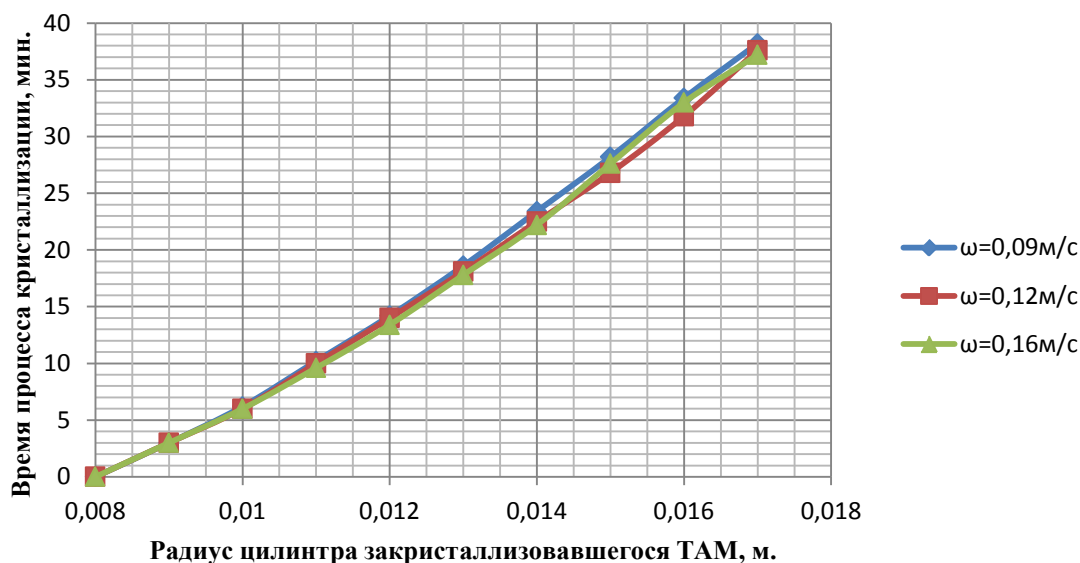


Рис. 3.7. Характеристика скорости кристаллизации парафина марки Т-3 при различных скоростях движения теплоносителя.

При рассмотрении результатов обоих опытов можно сделать вывод, что, как и предполагалось в подразделе 2.1, наиболее эффективным конечным радиусом фронта кристаллизации является случай $R=2R_0$. После перехода R через это значение происходит значительное снижение градиента температур теплоносителя на входе и на выходе из АТФП, т.е. снижается количество отбираемого тепла. Данное наблюдение относится к парафину Т-3. Данный факт доказывает применимость формулы (2.4) и заключений подраздела 2.1 для анализа поведения ТАМ при его кристаллизации в кожухотрубных АТФП.

3.3.2 Сопоставление экспериментальных данных с расчетной моделью тепломассобменных процессов

Для сравнения разработанной математической модели с результатами эксперимента и проверки ее адекватности необходимо задаться исходными данными, аналогичными условиям проведения исследования.

Влияние на изменение протекания тепломассобменного процесса при кристаллизации в первичном контуре ТАМ может оказывать только температура поверхности контакта двух сред. Воздействие со стороны вторичного контура (контура системы теплоснабжения) оказывают температурные параметры теплоносителя и режимы его движения. Прямая задача расчета любого теплообменного аппарата предусматривает знание температур теплоносителя на входе и на выходе из установки. В приведенном случае данное условие не изменяется. Оптимальный режим движения для обеспечения заданных параметров теплоносителя, как это уже было отмечено в подразделе 2.1, устанавливается в зависимости от теплофизических характеристик ТАМ, так как возможности теплообмена между аккумулирующим материалом и теплоносителем ограничены его теплопроводностью.

Таким образом, для моделирования процесса кристаллизации с помощью предлагаемой модели, зададимся температурными параметрами теплоносителя, принятыми по значениям эксперимента.

Так как температуры теплоносителя переменны во времени, приводим их к некоторому среднему значению

$$T_{cp.} = \frac{T_1 + T_2 + \dots + T_n}{n}, \quad (3.41)$$

где n - количество усредняемых измерений.

Как и температура теплоносителя, температура поверхности контакта изменяется во времени по причине увеличения сопротивления передаче теплоты при нарастании кристаллической фазы парафина. Однако процесс изменения данной температуры носит логарифмический характер (что наглядно иллюстрируют рис. 3.4-3.6, полученные в результате экспериментальных исследований). Он не может быть усреднен линейно, как это выполнено для температуры теплоносителя в формуле (3.41), поэтому используем следующую формулу для усреднения переменной:

$$T_1 = \frac{T_{кр} - \frac{(T_{cp.1} + T_{cp.2})}{2}}{\ln \frac{2T_{кр}}{(T_{cp.1} + T_{cp.2})}}, \quad (3.42)$$

где $T_{cp.1}$ - усредненная температура теплоносителя на выходе из АТФП;

$T_{cp.2}$ - усредненная температура теплоносителя на входе в аккумулятор.

Полученные результаты усредненных температур сведены в таблицу 3.14.

Таблица 3.14

Значения усредненных температур теплоносителя и поверхности контакта с ТАМ

Номер опыта	Скорость движения теплоносителя в теплообменной трубке, м/с	Режим движения	Усредненная температура теплоносителя на входе в АТФП, $T_{cp.1}$	Усредненная температура теплоносителя на выходе из АТФП, $T_{cp.2}$	Усредненная температура поверхности контакта ТАМ, T_1
1	0,09	ламинарный	37,74	38,75	45,67
2	0,12	переходный	37,63	37,85	45,39
3	0,16	переходный	37,24	37,35	45,13

Отообразим порядок изменения разницы температур теплоносителя на входе и выходе из аккумулятора в зависимости от скорости его движения графически на рис. 3.8.

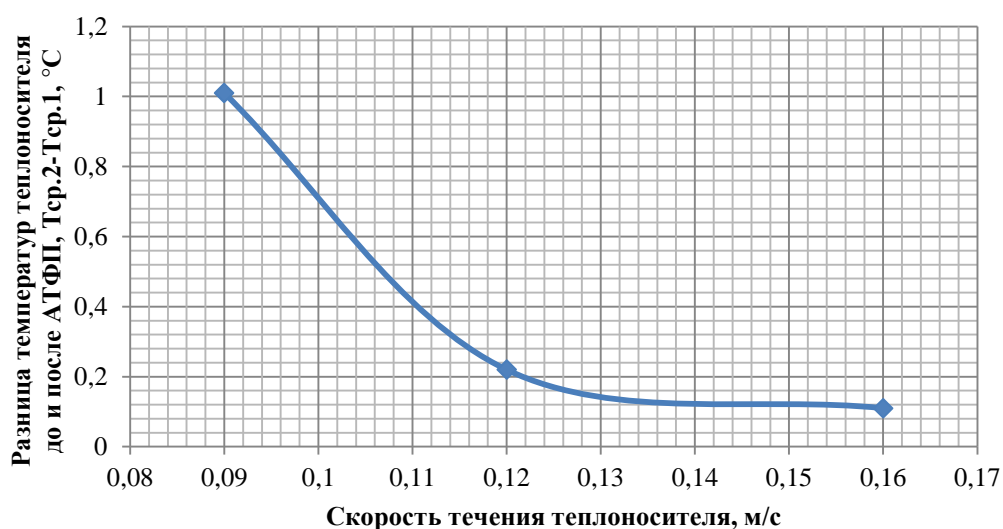


Рис. 3.8. Зависимость градиента температур теплоносителя на входе и выходе из аккумулятора от скорости его течения.

График на рис. 3.8 еще раз доказывает, что увеличение скорости течения

практически не увеличивает количество теплоты, воспринимаемой теплоносителем от аккумулирующего материала. При этом происходит только перераспределение значений в балансе теплоты воспринятой теплоносителем, т.е. $G_1 c \Delta T_1 \approx G_2 c \Delta T_2$ (где G_1 -массовый расход теплоносителя на первой скорости работы насоса; G_2 -массовый расход теплоносителя на второй скорости работы насоса). В такой ситуации меры по интенсификации теплообмена необходимо применять на стороне первичного контура, изменяя вид ТАМ, либо увеличивая поверхность теплообмена путем наружного оребрения теплообменной трубки.

Подставляя данные таблицы 3.14 в формулу 2.47 с учетом теплофизических свойств парафина Т-3 по таблице 3.2, произведем расчет динамики роста закристаллизовавшегося ТАМ вокруг теплообменных трубок аккумулятора. При этом усредним переменный во времени радиус фронта кристаллизующегося ТАМ R (изменение которого по результатам подраздела 2.1, носит логарифмический характер) по формуле

$$R_{cp} = \frac{R - R_o}{\ln \frac{R}{R_o}}. \quad (3.43)$$

Результаты расчета сводим в таблицу 3.15.

Динамика роста фронта кристаллизации ТАМ вокруг теплообменной трубки во времени

Номер опыта	Радиус теплообменной трубки, м.	Конечный радиус цилиндра закристаллизовавшегося ТАМ, м.	Усредненный радиус цилиндра закристаллизовавшегося ТАМ, м.	Значение радиуса закристаллизовавшегося цилиндра r в момент времени τ , м.	Расчетные данные				Экспериментальные данные	Относительная погрешность, %
					А (формула 2.29)	В (формула 2.30)	С (формула 2.31)	Время кристаллизации τ , мин. (формула 2.47)	Время кристаллизации $\tau_{\text{ср}}$, мин.	
1	2	3	4	5	7	8	9	10	6	11
1	0,008	0,016	0,011542	0,009	-19806,5	-24935,9	-13674,2	3,07	3	2,16
				0,010				6,49	6,2	4,51
				0,011				10,28	10,2	0,78
				0,012				14,43	14,2	1,58
				0,013				18,94	18,6	1,78
				0,014				23,81	23,4	1,71
				0,015				29,04	28,2	2,88
				0,016				34,63	33,4	3,54
				0,017				40,58	38,2	5,86
2	0,008	0,016	0,011542	0,009	-21183,4	-25769,8	-13467	2,96	3	1,19
				0,010				6,28	6	4,43
				0,011				9,94	10	0,60
				0,012				13,95	14	0,35

Номер опыта	Радиус теплообменной трубки, м.	Конечный радиус цилиндра закристаллизовавшегося ТАМ, м.	Усредненный радиус цилиндра закристаллизовавшегося ТАМ, м.	Значение радиуса закристаллизовавшегося цилиндра r в момент времени τ , м.	Расчетные данные				Экспериментальные данные	Относительная погрешность, %
					А (формула 2.29)	В (формула 2.30)	С (формула 2.31)	Время кристаллизации τ , мин. (формула 2.47)	Время кристаллизации $\tau_{\text{ср}}$, мин.	
1	2	3	4	5	7	8	9	1	2	3
				0,013				18,31	18,1	1,15
				0,014				23,02	22,5	2,26
				0,015				28,08	26,8	4,55
				0,016				33,48		
				0,017				39,24		
3	0,008	0,016	0,011542	0,009	-22455,5	-26515,4	-13283,1	2,88	3	4,18
				0,010				6,10	6	1,60
				0,011				9,65	9,6	0,57
				0,012				13,55	13,4	1,11
				0,013				17,79	17,8	0,08
				0,014				22,36	22,2	0,71
				0,015				27,27	27,6	1,21
				0,016				32,52	33,4	2,71
				0,017				38,11	39,4	3,39

На основании данных таблицы 3.15 можно говорить об очевидном схождении теоретических и экспериментальных данных. Максимальная погрешность значений не превышает 6%, и приходится на часть опыта, когда съем экспериментальных значений затруднялся за счет появления хлопьев закристаллизовавшегося ТАМ в объеме жидкой фазы при значениях $r \geq 7$ мм.

Имея значения приращения радиуса закристаллизовавшегося ТАМ во времени, рассмотрим значения эксперимента по наблюдению за изменением температурного поля внутри объема аккумулирующего материала. Для этого воспользуемся формулой 2.40. Учитывая изменение радиуса фронта, запишем 2.40 следующим образом

$$T(r, \tau) = \frac{T_1 \ln \frac{r_\phi(\tau)}{r} + T_2 \ln \frac{r}{R_0}}{\ln \frac{r_\phi(\tau)}{R_0}} \cdot e^{\frac{a(A-B)}{C} \tau}, \quad (3.44)$$

где $r_\phi(\tau)$ - значение радиуса закристаллизовавшегося аккумулирующего материала в момент времени τ ;

r - расстояние от оси теплообменной трубки до места установки температурного датчика в i -ом опыте;

a - коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

A, B, C - постоянные, описываемые зависимостями соответственно по уравнениями (2.29), (2.30), (2.31).

Результаты расчета сводим в таблицу 3.16.

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

Номер опыта	Рассматриваемый радиус r , м.	Радиус теплообменной трубки R_0 , м.	Время кристаллизации τ , мин.	Расчетные данные					Экспериментальные данные	Относительная погрешность, %
				Радиус фронта кристаллизации в момент времени τ , м.	А (формула 2.29)	В (формула 2.30)	С (формула 2.31)	Температура T на цилиндрической поверхности радиуса r , °C (формула 3.5)	Температура $T_{\text{ср.}}$ на заданном радиусе r , °C	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,009	0,008	0	0,008	-	-	-	54	54,2	0,37
			1	0,0083	-204649	-27383,7	9149,274	54,00	53,6	0,74
			5	0,0096	-44104,8	-25679,9	-5332,75	51,11	51,9	1,55
			10	0,0109	-23875,2	-24984,3	-11127,4	48,82	50,5	3,44
			15	0,0121	-17031,5	-25005	-16132,7	48,03	49,6	3,27
			20	0,0132	-13557,7	-25365,2	-20715,6	47,63	48,6	2,04
			25	0,0142	-11438,3	-25897,6	-24991,9	47,38	47,8	0,89
			30	0,0152	-9999,83	-26519,9	-29029	47,21	47,4	0,40
2	0,014	0,008	0	0,0080	-211395	-28295,2	8343,006	54	56	3,70
			1	0,0084	-45728,5	-26507,2	-5475,91	54	55,5	2,78
			5	0,0096	-24816,8	-25808,3	-11310,8	54	54,3	0,56
			10	0,0110	-17729,9	-25861,2	-16365,7	54	53,5	0,93
			15	0,0122	-14129,3	-26264,9	-20993,5	54	52,8	2,22
			20	0,0134	-11929,5	-26844,1	-25313,3	54	51,9	3,89
			25	0,0144	-10438,4	-27511,8	-29382	53,60	50,9	5,04
			30	0,0154	-9353,86	-28223,2	-33249,2	52,78	50,3	4,70

Номер опыта	Рассматриваемы й радиус r , м.	Радиус теплообменной трубки R_0 , м.	Время кристаллизации τ , мин.	Расчетные данные					Экспер-е данные	Относительная погрешность, %
				Радиус фронта кристаллизации в момент времени τ , м.	А (формула 2.29)	В (формула 2.30)	С (формула 2.31)	Температура T на цилиндрической поверхности радиуса r , °C (формула 3.5)	Температура $T_{\text{ср.}}$ на заданном радиусе r , °C	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			35	0,0163	-8527,71	-28951,1	-36936,9	52,19	49,4	5,35
3	0,012	0,008	0	0,008	-224089	-29132,2	8252,854	54	59	9,26
			1	0,0084	-48474,6	-27287	-5399,4	54	58,1	7,59
			5	0,0097	-26307,1	-26558,9	-11156	54	55,8	3,33
			10	0,0111	-18794,6	-26604,1	-16142,8	54	54,4	0,74
			15	0,0124	-14977,7	-27010,4	-20708,4	53,58	53,3	0,52
			20	0,0135	-12645,9	-27597,9	-24970,4	52,14	52,3	0,30
			25	0,0145	-11065,3	-28276,9	-28984,7	51,26	51,3	0,08
			30	0,0155	-9915,58	-29001,3	-32800,2	50,65	50,2	0,90
			35	0,0165	-9039,82	-29743,2	-36438,7	50,21	49,2	2,01
			40	0,0173	-224089	-29132,2	8252,854	49,87	49	1,74

Сходимость данных, полученных расчетным путем согласно результатам таблицы 3.16, говорит об адекватности предложенной расчетной модели, так как максимальная погрешность полученных значений не превышает 6%. В рассмотрение не принимается случай с погрешностью 9,26% и 7,59% в опыте 3. Она возникает по причине наличия незначительного перегрева жидкого ТАМ, и не может оказать значительный вклад в нарушение общего баланса, так как теплота, саккумулированная за счет теплоемкости (15,87 кДж) значительно меньше теплоты, выделяющейся при фазовом переходе (334,4 кДж). Кроме того необходимо иметь ввиду значительные размеры датчика температуры в стеклянной гильзе (диаметр 5 мм.), что является причиной возникновения дополнительной погрешности измерений, так как в таких условиях не удастся установить температурный датчик с шагом в 1мм на определенной цилиндрической поверхности.

3.4 Выводы по третьему разделу

1. Разработана экспериментальная установка и методика проверки основных теплообменных процессов работы кожухотрубного аккумулятора теплоты фазового перехода. Для проведения эксперимента смоделирована и изготовлена установка, отвечающая системе теплоснабжения с источником теплоты, потребителем и аккумулятором.
2. 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, т.е. $G_1 c \Delta T_1 \approx G_2 c \Delta T_2$. 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.
3. На основании рассмотрения результатов опытов изменения температуры

теплоносителя и роста диаметра цилиндра закристаллизовавшегося ТАМ и теоретически полученных результатов в подразделе 2.1, 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 формулы 2.4 и заключений подраздела 2.1 для анализа поведения ТАМ при его кристаллизации в кожухотрубных АТФП.

4. Сходимость данных, полученных расчетным путем и на описанной экспериментальной установке, говорит об адекватности предложенной расчетной модели, так как максимальная погрешность полученных значений не превышает 6% в рабочем диапазоне разрядки аккумулятора. Данная погрешность относится к погрешности измерительных приборов, трудностям со снятием показаний в условиях образования «хлопьев» ТАМ, и может быть сокращена за счет устранения изложенных недостатков.
5. Проведенное экспериментальное исследование подтверждает адекватность модели тепломассообменных процессов для кожухотрубных аккумуляторов фазового перехода, разработанной в разделе 2. Это позволяет использовать предложенную модель для разработки методики теплового и конструктивного расчета подобных аккумуляторов, а также исследовать пригодность любого вида ТАМ для нужд аккумулирующих систем теплоснабжения расчетным путем.

РАЗДЕЛ 4

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТЕПЛОВОГО И КОНСТРУКТИВНОГО
РАСЧЕТОВ АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛОТЫ КОЖУХОТРУБНОГО ТИПА,
ТЕПЛОВЫХ СХЕМ УСТАНОВОК ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ С АТФП

На основании разработанной модели тепломассообменных процессов в кожухотрубных аккумуляторах в данном разделе разрабатывается методика расчета натурного АТФП, а также способы и схемы включения аккумуляторов в систему генерации теплоты современных систем теплоснабжения.

4.1 Схемы включения аккумуляторов теплоты в системы теплоснабжения

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, а также в повышении КПД теплогенераторов на органических видах топлива за счет рационализации периодов их работы. Основываясь на данных принципах, учитывая существующие схемы аккумуляирования тепловой энергии [7,35,77,103] и особенности работы АТФП, были разработаны рассматриваемые ниже тепловые схемы систем теплоснабжения с фазопереходными аккумуляторами тепловой энергии.

4.1.1 Схемы работы АТФП в системах теплоснабжения с солнечными коллекторами.

Использование солнечной энергии – одно из основных направлений разработок возобновляемых источников энергии. Особенностью данного вида энергии является непостоянство поступления энергии во времени в силу дневной цикличности стояния Солнца и погодных условий. В такой ситуации выравнивание поступления тепловой энергии возможно только за счет

использования аккумуляторов.

В случае, если в системе теплоснабжения и гелиосистеме циркулирует одинаковый по свойствам теплоноситель (незамерзающая жидкость), возможно применение схемы, представленной на рис. 4.1.

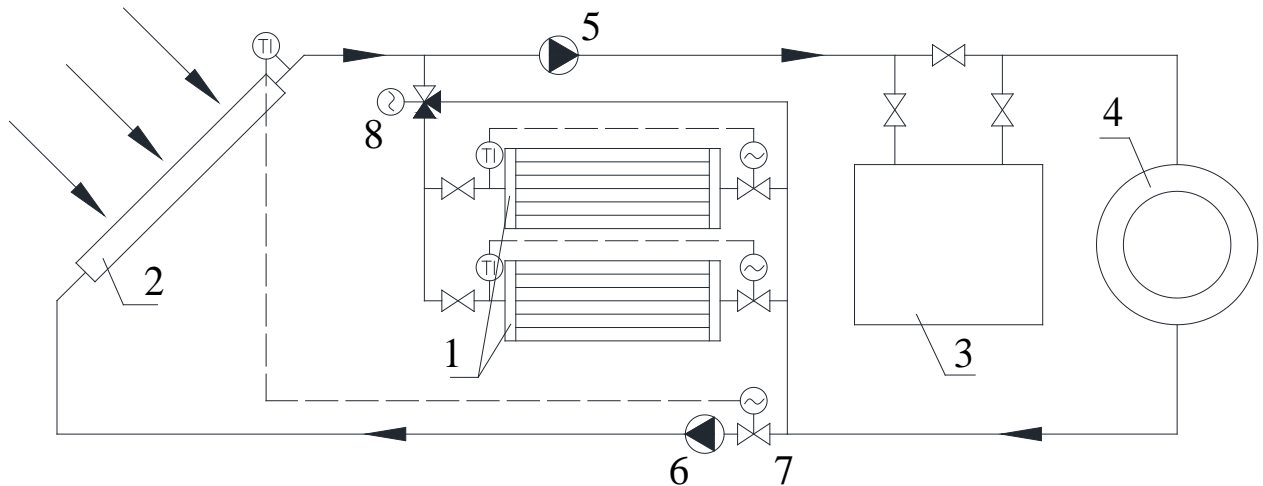


Рис. 4.1. Схема системы гелиотеплоснабжения с одноконтурным фазопереходным аккумулятором:

- 1 – фазопереходной аккумулятор;
- 2 – солнечный коллектор;
- 3 – теплогенератор;
- 4 – система теплоснабжения;
- 5 – циркуляционный насос системы теплоснабжения;
- 6 – циркуляционный насос системы солнечного коллектора;
- 7 – двухходовой клапан;
- 8 – трехходовой клапан.

В дневное время потребности в тепловой энергии системы теплоснабжения 4 покрываются за счет солнечной энергии, усваиваемой коллекторным полем 2, в то же время происходит аккумуляция теплоты в фазопереходном аккумуляторе 1. Для сглаживания изменения температур теплоносителя в течении работы системы от аккумулятора, он разбивается на блок-секции, работа каждой секции рассчитывается на час максимальной нагрузки. При прекращении солнечной активности отключается насос контура

гелиосистемы 6, закрывается двухходовой клапан 7, функционирование системы теплоснабжения 4 производится от аккумулятора 1. При разрядке одной секции на подводящем трубопроводе закрывается клапан, и открывается на следующей секции. Задача трехходового клапана 8 заключается в регулировании температуры теплоносителя при разрядке аккумулятора. В случае длительного отсутствия или недостаточной зарядки каскада аккумуляторов 1, производится догрев теплоносителя теплогенератором 3.

Если активность Солнца не проявляется длительное время, система может функционировать за счет аккумулятирования теплоты в периоды провала электропотребления при сниженных тарифах на электричество. Такая возможность осуществима за счет замены одноконтурного аккумулятора 1 на двухконтурный с установленным в нем ТЭН. Конструкция такого АТФП будет рассмотрена ниже. В этом случае трехходовой кран каскада аккумуляторов при зарядке устанавливается в положение на пропуск теплоносителя мимо аккумуляторов. Такая схема может быть использована и без включения солнечных коллекторов в районах с низкой годовой солнечной активностью.

Зарядка одноконтурного АТФП при дефиците солнечной энергии днем также может производиться от теплогенератора 3 (электрического). Для этого схема 4.1 дополнится буферной емкостью 9 (Рис. 4.2).

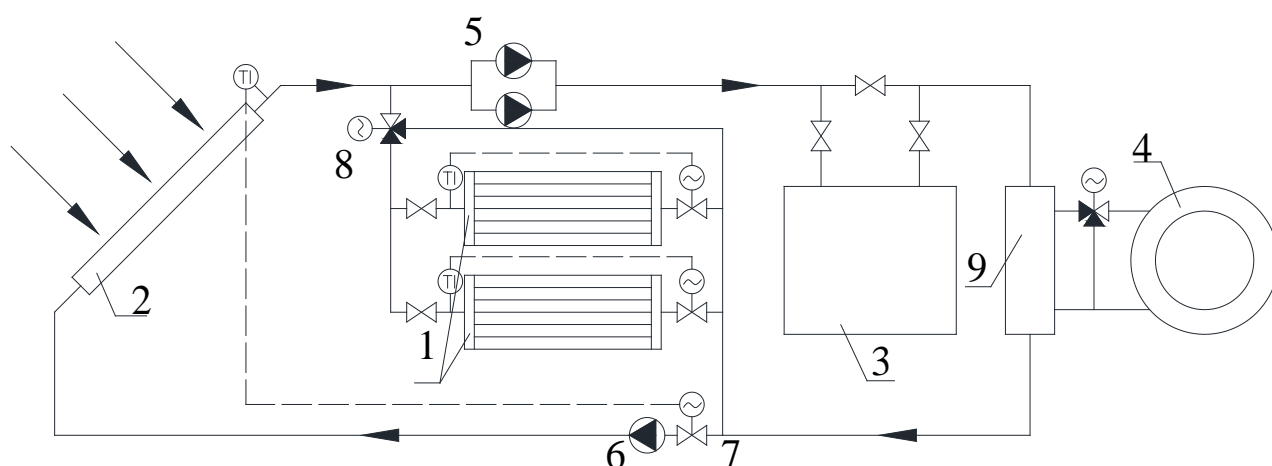


Рис. 4.2. Схема системы гелиотеплоснабжения с одноконтурным фазопереходным аккумулятором и буферной емкостью:

9 – буферная емкость.

В процессе зарядки аккумулятора предусматривается повышение параметров температуры подачи, так как в буфере 9 происходит подмес обратного теплоносителя от системы теплоснабжения 4. Также в процессе зарядки происходит смена режима движения в трубках аккумулятора на турбулентный, поэтому предусматривается увеличение скорости теплоносителя.

При заполнении контура гелиосистемы теплоносителем отличным по своим свойствам от теплоносителя системы теплоснабжения (гликоль-вода), возможно применение двухконтурных АТФП (Рис. 4.3). В таких аккумуляторах зарядка и разрядка производится по различным теплообменным трубкам, поэтому отсутствует необходимость в изменении режимов движения теплоносителя в процессе зарядки и разрядки.

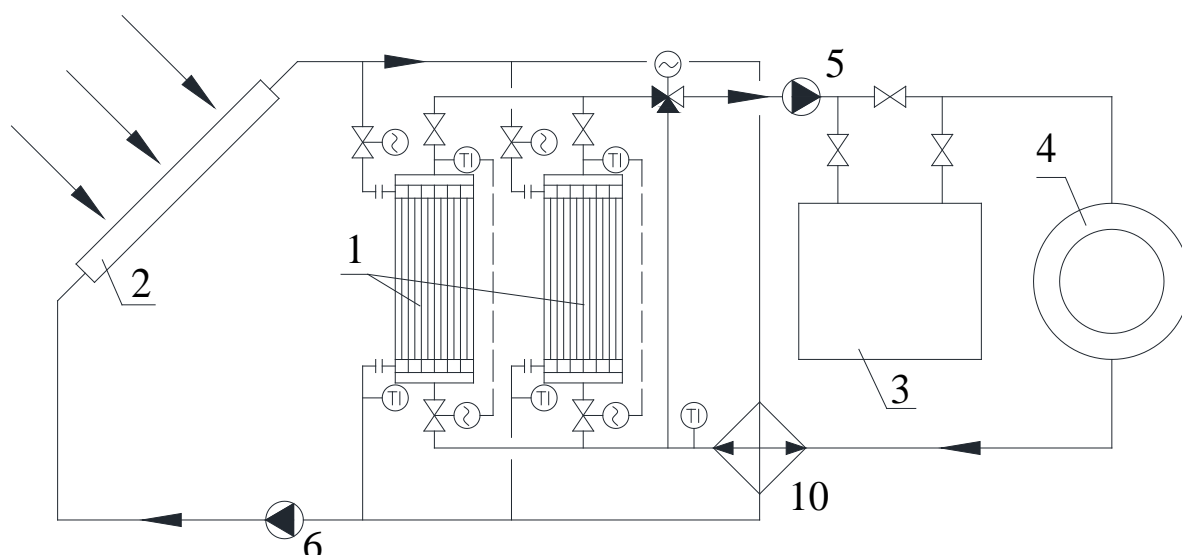


Рис. 4.3. Схема системы гелиотеплоснабжения с двухконтурным фазопереходным аккумулятором:

10 – промежуточный теплообменник.

Для климатических зон с невысокой солнечной активностью или невозможностью установки коллекторного поля достаточной площади применима схема с тепловым насосом (рис. 4.4).

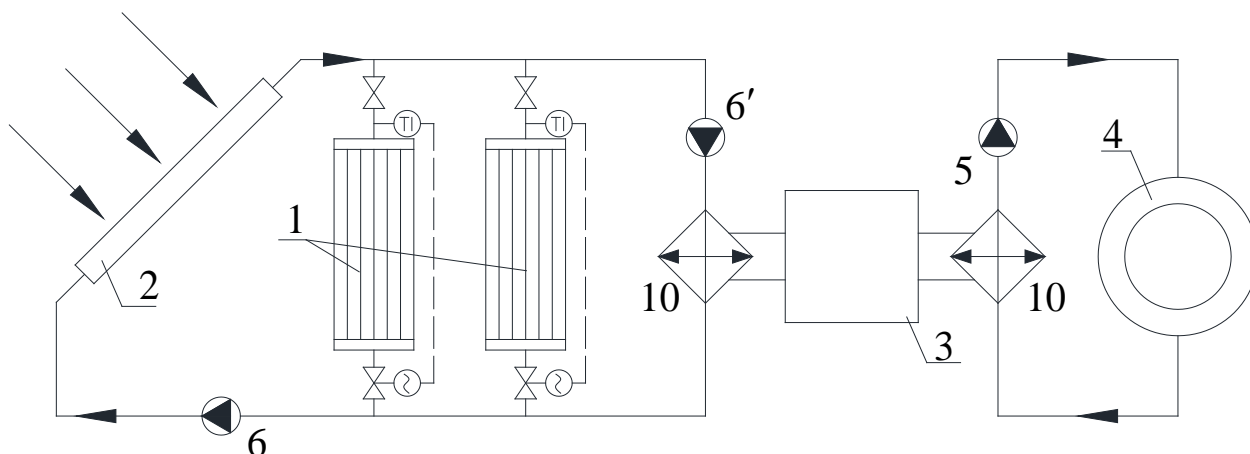


Рис. 4.4. Схема системы гелиотеплоснабжения с одноконтурным фазопереходным аккумулятором и тепловым насосом.

Преимущество данных систем заключается в комбинированном использовании дешевых видов энергии, а также в возможности создания абсолютно энергонезависимых и экологически чистых объектов. Применение подобных схем возможно как для индивидуального строения, так и для жилого массива.

Установка аккумулятора в силу его значительных габаритов (работа системы теплоснабжения от аккумулятора может составлять от 8 до 16 часов в сутки в зависимости от выбранной схемы) может выполняться в двух вариантах:

- монтаж аккумулятора внутри здания (при новом строительстве);
- монтаж аккумулятора снаружи здания.

В первом случае для расположения теплоаккумулятора используется внутреннее пространство отапливаемого объекта. Несомненным плюсом такого решения является минимизация теплопотерь от корпуса аккумулятора в окружающую среду. Все теплопотери являются полезными, так как направляются на отопление здания. Однако, применение такого решения возможно только при проектировании нового объекта, так как установка аккумулятора теплоты внутри объекта без ограничения объема помещений требует определенных конструкторских решений (Рис. 4.5).

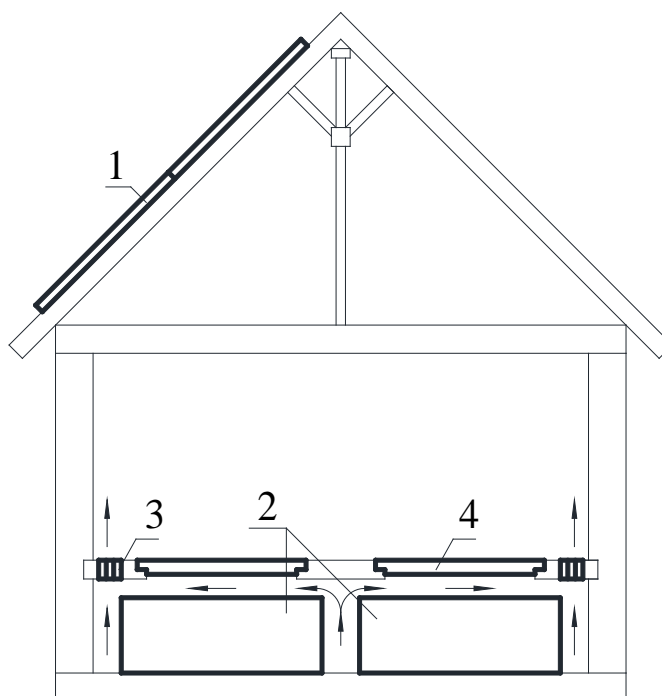


Рис. 4.5. Схема установки аккумуляторов теплоты фазового перехода
внутри здания:

- 1 – коллекторное поле;
- 2 – фазопереходный аккумулятор;
- 3 – регулируемые решетки;
- 4 – съемные панели.

Как показано на рис. 4.5, наиболее приемлемым местом для установки аккумуляторов теплоты фазового перехода 2 представляется основание здания. Поэтому, как уже указывалось выше, для установки АТФП необходимо проектировать здание с большей глубиной заложения фундамента и техническим подпольем, имеющим съемные панели 4 в полу нижнего этажа для доступа к аккумуляторам 2 в аварийной ситуации. Рассматриваемая конструкция аккумулятора не имеет движущихся частей, и является наиболее надежной. ТАМ на основе парафинов, как уже было сказано, не являются коррозионноактивными, поэтому аккумулятор может быть скрыт в конструкциях здания. Корпус АТФП может выполняться как из разного рода металлов, так и из бетона.

Тепловыделения от корпуса аккумулятора при таком расположении направляются на отопление вышележащего этажа через перекрытие и регулируемые решетки в полу 3, либо могут быть использованы для подогрева приточного воздуха всего здания, если воздух изначально подавать в объем подполья, а затем в систему вентиляции. Такая схема применима не только для коттеджей, но и для многоэтажных зданий.

Вариант монтажа АТФП снаружи здания рассматривается при реконструкции существующего объекта и невозможности создания технического подполья для аккумулятора, так как в этом случае появляются дополнительные затраты на прокладку сетей, земельные работы и более жесткие требования по теплоизоляции. Такая концепция становится более приемлемой, когда идет речь о многоквартирной застройке (Рис. 1.2) [77].

Стоит отметить, что при замене существующих жидкостных аккумуляторов с гравием на АТФП принципиально элементы схемы (Рис.1.3) для квартальной застройки не претерпевают изменений, при этом значительно повышаются возможности системы по аккумуляции тепла (температура подачи при таком аккумуляторе составляет 40°C , в АТФП $>45^{\circ}\text{C}$ в зависимости от ТАМ).

4.1.2 Схемы работы АТФП в системах теплоснабжения с котлами на органическом топливе.

Выработка тепловой энергии за счет сжигания органического топлива не носит цикличного характера. Однако, следует учесть, что подбор любого генератора теплоты ведется на покрытие максимальной нагрузки системы, которая носит кратковременный характер (около 3%) по сравнению с длительностью отопительного периода. В остальное время генераторы работают в диапазоне нагрузок от 40 до 100% номинальной мощности котла в зависимости от технологичности горелки. Для обеспечения необходимой мощности на минимуме своих возможностей котел увеличивает количество пусков и остановок в час, при этом снижается долговечность газогорелочного

оборудования и повышается эмиссия СО (неполное сгорание топлива) в атмосферу. Если говорить о твердотопливных котлах, то в переходном режиме на поддержание горения при отсутствии теплосъема тратится значительное количество топлива, при этом увеличивается тепловое напряжение поверхностей нагрева генератора.

Путь решения перечисленных вопросов лежит в увеличении тепловой инерции системы теплоснабжения. В настоящее время задача решается за счет жидкостных смесительных аккумуляторов. Однако, увеличение инерционности за счет такого типа аккумуляторов основано на элементарном наращивании водного объема системы и компенсационных емкостей. Это в результате сказывается на комфорте потребителя, так как котел не в состоянии быстро прогреть большой объем теплоносителя. В свою очередь АТФП лишены подобных недостатков.

Тепловой аккумулятор может быть применен в любой технологической схеме теплогенерирующей установки. Принципиальным моментом его расположения является его работа совместно с генератором. АТФП может быть включен в тепловую схему последовательно или параллельно.

Параллельное подключение (Рис. 4.6) предусматривает установку аккумулятора на параллельной линии с теплогенератором.

Включение в работу теплоаккумулятора предполагается при работе системы генерации на 60-70% от максимальной мощности. В процессе работы котла в переходной период, происходит зарядка теплоаккумулятора. При этом расход теплоты производится потребителями 7, 8 и теплоаккумулятором 2. Забор теплоносителя на зарядку АТФП выполняет насос 5, при этом его расход обеспечивает работу котла на уровне 30-40% максимальной мощности, так чтобы даже при закрытии потребителей 7, 8 теплогенератор продолжал выработку теплоты при своем максимально возможном КПД для аккумуляирования. В таком режиме выработка энергии идет при меньшей тепловой нагрузке топки, что ведет к снижению выбросов NO_x . При полной зарядке АТФП 2, насосы 3, 4 выключаются. Насос 6 включается в работу и

обеспечивает саккумулированной тепловой энергией систему на расчетный период. Установка перепускного клапана 9 предусматривается для защиты насоса 6. В системах малой мощности клапан 9 может быть заменен гидравлической стрелкой.

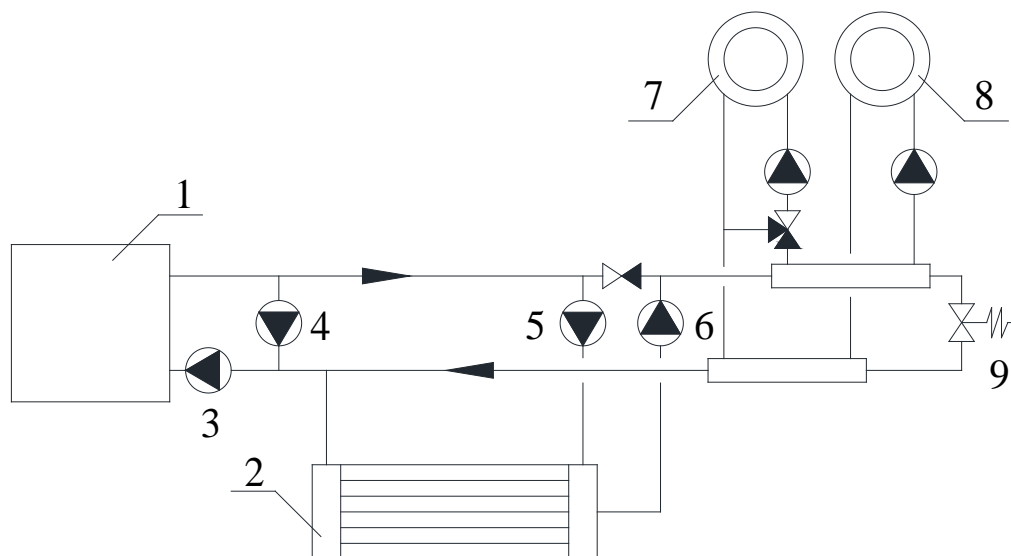


Рис. 4.6. Схема параллельного включения АТФП в систему теплоснабжения:

- 1 – теплогенератор;
- 2 – фазопереходный аккумулятор;
- 3 – котловый насос;
- 4 – рециркуляционный насос;
- 5 – насос зарядки АТФП;
- 6 – насос разрядки АТФП;
- 7 – контур потребителя регулируемый;
- 8 – контур потребителя нерегулируемый;
- 9 – перепускной клапан.

Особенностью такой схемы является увеличение времени работы теплогенератора в диапазонах мощности при максимальном КПД. Например, для котлов Viessmann Vitomax 100-LW увеличение КПД возможно на 3,5%.

При последовательном включении (Рис. 4.7) теплоаккумулятор 2 устанавливается на одну линию с теплогенератором 1.

Аккумулятор 2 в такой схеме участвует в процессе генерации теплоты на

протяжении всего периода работы теплогенерирующей установки, включая период максимальных нагрузок. Теплоноситель нагревается в котле 1 и поступает в систему теплоснабжения. В момент когда потребителям 5, 6 более не требуется тепловая энергия, потребитель закрывается, открывается перепускной клапан 7, который может быть настроен на 30-40% пропуска расчетного расхода теплоносителя, и производится зарядка АТФП 2 за счет «горячей» обратной магистрали. При полной зарядке аккумулятора 2, работа котла 1 прекращается. Система поддерживается за счет саккумулированной энергии.

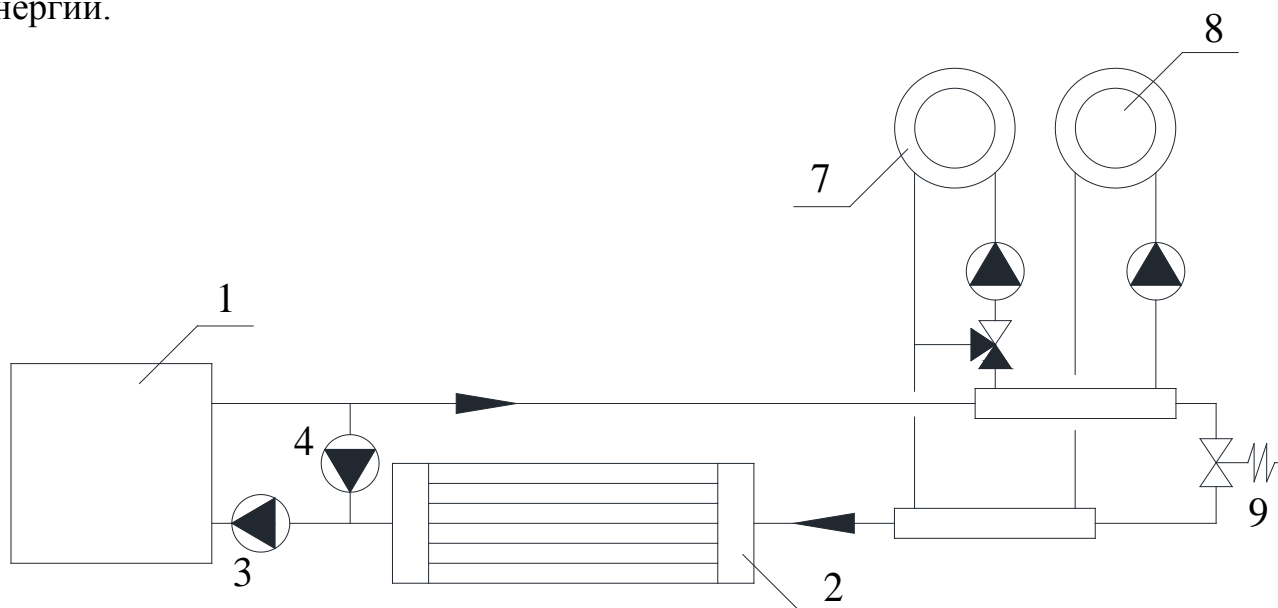


Рис. 4.7 Схема последовательного включения АТФП в систему теплоснабжения:

При последовательном подключении аккумулятора выполняется защита котла от холодной обратки за счет саккумулированной энергии во все периоды работы генератора. Однако это требует повышения мощности котла сверх проектной. Котел в переходной период не остывает за время простоя, а постоянно находится в разогретом (рабочем) состоянии за счет протока через него циркулирующего теплоносителя. Вместе с тем система становится менее маневренной, чем при параллельном подключении. При остановках котельной в аварийных ситуациях, выход котельной на необходимые параметры работы

возможен только после зарядки аккумулятора. Также увеличиваются теплопотери в максимальном режиме, когда работа аккумулятора практически сведена к нулю, и теплопотери от котла в ожидающем режиме.

Несомненным плюсом объединения АТФП с генераторами теплоты на органическом топливе является возможность работы в ночной период с меньшими капитальными затратами при использовании АТФП с электрическими элементами. Все данные мероприятия в сумме способны увеличить общий КПД генерации теплоты источником, а также снизить уровень вредных выбросов в окружающую среду [67].

4.2 Методика теплового и конструктивного расчета АТФП

Тепловой расчет аккумулятора предусматривает наличие следующих исходных данных:

Q' - расчетное количество теплоты, необходимое для обеспечения проектных параметров микроклимата в отапливаемых помещениях, Вт;

τ' - время работы системы от аккумулятора теплоты, ч;

T_2'/T_1' - значения температур теплоносителя обратного от системы теплоснабжения и подающего при максимальном режиме, °С.

1. На основании исходных данных определяется суммарное количество теплоты Q , которое должно быть саккумулировано аппаратом по формуле

$$Q = Q' \cdot \tau'. \quad (4.1)$$

2. Аккумулятор теплоты предлагается выполнять секционным таким образом, чтобы аккумулирующая емкость одной секции обеспечивала работу системы теплоснабжения в течении часа при максимальном режиме. Следствием такого шага будет уменьшение неравномерности температуры теплоносителя на выходе из АТФП во время его разрядки. Тогда количество секций аккумулятора теплоты составит $N = \tau'$.

3. Принимается термоаккумулирующий материал с таким условием, чтобы температура кристаллизации ТАМ была минимум на 15°С (по

результатам проведенных экспериментальных исследований) больше, чем средняя температура теплоносителя $T_{жс} = \frac{T'_1 + T'_2}{2}$ для обеспечения минимального температурного напора.

Используя уравнение

$$d = d_0 \cdot e^{\frac{2\lambda_2(T_{кр}-T_1)}{Nu_{жс,d}^{np} \cdot \lambda_{жс}(T_1-T_{жс})}}, \quad (4.2)$$

производится анализ возможных режимов движения теплоносителя (при характерных числах $Re=2 \cdot 10^3; 6 \cdot 10^3; 10^4$) внутри теплообменных поверхностей аккумулятора для трубки произвольного диаметра, как это выполнено в подразделе 2.1 (Рис.2.4). Условием непригодности режима является стремительное снижение температуры стенки при незначительном увеличении радиуса фронта кристаллизации r_ϕ . Для известных ТАМ с низкими показателями коэффициентов теплопроводности твердой фазы λ_2 , как это было доказано ранее, применим ламинарный режим движения. Следовательно только при увеличении λ_2 возможно увеличение эффективности аккумулятора с увеличением скорости теплоносителя АТФП.

4. Ориентировочно в первом приближении принимается диаметр теплообменных труб d_0 . Учитывая принятый режим движения, определяем скорость движения теплоносителя ω при соблюдении условия

$$Re_{жс,d}^{np} \geq \frac{\omega \cdot d_0}{\nu_{жс}}, \quad (4.3)$$

где $Re_{жс,d}^{np}$ - принятое число Рейнольдса, характеризующее приемлемый режим движения для используемого ТАМ согласно п.3.

5. Задается расчетное минимальное значение температуры стенки теплообменной трубки T'_1 , которое должно быть минимум на 4-5°C выше средней температуры теплоносителя $T_{жс}$, то есть

$$T'_1 \geq T_{жс} + (4...5^\circ\text{C}). \quad (4.4)$$

6. Определяется предельное значение роста тела закристаллизовавшегося

ТАМ в форме цилиндра диаметром d вокруг теплообменной трубки:

$$d = d_0 \cdot e^{\frac{2\lambda_2(T_{кр}-T'_1)}{\overline{Nu}_{ж,d} \cdot \lambda_{ж}(T'_1-T_{ж})}}, \quad (4.5)$$

где $\overline{Nu}_{ж,d}$ - критерий Нуссельта, определяемый соответственно принятому режиму движения по критериальным уравнениям [44], приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Критериальные уравнения конвективного теплообмена при вынужденном течении жидкости в трубах

Режим движения теплоносителя	Критериальное уравнение	Граница употребления
Ламинарный	$\overline{Nu}_{ж,d} = 0,15 \cdot Re_{ж,d}^{0,33} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot Gr_{ж,d}^{0,1} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{см}} \right)^{0,25}$	$Re \leq 2 \cdot 10^3$
Переходный	$\overline{Nu}_{ж,d} = K_0 \cdot Pr_{ж}^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{см}} \right)^{0,25}$ $K_0 = -10,66 + 6,9 \cdot (Re_{ж,d} \cdot 10^{-3}) - 0,375 \cdot (Re_{ж,d} \cdot 10^{-3})^2 + 0,012 \cdot (Re_{ж,d} \cdot 10^{-3})^3$	$2 \cdot 10^3 < Re < 10^4$
Турбулентный	$\overline{Nu}_{ж,d} = 0,021 \cdot Re_{ж,d}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{см}} \right)^{0,25}$	$Re \geq 10^4$

7. Определяем расход теплоносителя через одну секцию аккумулятора по формуле

$$G = \frac{Q'}{c_1(T'_1 - T'_2)}, \quad (4.6)$$

где c_1 - теплоемкость теплоносителя.

8. Рассчитываем количество теплообменных труб в секции аккумулятора

$$n = \frac{4 \cdot G}{\pi \cdot d_0^2 \cdot \omega} \quad (4.7)$$

9. По найденному значению $\overline{Nu}_{ж,d}$ в п.6 определяем коэффициент теплоотдачи в теплообменных трубках

$$\alpha = \frac{\overline{Nu}_{ж,д} \cdot \lambda_{ж}}{d_0}. \quad (4.8)$$

10. Из уравнения Ньютона-Рихмана $Q' = \alpha \cdot (T_1 - T_{жс})F$ находим площадь теплообмена, необходимую для передачи тепла

$$F = \frac{Q'}{\alpha \cdot (T_1 - T_{жс})}, \quad (4.9)$$

где T_1 - температура внутренней стенки полого цилиндра. T_1 принимается как среднелогарифмическая температура между минимальной температурой стенки теплообменной трубки T_1' и температурой кристаллизации ТАМ $T_{кр}$:

$$T_1 = \frac{(T_{кр} - T_1')}{\ln \frac{T_{кр}}{T_1'}}. \quad (4.10)$$

11. Общую длину теплообменных труб по ходу теплоносителя $l_{общ}$ находим из соотношения $F = \pi \cdot d_0 \cdot l_{общ} \cdot n$

$$l_{общ} = \frac{F}{\pi \cdot d_0 \cdot n}. \quad (4.11)$$

В случае если длина $l_{общ}$ превышает значение, определенное габаритами для установки аккумулятора, возможно увеличить d_0 и повторить расчет или изменить количество ходов теплоносителя x

$$x = \frac{l_{общ}}{l}, \quad (4.12)$$

где l - длина трубок одного хода.

12. Выполняется проверка условия – количество тепла, выделяемого при кристаллизации некоторой массы ТАМ m_2 в виде полого цилиндра диаметром d вокруг теплообменных трубок диаметром d_0 при длине пучка $l_{общ}$, должно быть больше либо равно расчетному количеству тепла Q'

$$Q = m_2 \cdot L_2 = \frac{\pi}{4} (d^2 - d_0^2) l_{общ} \cdot n \cdot \rho_2 \cdot L_2 \geq Q', \quad (4.13)$$

где L_2 - теплота кристаллизации ТАМ;

ρ_2 - плотность ТАМ в твердой фазе.

В случае, если условие не выполняется, необходимо откорректировать общую длину теплообменных труб $l_{общ}$ используя соотношение

$$l'_{общ} = \frac{4Q'}{\pi(d^2 - d_0^2) \cdot n \cdot \rho_2 \cdot L_2}. \quad (4.14)$$

13. Определяем геометрические параметры бункера в части расположения теплообменных поверхностей. Рассмотрим использование двух вариантов трубных пучков в теплоаккумуляторе: коридорного и шахматного.

Расположение труб в шахматном порядке (Рис. 4.8) применимо в случае, когда зарядка и разрядка аккумулятора производится по одним и тем же каналам. Порядок движения греющего и нагреваемого теплоносителя переменны во времени.

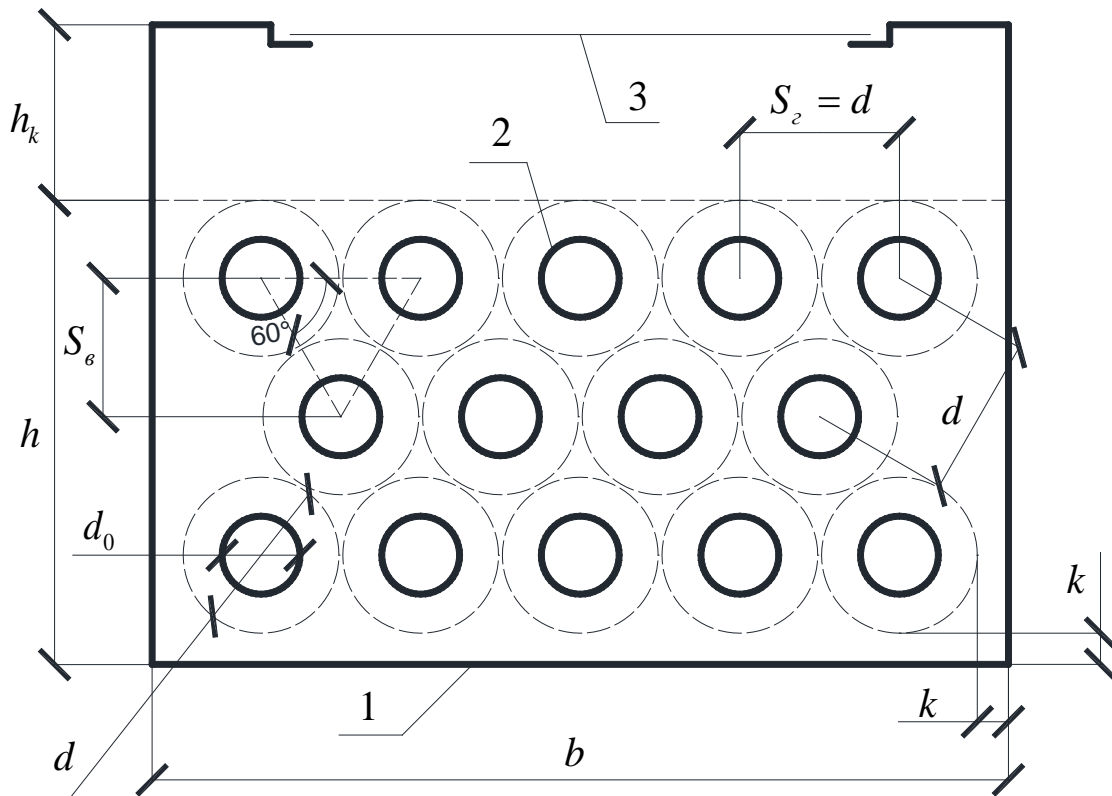


Рис. 4.8. Поперечный разрез АТФП с шахматным расположением теплообменных труб (одноконтурный аккумулятор):

b – ширина аккумулятора;

d – предельный диаметр роста закристаллизовавшегося ТАМ вокруг теплообменной трубки, определяющий шаг труб;

d_0 – диаметр теплообменной трубки;

- 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_z – горизонтальный шаг;
1 – корпус АТФП;
2 – теплообменная трубка;
3 – крышка бункера теплоаккумулятора.

Использование шахматного расположения теплообменных труб возможно в аккумуляторах, работающих в системах, имеющих один вид теплоносителя с равным статическим давлением во всех точках системы.

Для определения геометрических размеров корпуса аккумулятора, необходимо задаться одним из определяющих размеров высотой рабочей части h или шириной аккумулятора b . Относительно известного параметра определяются неизвестные по формулам:

$$h = n_v \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} d + k \Rightarrow n_v = \frac{2(h-k)}{\sqrt{3}d}; \quad (4.15)$$

$$b = n_z \cdot d + 2k \Rightarrow n_z = \frac{b-2k}{d}, \quad (4.16)$$

где n_v – количество теплообменных трубок в вертикальном ряду;

n_z – количество теплообменных трубок в горизонтальном ряду.

При этом соотношение между n_v и n_z определяется через найденное по ф-ле 4.7 общее количество трубок n в трубной решетке с шахматным расположением теплообменных труб следующим образом

$$n = \frac{n_v}{2} (2n_z - 1). \quad (4.17)$$

Коридорное расположение теплообменных труб в аккумуляторе (Рис. 4.9) приводит к увеличению его металлоемкости и габаритов. Однако, такой вариант дает возможность преобразовать аккумулятор в аккумулирующий

генератор тепловой энергии путем установки электрических ТЭН в точках 4, для использования его в ночной период провала в электропотреблении. При этом именно этот вариант применим для работы АТФП с ТАМ, имеющими температуру плавления более 100°C , так как в системах с теплоносителем-водой необходимо поднимать давление, чтобы расплавить подобный ТАМ. Также возможна установка аккумулятора в гелиосистемы с разного рода гликолевыми теплоносителями или на газоходе продуктов сгорания после котла на органическом топливе. В этом случае циркуляция теплоносителя контура гелиосистемы (или движение продуктов сгорания) производится по каналам 4, а системы теплоснабжения - по каналам 2.

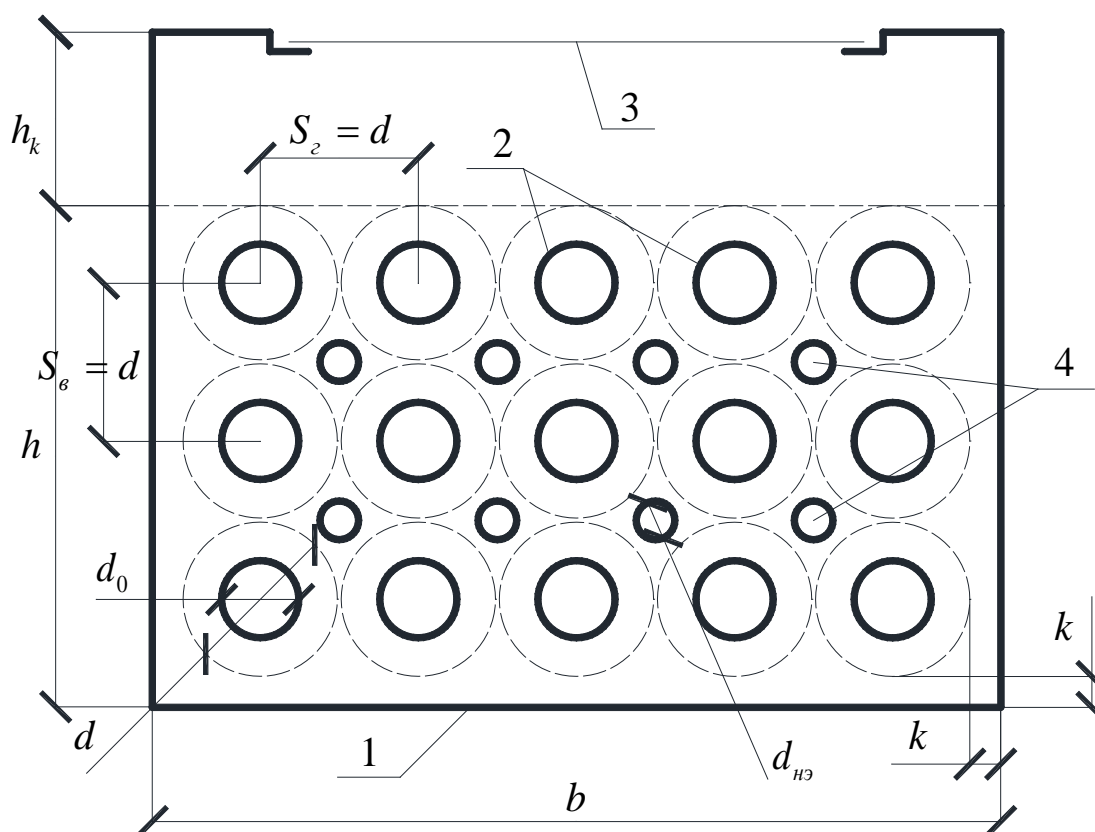


Рис. 4.9. Поперечный разрез АТФП с коридорным расположением теплообменных труб (двухконтурный аккумулятор):

$d_{нэ}$ – диаметр нагревательного элемента;

1 – корпус АТФП;

2 – теплообменная трубка;

3 – крышка бункера теплоаккумулятора;

4 –нагревательный элемент.

В случае использования жидкости или газа для зарядки аккумулятора в каналах 4 применим турбулентный режим движения. Вопрос расчета сечения нагревательного элемента не рассматривается.

Высота рабочей части h или ширина аккумулятора b относительно задаваемого параметра для АТФП с коридорным расположением теплообменных труб определяются по формулам:

$$h = n_g \cdot d + k \Rightarrow n_g = \frac{h - k}{d}; \quad (4.18)$$

$$b = n_z \cdot d + 2k \Rightarrow n_z = \frac{b - 2k}{d}, \quad (4.19)$$

При этом соотношение между n_g и n_z следующее

$$n = n_g \cdot n_z. \quad (4.20)$$

Величина k вводится для создания слоя собственной теплоизоляции аккумулятора за счет слоя закристаллизовавшегося ТАМ. Применимо только для ТАМ с низким коэффициентом теплопроводности. Для ТАМ с высокими показателями по теплопроводности $k=0$, и теплоизоляция принимается наружной.

При использовании наружных поверхностей аккумулятора для нагрева воздуха, как это показано на рис.4.5, величину k можно определить по формуле

$$k = \frac{\lambda_2 (T_{кр} - T_{cm}) F}{Q_g}, \quad (4.21)$$

где Q_g - количество теплоты на подогрев приточного воздуха;

T_{cm} - температура стенки аккумулятора, принимается как среднелогарифмическое между температурой кристаллизации ТАМ $T_{кр}$ и температурой приточного воздуха T_g

$$T_{cm} = \frac{(T_{кр} - T_g)}{\ln \frac{T_{кр}}{T_g}}. \quad (4.22)$$

При недостаточной площади поверхности аккумулятора F для нагрева приточного воздуха, необходимо дополнительно подавать его на калорифер.

Высота компенсационной зоны h_k аккумуляторов определяется на

основании выводов подраздела 2.6 по формулам:

- для АТФП с шахматным расположением теплообменных труб

$$h_{\kappa} = \left(\frac{\rho_2}{\rho'_2} - 1 \right) \cdot \left(h - \frac{\pi R_0^2 n}{b} \right), \quad (4.23)$$

где ρ_2 - плотность ТАМ в твердом состоянии;

ρ'_2 - плотность ТАМ в состоянии расплава;

- для АТФП с коридорным расположением теплообменных труб

$$h_{\kappa} = \left(\frac{\rho_2}{\rho'_2} - 1 \right) \cdot \left(h - \frac{\pi}{b} (R_0^2 n + R_{нэ}^2 n_{нэ}) \right), \quad (4.24)$$

где $R_{нэ}$ - радиус нагревательного элемента (ТЭН или трубы);

$n_{нэ}$ - количество нагревательных элементов, $n_{нэ}$.

14. Имея конструктивные характеристики аккумулятора, вычисляем рабочую массу ТАМ m_p (массу ТАМ, участвующую в рабочем процессе аккумулятора, находящуюся в объеме предельного расчетного диаметра d) и полную массу ТАМ m_n (массу ТАМ, включающую рабочую массу и балласт, необходимый для заполнения пространства бункера, в том числе и на создание собственного теплоизоляционного слоя k):

$$m_p = \frac{\pi}{4} \rho_2 (d^2 - d_0^2) \cdot n \cdot l; \quad (4.25)$$

$$m_n = \left(h \cdot b - \frac{\pi}{4} d_0^2 n \right) \cdot l \cdot \rho_2. \quad (4.26)$$

15. Произведем расчет времени зарядки аккумулятора. Расчет основан на выводах раздела 2. При преобразовании выражения 2.48 к условиям зарядки, получаем:

$$\tau_{зар.} = -\frac{C}{a(A-B)} \cdot \ln \left(1 - \frac{L_2 \ln \frac{R}{R_{нэ}} (A-B)(R^2 - R_{нэ}^2)}{2c'_2 C (T'_1 - T_2)} \right), \quad (4.27)$$

где c'_2 - теплоемкость ТАМ в состоянии расплава;

T'_1 - температура поверхности нагревательного элемента;

T_2 - температура плавления ТАМ;

A, B, C - постоянные, описываемые уравнениями:

$$A = \frac{(T'_1 - T_2)^2}{\ln^2 \frac{R}{R_{нэ}}} \left(\frac{1}{R_{нэ}} - \frac{1}{R} \right); \quad (4.28)$$

$$B = \frac{(T'_1 - T_2)}{\ln^2 \frac{R}{R_{нэ}}} \left(T'_1 \left(\frac{1}{R_0} \ln \frac{R_{нэ}}{R} + \frac{1}{R_{нэ}} - \frac{1}{R} \right) + T_2 \left(\frac{1}{R} \ln \frac{R}{R_{нэ}} - \frac{1}{R_{нэ}} + \frac{1}{R} \right) \right). \quad (4.29)$$

$$C = \frac{1}{\ln^2 \frac{R}{R_{нэ}}} \left(T_1^2 \left(R_{нэ} \left(\ln \frac{R}{R_{нэ}} + 1 \right)^2 + R_{нэ} - 2R \right) + 2T'_1 \cdot T_2 \left(\ln \frac{R_{нэ}}{R} (R + R_{нэ}) - 2R_{нэ} + 2R \right) + \right. \\ \left. + T_2^2 \left(-R \left(\ln \frac{R}{R_{нэ}} - 1 \right)^2 + 2R_{нэ} - R \right) \right). \quad (4.30)$$

16. Произведем расчет времени зарядки аккумулятора. Расчет основан на выводах раздела 2. При преобразовании выражения 2.48 к условиям зарядки, получаем:

$$\tau_{\text{зар.}} = -\frac{C}{a(A-B)} \cdot \ln \left(1 - \frac{L_2 \ln \frac{R}{R_0} (A-B)(R^2 - R_0^2)}{2c_2 C (T_2 - T_1)} \right). \quad (4.31)$$

где c_2 - теплоемкость ТАМ в твердом состоянии;

T_1 - температура поверхности теплообменной трубки;

A, B, C - постоянные, описываемые уравнениями:

$$A = \frac{(T_2 - T_1)^2}{\ln^2 \frac{R}{R_0}} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right); \quad (4.32)$$

$$B = \frac{(T_2 - T_1)}{\ln^2 \frac{R}{R_0}} \left(T_1 \left(\frac{1}{R_0} \ln \frac{R_0}{R} + \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R} \right) + T_2 \left(\frac{1}{R} \ln \frac{R}{R_0} - \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R} \right) \right). \quad (4.33)$$

$$C = \frac{1}{\ln^2 \frac{R}{R_0}} \left(T_1^2 \left(R_0 \left(\ln \frac{R}{R_0} + 1 \right)^2 + R_0 - 2R \right) + 2T_1 T_2 \left(\ln \frac{R_0}{R} (R + R_0) - 2R_0 + 2R \right) + \right. \\ \left. + T_2^2 \left(-R \left(\ln \frac{R}{R_0} - 1 \right)^2 + 2R_0 - R \right) \right). \quad (4.34)$$

17. Рассчитаем диаметры трубопроводов d_m для подвода и отвода теплоносителя в трубную решетку теплоаккумулятора

$$d_m = \sqrt{\frac{4G}{\pi\rho_1\omega_1}}, \quad (4.35)$$

где ρ_1 - плотность теплоносителя;

ω_1 - скорость теплоносителя в трубопроводе для подвода и отвода теплоносителя в трубную решетку теплоаккумулятора.

Таким образом, на основании приведенной методики можно рассчитать оптимальные конструктивные характеристики фазопереходного аккумулятора тепловой энергии, обеспечивающие соблюдение заданных параметров.

4.3 Экономический анализ и расчет показателей экономической эффективности внедрения АТФП в работу систем теплоснабжения

4.3.1 Расчет затрат на генерацию тепловой энергии для систем с АТФП и без него

4.3.1.1 Работа АТФП в системах с электрической генерацией теплоты

Рассмотрим электрическую теплогенерирующую установку с установленной мощностью 1 МВт. Для работы установки в пиковые периоды при расчетных температурах наружного воздуха (-22°C для г. Киев) необходимо увеличить мощность установки для создания избытка теплоты (с учетом теплопотерь от аккумулятора) аккумулируемого в АТФП и используемого в периоды выключения установки. Пиковый период длится 3 ч, при этом саккумулировать энергию на 3ч необходимо за 8 ч, тогда увеличение мощности котельной составит $3 \text{ ч} \cdot 1 \text{ МВт} \cdot 1,03/8 \text{ ч} = 0,386 \text{ МВт}$.

При средней отопительной температуре $-0,1^{\circ}\text{C}$ для г. Киев отопительная мощность установки без АТФП снижается до 479 кВт, а для установки с АТФП уменьшается период работы на максимальной мощности. При такой температуре суточное потребление теплоты абонентом составит $0,479 \text{ МВт} \cdot 24 \text{ ч} \cdot 3600 \text{ с} = 41,4 \text{ ГДж}$, при этом установка с АТФП в ночной период провала электропотребления генерирует $1,386 \text{ МВт} \cdot 7 \text{ ч} \cdot 3600 \text{ с} = 34,9 \text{ ГДж}$. Таким

образом, установке с аккумулятором необходимо дополнительно $(41,4 \cdot 10^9 - 34,9 \cdot 10^9) / (1,386 \text{ МВт} \cdot 1 \text{ ч} \cdot 3600 \text{ с}) = 1,3 \text{ ч}$ для покрытия суточных теплопотерь потребителя.

Учитывая вышеизложенную информацию, произведем расчет затрат на электрическую энергию работы генератора теплоты при средней температуре за отопительный период по тарифам установленным согласно постановления КМУ от 15.08.2005 №175:

- стоимость потребленной энергии для теплогенерирующей установки без аккумулятора теплоты

$$\Pi_1 = 24 \text{ ч} \cdot 479 \text{ кВт} \cdot 1,1182 \text{ грн/кВт} \cdot \text{ч} = 12\,854,83 \text{ грн/сут.}$$

- стоимость потребленной энергии для теплогенерирующей установки с аккумулятором теплоты для трехзонной тарификации

$$\Pi_2 = 7 \text{ ч} \cdot 1386 \text{ кВт} \cdot 0,35 \cdot 1,1182 \text{ грн/кВт} \cdot \text{ч} + 1,3 \text{ ч} \cdot 1386 \text{ кВт} \cdot 1,02 \cdot 1,1182 \text{ грн/кВт} \cdot \text{ч} = 5852,14 \text{ грн/сут.}$$

Следовательно, снижение затрат на энергию при установке в систему аккумулятора составит 54,5%.

4.3.1.2 Работа АТФП в системах с котлами на органическом топливе.

Для изучения возможности установки АТФП в схему теплогенерирующей установки на органическом топливе, рассмотрим установку с установленной мощностью котлоагрегатов 1 МВт. Учитывая требования СНиП «Котельные установки» в такой котельной необходимо установить как минимум два котла по 500 кВт.

При средней отопительной температуре $-0,1^\circ\text{C}$ для г.Киев полная мощность установки без АТФП снижается до 479 кВт. При этом в работе остается только один агрегат, работающий на 95,8% своей мощности. Второй котел стоит в «ожидании запроса». В таких условиях целесообразно рассмотреть работу простаивающего котлоагрегата на уровне мощности 40% при аккумуляции выработанной им энергии в АТФП.

На основании результатов исследований научной группы фирмы

Viessmann характеристик работы котлов Vitomax [62], представленных на рис. 4.10, можно отметить, что КПД котлоагрегата при уровне работы 40% составляет 95% против КПД 91,5% на уровне мощности 100%.

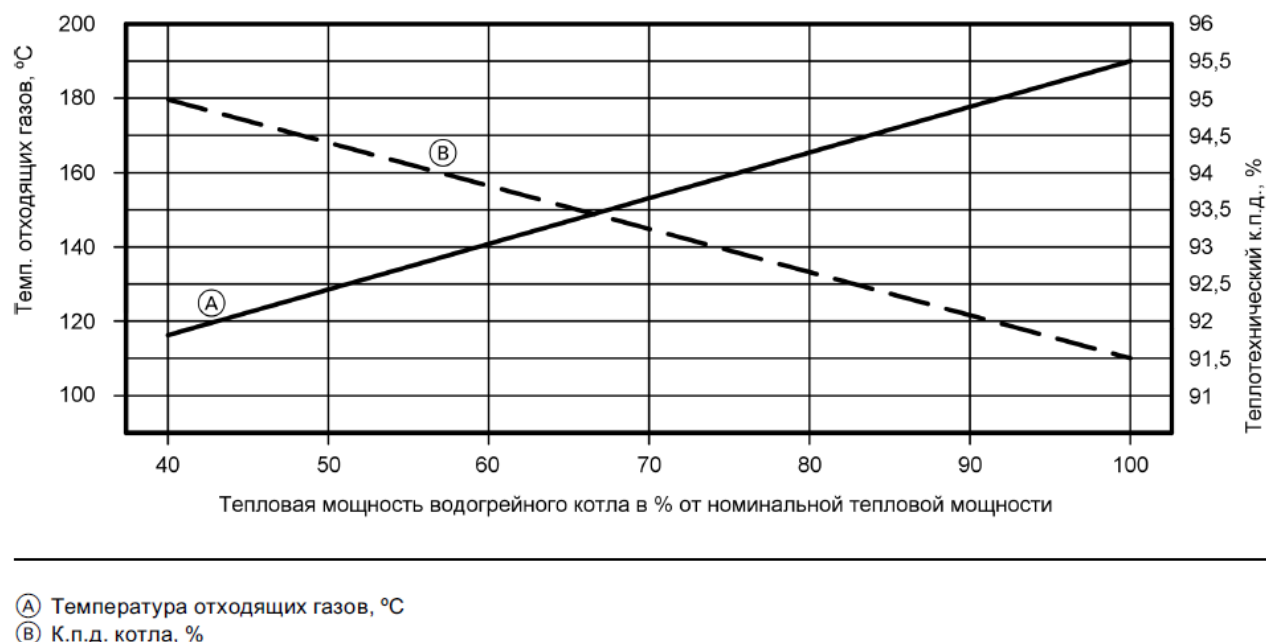


Рис. 4.10. Показатели работы котлоагрегата Vitomax при различной степени загрузки.

Тепловая мощность второго котлоагрегата на уровне 40% составит $500 \text{ кВт} \cdot 0,4 = 200 \text{ кВт}$. При этом его тепловая нагрузка будет равна $200 \text{ кВт} \cdot 0,95 = 190 \text{ кВт}$. Величина отпущенной тепловой энергии первым котлом в установленных условиях составит $479 \text{ кВт} \cdot 0,915 = 438 \text{ кВт}$. Следовательно, второму котлу необходимо $438 \text{ кВт} \cdot 3600 \text{ с} / 190 \text{ кВт} = 8299 \text{ с}$ или 2 ч 18 мин для выработки с аккумуляцией часовой потребности абонента в тепловой энергии. Количество циклов зарядки-разрядки аккумулятора в сутки равно $24 \text{ ч} / (2,3 \text{ ч} + 1 \text{ ч}) = 7,25$ раз. Работа абонента от аккумулятора в течении суток составит 7,25 ч.

Учитывая вышеизложенную информацию, произведем расчет затрат на газообразное топливо при средней температуре за отопительный период по тарифам, установленным согласно постановления НКРЭ Украины от 31.03.2014 №352, №353:

- стоимость потребленной энергии для теплогенерирующей установки без аккумулятора теплоты:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= 24 \text{ ч} \cdot (0,438 \text{ МВт} \cdot 3600 \text{ с}) / (33,1 \text{ МДж/м}^3 \cdot 0,915) \cdot 5324,64 \text{ грн/тыс.м}^3 = \\ &= 1250,3 \text{ м}^3/\text{сут} \cdot 5324,64 \text{ грн/тыс.м}^3 = 6657,4 \text{ грн/сут.} \end{aligned}$$

- стоимость потребленной энергии для теплогенерирующей установки с аккумулятором теплоты:

$$\begin{aligned} \Pi_2 &= (24 \text{ ч} - 7,25 \text{ ч}) \cdot ((0,438 \text{ МВт} \cdot 3600 \text{ с}) / (33,1 \text{ МДж/м}^3 \cdot 0,915) + (0,190 \text{ МВт} \cdot 3600 \text{ с}) / \\ &/ (33,1 \text{ МДж/м}^3 \cdot 0,95)) \cdot 5324,64 \text{ грн/тыс.м}^3 = 1236,7 \text{ м}^3/\text{сут} \cdot 5324,64 \text{ грн/тыс.м}^3 = \\ &= 6585 \text{ грн/сут.} \end{aligned}$$

Снижение расхода топлива за счет предложенного мероприятия равно $\Pi_1 - \Pi_2 = 1250,3 \text{ м}^3/\text{сут} - 1236,7 \text{ м}^3/\text{сут} = 13,6 \text{ м}^3/\text{сут}$ для 1МВт установленной мощности теплогенератора. При этом увеличение общего КПД теплогенерирующей установки составит 1,1%.

При установке АТФП в тепловые схемы с твердотопливными котлоагрегатами эффект может быть увеличен, т.к. будут исключены затраты на поддержание горения при простое котлоагрегата. На время работы от аккумулятора генератор останавливается.

Наряду с прямыми уменьшениями затрат органического топлива установка АТФП ведет к уменьшению количества пусков котлоагрегата, сопровождающихся выбросом СО (недожог топлива), что положительно сказывается на экологической обстановке и долговечности оборудования.

4.3.2 Экономический анализ внедрения АТФП в схемы теплогенерирующих установок

При рассмотрении экономической эффективности АТФП в системах теплоснабжения акцент приводится на работу аккумулятора в системах с электрической генерацией теплоты с учетом работы генераторов в периоды времени, когда наблюдается провал в потреблении электрической энергии. Расчет работы АТФП с парафином марки Т-3 в качестве ТАМ в системах теплоснабжения с котлами на органическом топливе не рассматривается из-за

недостаточных теплофизических свойств аккумулирующего материала, что значительно сказывается на цене установки.

При включении аккумулятора в схему генерации теплоты с электрическим генератором количество отпускаемой тепловой энергии не меняется, изменяется лишь величина затрат на производство в части материальных затрат на электроэнергию. Сэкономленные средства могут быть отнесены к доходу. При этом дополнительных затрат на производство теплоты не предусматривается, так как аккумулятор не требует обслуживания при соблюдении требований к качеству теплоносителя.

Начальные данные для проведения оценки экономической эффективности внедрения АТФП в технологическую схему систем теплоснабжения с электрическими теплогенераторами сведены в таблицу 4.2.

Таблица 4.2

Начальные данные для проведения финансового анализа внедрения
аккумуляторов фазового перехода

№	Параметр	Показатель
1	2	3
1	Стоимость конструкции АТФП, тыс. грн.	22 067,4
2	Ориентировочный термин службы АТФП, год	20
3	Ликвидационная стоимость (на 0 год), тыс.грн.	7 790
4	Экономия средств при внедрении за 1год (на 0 год), тыс.грн.	1 317,9
5	Налог на прибыль, %	21
6	Уровень инфляции, %	12

Стоимость конструкции теплоаккумулятора фазового перехода для теплогенерирующей установки с установленной мощностью 1,386 МВт, работающей в период ночного провала электропотребления, составляет 22067,4 тыс.грн. Для заполнения аккумулятора используется парафин марки Т-3 массой 21,5 т стоимостью 456,9 тыс.грн., который после 5 лет эксплуатации подлежит замене и реализации по остаточной стоимости на первый год 319,8 тыс.грн. Необходимость в оборотном капитале, затрачиваемом на периодическое приобретение частей для аккумулятора, отсутствует. В конце

срока эксплуатации теплоаккумулятор может быть продан как лом, что принесет некоторый доход. Стоит учесть, что на момент внедрения цена реализации установки как лом составляет 7790 тыс. грн. Через 20 лет этот доход необходимо учесть с уровнем инфляции. Также уровень инфляции следует вкладывать в закупку и продажу парафина. Учитывая перечисленные условия, движение денежного капитала сводится в таблицу 4.3.

Таблица 4.3

Движение капитала при реализации проекта

Год	Изменение оборотного капитала, тыс.грн.	Покупка (продажа) АТФП, тыс.грн.	Движение денежного капитала, тыс.грн.	Год	Изменение оборотного капитала, тыс.грн.	Покупка (продажа) АТФП, тыс.грн.	Движение денежного капитала, тыс.грн.
1	2	3	4	5	6	7	8
0	-456,9	-22067,4	-22524,3	11	0	0	0
1	0	0	0	12	0	0	0
2	0	0	0	13	0	0	0
3	0	0	0	14	0	0	0
4	0	0	0	15	-670,02	0	-670,02
5	-215,73	0	-215,73	16	0	0	0
6	0	0	0	17	0	0	0
7	0	0	0	18	0	0	0
8	0	0	0	19	0	0	0
9	0	0	0	20	+2754,361	+67093,41	+69847,77
10	-380,19	0	-380,19				

Учитывая то, что отпуск тепловой энергии также как и экономия средств за счет внедрения АТФП являются постоянными величинами (учитывается только величина инфляции), а также что аккумулятор амортизируется в течение 20 лет (годовая амортизация составляет $22067,4/20$ тыс.грн.), определим величину налога на прибыль от реализации внедрения. Результаты сводим в таблицу 4.4.

Таблица 4.4

Налог на прибыль при реализации внедрения АТФП

Год	Экономия средств, тыс.грн.	Доп. затраты на производство тепловой энергии, тыс.грн.	Амортизация, тыс.грн.	Налогооблагаемая прибыль, тыс.грн.	Налог на прибыль, тыс.грн.
1	2	3	4	5	6
1	1317,9	0	1103,4	214,5	45,05
2	1476,05	0	1103,4	372,648	78,26
3	1653,17	0	1103,4	549,774	115,45

Продолжение таблицы 4.4

1	2	3	4	5	6
4	1851,55	0	1103,4	748,155	157,11
5	2073,74	0	1103,4	970,341	203,77
6	2322,59	0	1103,4	1219,19	256,03
7	2601,3	0	1103,4	1497,9	314,56
8	2913,46	0	1103,4	1810,06	380,11
9	3263,07	0	1103,4	2159,67	453,53
10	3654,64	0	1103,4	2551,24	535,76
11	4093,2	0	1103,4	2989,8	627,86
12	4584,38	0	1103,4	3480,98	731,01
13	5134,51	0	1103,4	4031,11	846,53
14	5750,65	0	1103,4	4647,25	975,92
15	6440,73	0	1103,4	5337,33	1120,84
16	7213,61	0	1103,4	6110,21	1283,14
17	8079,25	0	1103,4	6975,85	1464,93
18	9048,76	0	1103,4	7945,36	1668,52
19	10134,6	0	1103,4	9031,21	1896,55
20	11350,8	0	1103,4	10247,4	2151,95

Вычитая из величины сэкономленных средств дополнительные затраты на производство тепловой энергии и налог на прибыль, получаем поток платежей от работы аккумулятора. Результаты сводим в таблицу 4.5.

Таблица 4.5

Поток платежей от работы аккумулятора.

Год	Экономия средств, тыс.грн.	Доп. затраты на производство тепловой энергии, тыс.грн.	Налог на прибыль, тыс.грн.	Поток платежей от работы аккумулятора, тыс.грн.
1	2	3	4	5
1	1317,9	0	45,05	1272,85
2	1476,05	0	78,26	1397,79
3	1653,17	0	115,45	1537,72
4	1851,55	0	157,11	1694,44
5	2073,74	0	203,77	1869,97
6	2322,59	0	256,03	2066,56
7	2601,3	0	314,56	2286,74
8	2913,46	0	380,11	2533,35
9	3263,07	0	453,53	2809,54
10	3654,64	0	535,76	3118,88
11	4093,2	0	627,86	3465,34
12	4584,38	0	731,01	3853,37
13	5134,51	0	846,53	4287,98
14	5750,65	0	975,92	4774,73
15	6440,73	0	1120,84	5319,89
16	7213,61	0	1283,14	5930,47
17	8079,25	0	1464,93	6614,32
18	9048,76	0	1668,52	7380,24

Продолжение таблицы 4.5

19	10134,6	0	1896,55	8238,05
20	11350,8	0	2151,95	9198,85

Суммируя движение денежного капитала в таблице 4.3 и поток платежей от работы аккумулятора в таблице 4.5, получаем общее движение средств от внедрения теплоаккумулятора в схему генерации теплоты с электрическими генераторами. Результаты сводим в таблицу 4.6.

Таблица 4.6

Движение капитала при реализации проекта

Год	Движение денежного капитала, тыс.грн.	Поток платежей от работы ак-ра, тыс.грн.	Поток платежей всего с учетом проекта, тыс.грн.	Год	Движение денежного капитала, тыс.грн.	Поток платежей от работы ак-ра, тыс.грн.	Поток платежей всего с учетом проекта, тыс.грн.
1	4	2	3	5	8	6	7
0	-22524,3	0	-22524,3	11	0	3465,34	3465,34
1	0	1272,85	1272,85	12	0	3853,37	3853,37
2	0	1397,79	1397,79	13	0	4287,98	4287,98
3	0	1537,72	1537,72	14	0	4774,73	4774,73
4	0	1694,44	1694,44	15	-670,02	5319,89	4649,87
5	-215,73	1869,97	1654,24	16	0	5930,47	5930,47
6	0	2066,56	2066,56	17	0	6614,32	6614,32
7	0	2286,74	2286,74	18	0	7380,24	7380,24
8	0	2533,35	2533,35	19	0	8238,05	8238,05
9	0	2809,54	2809,54	20	+69847,8	9198,85	79046,6
10	-380,19	3118,88	2738,69				

Используя приведенную методику, производится экономический анализ внедрения аккумуляторов в работу систем теплоснабжения с котлами на органическом топливе.

4.3.3 Определение эффективности внедрения АТФП в работу систем теплоснабжения

Эффективность внедрения характеризуется следующими показателями:

- чистый приведенный доход (ЧПД) определяется по формуле

$$\text{ЧПД} = \sum_{t=0}^T \frac{P_t}{(1+d)^t}, \quad (4.36)$$

где t - год реализации проекта;

P_t - поток платежей соответствующего года;

d - норма дисконтирования ($d=10\%$).

- внутренняя норма доходности (ВНД) определяется функцией:

$$\sum_{t=0}^T \frac{P_t}{(1+d^*)^t} = 0, \quad (4.37)$$

где d^* - внутренняя норма доходности.

- срок окупаемости (СО) определяется по формуле:

$$\text{СО} = \frac{KV_t}{P_t^{\text{ср.г.}}}, \quad (4.38)$$

где KV_t - первичные инвестиции;

$P_t^{\text{ср.г.}}$ - среднегодовая сумма денежного потока проекта.

- рентабельность (R) определяется по формуле:

$$R = 100\% + \frac{\text{ЧПД} \cdot 100\%}{KV_t} \quad (4.39)$$

Результаты расчета показателей эффективности сводим в таблицу 4.7.

Таблица 4.7

Показатели экономической эффективности внедрения АТФП в работу систем теплоснабжения

№	Показатель	Значение показателя	
		для схем с электрическими теплогенераторами	для схем с теплогенераторами на газовом топливе
1	2	3	4
1	Чистый приведенный доход, тыс.грн	11975,38	83,3
2	Внутренняя норма доходности, %	13,7	10,27
3	Срок окупаемости, год	17,7	46
4	Рентабельность, %	153,17	114,23

4.4 Выводы по четвертому разделу

1. 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.
2. Для генераторов теплоты на органическом топливе предложены варианты их работы с АТФП, позволяющие повысить общий КПД выработки теплоты, при этом снизить выбросы вредных веществ за счет рационализации процесса горения в переходных режимах работы теплогенерирующих установок.
3. Предложены варианты расположения аккумуляторов теплоты при центральном и децентрализованном теплоснабжении.
4. На основании результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика теплового и конструктивного расчета натурной модели фазопереходного аккумулятора тепловой энергии.
5. Произведен 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. ЧПД проекта внедрения АТФП для котельной с электрическими котлоагрегатами установленной мощностью 1,4 МВт составляет 11975,38 тыс.грн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных и аналитических исследований теоретически и экспериментально обосновано и разработано решение повышения эффективности работы систем теплоснабжения за счет использования фазопереходного аккумулятора теплоты.

По результатам исследований получены следующие научные и практические выводы:

1. На основании аналитических исследований в области аккумулирования тепловой энергии установлено, что наиболее перспективным направлением развития технологии аккумулирования 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 ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский – М. : Наука, 1971. – 283с.
2. Аллонкль. Р. Исследование теплового аккумулятора со скрытой теплотой в периодическом режиме. Применение к материалу, заключенному в оболочку / Р. Аллонкль // *Revue Generale de Thermique*. - 1983. - Т. 22, № 254. - С. 161-167.
3. Андреев, Е. И. Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах / Е.И. Андреев. - Л.: Энергоатомиздат, 1985. - 192с.
4. Ахназарова С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии: учебн. пособие для химико – технологических вузов / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафаров. – М. : Высш. школа, 1978 – 319с.
5. Ашмарин И. П. Быстрые методы статистической обработки экспериментальных данных / И.П. Ашмарин, В.А. Абрамов, Н.Н. Васильев. – М. : Статистика, 1981. – 77с.
6. Бабаев Б.Д. Сравнительные характеристики различных типов аккумуляторов тепла, перспективные направления разработок новых методов и устройств для аккумулирования тепловой энергии / материалы VI Школы молодых ученых им. Э.Э. Шпильрайна, «Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов» - Махачкала – 2013 – С. 125-137.
7. Бекман Г., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии: Перевод с англ. В. Я. Сидорова, Е. В. Сидорова. Под ред. В. М. Бродянского. – М.: Мир, 1987. – 272с.
8. Богословский, В. Н. Расчет аккумуляторов тепла с фазовым переходом в элементах канонической формы / В. Н. Богословский, Э. Л. Лихтенштейн, Р.Р. Манасыпов // *Изв. вузов. Строительство и архитектура*. -1985. - № 12. - С. 78-79.

9. Бондарь А. Г. Планирование экспериментов при оптимизации процессов химической технологии (алгоритмы и примеры) : учебное пособие / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха, И. А. Потяженко. – К. : Вища школа, 1980 – 264 с.
10. Будаков Б.М., Соловьева Е.Н., Успенский А.Б. Разностный метод со сглаживанием коэффициентов для решения задачи Стефана. // Журнал вычисл. математики и матем. физики, т. 5, № 5, 1965. С. 828-840.
11. Бутузов, В. А. Анализ опыта разработки и эксплуатации гелиоустановок в Краснодарском крае / В. А. Бутузов // Энергетическая эффективность. - 2002. - № 34.-С. 54-61.
12. Быстров В.П. Теплоаккумуляторы с использованием фазового перехода / В.П.Быстров, А.В.Ливчак // Вопросы экономии теплоэнергетических ресурсов в системах вентиляции и теплоснабжения: сб. науч. трудов. - М.: Изд-во ЦНИИ-ЭПИО, 1984. - С. 75-90.
13. Вабищевич П.Н. Вычислительные методы в математической физике / Вабищевич П.Н., Головизнин В.М., Еленин Г.Г. и др. — М.: Изд-во Моск. университета, 1986.-150с.
14. Вабищевич П.Н. Численные методы решения задач со свободной границей. — М.: Изд-во Моск. университета, 1987. 164 с.
15. Васильев Ф.П. Разностный метод решения задач типа Стефана для квазилинейного параболического уравнения с разрывными коэффициентами. //Доклады АН СССР, 1964, т. 157, № 6. С. 1280-1283.
16. Врине, Е. Исследование установки, работающей в периодическом режиме для аккумуляирования тепла скрытой теплотой / Е. Врине // Revue Generale deThermique. -1983. - Т. 22, № 254. - С. 183-188.
17. Госнадзор за ядерной безопасностью будет усилен / Информационно-аналитический бюллетень КМУ – опубл. 14.11.2013г. (<http://ru.info-kmu.com.ua/2013-11-14-000000pm/article/16904131.html>)
18. Гнідий М.В. Вихідні положення Енергетичної стратегії України до 2030 р у сфері енерговикористання, формування енергобалансів та імпоротно-експортної політики // Енергетична стратегія України. Погляд

- громадськості. За матеріалами міжнародної науково-технічної конференції “Основні положення Енергетичної стратегії України та науково-технічне забезпечення її реалізації”. – Київ: Енергетика та електрифікація, 2003.
19. Григорьев В.А. Разработка аккумуляторов теплоты с зернистым теплоносителем и методы их расчета на основе математического моделирования. Воронеж: Дис. ... кан. техн. наук 05.23.03 .-М.: РГБ, 2003, 147с.
 20. Гулиа Н. В. Накопители энергии. – М.,1980г.
 21. Данилюк И. И. О вариационном подходе к квазистационарной задачи Стефана. – В кн.: Дифференциальные и интегральные уравнения. Краевые задачи. – Тбилиси: Изд-во Тбил. ун-та, 1976, с. 75-89.
 22. Денисенко А. Крупнейшая незадействованная "электростанция" Украины / Зеркало недели. Украина, №49 – опубл. 27.12.2013г. (http://gazeta.zn.ua/energy_market/krupneyshaya-nezadeystvovannaya-elektrostantsiya-ukrainy-.html)
 23. Дерзский В.Г. Реформирование рынка в электроэнергетике Украины и ценообразование// //Электрические сети и системы.-2012.-№6.
 24. Дремов В.В. Вариационный и численный методы в теплофизике затвердевающего слитка. / Недопекин Ф.В. // ДонНАСА – 2007 – с.34-36.
 25. Заявка 61-272281. Состав, аккумулирующий тепло / Кагэяма Икудзо; заявитель Кагэяма Икудзо. - № 60-115111 // РЖ Химия. -1988. - № 6. - Л72 П
 26. Исаченко В.П. Теплопередача. / Осипова В.А., Сукомел А.С. // «Энергия», М. – 1975. 488с.
 27. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с. (88)
 28. Камимото, Абе Е. Теплообменники в накопителях скрытой тепловой энергии / Абе Е.Камимото, К. Канари // Solar Energy. - 1980.- Vol. 24. - P. 581-622
 29. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел. / Д. Егер // М.: Наука, 1964 - 488 с.

30. Коган Б. С. Теплоаккумулирующие составы на основе сульфата натрия/ Б. С. Коган, К. В. Ткачев, В.М. Шамриков // Сб. тр. ФГУП «УНИХИМ с 03». -2005. - № 72.
31. Котенко, Э. В. Разработка математической модели и методики расчета аккумуляторов теплоты на фазовом переходе: автореф. ... канд. техн. наук:05.14.05 / Котенко, Элина Владимировна - Воронеж, 1996.-15 с.
32. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп.— М.: ЮНИТИ- ДАНА, 2004. - 573 с.
33. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1970. — 659 с.
34. Ладыженская О.А. Краевые задачи математической физики. М.: Наука, 1973. 408с.
35. Левенберг, В. А. Аккумуляция тепла / В. А. Левенберг, М. П. Ткач, В. А. Гольстрем. - Киев: Техника, 1991. -112 с.
36. Лежнюк П. Д. Основи теорії планування експерименту. Лабораторний практикум / П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, Ю. В. Лук'яненко. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 167 с.
37. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов.-М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 535 с.
38. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М., «Энергия», 1966. 600 с.
39. Малярченко В. А. Анализ производства и потребления электроэнергии в объединенной энергосистеме Украины / И. Е. Щербак / Ползуновский Вестник. – 2013. - №4-2 – С. 125-130.
40. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. — Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1973. 352 с.
41. Миненко А. С. О вариационном методе изучения квазистационарной задачи Стефана. – В кн.: Уравнения в частных производных и задачи со свободной границей. – Киев: Наукова думка, 1983, с. 82-85.
42. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977. 344 с.

43. Муйрманов А.М. Задача Стефана. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1986. 240с.
44. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: «Высшая школа», 1975. – с.381-394.
45. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов П.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука, 1984. 288 с.
46. Патент 2088857 Российская Федерация. МПК6 F24H7/00 Теплоаккумулирующий элемент и тепловой аккумулятор на его основе / В.В. Булычев, Е.С. Емельянов, В.Н. Загрязкин, А.В. Маковецкий, В.С. Степанов; заявитель и патентообладатель В.В. Булычев, Е.С. Емельянов, В.Н. Загрязкин, А.В. Маковецкий, В.С. Степанов. - № 93036725/06; заявл. 16.07.93; опубл. 27.08.97, Бюл. №16. – 3
47. Планирование эксперимента в технике / под. ред. Б. П. Креденцера. – К. : Техника, 1984. – 200 с.
48. Попов Ф.С. Вычислительные методы инженерной геокриологии. — Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН. 1995. 136 с.
49. Правительство будет продолжать реализацию политики обеспечения энергетической независимости Украины / Информационно-аналитический бюллетень КМУ – опубл. 14.11.2013г. (<http://ru.info-kmu.com.ua/2013-11-13-000000pm/article/16888820.html>)
50. Резницкий Л.А. Тепловые аккумуляторы. - М.: Энергоатомиздат, 1996. - 91с.
51. Рожин, И.И. Численное моделирование переходных процессов в прикладных задачах теплопроводности с фазовыми превращениями: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Рожин, Игорь Иванович. - Якутск, 2005.-182 с.
52. Рубцов А. В. Факторы экономической эффективности развития солнечной энергетики // Строительство и техногенная безопасность – 2006 - № 15-16 – С. 175-181.
53. Самарский А.А. Введение в теорию разностных схем. — М.: Наука, 1971. 550 с.

54. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерных задач Стефана. // Журнал вычислит, математики и матем. физики, т. 5, № 5, 1965. С. 816-827.
55. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. — М.: Наука, 1978. 592 с.
56. Самарский А.А., Фрязинов И.В. О сходимости локально-одномерной схемы решения многомерного уравнения теплопроводности на неравномерных сетках. // Журнал вычислит, математики и матем. физики, т. 11, №3, 1971. С. 642-657.
57. Сластилова С.В. Разработка материалов для тепловых аккумуляторов с использованием теплоты фазового перехода: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06 / Сластилова Светлана Викторовна. - Москва, 2000.-177с.
58. Сотникова О.А., Турбин В.С., Григорьев В.А. Аккумуляторы теплоты теплогенерирующих установок систем теплоснабжения: Журнал «АВОК». - М.: -2003, №5.-С.40-44.
59. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов – М. : Машиностроение, 1981. – 283 с.
60. Спирин Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Конспект лекций (отдельные главы из учебника для ВУЗов) / В.В. Лавров – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004.-257с.
61. Такахаси Есио. Разработка специальных материалов - ключ к решению проблемы аккумуляирования скрытой тепловой энергии // Нахонно кагаку то гидзюцу. 1982. С. 61-67.
62. Технический паспорт Viessmann Vitomax 100 / Viessmann Werke GmbH&CO KG, №5 – 2005.
63. Тимакова, О. В. Автономная система солнечного отопления и горячего водоснабжения с использованием аккумуляирования на основе веществ с фазовым переходом. Москва: Дис. ... кан. техн. наук 05.14.04-М.: 2006, 126с.

64. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. Изд. 5-е. -М.: Наука, 1977. 736 с.
65. Токарь Б.З. Приближенный расчет температуры на выходе фазопереходного аккумулятора теплоты (режим разрядки) / Б.З. Токарь, Ю.С. Быковцов, Э.В. Котенко // Тр. II Рос.нац. конф. по теплообмену. – 1998 – Т.7 – с. 217-220
66. Турчак Л.И. Основы численных методов. М.: Наука, 1987. 320 с.
67. Умеренков, Е. В. Разработка аккумуляторов теплоты на фазовом переходе для систем теплоснабжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Умеренков Евгений Валериевич. - Курск, 2012.-196 с.
68. Филатов Л.Л. Расчет и экспериментальное исследование системы охлаждения с использованием тепла фазового перехода. / Рзаев А.И., Циклаури Г.В., Пахорский В.А., Кабанова Е.Б. // Теплоэнергетика, № 5, 1990. С. 72-74.
69. Цымбалюк, Ю. В. Исследование процессов с фазовыми переходами материалов с пластинчатыми инклюзивами в тепловых аккумуляторах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Цымбалюк Юлия Валерьевна. - Астрахань, 2006.- 15 с
70. Шабалина, С. Г. Теплоаккумулирующие свойства природных и синтетических восков / С. Г. Шабалина, Л. В. Боровская // Современные наукоемкие технологии.- 2010. - № 4 - С. 98-99
71. Шестак Я. Теория термического анализа. – М.: Мир, 1987. – 455с.
72. Шехтер Р.С. Вариационный метод в инженерных расчетах. Мир, 1971, Москва, 110с.
73. Шишкин Н.Д. Исследование параметров теплоносителя на выходе из фазопереходного аккумулятора теплоты. / Н.Д. Шишкин, Ю.В. Цымбалюк // Вестник АГТУ, 2005, №6(29) – с.254-258
74. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. — Новосибирск: Наука, 1967. 196 с.
75. Abhat, A. Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials / A. Abhat // Solar Energy. - 1983. - Vol. 30, № 4. - P. 313-332.

76. Alarło, Y. Active Heat Exchange System Development for Latent Heat Thermal Energy Storage: Topical report. NASA CR-159726 / Y. Alarło, R. Kosson, R. Haslett; Grumman Aerospace Corporation. - Bethpage, New York, 1980. - 60 p.
77. Benner M. Solar unterstützte Nahwärmeversorgung mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher / M. Bodmann, D. Mangold, J. Nußbicker, S. Raab, T. Schmidt, H. Seiwald // Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Stuttgart – 2003.
78. Birchenall, C. E. Heat Storage in Alloy Transformations: Final Report. NASA CR-165355 / C E. Birchenall, S. I. Gueceri, D. Farkas, M. B. Labdon, N. Nagaswami, B. Pregger. - NASA, 1981. -184 p.
79. Bulgrin, R. Thermal Properties Of Organic Latent Cold Storage Materials / R. Bulgrin, R. Naumann, H.-H. Emons, U. Holfter // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. -1991. - Vol. 37, № 1. - P. 155-169
80. Cabeza L. Storage techniques with Phase Change Materials / Hadorn J. C. // University of Lleida - Spain, 2005 - p. 107-114
81. Cohen, B. M. Active Heat Exchange System Development for Thermal Energy Storage / B. M. Cohen, R. E. Rice, P. E. Rowny // Development of a Phase-Change Thermal Storage System Using Modified Anhydrous Sodium Hydroxide for Solar Electric Power Generation. NASA CR-159465. - NASA, 1978. - 247 p.
82. Dr. Tamme R. Speicherung für Hochtemperaturwärme / Dr. R. Tamme, Dr. Th. Nunez, Dr. J. Götsche // Themen 2005: Wärme und Kälte – Energie aus Sonne und Erde - Berlin, Februar 2006 – S. 126-130
83. Fisch N. Wärmespeicher / N. Fisch, M. Bodmann, L. Kühl, Ch. Sätze, H. Schnürer // Institut für Gebäude- und Solartechnik. Technische Universität Braunschweig – Köln, 2005 – 129 S.
84. Kamimoto, A. Development of Latent Heat Storage Unit Using Form-Stable High Density Polythelene for Solar Total Energy System / A. Kamimoto et al. // Int. Soc. Energy Convers. Eng. Conf, 18. - New York, Orlando, 1983. - V. 4. - P. 113-119
85. Kenisarin M. Solar energy storage using phase change materials./ K. Mahkamov // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2007. - №11. – Pp. 1913-1965.

86. Kerslake, T. W. Analysis of thermal energy storage material with change-of-phase volumetric effects / M. B. Ibrahim / Journal of Solar Engineering, 115:1, 1993, pp. 22-31
87. Lane G.A. Solar Heat Storage: Latent heat materials. Volume I: Background and scientific principles / Reseach Associate. Central Research Inorganic Laboratory, The Dow Chemical Company – Boca Raton, Florida, 1983 – 238p.
88. LeFrois, R.T. Active Heat Exchange System Development for Latent Heat Thermal Energy Storage / R.T. LeFrois // Thermal Energy Storage: Fourth Annual Review Meeting. NASACP-2125. - Washington, D.C.: NASA, 1980. - P. 337-353
89. Li Gyong Hui. Исследование декагидрата сульфата натрия как аккумулятора тепла / Li Gyong Hui, Kim Sung Choi, Li Sung Hwan // Chem. And Chem Eng. 1990. -№5.-P. 25-27.
90. Luyt*, A.S. Thermal behaviour of low and high molecular weight paraffin waxes used for designing phase change materials./ I. Krupa // Thermochimica Acta. – 2008 - № 467. Pp. 117-120.
91. Nagan K. Thermal characteristics of Magnesium nitrate hexahydrate and magnesium chloride hexahydrate mixture as a phase change material for effective utilization of urban waste heat/ K. Ogawa, T. Mochida ,K. Simukara, K. Hayashi and H. Ogoshi // 9th International Conference on Thermal Energy Storage, Warsaw, POLAND – Warsaw, 2003 – P. 585-590
92. Nagan K. Performance of heat charge/discharge of Magnesium nitratehexahydrate and magnesium chloride hexahydrate mixture to a single vertical tube for a latent heat storage system/ K.Ogawa, T. Mochida ,K. Simukara, K. Hayashi and H. Ogoshi // 9th International Conference on Thermal Energy Storage, Warsaw, POLAND – Warsaw, 2003 – P. 591-596
93. Patent US 3596034 A. Heat storage / автор-М.Мекjean / патентообладатель- Hooker Chemical Corp / опубликовано 27.07.1971
94. Patent US 7913685 B2. Textile heat accumulator for utilization of solar energy. / Barbara Hildegard Pause / 29.03.2011

95. Patent US 8091613 B2. Thermal energy storage materials. / автор-
H.Bank, N.Soukhojak, K.Sehanobish, G.McLeod // патентообладатель-Dow
Global Technologies Llc / опубликовано 10.01.2012
96. Prigogine J., Glansdorf P., Variational Properties and Fluctuation Theory,
Physica, 31 p. 1242 (1965).
97. Rundel P. Speicher für die Energiewende / B.Meyer, I.Meyer, R.Dascner,
M.Jakuttis, M.Franke, S.Binder, A.Hornung // Fraunhofer-Institut für Umwelt-,
Sicherheits-, und Energietechnik UMSICHT – Sulzbach-Rosenberg, 2013.
98. Sanner B. IEA ECES Annex 12 - High Temperature Underground Thermal
Energy Storage// 9th International Conference on Thermal Energy Storage,
Warsaw, POLAND – Warsaw, 2003 – P. 709-713
99. Schossig P. Wärmespeicher für die Hausenergieversorgung / P.Schossig, Dr.
Ch.Dötsch, H.Drück, Dr. J.Göttsche, Dr. Er.Huenges, Dr. Fr.Kabus, Dr.
R.Tamme // Themen 2005: Wärme und Kälte –Energie aus Sonne und Erde -
Berlin, Februar 2006 – S. 120-125
100. Schroder, J. American Society of Mechanical Engineers publ. - 1974. - V. I. -P.
14.
101. Schwind H. Zur Auslegung von Latent warmespeichern mit Rippenrohren. /
D.Wolf // Klima-Kalte-Heizung, Dortmund, 1981, №9-4, s.171-176.
102. Stiles L. Underground Thermal Energy Storage in the United States /
A.Gitchell, D.Hulse-Hiller// 9th International Conference on Thermal Energy
Storage, Warsaw, POLAND – Warsaw, 2003 – P. 651-656
103. Streicher W. et al. Fortschrittliche Wärmespeicher / Bundesministerium für
Verkehr, Innovation und Technologie – Wien – 2007.
104. Zegers P. Overview of the thermal storage work within the energi R&D
Programme of the European community. Thermal energy storage, Lect. Course,
Ispra, June, 1981. P. 101-113.

Приложение А

Результаты экспериментального исследования температурного поля ТАМ при его кристаллизации

Таблица А.1

Показания наблюдений (усредненные за 5 опытов) за изменением температур теплоносителя и температурного поля ТАМ при его кристаллизации. Условия: скорость теплоносителя в теплообменной трубке 0,09м/с (ламинарный режим); удаление датчика от поверхности трубки – 1мм.

τ , с.	τ , мин.	T_2' , °C	T_1' , °C	$T(r, \tau)$, °C	τ , с.	τ , мин.	T_2' , °C	T_1' , °C	$T(r, \tau)$, °C
1	2	3	4	5	123	2,05	51,7	45,3	47,4
0	0,00	38,7	37,5	46,5	126	2,10	52,1	45,7	47,4
4	0,07	38,6	37,6	46,5	130	2,17	52,5	46,1	47,5
7	0,12	38,6	37,8	46,5	133	2,22	53	46,5	47,5
11	0,18	38,6	37,8	46,5	140	2,33	53,8	47,3	47,6
18	0,30	38,6	38	46,5	144	2,40	54,1	47,6	47,6
21	0,35	38,6	38,1	46,5	147	2,45	54,6	48	47,6
25	0,42	38,9	38,1	46,5	151	2,52	55	48,4	47,7
28	0,47	39,5	38,2	46,5	154	2,57	55,4	48,8	47,8
32	0,53	40,1	38,3	46,5	158	2,63	55,8	49,1	47,8
35	0,58	41	38,3	46,5	165	2,75	56,6	49,9	47,8
42	0,70	42,4	38,5	46,6	168	2,80	57	50,3	47,9
46	0,77	42,9	38,6	46,6	172	2,87	57,4	50,6	47,9
49	0,82	43,3	38,7	46,6	175	2,92	57,8	51	48
53	0,88	43,8	38,9	46,6	179	2,98	58,2	51,4	48
56	0,93	44,1	39,1	46,6	186	3,10	59	52,1	48,1
63	1,05	44,7	39,7	46,7	189	3,15	59,5	52,5	48,1
67	1,12	45	40	46,7	193	3,22	59,8	52,9	48,1
70	1,17	45,3	40,3	46,8	196	3,27	60,2	53,3	48,1
74	1,23	45,6	40,6	46,8	200	3,33	60,6	53,6	48,2
77	1,28	46,1	41	46,8	203	3,38	61	54	48,2
81	1,35	46,5	41,3	46,9	210	3,50	61,8	54,8	48,3
88	1,47	47,5	41,9	47	214	3,57	62,2	55,2	48,3
91	1,52	47,9	42,2	47	217	3,62	62,5	55,6	48,3
95	1,58	48,3	42,5	47	221	3,68	63	56	48,4
98	1,63	48,8	42,9	47,1	224	3,73	63,3	56,3	48,5
102	1,70	49,3	43,2	47,1	231	3,85	64,1	57,1	48,5
109	1,82	50,1	43,9	47,2	235	3,92	64,5	57,5	48,6
112	1,87	50,5	44,3	47,3	238	3,97	64,9	57,8	48,6
116	1,93	50,9	44,6	47,3	242	4,03	65,3	58,3	48,6
119	1,98	51,3	45	47,3					

1	2	3	4	5
245	4,08	65,6	58,6	48,6
249	4,15	66	59	48,7
252	4,20	66,3	59,4	48,7
256	4,27	66,8	59,8	48,8
259	4,32	67,1	60,1	48,8
263	4,38	67,5	60,5	48,9
266	4,43	67,8	60,9	48,9
270	4,50	68,2	61,3	49
273	4,55	68,6	61,6	49
277	4,62	69	62,1	49,1
280	4,67	69,3	62,4	49,1
284	4,73	69,7	62,8	49,2
287	4,78	70	63,1	49,3
291	4,85	70,4	63,5	49,3
294	4,90	70,8	64	49,3
298	4,97	71,1	64,3	49,5
301	5,02	71,5	64,6	49,5
305	5,08	71,8	65	49,5
308	5,13	72,3	65,5	49,6
312	5,20	72,6	65,8	49,7
315	5,25	73	66,1	49,8
319	5,32	73,3	66,5	49,8
322	5,37	73,6	66,9	50
326	5,43	74	67,3	50
329	5,48	74,3	67,6	50,1
333	5,55	74,7	68	50,1
336	5,60	75	68,3	50,3
340	5,67	75,3	68,7	50,3
343	5,72	75,7	69,1	50,5
347	5,78	76,1	69,4	50,5
350	5,83	76,5	69,8	50,6
354	5,90	76,8	70,1	50,7
357	5,95	77,1	70,5	50,8
361	6,02	77,5	70,8	51
364	6,07	77,8	71,1	51,1
368	6,13	78,1	71,5	51,1
371	6,18	78,5	71,8	51,2
375	6,25	78,8	72,2	51,3
378	6,30	79,1	72,5	51,5
382	6,37	79,5	72,9	51,6
385	6,42	79,8	73,2	51,7
389	6,48	80,1	73,5	51,8
392	6,53	80,5	73,9	51,9
396	6,60	80,8	74,2	52
399	6,65	81,1	74,6	52,1

1	2	3	4	5
403	6,72	81,5	74,9	52,3
406	6,77	81,8	75,2	52,5
410	6,83	82,1	75,6	52,6
413	6,88	82,1	75,9	52,8
417	6,95	81,7	76,2	52,9
420	7,00	81,3	76,5	53,1
424	7,07	81	76,9	53,2
427	7,12	80,8	77,2	53,3
431	7,18	80,6	77,5	53,5
434	7,23	80,5	77,7	53,6
438	7,30	80,4	77,9	53,7
441	7,35	80,4	78	53,8
445	7,42	80,4	78,1	53,9
448	7,47	80,4	78,2	54
452	7,53	80,5	78,3	54
455	7,58	80,4	78,3	54,1
459	7,65	80,3	78,3	54,1
462	7,70	80,3	78,3	54,2
466	7,77	80,1	78,4	54,3
469	7,82	80	78,4	54,3
473	7,88	79,9	78,4	54,4
476	7,93	79,8	78,5	54,5
480	8,00	79,6	78,5	54,5
483	8,05	79,5	78,5	54,6
487	8,12	79,4	78,4	54,6
490	8,17	79,3	78,4	54,7
494	8,23	79,1	78,3	54,7
497	8,28	79,1	78,3	54,8
501	8,35	79	78,3	54,8
504	8,40	78,8	78,2	54,8
508	8,47	78,7	78,1	54,9
511	8,52	78,6	78,1	55
515	8,58	78,5	78	55
518	8,63	78,3	77,9	55
522	8,70	78,1	77,8	55
525	8,75	78	77,7	55,1
529	8,82	77,9	77,6	55,1
532	8,87	77,8	77,5	55,1
536	8,93	77,6	77,5	55,1
539	8,98	77,5	77,4	55,1
543	9,05	77,4	77,3	55,2
546	9,10	77,2	77,2	55,2
550	9,17	77,1	77,1	55,2
553	9,22	77	77	55,3
557	9,28	76,8	76,9	55,3

1	2	3	4	5
560	9,33	76,6	76,8	55,3
564	9,40	76,6	76,6	55,3
567	9,45	76,9	76,6	55,3
571	9,52	77,5	76,5	55,3
574	9,57	78,1	76,3	55,3
578	9,63	78,6	76,2	55,3
581	9,68	79,1	76,1	55,4
585	9,75	79,5	76,1	55,5
588	9,80	79,7	76,1	55,5
592	9,87	79,9	76,1	55,5
595	9,92	80,1	76,2	55,6
599	9,98	80,2	76,3	55,8
602	10,03	80,3	76,5	55,9
606	10,10	80,5	76,6	56
609	10,15	80,7	76,8	56,2
613	10,22	80,9	77	56,3
616	10,27	81,1	77,1	56,5
620	10,33	81,1	77,3	56,6
623	10,38	80,8	77,5	56,8
627	10,45	80,5	77,6	57
630	10,50	80,1	77,8	57,1
634	10,57	79,8	78	57,3
637	10,62	79,6	78,1	57,4
641	10,68	79,5	78,3	57,5
644	10,73	79,3	78,3	57,6
648	10,80	79,3	78,3	57,7
651	10,85	79,3	78,4	57,8
655	10,92	79,3	78,3	57,8
658	10,97	79,2	78,3	57,8
662	11,03	79,2	78,3	57,8
665	11,08	79,1	78,3	57,9
669	11,15	79	78,2	57,9
672	11,20	78,9	78,2	58
676	11,27	78,8	78,1	58
679	11,32	78,6	78,1	58
683	11,38	78,5	78,1	58
686	11,43	78,4	78	58
690	11,50	78,2	78	58
693	11,55	78,1	78	58
697	11,62	78	77,9	58
700	11,67	77,9	77,8	58
704	11,73	77,8	77,7	58
707	11,78	77,7	77,6	58
711	11,85	77,6	77,6	58
714	11,90	77,5	77,5	58

1	2	3	4	5
718	11,97	77,3	77,4	58
721	12,02	77,2	77,3	58
725	12,08	77,1	77,2	58
728	12,13	77	77,1	57,9
732	12,20	76,8	77	58
735	12,25	76,7	76,9	57,9
739	12,32	76,6	76,8	57,9
742	12,37	76,5	76,7	57,9
746	12,43	76,4	76,6	57,9
749	12,48	76,2	76,5	57,8
753	12,55	76,1	76,5	57,8
756	12,60	76	76,3	57,8
760	12,67	76,2	76,2	57,8
763	12,72	76,7	76,1	57,8
767	12,78	77,4	76	57,8
770	12,83	78	75,9	57,7
774	12,90	78,5	75,8	57,7
777	12,95	78,8	75,8	57,7
781	13,02	79,2	75,8	57,7
784	13,07	79,4	75,8	57,7
788	13,13	79,6	75,8	57,8
791	13,18	79,8	76	57,9
795	13,25	80	76,1	58
798	13,30	80,1	76,3	58,1
802	13,37	80,3	76,5	58,2
805	13,42	80,6	76,6	58,3
809	13,48	80,5	76,8	58,5
812	13,53	80,2	77	58,6
816	13,60	79,8	77,1	58,8
819	13,65	79,5	77,3	58,9
823	13,72	79,2	77,5	59,1
826	13,77	79	77,6	59,2
830	13,83	78,8	77,7	59,3
833	13,88	78,8	77,8	59,5
837	13,95	78,7	77,8	59,5
840	14,00	78,7	77,8	59,6
844	14,07	78,7	77,9	59,6
847	14,12	78,7	77,8	59,7
851	14,18	78,6	77,8	59,8
854	14,23	78,6	77,8	59,8
858	14,30	78,5	77,7	59,8
861	14,35	78,4	77,6	59,9
865	14,42	78,3	77,6	59,9
868	14,47	78,1	77,6	60
872	14,53	78	77,6	60

1	2	3	4	5
875	14,58	77,9	77,5	60
879	14,65	77,8	77,5	60,1
882	14,70	77,6	77,5	60,1
886	14,77	77,5	77,4	60,1
889	14,82	77,5	77,3	60,1
893	14,88	77,3	77,3	60,2
896	14,93	77,3	77,2	60,2
900	15,00	77,2	77,1	60,3
903	15,05	77,1	77	60,3
907	15,12	77	77	60,3
910	15,17	76,8	76,9	60,3
914	15,23	76,7	76,8	60,3
917	15,28	76,6	76,7	60,3
921	15,35	76,5	76,6	60,3
924	15,40	76,3	76,5	60,3
928	15,47	76,3	76,5	60,3
931	15,52	76,1	76,3	60,3
935	15,58	76	76,3	60,3
938	15,63	75,9	76,1	60,3
942	15,70	75,8	76,1	60,3
945	15,75	76	76	60,4
949	15,82	76,5	75,9	60,4
952	15,87	77,1	75,8	60,4
956	15,93	77,8	75,6	60,4
959	15,98	78,3	75,6	60,4
963	16,05	78,7	75,5	60,5
966	16,10	79	75,5	60,5
970	16,17	79,3	75,6	60,5
973	16,22	79,5	75,6	60,6
977	16,28	79,7	75,8	60,7
980	16,33	79,8	75,9	60,9
984	16,40	80	76	61
987	16,45	79,8	76,2	61,2
991	16,52	79,3	76,4	61,3
994	16,57	78,9	76,6	61,5
998	16,63	78,5	76,8	61,6
1001	16,68	78,3	77	61,8
1005	16,75	78,1	77,1	61,9
1008	16,80	78	77,1	62
1012	16,87	78	77,3	62,1
1015	16,92	78	77,3	62,1
1019	16,98	78	77,3	62,2
1022	17,03	78	77,2	62,3
1026	17,10	78	77,2	62,3
1029	17,15	78	77,1	62,3

1	2	3	4	5
1033	17,22	77,9	77,1	62,4
1036	17,27	77,8	77,1	62,5
1040	17,33	77,6	77	62,5
1043	17,38	77,5	77	62,5
1047	17,45	77,4	77	62,6
1050	17,50	77,3	77	62,6
1054	17,57	77,1	76,9	62,6
1057	17,62	77	76,8	62,7
1061	17,68	77	76,8	62,8
1064	17,73	76,8	76,8	62,8
1068	17,80	76,8	76,7	62,8
1071	17,85	76,6	76,6	62,9
1075	17,92	76,6	76,6	62,9
1078	17,97	76,5	76,5	63
1082	18,03	76,4	76,4	63
1085	18,08	76,3	76,3	63
1089	18,15	76,1	76,3	63
1092	18,20	76	76,2	63,1
1096	18,27	76	76,1	63,1
1099	18,32	75,8	76	63,1
1103	18,38	75,7	76	63,2
1106	18,43	75,6	75,9	63,3
1110	18,50	75,5	75,8	63,3
1113	18,55	75,4	75,7	63,3
1117	18,62	75,3	75,6	63,3
1120	18,67	75,1	75,5	63,3
1124	18,73	75	75,5	63,4
1127	18,78	75	75,3	63,4
1131	18,85	74,8	75,3	63,5
1134	18,90	74,7	75,2	63,5
1138	18,97	74,6	75,1	63,5
1141	19,02	74,5	75	63,5
1145	19,08	74,4	74,9	63,5
1148	19,13	74,3	74,8	63,5
1152	19,20	74,1	74,7	63,5
1155	19,25	74,1	74,6	63,5
1159	19,32	74	74,5	63,5
1162	19,37	73,8	74,4	63,6
1166	19,43	73,8	74,3	63,6
1169	19,48	73,6	74,2	63,6
1173	19,55	73,5	74,1	63,6
1176	19,60	73,5	74	63,6
1180	19,67	73,3	74	63,6
1183	19,72	73,2	73,8	63,7
1187	19,78	73,1	73,8	63,7

1	2	3	4	5
1190	19,83	73	73,6	63,7
1194	19,90	72,9	73,6	63,7
1197	19,95	72,8	73,5	63,8
1201	20,02	72,7	73,4	63,8
1204	20,07	72,6	73,3	63,8
1208	20,13	72,5	73,1	63,8
1211	20,18	72,4	73,1	63,8
1215	20,25	72,3	73	63,8
1218	20,30	72,2	72,9	63,8
1222	20,37	72,1	72,8	63,8
1225	20,42	72	72,7	63,9
1229	20,48	71,9	72,6	63,9
1232	20,53	71,8	72,5	63,9
1236	20,60	71,7	72,5	63,9
1239	20,65	71,6	72,4	63,9
1243	20,72	71,5	72,3	63,9
1246	20,77	71,5	72,2	64
1250	20,83	71,3	72,1	64
1253	20,88	71,3	72	64
1257	20,95	71,1	72	64
1260	21,00	71	71,8	64
1264	21,07	68,9	71,8	64
1267	21,12	64	71,7	64
1271	21,18	60,1	71,6	64
1274	21,23	57,3	71,5	64
1278	21,30	55	71,3	64
1281	21,35	53,2	71	63,9
1285	21,42	52,2	70,5	63,9
1288	21,47	52,3	69,9	63,8
1292	21,53	53	69,1	63,7
1295	21,58	53,8	68,1	63,6
1299	21,65	54,8	67,1	63,5
1302	21,70	55,6	66,1	63,3
1306	21,77	56,4	65,1	63,1
1309	21,82	57	64,1	63
1313	21,88	57,3	63,3	62,9
1316	21,93	57,3	62,6	62,8
1320	22,00	57,1	62	62,7
1323	22,05	56,8	61,4	62,6
1327	22,12	56,2	61	62,6
1330	22,17	55,5	60,6	62,5
1334	22,23	54,9	60,3	62,5
1337	22,28	54,2	60	62,4
1341	22,35	53,6	59,8	62,3
1344	22,40	53,1	59,5	62,3

1	2	3	4	5
1348	22,47	52,8	59,2	62,3
1351	22,52	52,5	58,9	62,2
1355	22,58	52,3	58,6	62,1
1358	22,63	52,1	58,2	62,1
1362	22,70	52,1	57,8	62,1
1365	22,75	52	57,5	62
1369	22,82	52	57,1	62
1372	22,87	52	56,8	61,9
1376	22,93	51,8	56,4	61,9
1379	22,98	51,8	56,1	61,8
1383	23,05	51,6	55,8	61,8
1386	23,10	51,5	55,5	61,8
1390	23,17	51,3	55,3	61,7
1393	23,22	51,2	55	61,6
1397	23,28	51	54,8	61,6
1400	23,33	50,8	54,6	61,6
1404	23,40	50,6	54,5	61,5
1407	23,45	50,5	54,3	61,5
1411	23,52	50,3	54,1	61,4
1414	23,57	50,1	53,9	61,4
1418	23,63	50	53,7	61,3
1421	23,68	50	53,5	61,3
1425	23,75	49,8	53,3	61,2
1428	23,80	49,7	53,2	61,2
1432	23,87	49,6	53	61,1
1435	23,92	49,5	52,9	61,1
1439	23,98	49,5	52,7	61
1442	24,03	49,4	52,6	61
1446	24,10	49,3	52,5	60,9
1449	24,15	49,3	52,3	60,9
1453	24,22	49,1	52,1	60,8
1456	24,27	49,1	52	60,8
1460	24,33	49	51,9	60,7
1463	24,38	48,9	51,8	60,7
1467	24,45	48,8	51,7	60,6
1470	24,50	48,8	51,6	60,5
1474	24,57	48,6	51,5	60,5
1477	24,62	48,6	51,3	60,5
1481	24,68	48,5	51,2	60,4
1484	24,73	48,5	51,1	60,3
1488	24,80	48,4	51	60,3
1491	24,85	48,3	50,9	60,3
1495	24,92	48,3	50,8	60,2
1498	24,97	48,2	50,8	60,1
1502	25,03	48,1	50,6	60,1

1	2	3	4	5
1505	25,08	48,1	50,6	60
1509	25,15	48,1	50,5	60
1512	25,20	48	50,4	60
1516	25,27	48	50,3	59,9
1519	25,32	47,9	50,3	59,9
1523	25,38	47,8	50,2	59,8
1526	25,43	47,8	50,1	59,8
1530	25,50	47,8	50	59,7
1533	25,55	47,7	50	59,6
1537	25,62	47,6	49,9	59,6
1540	25,67	47,6	49,8	59,6
1544	25,73	47,5	49,7	59,5
1547	25,78	47,5	49,6	59,5
1551	25,85	47,5	49,6	59,4
1554	25,90	47,4	49,5	59,3
1558	25,97	47,3	49,5	59,3
1561	26,02	47,3	49,4	59,3
1565	26,08	47,3	49,3	59,2
1568	26,13	47,2	49,3	59,1
1572	26,20	47,1	49,2	59,1
1575	26,25	47,1	49,1	59,1
1579	26,32	47,1	49,1	59
1582	26,37	47,1	49	59
1586	26,43	47	49	58,9
1589	26,48	47	48,9	58,8
1593	26,55	47	48,8	58,8
1596	26,60	46,9	48,8	58,8
1600	26,67	46,8	48,7	58,7
1603	26,72	46,8	48,7	58,6
1607	26,78	46,8	48,6	58,6
1610	26,83	46,7	48,6	58,6
1614	26,90	46,7	48,5	58,5
1617	26,95	46,6	48,5	58,5
1621	27,02	46,6	48,5	58,4
1624	27,07	46,6	48,4	58,3
1628	27,13	46,5	48,3	58,3
1631	27,18	46,5	48,3	58,3
1635	27,25	46,5	48,2	58,2
1638	27,30	46,5	48,1	58,1
1642	27,37	46,4	48,1	58,1
1645	27,42	46,3	48,1	58,1
1649	27,48	46,3	48	58
1652	27,53	46,3	48	58
1656	27,60	46,2	48	58
1659	27,65	46,2	47,9	57,9

1	2	3	4	5
1663	27,72	46,1	47,8	57,8
1666	27,77	46,1	47,8	57,8
1670	27,83	46,1	47,8	57,7
1673	27,88	46	47,7	57,7
1677	27,95	46	47,6	57,6
1680	28,00	46	47,6	57,6
1684	28,07	46	47,6	57,5
1687	28,12	45,9	47,5	57,5
1691	28,18	45,8	47,5	57,5
1694	28,23	45,8	47,5	57,4
1698	28,30	45,8	47,4	57,3
1701	28,35	45,7	47,3	57,3
1705	28,42	45,7	47,3	57,3
1708	28,47	45,6	47,3	57,2
1712	28,53	45,6	47,2	57,1
1715	28,58	45,6	47,1	57,1
1719	28,65	45,5	47,1	57,1
1722	28,70	45,5	47,1	57
1726	28,77	45,5	47	57
1729	28,82	45,5	47	56,9
1733	28,88	45,4	47	56,9
1736	28,93	45,3	47	56,8
1740	29,00	45,3	46,9	56,8
1743	29,05	45,3	46,8	56,7
1747	29,12	45,3	46,8	56,7
1750	29,17	45,2	46,8	56,6
1754	29,23	45,1	46,7	56,6
1757	29,28	45,1	46,7	56,6
1761	29,35	45,1	46,6	56,5
1764	29,40	45	46,6	56,5
1768	29,47	45	46,5	56,4
1771	29,52	45	46,5	56,4
1775	29,58	45	46,5	56,3
1778	29,63	44,9	46,4	56,3
1782	29,70	44,9	46,4	56,3
1785	29,75	44,8	46,3	56,2
1789	29,82	44,8	46,3	56,1
1792	29,87	44,8	46,3	56,1
1796	29,93	44,7	46,2	56,1
1799	29,98	44,7	46,2	56,1
1803	30,05	44,6	46,1	56
1806	30,10	44,6	46,1	56
1810	30,17	44,6	46,1	55,9
1813	30,22	44,6	46	55,9
1817	30,28	44,5	46	55,8

1	2	3	4	5
1820	30,33	44,5	46	55,8
1824	30,40	44,5	45,9	55,8
1827	30,45	44,4	45,8	55,7
1831	30,52	44,4	45,8	55,6
1834	30,57	44,3	45,8	55,6
1838	30,63	44,3	45,7	55,6
1841	30,68	44,3	45,7	55,5
1845	30,75	44,2	45,6	55,5
1848	30,80	44,2	45,6	55,5
1852	30,87	44,1	45,6	55,4
1855	30,92	44,1	45,5	55,3
1859	30,98	44,1	45,5	55,3
1862	31,03	44	45,5	55,3
1866	31,10	44	45,4	55,3
1869	31,15	44	45,3	55,2
1873	31,22	44	45,3	55,1
1876	31,27	43,9	45,3	55,1
1880	31,33	43,9	45,2	55,1
1883	31,38	43,8	45,2	55
1887	31,45	43,8	45,1	55
1890	31,50	43,8	45,1	55
1894	31,57	43,7	45,1	55
1897	31,62	43,7	45,1	54,9
1901	31,68	43,6	45	54,9
1904	31,73	43,6	45	54,8
1908	31,80	43,6	45	54,8
1911	31,85	43,6	44,9	54,8
1915	31,92	43,5	44,9	54,7
1918	31,97	43,5	44,8	54,6
1922	32,03	43,5	44,8	54,6
1925	32,08	43,4	44,8	54,6
1929	32,15	43,4	44,7	54,6
1932	32,20	43,3	44,7	54,5
1936	32,27	43,3	44,6	54,5
1939	32,32	43,3	44,6	54,5
1943	32,38	43,3	44,6	54,5
1946	32,43	43,2	44,5	54,4
1950	32,50	43,2	44,5	54,3
1953	32,55	43,1	44,5	54,3
1957	32,62	43,1	44,5	54,3
1960	32,67	43,1	44,4	54,3
1964	32,73	43	44,3	54,2
1967	32,78	43	44,3	54,1
1971	32,85	43	44,3	54,1
1974	32,90	43	44,3	54,1

1	2	3	4	5
1978	32,97	42,9	44,2	54,1
1981	33,02	42,9	44,2	54
1985	33,08	42,8	44,1	54
1988	33,13	42,8	44,1	54
1992	33,20	42,8	44,1	53,9
1995	33,25	42,8	44,1	53,8
1999	33,32	42,7	44	53,8
2002	33,37	42,6	44	53,8
2006	33,43	42,6	44	53,8
2009	33,48	42,6	43,9	53,7
2013	33,55	42,6	43,9	53,7
2016	33,60	42,5	43,8	53,6
2020	33,67	42,5	43,8	53,6
2023	33,72	42,5	43,8	53,6
2027	33,78	42,5	43,8	53,6
2030	33,83	42,4	43,7	53,5
2034	33,90	42,4	43,7	53,5
2037	33,95	42,3	43,6	53,5
2041	34,02	42,3	43,6	53,4
2044	34,07	42,3	43,6	53,4
2048	34,13	42,3	43,5	53,3
2051	34,18	42,2	43,5	53,3
2055	34,25	42,2	43,5	53,3
2058	34,30	42,1	43,5	53,3
2062	34,37	42,1	43,4	53,2
2065	34,42	42,1	43,3	53,2
2069	34,48	42,1	43,3	53,1
2072	34,53	42	43,3	53,1
2076	34,60	42	43,3	53,1
2079	34,65	42	43,2	53,1
2083	34,72	42	43,2	53,1
2086	34,77	42	43,1	53
2090	34,83	41,9	43,1	53
2093	34,88	41,8	43,1	53
2097	34,95	41,8	43,1	53
2100	35,00	41,8	43	52,9
2104	35,07	41,8	43	52,9
2107	35,12	41,7	43	52,9
2111	35,18	41,7	42,9	52,8
2114	35,23	41,7	42,9	52,8
2118	35,30	41,6	42,9	52,8
2121	35,35	41,6	42,8	52,8
2125	35,42	41,6	42,8	52,7
2128	35,47	41,6	42,8	52,7
2132	35,53	41,5	42,7	52,7

1	2	3	4	5
2135	35,58	41,5	42,7	52,6
2139	35,65	41,5	42,7	52,6
2142	35,70	41,5	42,6	52,6
2146	35,77	41,4	42,6	52,6
2149	35,82	41,4	42,6	52,6
2153	35,88	41,3	42,6	52,5
2156	35,93	41,3	42,5	52,5
2160	36,00	41,3	42,5	52,5
2163	36,05	41,3	42,5	52,5
2167	36,12	41,2	42,5	52,5
2170	36,17	41,2	42,5	52,5
2174	36,23	41,1	42,4	52,4
2177	36,28	41,1	42,4	52,4
2181	36,35	41,1	42,3	52,4
2184	36,40	41,1	42,3	52,3
2188	36,47	41	42,3	52,3
2191	36,52	41	42,3	52,3
2195	36,58	41	42,2	52,3
2198	36,63	41	42,2	52,3
2202	36,70	41	42,1	52,2
2205	36,75	40,9	42,1	52,2
2209	36,82	40,9	42,1	52,1
2212	36,87	40,8	42,1	52,1
2216	36,93	40,8	42,1	52,1
2219	36,98	40,8	42	52,1
2223	37,05	40,8	42	52,1
2226	37,10	40,8	42	52,1
2230	37,17	40,7	42	52
2233	37,22	40,7	41,9	52
2237	37,28	40,6	41,8	52
2240	37,33	40,6	41,8	52
2244	37,40	40,6	41,8	52
2247	37,45	40,6	41,8	52
2251	37,52	40,5	41,8	52
2254	37,57	40,5	41,7	52
2258	37,63	40,5	41,7	51,9
2261	37,68	40,5	41,6	51,9
2265	37,75	40,5	41,6	51,9
2268	37,80	40,4	41,6	51,9
2272	37,87	40,4	41,6	51,9
2275	37,92	40,4	41,5	51,8
2279	37,98	40,3	41,5	51,8
2282	38,03	40,3	41,5	51,8
2286	38,10	40,3	41,5	51,8
2289	38,15	40,3	41,5	51,8

1	2	3	4	5
2293	38,22	40,3	41,4	51,8
2296	38,27	40,2	41,4	51,8
2300	38,33	40,2	41,3	51,8
2303	38,38	40,1	41,3	51,8
2307	38,45	40,1	41,3	51,7
2310	38,50	40,1	41,3	51,7
2314	38,57	40,1	41,3	51,7
2317	38,62	40,1	41,2	51,7
2321	38,68	40	41,2	51,6
2324	38,73	40	41,1	51,6
2328	38,80	40	41,1	51,6
2331	38,85	40	41,1	51,6
2335	38,92	40	41,1	51,6
2338	38,97	39,9	41,1	51,6
2342	39,03	39,9	41	51,6
2345	39,08	39,8	41	51,5
2349	39,15	39,8	41	51,5
2352	39,20	39,8	41	51,5
2356	39,27	39,8	40,9	51,5
2359	39,32	39,8	40,9	51,5
2363	39,38	39,7	40,9	51,5
2366	39,43	39,7	40,8	51,4
2370	39,50	39,7	40,8	51,4
2373	39,55	39,6	40,8	51,4
2377	39,62	39,6	40,8	51,4
2380	39,67	39,6	40,8	51,3
2384	39,73	39,6	40,7	51,3
2387	39,78	39,6	40,7	51,3
2391	39,85	39,5	40,6	51,3
2394	39,90	39,5	40,6	51,3
2398	39,97	39,5	40,6	51,3
2401	40,02	39,5	40,6	51,3
2405	40,08	39,4	40,6	51,2
2408	40,13	39,4	40,5	51,2
2412	40,20	39,4	40,5	51,2
2415	40,25	39,3	40,5	51,2
2419	40,32	39,3	40,5	51,2
2422	40,37	39,3	40,4	51,2
2426	40,43	39,3	40,4	51,1
2429	40,48	39,3	40,4	51,1
2433	40,55	39,2	40,3	51,1
2436	40,60	39,2	40,3	51,1
2440	40,67	39,2	40,3	51,1
2443	40,72	39,1	40,3	51,1
2447	40,78	39,1	40,2	51,1

1	2	3	4	5
2450	40,83	39,1	40,2	51,1
2454	40,90	39,1	40,2	51,1
2457	40,95	39,1	40,2	51,1
2461	41,02	39	40,1	51
2464	41,07	39	40,1	51
2468	41,13	39	40,1	51
2471	41,18	39	40,1	51
2475	41,25	39	40,1	51
2478	41,30	38,9	40	51
2482	41,37	38,9	40	51
2485	41,42	38,9	40	50,9
2489	41,48	38,8	40	50,9
2492	41,53	38,8	39,9	50,9
2496	41,60	38,8	39,9	50,9
2499	41,65	38,8	39,9	50,8
2503	41,72	38,8	39,9	50,8
2506	41,77	38,7	39,8	50,8
2510	41,83	38,7	39,8	50,8
2513	41,88	38,7	39,8	50,8
2517	41,95	38,6	39,8	50,8
2520	42,00	38,6	39,8	50,8
2524	42,07	38,6	39,7	50,7
2527	42,12	38,6	39,7	50,7
2531	42,18	38,6	39,6	50,7
2534	42,23	38,5	39,6	50,6
2538	42,30	38,5	39,6	50,6
2541	42,35	38,5	39,6	50,6
2545	42,42	38,5	39,6	50,6
2548	42,47	38,5	39,5	50,6
2552	42,53	38,4	39,5	50,6
2555	42,58	38,4	39,5	50,6
2559	42,65	38,4	39,5	50,6
2562	42,70	38,3	39,5	50,6
2566	42,77	38,3	39,5	50,5
2569	42,82	38,3	39,4	50,5
2573	42,88	38,3	39,4	50,5
2576	42,93	38,3	39,4	50,5
2580	43,00	38,3	39,3	50,5
2583	43,05	38,2	39,3	50,5
2587	43,12	38,2	39,3	50,5
2590	43,17	38,2	39,3	50,5
2594	43,23	38,2	39,3	50,5
2597	43,28	38,1	39,2	50,4
2601	43,35	38,1	39,2	50,5
2604	43,40	38,1	39,1	50,4

1	2	3	4	5
2608	43,47	38,1	39,1	50,4
2611	43,52	38,1	39,1	50,4
2615	43,58	38,1	39,1	50,4
2618	43,63	38	39,1	50,4
2622	43,70	38	39,1	50,3
2625	43,75	38	39,1	50,3
2629	43,82	38	39	50,3
2632	43,87	38	39	50,3
2636	43,93	38	39	50,3
2639	43,98	37,9	39	50,3
2643	44,05	37,9	39	50,3
2646	44,10	37,8	38,9	50,3
2650	44,17	37,8	38,9	50,3
2653	44,22	37,8	38,9	50,3
2657	44,28	37,8	38,8	50,3
2660	44,33	37,8	38,8	50,3
2664	44,40	37,8	38,8	50,2
2667	44,45	37,8	38,8	50,2
2671	44,52	37,7	38,8	50,2
2674	44,57	37,7	38,8	50,2
2678	44,63	37,6	38,7	50,2
2681	44,68	37,6	38,7	50,2
2685	44,75	37,6	38,6	50,1
2688	44,80	37,6	38,6	50,1
2692	44,87	37,6	38,6	50,1
2695	44,92	37,6	38,6	50,1
2699	44,98	37,5	38,6	50,1
2702	45,03	37,5	38,6	50,1
2706	45,10	37,5	38,5	50,1
2709	45,15	37,5	38,5	50,1
2713	45,22	37,5	38,5	50,1
2716	45,27	37,5	38,5	50,1
2720	45,33	37,5	38,5	50,1
2723	45,38	37,5	38,5	50,1
2727	45,45	37,5	38,4	50
2730	45,50	37,4	38,4	50
2734	45,57	37,4	38,4	50
2737	45,62	37,4	38,4	50
2741	45,68	37,3	38,3	50
2744	45,73	37,3	38,3	50
2748	45,80	37,3	38,3	50
2751	45,85	37,3	38,3	50
2755	45,92	37,3	38,2	50
2758	45,97	37,3	38,2	50
2762	46,03	37,3	38,2	50

1	2	3	4	5
2765	46,08	37,2	38,2	50
2769	46,15	37,2	38,1	50
2772	46,20	37,2	38,1	50
2776	46,27	37,2	38,1	49,9
2779	46,32	37,1	38,1	49,9
2783	46,38	37,1	38,1	49,9
2786	46,43	37,1	38,1	49,9
2790	46,50	37,1	38,1	49,8
2793	46,55	37,1	38	49,9
2797	46,62	37,1	38	49,8
2800	46,67	37	38	49,8
2804	46,73	37	38	49,8
2807	46,78	37	38	49,8
2811	46,85	37	38	49,8
2814	46,90	37	37,9	49,8
2818	46,97	37	37,9	49,8
2821	47,02	36,9	37,8	49,8
2825	47,08	36,9	37,8	49,8
2828	47,13	36,9	37,8	49,8
2832	47,20	36,8	37,8	49,7
2835	47,25	36,8	37,8	49,7
2839	47,32	36,8	37,8	49,7
2842	47,37	36,8	37,8	49,7
2846	47,43	36,8	37,8	49,7
2849	47,48	36,8	37,7	49,6
2853	47,55	36,8	37,7	49,6
2856	47,60	36,7	37,7	49,6
2860	47,67	36,7	37,6	49,6
2863	47,72	36,7	37,6	49,6
2867	47,78	36,6	37,6	49,6
2870	47,83	36,6	37,6	49,6
2874	47,90	36,6	37,6	49,6
2877	47,95	36,6	37,6	49,6
2881	48,02	36,6	37,6	49,6
2884	48,07	36,6	37,5	49,6
2888	48,13	36,6	37,5	49,6
2891	48,18	36,6	37,5	49,5
2895	48,25	36,5	37,5	49,5
2898	48,30	36,5	37,5	49,5
2902	48,37	36,5	37,5	49,5
2905	48,42	36,5	37,5	49,5
2909	48,48	36,5	37,4	49,5
2912	48,53	36,5	37,4	49,5
2916	48,60	36,5	37,4	49,5
2919	48,65	36,4	37,4	49,4

1	2	3	4	5
2923	48,72	36,4	37,3	49,4
2926	48,77	36,4	37,3	49,4
2930	48,83	36,3	37,3	49,4
2933	48,88	36,3	37,3	49,4
2937	48,95	36,3	37,3	49,4
2940	49,00	36,3	37,3	49,3
2944	49,07	36,3	37,2	49,3
2947	49,12	36,3	37,2	49,3
2951	49,18	36,3	37,2	49,3
2954	49,23	36,2	37,1	49,3
2958	49,30	36,2	37,1	49,3
2961	49,35	36,2	37,1	49,3
2965	49,42	36,2	37,1	49,3
2968	49,47	36,1	37,1	49,2
2972	49,53	36,1	37,1	49,2
2975	49,58	36,1	37,1	49,2
2979	49,65	36,1	37	49,2
2982	49,70	36,1	37	49,2
2986	49,77	36,1	37	49,1
2989	49,82	36,1	37	49,1
2993	49,88	36,1	37	49,1
2996	49,93	36,1	37	49,1
3000	50,00	36	37	49,1
3003	50,05	36	37	49,1
3007	50,12	36	36,9	49,1
3010	50,17	36	36,9	49,1
3014	50,23	36	36,9	49,1
3017	50,28	36	36,8	49,1
3021	50,35	36	36,8	49
3024	50,40	36	36,8	49
3028	50,47	36	36,8	49
3031	50,52	35,9	36,8	49
3035	50,58	35,9	36,8	49
3038	50,63	35,9	36,8	49
3042	50,70	35,9	36,8	49
3045	50,75	35,8	36,8	49
3049	50,82	35,8	36,7	49
3052	50,87	35,8	36,7	49
3056	50,93	35,8	36,7	49
3059	50,98	35,8	36,7	49
3063	51,05	35,8	36,6	49
3066	51,10	35,8	36,6	49
3070	51,17	35,7	36,6	48,9
3073	51,22	35,7	36,6	48,9
3077	51,28	35,7	36,6	48,9

1	2	3	4	5
3080	51,33	35,7	36,5	48,9
3084	51,40	35,7	36,6	48,8
3087	51,45	35,6	36,5	48,8
3091	51,52	35,6	36,5	48,8
3094	51,57	35,6	36,5	48,8
3098	51,63	35,6	36,5	48,8
3101	51,68	35,6	36,5	48,8
3105	51,75	35,6	36,5	48,8
3108	51,80	35,6	36,5	48,8
3112	51,87	35,6	36,4	48,8
3115	51,92	35,5	36,4	48,8
3119	51,98	35,5	36,4	48,7
3122	52,03	35,5	36,4	48,8
3126	52,10	35,5	36,4	48,7
3129	52,15	35,5	36,3	48,7
3133	52,22	35,5	36,3	48,6
3136	52,27	35,5	36,3	48,6
3140	52,33	35,5	36,3	48,6
3143	52,38	35,5	36,3	48,6
3147	52,45	35,4	36,3	48,6
3150	52,50	35,4	36,3	48,6
3154	52,57	35,4	36,3	48,6
3157	52,62	35,4	36,2	48,6
3161	52,68	35,3	36,2	48,6
3164	52,73	35,3	36,2	48,6
3168	52,80	35,3	36,2	48,5
3171	52,85	35,3	36,2	48,5
3175	52,92	35,3	36,1	48,5
3178	52,97	35,3	36,1	48,5
3182	53,03	35,3	36,1	48,5
3185	53,08	35,3	36,1	48,5
3189	53,15	35,3	36,1	48,5
3192	53,20	35,2	36,1	48,5
3196	53,27	35,2	36,1	48,5
3199	53,32	35,2	36	48,5
3203	53,38	35,2	36,1	48,4
3206	53,43	35,1	36	48,4
3210	53,50	35,1	36	48,4
3213	53,55	35,1	36	48,4
3217	53,62	35,1	36	48,4
3220	53,67	35,1	36	48,4
3224	53,73	35,1	36	48,4
3227	53,78	35,1	36	48,4
3231	53,85	35,1	35,9	48,3
3234	53,90	35,1	35,9	48,3

1	2	3	4	5
3238	53,97	35	35,9	48,3
3241	54,02	35,1	35,9	48,3
3245	54,08	35	35,8	48,3
3248	54,13	35	35,8	48,3
3252	54,20	35	35,8	48,3
3255	54,25	35	35,8	48,3
3259	54,32	35	35,8	48,3
3262	54,37	35	35,8	48,3
3266	54,43	35	35,8	48,3
3269	54,48	35	35,8	48,3
3273	54,55	34,9	35,8	48,3
3276	54,60	34,9	35,7	48,3
3280	54,67	34,9	35,7	48,3
3283	54,72	34,9	35,7	48,3
3287	54,78	34,8	35,7	48,2
3290	54,83	34,8	35,6	48,2
3294	54,90	34,8	35,6	48,2
3297	54,95	34,8	35,6	48,2
3301	55,02	34,8	35,6	48,2
3304	55,07	34,8	35,6	48,2
3308	55,13	34,8	35,6	48,2
3311	55,18	34,8	35,6	48,2
3315	55,25	34,8	35,6	48,2
3318	55,30	34,8	35,6	48,1
3322	55,37	34,7	35,5	48,1
3325	55,42	34,7	35,5	48,1
3329	55,48	34,7	35,5	48,1
3332	55,53	34,7	35,5	48,1
3336	55,60	34,7	35,5	48,1
3339	55,65	34,6	35,5	48,1
3343	55,72	34,6	35,5	48,1
3346	55,77	34,6	35,5	48,1
3350	55,83	34,6	35,5	48,1
3353	55,88	34,6	35,5	48,1
3357	55,95	34,6	35,4	48,1
3360	56,00	34,6	35,4	48,1
3364	56,07	34,6	35,4	48,1
3367	56,12	34,6	35,4	48,1
3371	56,18	34,6	35,3	48
3374	56,23	34,5	35,3	48
3378	56,30	34,5	35,3	48,1
3381	56,35	34,5	35,3	48
3385	56,42	34,5	35,3	48
3388	56,47	34,5	35,3	48
3392	56,53	34,5	35,3	48

[illegible]

Таблица А.2

Показания наблюдений (усредненные за 5 опытов) за изменением температур теплоносителя и температурного поля ТАМ при его кристаллизации. Условия: скорость теплоносителя в теплообменной трубке 0,12м/с (переходной режим); удаление датчика от поверхности трубки – бмм.

τ , с.	τ , мин.	T_2' , °C	T_1' , °C	$T(r, \tau)$, °C
1	2	3	4	5
0	0,00	67,8	62,4	46,5
4	0,07	68,1	62,8	46,8
7	0,12	68,5	63,1	47
11	0,18	68,8	63,5	47,3
14	0,23	69,2	63,8	47,5
18	0,30	69,6	64,2	47,8
21	0,35	69,9	64,6	48
25	0,42	70,3	64,9	48,3
28	0,47	70,6	65,3	48,5
32	0,53	71	65,6	48,7
35	0,58	71,3	66	48,9
39	0,65	71,6	66,3	49,1
42	0,70	72	66,6	49,3
46	0,77	72,3	67	49,5
49	0,82	72,6	67,3	49,6
53	0,88	73	67,7	49,8
56	0,93	73,3	68	50
60	1,00	73,6	68,3	50,1
63	1,05	74	68,7	50,3
67	1,12	74,3	69	50,5
70	1,17	74,6	69,4	50,6
74	1,23	75	69,7	50,8
77	1,28	75,3	70	51
81	1,35	75,6	70,3	51,2
84	1,40	75,9	70,6	51,3
88	1,47	76,2	71	51,5
91	1,52	76,5	71,3	51,6
95	1,58	76,9	71,6	51,8
98	1,63	77,2	72	52
102	1,70	77,5	72,3	52,1
105	1,75	77,8	72,6	52,3
109	1,82	78,1	72,9	52,4
112	1,87	78,5	73,3	52,5
116	1,93	78,6	73,6	52,7
119	1,98	78,8	73,9	52,8

τ , с.	τ , мин.	T_2' , °C	T_1' , °C	$T(r, \tau)$, °C
1	2	3	4	5
123	2,05	78,8	74,2	52,9
126	2,10	78,9	74,5	53
130	2,17	78,9	74,8	53,1
133	2,22	79	75,1	53,3
137	2,28	79,1	75,4	53,3
140	2,33	79,2	75,6	53,4
144	2,40	79,3	75,9	53,5
147	2,45	79,3	76,1	53,6
151	2,52	79,4	76,3	53,6
154	2,57	79,5	76,5	53,7
158	2,63	79,5	76,7	53,8
161	2,68	79,5	76,9	53,9
165	2,75	79,5	77,1	53,9
168	2,80	79,5	77,2	54
172	2,87	79,5	77,4	54
175	2,92	79,5	77,5	54,1
179	2,98	79,5	77,6	54,1
182	3,03	79,4	77,6	54,2
186	3,10	79,4	77,8	54,2
189	3,15	79,3	77,8	54,3
193	3,22	79,3	77,9	54,3
196	3,27	79,3	78	54,3
200	3,33	79,2	78	54,4
203	3,38	79,1	78	54,5
207	3,45	79,1	78	54,5
210	3,50	79	78	54,5
214	3,57	79	78	54,6
217	3,62	78,9	78	54,6
221	3,68	78,8	78	54,6
224	3,73	78,7	77,9	54,7
228	3,80	78,6	77,9	54,7
231	3,85	78,5	77,8	54,8
235	3,92	78,5	77,8	54,8
238	3,97	78,3	77,7	54,9
242	4,03	78,2	77,6	54,9

1	2	3	4	5
245	4,08	78,1	77,6	55
249	4,15	78	77,5	55
252	4,20	77,9	77,5	55
256	4,27	77,8	77,3	55
259	4,32	77,7	77,3	55
263	4,38	77,6	77,1	55
266	4,43	77,5	77,1	55
270	4,50	77,3	77	55
273	4,55	77,2	76,8	55
277	4,62	77,1	76,8	55
280	4,67	77	76,6	55
284	4,73	76,9	76,5	55
287	4,78	76,8	76,5	55,1
291	4,85	76,6	76,3	55,1
294	4,90	76,5	76,2	55,2
298	4,97	76,4	76,1	55,3
301	5,02	76,3	76	55,3
305	5,08	76,2	75,8	55,3
308	5,13	76,2	75,8	55,3
312	5,20	76,4	75,6	55,3
315	5,25	76,6	75,5	55,3
319	5,32	76,7	75,4	55,2
322	5,37	76,8	75,3	55,3
326	5,43	77	75,2	55,3
329	5,48	77	75,1	55,2
333	5,55	77,1	75,1	55,3
336	5,60	77,3	75	55,3
340	5,67	77,4	75	55,3
343	5,72	77,5	75	55,3
347	5,78	77,7	75	55,3
350	5,83	77,9	75	55,3
354	5,90	78,1	75	55,3
357	5,95	78,3	75	55,3
361	6,02	78,5	75	55,3
364	6,07	78,6	75,1	55,3
368	6,13	78,8	75,1	55,4
371	6,18	79	75,2	55,4
375	6,25	79,2	75,3	55,5
378	6,30	79,3	75,4	55,5
382	6,37	79,2	75,5	55,6
385	6,42	79,2	75,6	55,7
389	6,48	79,1	75,8	55,8
392	6,53	79,1	75,9	55,9
396	6,60	79,1	76	56,1
399	6,65	79,1	76,1	56,2

1	2	3	4	5
403	6,72	79,1	76,2	56,3
406	6,77	79,1	76,3	56,5
410	6,83	79,1	76,5	56,6
413	6,88	79,1	76,5	56,8
417	6,95	79,1	76,6	56,9
420	7,00	79	76,6	57
424	7,07	79	76,7	57,1
427	7,12	79	76,8	57,3
431	7,18	78,9	76,9	57,5
434	7,23	78,8	77	57,6
438	7,30	78,8	77	57,7
441	7,35	78,8	77	57,9
445	7,42	78,7	77,1	58
448	7,47	78,6	77,1	58,1
452	7,53	78,6	77,1	58,3
455	7,58	78,5	77,1	58,5
459	7,65	78,5	77,1	58,6
462	7,70	78,4	77,1	58,8
466	7,77	78,3	77,1	59
469	7,82	78,2	77,1	59,1
473	7,88	78,1	77,1	59,3
476	7,93	78,1	77,1	59,5
480	8,00	78	77	59,6
483	8,05	77,9	77	59,7
487	8,12	77,8	77	59,8
490	8,17	77,7	76,9	60
494	8,23	77,6	76,9	60,1
497	8,28	77,5	76,8	60,1
501	8,35	77,5	76,8	60,2
504	8,40	77,3	76,7	60,2
508	8,47	77,3	76,6	60,3
511	8,52	77,1	76,6	60,3
515	8,58	77	76,5	60,4
518	8,63	77	76,4	60,4
522	8,70	76,8	76,3	60,5
525	8,75	76,8	76,3	60,5
529	8,82	76,6	76,1	60,5
532	8,87	76,5	76,1	60,5
536	8,93	76,4	76	60,6
539	8,98	76,3	75,9	60,6
543	9,05	76,2	75,8	60,7
546	9,10	76,1	75,7	60,8
550	9,17	76	75,6	61
553	9,22	75,8	75,5	61,1
557	9,28	75,7	75,3	61,1

1	2	3	4	5
560	9,33	75,6	75,3	61,3
564	9,40	75,5	75,1	61,4
567	9,45	75,4	75	61,5
571	9,52	75,3	74,9	61,6
574	9,57	75,1	74,8	61,7
578	9,63	75	74,7	61,8
581	9,68	74,9	74,6	61,9
585	9,75	74,8	74,5	62
588	9,80	74,6	74,4	62,1
592	9,87	74,6	74,2	62,1
595	9,92	74,5	74,1	62,2
599	9,98	74,3	74	62,2
602	10,03	74,2	73,9	62,3
606	10,10	74,1	73,8	62,3
609	10,15	74	73,7	62,4
613	10,22	73,8	73,6	62,4
616	10,27	73,7	73,5	62,4
620	10,33	73,6	73,3	62,5
623	10,38	73,5	73,2	62,5
627	10,45	73,4	73,1	62,5
630	10,50	73,1	73	62,5
634	10,57	71,5	72,9	62,5
637	10,62	69,3	72,8	62,5
641	10,68	67,3	72,7	62,5
644	10,73	65,5	72,6	62,5
648	10,80	64,3	72,3	62,5
651	10,85	63,7	72,1	62,5
655	10,92	63,6	71,7	62,4
658	10,97	63,6	71,3	62,4
662	11,03	63,8	70,8	62,4
665	11,08	63,8	70,3	62,3
669	11,15	63,8	69,8	62,3
672	11,20	63,5	69,3	62,3
676	11,27	63,1	68,8	62,3
679	11,32	62,5	68,3	62,2
683	11,38	61,9	67,8	62,1
686	11,43	61,3	67,3	62,1
690	11,50	60,8	66,9	62,1
693	11,55	60,3	66,4	62
697	11,62	60	65,9	62
700	11,67	59,7	65,4	62
704	11,73	59,4	64,9	61,9
707	11,78	59,1	64,3	61,8
711	11,85	58,9	63,8	61,8
714	11,90	58,6	63,3	61,8

1	2	3	4	5
718	11,97	58,3	62,9	61,7
721	12,02	58,1	62,4	61,7
725	12,08	57,8	62	61,6
728	12,13	57,5	61,5	61,6
732	12,20	57,1	61	61,5
735	12,25	56,8	60,6	61,5
739	12,32	56,6	60,2	61,5
742	12,37	56,3	59,8	61,4
746	12,43	56,1	59,4	61,3
749	12,48	55,8	59	61,3
753	12,55	55,6	58,6	61,2
756	12,60	55,4	58,3	61,2
760	12,67	55,2	58	61,1
763	12,72	55	57,6	61,1
767	12,78	54,8	57,3	61
770	12,83	54,6	57	61
774	12,90	54,4	56,7	61
777	12,95	54,2	56,4	60,9
781	13,02	54	56,1	60,8
784	13,07	53,8	55,9	60,8
788	13,13	53,7	55,6	60,7
791	13,18	53,5	55,4	60,7
795	13,25	53,4	55,1	60,6
798	13,30	53,3	54,9	60,6
802	13,37	53,1	54,7	60,5
805	13,42	53	54,5	60,5
809	13,48	52,8	54,3	60,4
812	13,53	52,6	54,1	60,4
816	13,60	52,5	54	60,3
819	13,65	52,5	53,8	60,3
823	13,72	52,3	53,6	60,2
826	13,77	52,2	53,5	60,2
830	13,83	52,1	53,4	60,1
833	13,88	52	53,2	60,1
837	13,95	51,9	53,1	60
840	14,00	51,8	53	60
844	14,07	51,7	52,9	60
847	14,12	51,6	52,8	59,9
851	14,18	51,4	52,6	59,8
854	14,23	51,3	52,5	59,8
858	14,30	51,1	52,4	59,7
861	14,35	51	52,3	59,6
865	14,42	50,8	52,3	59,6
868	14,47	50,8	52,1	59,6
872	14,53	50,7	52	59,5

1	2	3	4	5
875	14,58	50,6	52	59,5
879	14,65	50,6	51,8	59,5
882	14,70	50,6	51,8	59,4
886	14,77	50,5	51,7	59,3
889	14,82	50,5	51,6	59,3
893	14,88	50,4	51,5	59,2
896	14,93	50,3	51,5	59,2
900	15,00	50,2	51,4	59,1
903	15,05	50,1	51,3	59,1
907	15,12	50,1	51,2	59
910	15,17	50	51,1	59
914	15,23	50	51,1	59
917	15,28	50	51	59
921	15,35	49,9	51	58,9
924	15,40	49,8	50,8	58,8
928	15,47	49,8	50,8	58,8
931	15,52	49,7	50,7	58,7
935	15,58	49,6	50,6	58,7
938	15,63	49,6	50,6	58,6
942	15,70	49,6	50,5	58,6
945	15,75	49,5	50,5	58,6
949	15,82	49,5	50,5	58,5
952	15,87	49,4	50,4	58,5
956	15,93	49,4	50,3	58,4
959	15,98	49,3	50,3	58,4
963	16,05	49,3	50,2	58,3
966	16,10	49,3	50,1	58,3
970	16,17	49,2	50,1	58,2
973	16,22	49,2	50,1	58,2
977	16,28	49,1	50	58,1
980	16,33	49,1	50	58,1
984	16,40	49,1	49,9	58
987	16,45	49	49,8	58
991	16,52	49	49,8	58
994	16,57	49	49,8	57,9
998	16,63	48,9	49,7	57,9
1001	16,68	48,9	49,6	57,8
1005	16,75	48,8	49,6	57,8
1008	16,80	48,8	49,6	57,8
1012	16,87	48,8	49,5	57,7
1015	16,92	48,7	49,5	57,6
1019	16,98	48,7	49,4	57,6
1022	17,03	48,6	49,3	57,6
1026	17,10	48,6	49,3	57,5
1029	17,15	48,5	49,2	57,5

1	2	3	4	5
1033	17,22	48,5	49,1	57,5
1036	17,27	48,5	49,1	57,4
1040	17,33	48,4	49,1	57,3
1043	17,38	48,4	49	57,3
1047	17,45	48,3	49	57,3
1050	17,50	48,3	48,9	57,2
1054	17,57	48,2	48,9	57,1
1057	17,62	48,1	48,8	57,1
1061	17,68	48,1	48,8	57,1
1064	17,73	48,1	48,7	57
1068	17,80	48	48,6	57
1071	17,85	48	48,6	56,9
1075	17,92	48	48,5	56,8
1078	17,97	47,9	48,5	56,8
1082	18,03	47,8	48,5	56,8
1085	18,08	47,8	48,4	56,7
1089	18,15	47,7	48,4	56,7
1092	18,20	47,7	48,3	56,6
1096	18,27	47,6	48,3	56,6
1099	18,32	47,6	48,2	56,6
1103	18,38	47,5	48,2	56,6
1106	18,43	47,5	48,1	56,5
1110	18,50	47,5	48,1	56,5
1113	18,55	47,4	48	56,5
1117	18,62	47,3	48	56,4
1120	18,67	47,3	47,9	56,3
1124	18,73	47,2	47,9	56,3
1127	18,78	47,1	47,8	56,3
1131	18,85	47,1	47,8	56,3
1134	18,90	47,1	47,7	56,3
1138	18,97	47	47,7	56,2
1141	19,02	47	47,6	56,1
1145	19,08	46,9	47,6	56,1
1148	19,13	46,9	47,5	56,1
1152	19,20	46,8	47,5	56
1155	19,25	46,8	47,4	56
1159	19,32	46,7	47,4	56
1162	19,37	46,6	47,3	56
1166	19,43	46,6	47,3	55,9
1169	19,48	46,6	47,3	55,9
1173	19,55	46,5	47,2	55,8
1176	19,60	46,5	47,1	55,8
1180	19,67	46,5	47,1	55,8
1183	19,72	46,4	47,1	55,8
1187	19,78	46,4	47	55,8

1	2	3	4	5
1190	19,83	46,3	47	55,7
1194	19,90	46,3	47	55,7
1197	19,95	46,3	46,9	55,6
1201	20,02	46,2	46,8	55,6
1204	20,07	46,1	46,8	55,6
1208	20,13	46,1	46,8	55,6
1211	20,18	46,1	46,7	55,5
1215	20,25	46	46,7	55,5
1218	20,30	46	46,6	55,5
1222	20,37	46	46,6	55,5
1225	20,42	45,9	46,6	55,4
1229	20,48	45,8	46,5	55,3
1232	20,53	45,8	46,5	55,4
1236	20,60	45,8	46,5	55,3
1239	20,65	45,7	46,4	55,3
1243	20,72	45,7	46,3	55,3
1246	20,77	45,6	46,3	55,3
1250	20,83	45,6	46,3	55,2
1253	20,88	45,6	46,2	55,2
1257	20,95	45,5	46,2	55,2
1260	21,00	45,5	46,1	55,1
1264	21,07	45,5	46,1	55,1
1267	21,12	45,4	46,1	55,1
1271	21,18	45,3	46	55,1
1274	21,23	45,3	46	55,1
1278	21,30	45,3	45,9	55
1281	21,35	45,2	45,9	55
1285	21,42	45,2	45,8	55
1288	21,47	45,1	45,8	55
1292	21,53	45,1	45,8	55
1295	21,58	45,1	45,7	55
1299	21,65	45	45,6	54,9
1302	21,70	45	45,6	54,9
1306	21,77	45	45,6	54,9
1309	21,82	44,9	45,5	54,8
1313	21,88	44,9	45,5	54,8
1316	21,93	44,8	45,5	54,8
1320	22,00	44,8	45,5	54,8
1323	22,05	44,8	45,4	54,8
1327	22,12	44,7	45,3	54,8
1330	22,17	44,7	45,3	54,7
1334	22,23	44,6	45,3	54,7
1337	22,28	44,6	45,2	54,7
1341	22,35	44,6	45,2	54,6
1344	22,40	44,5	45,1	54,6

1	2	3	4	5
1348	22,47	44,5	45,1	54,6
1351	22,52	44,5	45,1	54,6
1355	22,58	44,5	45	54,6
1358	22,63	44,4	45	54,6
1362	22,70	44,3	45	54,6
1365	22,75	44,3	44,9	54,6
1369	22,82	44,3	44,9	54,5
1372	22,87	44,2	44,8	54,5
1376	22,93	44,2	44,8	54,5
1379	22,98	44,2	44,8	54,5
1383	23,05	44,1	44,7	54,5
1386	23,10	44,1	44,7	54,5
1390	23,17	44,1	44,6	54,5
1393	23,22	44	44,6	54,5
1397	23,28	44	44,6	54,5
1400	23,33	44	44,5	54,5
1404	23,40	44	44,5	54,5
1407	23,45	43,9	44,5	54,4
1411	23,52	43,8	44,5	54,4
1414	23,57	43,8	44,4	54,4
1418	23,63	43,8	44,4	54,4
1421	23,68	43,8	44,3	54,4
1425	23,75	43,7	44,3	54,4
1428	23,80	43,7	44,2	54,4
1432	23,87	43,6	44,2	54,3
1435	23,92	43,6	44,1	54,3
1439	23,98	43,6	44,1	54,3
1442	24,03	43,6	44,1	54,3
1446	24,10	43,5	44,1	54,3
1449	24,15	43,5	44	54,3
1453	24,22	43,5	44	54,3
1456	24,27	43,4	44	54,3
1460	24,33	43,4	43,9	54,3
1463	24,38	43,3	43,9	54,3
1467	24,45	43,3	43,8	54,3
1470	24,50	43,3	43,8	54,3
1474	24,57	43,2	43,8	54,3
1477	24,62	43,2	43,7	54,3
1481	24,68	43,1	43,7	54,3
1484	24,73	43,1	43,6	54,2
1488	24,80	43,1	43,6	54,2
1491	24,85	43,1	43,6	54,2
1495	24,92	43	43,6	54,2
1498	24,97	43	43,5	54,2
1502	25,03	43	43,5	54,2

1	2	3	4	5
1505	25,08	42,9	43,5	54,2
1509	25,15	42,9	43,4	54,1
1512	25,20	42,9	43,4	54,1
1516	25,27	42,8	43,3	54,1
1519	25,32	42,8	43,3	54,1
1523	25,38	42,8	43,3	54,1
1526	25,43	42,7	43,3	54,1
1530	25,50	42,7	43,2	54,1
1533	25,55	42,6	43,2	54,1
1537	25,62	42,6	43,1	54,1
1540	25,67	42,6	43,1	54,1
1544	25,73	42,6	43,1	54,1
1547	25,78	42,5	43,1	54,1
1551	25,85	42,5	43	54,1
1554	25,90	42,5	43	54,1
1558	25,97	42,5	43	54
1561	26,02	42,5	42,9	54
1565	26,08	42,4	42,9	54
1568	26,13	42,4	42,9	54
1572	26,20	42,3	42,8	54
1575	26,25	42,3	42,8	54
1579	26,32	42,3	42,8	54
1582	26,37	42,3	42,8	54
1586	26,43	42,2	42,7	54
1589	26,48	42,2	42,6	54
1593	26,55	42,2	42,6	53,9
1596	26,60	42,1	42,6	53,9
1600	26,67	42,1	42,6	53,9
1603	26,72	42,1	42,6	53,9
1607	26,78	42,1	42,5	53,9
1610	26,83	42	42,5	53,9
1614	26,90	42	42,5	53,9
1617	26,95	42	42,4	53,8
1621	27,02	42	42,4	53,9
1624	27,07	42	42,4	53,8
1628	27,13	41,9	42,3	53,8
1631	27,18	41,9	42,3	53,8
1635	27,25	41,8	42,3	53,8
1638	27,30	41,8	42,3	53,8
1642	27,37	41,8	42,2	53,8
1645	27,42	41,8	42,2	53,8
1649	27,48	41,8	42,2	53,8
1652	27,53	41,7	42,1	53,8
1656	27,60	41,7	42,1	53,8
1659	27,65	41,6	42,1	53,8

1	2	3	4	5
1663	27,72	41,6	42	53,8
1666	27,77	41,6	42	53,7
1670	27,83	41,6	42	53,7
1673	27,88	41,5	42	53,7
1677	27,95	41,5	41,9	53,7
1680	28,00	41,5	41,9	53,7
1684	28,07	41,5	41,8	53,7
1687	28,12	41,5	41,8	53,7
1691	28,18	41,4	41,8	53,6
1694	28,23	41,4	41,8	53,6
1698	28,30	41,3	41,8	53,7
1701	28,35	41,3	41,7	53,6
1705	28,42	41,3	41,7	53,6
1708	28,47	41,3	41,6	53,6
1712	28,53	41,3	41,6	53,6
1715	28,58	41,2	41,6	53,6
1719	28,65	41,2	41,6	53,6
1722	28,70	41,1	41,6	53,6
1726	28,77	41,1	41,5	53,6
1729	28,82	41,1	41,5	53,6
1733	28,88	41,1	41,5	53,6
1736	28,93	41,1	41,5	53,6
1740	29,00	41,1	41,5	53,6
1743	29,05	41	41,5	53,6
1747	29,12	41	41,4	53,5
1750	29,17	41	41,4	53,6
1754	29,23	41	41,3	53,5
1757	29,28	41	41,3	53,5
1761	29,35	40,9	41,3	53,5
1764	29,40	40,9	41,3	53,5
1768	29,47	40,8	41,3	53,5
1771	29,52	40,8	41,2	53,5
1775	29,58	40,8	41,2	53,5
1778	29,63	40,8	41,1	53,5
1782	29,70	40,8	41,1	53,5
1785	29,75	40,7	41,1	53,5
1789	29,82	40,7	41,1	53,5
1792	29,87	40,6	41	53,5
1796	29,93	40,6	41	53,5
1799	29,98	40,6	41	53,5
1803	30,05	40,6	41	53,5
1806	30,10	40,5	40,9	53,5
1810	30,17	40,5	40,9	53,4
1813	30,22	40,5	40,9	53,4
1817	30,28	40,5	40,8	53,4

1	2	3	4	5
1820	30,33	40,5	40,8	53,4
1824	30,40	40,4	40,8	53,4
1827	30,45	40,4	40,8	53,4
1831	30,52	40,3	40,8	53,4
1834	30,57	40,3	40,7	53,3
1838	30,63	40,3	40,7	53,3
1841	30,68	40,3	40,6	53,3
1845	30,75	40,3	40,6	53,3
1848	30,80	40,3	40,6	53,3
1852	30,87	40,2	40,6	53,3
1855	30,92	40,2	40,6	53,3
1859	30,98	40,1	40,5	53,3
1862	31,03	40,1	40,5	53,3
1866	31,10	40,1	40,5	53,3
1869	31,15	40,1	40,5	53,3
1873	31,22	40,1	40,5	53,2
1876	31,27	40	40,5	53,2
1880	31,33	40	40,4	53,2
1883	31,38	40	40,4	53,2
1887	31,45	40	40,3	53,2
1890	31,50	40	40,3	53,2
1894	31,57	40	40,3	53,2
1897	31,62	39,9	40,3	53,1
1901	31,68	39,9	40,3	53,2
1904	31,73	39,9	40,3	53,1
1908	31,80	39,9	40,2	53,1
1911	31,85	39,8	40,2	53,1
1915	31,92	39,8	40,2	53,1
1918	31,97	39,8	40,1	53,1
1922	32,03	39,8	40,1	53,1
1925	32,08	39,8	40,1	53,1
1929	32,15	39,8	40,1	53,1
1932	32,20	39,7	40,1	53,1
1936	32,27	39,7	40	53,1
1939	32,32	39,6	40	53,1
1943	32,38	39,6	40	53,1
1946	32,43	39,6	40	53
1950	32,50	39,6	39,9	53
1953	32,55	39,6	39,9	53
1957	32,62	39,6	39,9	53
1960	32,67	39,5	39,8	53
1964	32,73	39,5	39,8	53
1967	32,78	39,5	39,8	53
1971	32,85	39,5	39,8	53
1974	32,90	39,5	39,8	53

1	2	3	4	5
1978	32,97	39,5	39,8	53
1981	33,02	39,4	39,7	53
1985	33,08	39,4	39,7	53
1988	33,13	39,3	39,6	53
1992	33,20	39,3	39,6	53
1995	33,25	39,3	39,6	52,9
1999	33,32	39,3	39,6	52,9
2002	33,37	39,3	39,6	52,9
2006	33,43	39,3	39,5	52,9
2009	33,48	39,2	39,5	52,9
2013	33,55	39,2	39,5	52,9
2016	33,60	39,1	39,5	52,9
2020	33,67	39,1	39,5	52,8
2023	33,72	39,1	39,5	52,8
2027	33,78	39,1	39,5	52,8
2030	33,83	39,1	39,4	52,8
2034	33,90	39	39,4	52,8
2037	33,95	39	39,3	52,8
2041	34,02	39	39,3	52,8
2044	34,07	39	39,3	52,8
2048	34,13	39	39,3	52,8
2051	34,18	39	39,3	52,8
2055	34,25	39	39,3	52,8
2058	34,30	38,9	39,2	52,8
2062	34,37	38,9	39,2	52,7
2065	34,42	38,9	39,1	52,7
2069	34,48	38,8	39,1	52,7
2072	34,53	38,8	39,1	52,7
2076	34,60	38,8	39,1	52,7
2079	34,65	38,8	39,1	52,7
2083	34,72	38,8	39,1	52,7
2086	34,77	38,8	39	52,7
2090	34,83	38,7	39	52,6
2093	34,88	38,7	39	52,6
2097	34,95	38,7	39	52,6
2100	35,00	38,7	39	52,6
2104	35,07	38,6	38,9	52,6
2107	35,12	38,6	38,9	52,6
2111	35,18	38,6	38,9	52,6
2114	35,23	38,6	38,9	52,6
2118	35,30	38,6	38,8	52,6
2121	35,35	38,5	38,8	52,6
2125	35,42	38,5	38,8	52,6
2128	35,47	38,5	38,8	52,6
2132	35,53	38,5	38,8	52,6

1	2	3	4	5
2135	35,58	38,5	38,8	52,6
2139	35,65	38,5	38,8	52,6
2142	35,70	38,5	38,7	52,5
2146	35,77	38,5	38,7	52,5
2149	35,82	38,4	38,7	52,5
2153	35,88	38,4	38,6	52,5
2156	35,93	38,4	38,6	52,5
2160	36,00	38,4	38,6	52,5
2163	36,05	38,3	38,6	52,5
2167	36,12	38,3	38,6	52,5
2170	36,17	38,3	38,6	52,5
2174	36,23	38,3	38,6	52,5
2177	36,28	38,3	38,5	52,5
2181	36,35	38,3	38,5	52,5
2184	36,40	38,3	38,5	52,4
2188	36,47	38,3	38,5	52,4
2191	36,52	38,3	38,5	52,4
2195	36,58	38,2	38,4	52,4
2198	36,63	38,2	38,4	52,4
2202	36,70	38,2	38,4	52,4
2205	36,75	38,2	38,4	52,4
2209	36,82	38,2	38,4	52,3
2212	36,87	38,1	38,3	52,3
2216	36,93	38,2	38,3	52,3
2219	36,98	38,1	38,3	52,3
2223	37,05	38,1	38,3	52,3
2226	37,10	38,1	38,3	52,3
2230	37,17	38,1	38,3	52,3
2233	37,22	38,1	38,2	52,3
2237	37,28	38,1	38,2	52,3
2240	37,33	38,1	38,2	52,3
2244	37,40	38,1	38,1	52,2
2247	37,45	38	38,1	52,2
2251	37,52	38	38,1	52,2
2254	37,57	38	38,1	52,2
2258	37,63	38	38,1	52,2
2261	37,68	38	38,1	52,1
2265	37,75	38	38,1	52,1
2268	37,80	37,9	38	52,1
2272	37,87	37,9	38	52,1
2275	37,92	37,9	38	52,1
2279	37,98	37,9	38	52,1
2282	38,03	37,8	38	52,1
2286	38,10	37,8	38	52,1
2289	38,15	37,8	38	52,1

1	2	3	4	5
2293	38,22	37,8	37,9	52,1
2296	38,27	37,8	37,9	52,1
2300	38,33	37,8	37,9	52
2303	38,38	37,8	37,8	52
2307	38,45	37,7	37,8	52
2310	38,50	37,7	37,8	52
2314	38,57	37,6	37,8	52
2317	38,62	37,6	37,8	52
2321	38,68	37,6	37,8	52
2324	38,73	37,6	37,8	52
2328	38,80	37,6	37,7	52
2331	38,85	37,6	37,7	52
2335	38,92	37,6	37,7	52
2338	38,97	37,5	37,6	52
2342	39,03	37,5	37,6	51,9
2345	39,08	37,5	37,6	51,9
2349	39,15	37,5	37,6	51,9
2352	39,20	37,5	37,6	51,9
2356	39,27	37,4	37,6	51,9
2359	39,32	37,4	37,6	51,9
2363	39,38	37,4	37,5	51,8
2366	39,43	37,3	37,5	51,8
2370	39,50	37,3	37,5	51,8
2373	39,55	37,3	37,5	51,8
2377	39,62	37,3	37,5	51,8
2380	39,67	37,3	37,5	51,8
2384	39,73	37,3	37,5	51,8
2387	39,78	37,3	37,5	51,8
2391	39,85	37,3	37,5	51,8
2394	39,90	37,3	37,4	51,8
2398	39,97	37,2	37,4	51,8
2401	40,02	37,2	37,4	51,8
2405	40,08	37,2	37,4	51,8
2408	40,13	37,1	37,3	51,7
2412	40,20	37,1	37,3	51,7
2415	40,25	37,1	37,3	51,7
2419	40,32	37,1	37,3	51,7
2422	40,37	37,1	37,3	51,6
2426	40,43	37,1	37,3	51,6
2429	40,48	37,1	37,3	51,6
2433	40,55	37,1	37,3	51,6
2436	40,60	37,1	37,3	51,6
2440	40,67	37,1	37,3	51,6
2443	40,72	37,1	37,2	51,6
2447	40,78	37	37,2	51,6

1	2	3	4	5
2450	40,83	37	37,2	51,6
2454	40,90	37	37,2	51,6
2457	40,95	37	37,1	51,6
2461	41,02	37	37,1	51,6
2464	41,07	37	37,1	51,5
2468	41,13	37	37,1	51,5
2471	41,18	36,9	37,1	51,5
2475	41,25	36,9	37,1	51,5
2478	41,30	36,9	37	51,5
2482	41,37	36,9	37	51,5
2485	41,42	36,9	37	51,5
2489	41,48	36,8	37	51,5
2492	41,53	36,8	37	51,5
2496	41,60	36,8	37	51,5
2499	41,65	36,8	37	51,5
2503	41,72	36,8	37	51,4
2506	41,77	36,8	36,9	51,4
2510	41,83	36,8	36,9	51,4
2513	41,88	36,8	36,9	51,4
2517	41,95	36,8	36,8	51,4
2520	42,00	36,8	36,8	51,3
2524	42,07	36,7	36,8	51,3
2527	42,12	36,7	36,8	51,3
2531	42,18	36,7	36,8	51,3
2534	42,23	36,7	36,8	51,3
2538	42,30	36,6	36,8	51,3
2541	42,35	36,6	36,8	51,3
2545	42,42	36,6	36,8	51,3
2548	42,47	36,6	36,7	51,3
2552	42,53	36,6	36,7	51,3
2555	42,58	36,6	36,7	51,3
2559	42,65	36,6	36,7	51,2
2562	42,70	36,6	36,6	51,2
2566	42,77	36,6	36,6	51,2
2569	42,82	36,6	36,6	51,2
2573	42,88	36,5	36,6	51,1
2576	42,93	36,5	36,6	51,1
2580	43,00	36,5	36,6	51,1
2583	43,05	36,5	36,6	51,1
2587	43,12	36,5	36,6	51,1
2590	43,17	36,5	36,6	51,1
2594	43,23	36,5	36,6	51,1
2597	43,28	36,5	36,6	51,1
2601	43,35	36,5	36,5	51,1
2604	43,40	36,5	36,5	51,1

1	2	3	4	5
2608	43,47	36,5	36,5	51,1
2611	43,52	36,5	36,5	51,1
2615	43,58	36,5	36,5	51
2618	43,63	36,4	36,5	51
2622	43,70	36,4	36,4	51
2625	43,75	36,4	36,4	51
2629	43,82	36,3	36,4	51
2632	43,87	36,3	36,4	51
2636	43,93	36,3	36,4	51
2639	43,98	36,3	36,3	51
2643	44,05	36,3	36,3	51
2646	44,10	36,3	36,3	51
2650	44,17	36,3	36,3	50,9
2653	44,22	36,3	36,3	50,9
2657	44,28	36,3	36,3	50,9
2660	44,33	36,2	36,3	50,9
2664	44,40	36,2	36,3	50,9
2667	44,45	36,2	36,3	50,9
2671	44,52	36,2	36,2	50,8
2674	44,57	36,2	36,2	50,9
2678	44,63	36,1	36,2	50,8
2681	44,68	36,1	36,2	50,8
2685	44,75	36,1	36,1	50,8
2688	44,80	36,1	36,1	50,8
2692	44,87	36,1	36,1	50,8
2695	44,92	36,1	36,1	50,8
2699	44,98	36,1	36,1	50,8
2702	45,03	36	36,1	50,8
2706	45,10	36	36,1	50,8
2709	45,15	36	36,1	50,8
2713	45,22	36	36	50,8
2716	45,27	36	36	50,8
2720	45,33	36	36	50,8
2723	45,38	36	36	50,8
2727	45,45	35,9	36	50,7
2730	45,50	35,9	36	50,7
2734	45,57	35,9	36	50,7
2737	45,62	35,8	36	50,7
2741	45,68	35,8	36	50,7
2744	45,73	35,8	35,9	50,7
2748	45,80	35,8	35,9	50,6
2751	45,85	35,8	35,9	50,6
2755	45,92	35,8	35,9	50,6
2758	45,97	35,8	35,9	50,6
2762	46,03	35,8	35,9	50,6

1	2	3	4	5
2765	46,08	35,7	35,8	50,6
2769	46,15	35,7	35,8	50,6
2772	46,20	35,7	35,8	50,6
2776	46,27	35,7	35,8	50,6
2779	46,32	35,7	35,8	50,6
2783	46,38	35,6	35,8	50,6
2786	46,43	35,6	35,8	50,6
2790	46,50	35,6	35,8	50,6
2793	46,55	35,6	35,8	50,6
2797	46,62	35,6	35,7	50,6
2800	46,67	35,6	35,7	50,6
2804	46,73	35,6	35,7	50,6
2807	46,78	35,5	35,7	50,6
2811	46,85	35,5	35,7	50,6
2814	46,90	35,5	35,6	50,5
2818	46,97	35,5	35,6	50,5
2821	47,02	35,5	35,6	50,5
2825	47,08	35,5	35,6	50,5
2828	47,13	35,5	35,6	50,5
2832	47,20	35,5	35,6	50,5
2835	47,25	35,5	35,6	50,5
2839	47,32	35,4	35,6	50,5
2842	47,37	35,4	35,6	50,5
2846	47,43	35,4	35,6	50,5
2849	47,48	35,4	35,5	50,5
2853	47,55	35,4	35,5	50,5
2856	47,60	35,3	35,5	50,5
2860	47,67	35,3	35,5	50,5
2863	47,72	35,3	35,5	50,5
2867	47,78	35,3	35,5	50,4
2870	47,83	35,3	35,5	50,4
2874	47,90	35,3	35,5	50,5
2877	47,95	35,3	35,5	50,4
2881	48,02	35,3	35,4	50,4
2884	48,07	35,2	35,5	50,4
2888	48,13	35,2	35,4	50,4
2891	48,18	35,2	35,4	50,4
2895	48,25	35,2	35,3	50,4
2898	48,30	35,1	35,3	50,3
2902	48,37	35,1	35,3	50,4
2905	48,42	35,1	35,3	50,3
2909	48,48	35,1	35,3	50,3
2912	48,53	35,1	35,3	50,3
2916	48,60	35,1	35,3	50,3
2919	48,65	35,1	35,3	50,3

1	2	3	4	5
2923	48,72	35,1	35,3	50,3
2926	48,77	35	35,3	50,3
2930	48,83	35	35,3	50,3
2933	48,88	35	35,3	50,3
2937	48,95	35	35,2	50,3
2940	49,00	35	35,2	50,3
2944	49,07	35	35,2	50,3
2947	49,12	35	35,2	50,3
2951	49,18	35	35,2	50,3
2954	49,23	34,9	35,1	50,3
2958	49,30	35	35,1	50,3
2961	49,35	35	35,1	50,2
2965	49,42	34,9	35,1	50,2
2968	49,47	34,9	35,1	50,2
2972	49,53	34,9	35,1	50,2
2975	49,58	34,9	35,1	50,2
2979	49,65	34,8	35,1	50,2
2982	49,70	34,8	35,1	50,2
2986	49,77	34,8	35,1	50,1
2989	49,82	34,8	35	50,1
2993	49,88	34,8	35,1	50,1
2996	49,93	34,8	35	50,1
3000	50,00	34,8	35	50,1
3003	50,05	34,8	35	50,1
3007	50,12	34,8	35	50,1
3010	50,17	34,8	35	50,1
3014	50,23	34,8	35	50,1
3017	50,28	34,8	35	50,1
3021	50,35	34,7	35	50,1
3024	50,40	34,7	35	50,1
3028	50,47	34,7	35	50,1
3031	50,52	34,7	34,9	50,1
3035	50,58	34,7	34,9	50,1
3038	50,63	34,6	34,9	50,1
3042	50,70	34,6	34,9	50
3045	50,75	34,6	34,9	50
3049	50,82	34,6	34,9	50
3052	50,87	34,6	34,8	50
3056	50,93	34,6	34,8	50
3059	50,98	34,6	34,8	50
3063	51,05	34,6	34,8	50
3066	51,10	34,6	34,8	50
3070	51,17	34,6	34,8	50
3073	51,22	34,6	34,8	50
3077	51,28	34,6	34,8	50

1	2	3	4	5
3080	51,33	34,5	34,8	50
3084	51,40	34,5	34,8	50
3087	51,45	34,5	34,8	50
3091	51,52	34,5	34,8	49,9
3094	51,57	34,5	34,7	49,9
3098	51,63	34,5	34,7	49,9
3101	51,68	34,5	34,7	49,9
3105	51,75	34,5	34,7	49,9
3108	51,80	34,5	34,7	49,9
3112	51,87	34,5	34,7	49,9
3115	51,92	34,5	34,6	49,8
3119	51,98	34,5	34,6	49,9
3122	52,03	34,5	34,6	49,8
3126	52,10	34,5	34,6	49,8
3129	52,15	34,5	34,6	49,8
3133	52,22	34,4	34,6	49,8
3136	52,27	34,4	34,6	49,8
3140	52,33	34,4	34,6	49,8
3143	52,38	34,4	34,6	49,8
3147	52,45	34,4	34,6	49,8
3150	52,50	34,4	34,6	49,8
3154	52,57	34,4	34,5	49,8
3157	52,62	34,4	34,5	49,8
3161	52,68	34,4	34,5	49,7
3164	52,73	34,3	34,5	49,7
3168	52,80	34,4	34,5	49,7
3171	52,85	34,3	34,5	49,7
3175	52,92	34,3	34,5	49,6
3178	52,97	34,3	34,5	49,6
3182	53,03	34,3	34,5	49,6
3185	53,08	34,3	34,5	49,6
3189	53,15	34,3	34,5	49,6
3192	53,20	34,3	34,5	49,6
3196	53,27	34,3	34,5	49,6
3199	53,32	34,3	34,5	49,6
3203	53,38	34,3	34,4	49,6
3206	53,43	34,3	34,5	49,6
3210	53,50	34,3	34,4	49,5
3213	53,55	34,3	34,4	49,6
3217	53,62	34,3	34,4	49,5
3220	53,67	34,3	34,4	49,5
3224	53,73	34,3	34,4	49,5
3227	53,78	34,2	34,3	49,5
3231	53,85	34,2	34,3	49,5
3234	53,90	34,2	34,3	49,5

[illegible]

Таблица А.3

Показания наблюдений (усредненные за 5 опытов) за изменением температур теплоносителя и температурного поля ТАМ при его кристаллизации. Условия: скорость теплоносителя в теплообменной трубке 0,16м/с (переходной режим); удаление датчика от поверхности трубки – 4мм.

τ , с.	τ , мин.	T_2' , °C	T_1' , °C	$T(r, \tau)$, °C
0	0,00	81,1	76,8	46,5
4	0,07	81,3	77	46,6
7	0,12	81,6	77,1	46,6
11	0,18	81,9	77,3	46,7
14	0,23	82,1	77,6	46,8
18	0,30	82,5	77,8	46,8
21	0,35	82,7	78	46,9
25	0,42	83	78,3	47
28	0,47	83,2	78,5	47,1
32	0,53	83,5	78,7	47,1
35	0,58	83,8	79	47,2
39	0,65	84	79,2	47,3
42	0,70	84,3	79,5	47,4
46	0,77	84,5	79,7	47,5
49	0,82	84,7	80	47,5
53	0,88	84,8	80,2	47,6
56	0,93	84,8	80,5	47,7
60	1,00	84,8	80,7	47,8
63	1,05	84,9	81	47,9
67	1,12	85	81,1	48
70	1,17	85	81,3	48,1
74	1,23	85,1	81,5	48,2
77	1,28	85,1	81,7	48,3
81	1,35	85,1	81,9	48,5
84	1,40	85,2	82,1	48,6
88	1,47	85,2	82,2	48,8
91	1,52	85,2	82,4	48,9
95	1,58	85,2	82,5	49,1
98	1,63	85,2	82,6	49,3
102	1,70	85,2	82,8	49,5
105	1,75	85,2	82,9	49,6
109	1,82	85,1	83	49,9
112	1,87	85,1	83,1	50,2
116	1,93	85,1	83,1	50,5
119	1,98	85,1	83,2	50,8
123	2,05	85	83,3	51,1

τ , с.	τ , мин.	T_2' , °C	T_1' , °C	$T(r, \tau)$, °C
126	2,10	85	83,3	51,4
130	2,17	85	83,3	51,6
133	2,22	84,9	83,3	52
137	2,28	84,8	83,3	52,2
140	2,33	84,8	83,3	52,5
144	2,40	84,7	83,3	52,8
147	2,45	84,6	83,3	53,1
151	2,52	84,5	83,3	53,3
154	2,57	84,5	83,3	53,6
158	2,63	84,4	83,2	53,8
161	2,68	84,3	83,1	54,1
165	2,75	84,2	83,1	54,3
168	2,80	84,1	83,1	54,6
172	2,87	84	83	54,8
175	2,92	83,9	83	55,1
179	2,98	83,8	82,9	55,3
182	3,03	83,7	82,8	55,5
186	3,10	83,6	82,8	55,7
189	3,15	83,5	82,7	55,9
193	3,22	83,4	82,6	56,1
196	3,27	83,3	82,5	56,3
200	3,33	83,1	82,5	56,6
203	3,38	83	82,4	56,9
207	3,45	83	82,3	57,1
210	3,50	82,8	82,1	57,5
214	3,57	82,7	82,1	57,7
217	3,62	82,6	82	58
221	3,68	82,5	81,9	58,3
224	3,73	82,3	81,8	58,6
228	3,80	82,2	81,6	58,9
231	3,85	82,1	81,5	59,1
235	3,92	82	81,5	59,4
238	3,97	81,8	81,3	59,7
242	4,03	81,7	81,2	60
245	4,08	81,6	81,1	60,3
249	4,15	81,5	81	60,6

1	2	3	4	5
252	4,20	81,3	80,8	60,8
256	4,27	81,2	80,7	61,1
259	4,32	81,1	80,6	61,4
263	4,38	81	80,5	61,6
266	4,43	80,8	80,4	61,9
270	4,50	80,7	80,3	62,1
273	4,55	80,6	80,1	62,3
277	4,62	80,4	80	62,5
280	4,67	80,3	79,9	62,7
284	4,73	80,1	79,8	62,9
287	4,78	80,1	79,6	63,1
291	4,85	79,9	79,5	63,2
294	4,90	79,8	79,4	63,3
298	4,97	79,6	79,3	63,5
301	5,02	79,5	79,1	63,6
305	5,08	79,4	79	63,8
308	5,13	79,3	78,9	63,9
312	5,20	79,1	78,8	64
315	5,25	79	78,6	64,1
319	5,32	78,9	78,6	64,2
322	5,37	78,8	78,5	64,3
326	5,43	78,7	78,3	64,4
329	5,48	78,5	78,1	64,5
333	5,55	78,4	78,1	64,6
336	5,60	78,3	78	64,7
340	5,67	78,2	77,8	64,8
343	5,72	78	77,7	64,8
347	5,78	78	77,6	64,9
350	5,83	77,8	77,5	64,9
354	5,90	77,7	77,3	65
357	5,95	77,6	77,2	65
361	6,02	77,5	77,1	65,1
364	6,07	77,3	77	65,1
368	6,13	77,2	76,9	65,2
371	6,18	77,1	76,8	65,3
375	6,25	77	76,6	65,3
378	6,30	76,8	76,6	65,3
382	6,37	76,7	76,5	65,4
385	6,42	76,6	76,4	65,5
389	6,48	76,5	76,3	65,5
392	6,53	76,4	76,1	65,5
396	6,60	76,3	76	65,5
399	6,65	76,1	75,9	65,6
403	6,72	76	75,8	65,6
406	6,77	75,9	75,7	65,6

1	2	3	4	5
410	6,83	75,8	75,6	65,6
413	6,88	75,8	75,5	65,6
417	6,95	76	75,3	65,7
420	7,00	76,1	75,3	65,7
424	7,07	76,3	75,1	65,8
427	7,12	76,4	75,1	65,8
431	7,18	76,5	75	65,8
434	7,23	76,6	75	65,8
438	7,30	76,6	74,9	65,8
441	7,35	76,8	74,9	65,8
445	7,42	77	74,8	65,8
448	7,47	77,1	74,8	65,9
452	7,53	77,1	74,8	65,9
455	7,58	77	74,8	65,9
459	7,65	77,1	74,9	66
462	7,70	77,3	74,9	66
466	7,77	77,6	75	66
469	7,82	77,8	75	66
473	7,88	78	75	66
476	7,93	78,2	75,1	66
480	8,00	78,3	75,2	66,1
483	8,05	78,5	75,3	66,1
487	8,12	78,6	75,4	66,1
490	8,17	78,6	75,5	66,2
494	8,23	78,6	75,6	66,2
497	8,28	78,6	75,8	66,3
501	8,35	78,6	75,8	66,3
504	8,40	78,7	76	66,3
508	8,47	78,7	76,1	66,4
511	8,52	78,8	76,2	66,4
515	8,58	78,8	76,3	66,5
518	8,63	78,7	76,3	66,5
522	8,70	77,8	76,5	66,5
525	8,75	75,1	76,6	66,6
529	8,82	72,3	76,6	66,6
532	8,87	70	76,5	66,6
536	8,93	68,7	76,3	66,7
539	8,98	68,5	76	66,8
543	9,05	68,6	75,5	66,8
546	9,10	68,8	75	66,8
550	9,17	69	74,5	66,9
553	9,22	68,9	74	66,9
557	9,28	68,5	73,6	67
560	9,33	67,8	73,1	67
564	9,40	67,1	72,6	67

1	2	3	4	5
567	9,45	66,4	72,1	67
571	9,52	65,8	71,6	67
574	9,57	65,4	71,1	67
578	9,63	65	70,6	67
581	9,68	64,8	70	67
585	9,75	64,5	69,5	67
588	9,80	64,2	68,8	67
592	9,87	63,9	68,3	67
595	9,92	63,5	67,8	67
599	9,98	63,1	67,2	67
602	10,03	62,8	66,7	67
606	10,10	62,4	66,1	67
609	10,15	62,1	65,6	67
613	10,22	61,7	65,1	67
616	10,27	61,5	64,6	67
620	10,33	61,1	64,2	66,9
623	10,38	60,9	63,7	66,9
627	10,45	60,6	63,3	66,8
630	10,50	60,3	62,8	66,8
634	10,57	60	62,4	66,8
637	10,62	59,8	62	66,8
641	10,68	59,5	61,6	66,8
644	10,73	59,2	61,3	66,7
648	10,80	59	60,9	66,7
651	10,85	58,7	60,5	66,7
655	10,92	58,5	60,1	66,6
658	10,97	58,3	59,8	66,6
662	11,03	58	59,5	66,6
665	11,08	57,8	59,2	66,6
669	11,15	57,6	58,9	66,5
672	11,20	57,4	58,6	66,5
676	11,27	57,2	58,4	66,5
679	11,32	57	58,1	66,5
683	11,38	56,8	57,8	66,4
686	11,43	56,6	57,6	66,3
690	11,50	56,5	57,4	66,3
693	11,55	56,3	57,1	66,3
697	11,62	56,1	57	66,3
700	11,67	56	56,8	66,2
704	11,73	55,8	56,5	66,2
707	11,78	55,7	56,4	66,1
711	11,85	55,5	56,2	66,1
714	11,90	55,4	56	66,1
718	11,97	55,3	55,8	66
721	12,02	55,1	55,7	66

1	2	3	4	5
725	12,08	55	55,6	65,9
728	12,13	54,9	55,4	65,8
732	12,20	54,8	55,3	65,7
735	12,25	54,6	55,1	65,6
739	12,32	54,5	55	65,3
742	12,37	54,4	54,9	65,3
746	12,43	54,3	54,8	65,2
749	12,48	54,2	54,6	65,2
753	12,55	54,1	54,5	65,1
756	12,60	54	54,5	65
760	12,67	54	54,4	64,9
763	12,72	53,8	54,3	64,8
767	12,78	53,8	54,2	64,8
770	12,83	53,7	54,1	64,8
774	12,90	53,6	54	64,7
777	12,95	53,5	53,9	64,7
781	13,02	53,5	53,8	64,7
784	13,07	53,3	53,8	64,6
788	13,13	53,3	53,7	64,6
791	13,18	53,2	53,6	64,6
795	13,25	53,1	53,5	64,6
798	13,30	53,1	53,5	64,6
802	13,37	53	53,4	64,6
805	13,42	53	53,3	64,5
809	13,48	52,9	53,3	64,5
812	13,53	52,8	53,2	64,5
816	13,60	52,7	53,1	64,5
819	13,65	52,7	53,1	64,4
823	13,72	52,6	53	64,4
826	13,77	52,6	53	64,3
830	13,83	52,5	52,9	64,3
833	13,88	52,5	52,8	64,3
837	13,95	52,4	52,8	64,2
840	14,00	52,4	52,8	64,2
844	14,07	52,3	52,7	64,1
847	14,12	52,3	52,6	64,1
851	14,18	52,2	52,6	64,1
854	14,23	52,1	52,6	64
858	14,30	52,1	52,5	64
861	14,35	52,1	52,5	63,9
865	14,42	52	52,4	63,9
868	14,47	52	52,3	63,8
872	14,53	51,9	52,3	63,8
875	14,58	51,8	52,3	63,8
879	14,65	51,8	52,2	63,7

1	2	3	4	5
882	14,70	51,7	52,1	63,6
886	14,77	51,7	52,1	63,6
889	14,82	51,6	52,1	63,5
893	14,88	51,6	52	63,5
896	14,93	51,5	52	63,4
900	15,00	51,5	51,9	63,4
903	15,05	51,4	51,8	63,3
907	15,12	51,3	51,8	63,3
910	15,17	51,3	51,8	63,2
914	15,23	51,3	51,7	63,1
917	15,28	51,2	51,6	63,1
921	15,35	51,1	51,6	63
924	15,40	51,1	51,5	63
928	15,47	51,1	51,5	63
931	15,52	51	51,4	62,9
935	15,58	50,9	51,4	62,8
938	15,63	50,9	51,3	62,8
942	15,70	50,8	51,3	62,7
945	15,75	50,8	51,3	62,6
949	15,82	50,7	51,2	62,6
952	15,87	50,6	51,1	62,5
956	15,93	50,6	51,1	62,5
959	15,98	50,5	51,1	62,4
963	16,05	50,5	51	62,4
966	16,10	50,5	51	62,3
970	16,17	50,4	50,9	62,3
973	16,22	50,3	50,9	62,2
977	16,28	50,3	50,8	62,1
980	16,33	50,2	50,8	62,1
984	16,40	50,2	50,7	62
987	16,45	50,1	50,7	62
991	16,52	50,1	50,6	61,9
994	16,57	50	50,6	61,8
998	16,63	50	50,5	61,8
1001	16,68	49,9	50,5	61,7
1005	16,75	49,9	50,5	61,7
1008	16,80	49,8	50,4	61,6
1012	16,87	49,8	50,4	61,6
1015	16,92	49,7	50,3	61,5
1019	16,98	49,7	50,3	61,5
1022	17,03	49,6	50,2	61,4
1026	17,10	49,6	50,2	61,3
1029	17,15	49,5	50,1	61,3
1033	17,22	49,5	50,1	61,2
1036	17,27	49,5	50,1	61,1

1	2	3	4	5
1040	17,33	49,4	50	61,1
1043	17,38	49,3	50	61
1047	17,45	49,3	49,9	61
1050	17,50	49,3	49,9	61
1054	17,57	49,2	49,8	60,9
1057	17,62	49,2	49,8	60,8
1061	17,68	49,1	49,7	60,8
1064	17,73	49,1	49,7	60,7
1068	17,80	49	49,6	60,6
1071	17,85	49	49,6	60,6
1075	17,92	49	49,5	60,5
1078	17,97	48,9	49,5	60,5
1082	18,03	48,9	49,5	60,5
1085	18,08	48,8	49,4	60,4
1089	18,15	48,8	49,4	60,3
1092	18,20	48,8	49,3	60,3
1096	18,27	48,7	49,3	60,2
1099	18,32	48,6	49,2	60,2
1103	18,38	48,6	49,1	60,1
1106	18,43	48,6	49,1	60,1
1110	18,50	48,5	49,1	60
1113	18,55	48,5	49	60
1117	18,62	48,5	49	59,9
1120	18,67	48,4	49	59,9
1124	18,73	48,3	48,9	59,8
1127	18,78	48,3	48,8	59,8
1131	18,85	48,3	48,8	59,7
1134	18,90	48,2	48,8	59,6
1138	18,97	48,1	48,7	59,6
1141	19,02	48,1	48,6	59,5
1145	19,08	48,1	48,6	59,5
1148	19,13	48	48,5	59,5
1152	19,20	48	48,5	59,4
1155	19,25	48	48,5	59,3
1159	19,32	47,9	48,4	59,3
1162	19,37	47,9	48,4	59,3
1166	19,43	47,8	48,3	59,2
1169	19,48	47,8	48,3	59,1
1173	19,55	47,7	48,2	59,1
1176	19,60	47,7	48,2	59,1
1180	19,67	47,6	48,1	59
1183	19,72	47,6	48,1	59
1187	19,78	47,6	48	58,9
1190	19,83	47,5	48	58,9
1194	19,90	47,5	48	58,8

1	2	3	4	5
1197	19,95	47,4	47,9	58,8
1201	20,02	47,4	47,8	58,7
1204	20,07	47,3	47,8	58,7
1208	20,13	47,3	47,8	58,6
1211	20,18	47,3	47,7	58,6
1215	20,25	47,2	47,6	58,6
1218	20,30	47,2	47,6	58,5
1222	20,37	47,1	47,6	58,5
1225	20,42	47,1	47,5	58,4
1229	20,48	47	47,5	58,3
1232	20,53	47	47,5	58,3
1236	20,60	47	47,4	58,3
1239	20,65	47	47,4	58,2
1243	20,72	46,9	47,3	58,1
1246	20,77	46,8	47,3	58,1
1250	20,83	46,8	47,2	58,1
1253	20,88	46,8	47,2	58,1
1257	20,95	46,7	47,1	58
1260	21,00	46,6	47,1	58
1264	21,07	46,6	47,1	58
1267	21,12	46,6	47	57,9
1271	21,18	46,6	47	57,8
1274	21,23	46,5	47	57,8
1278	21,30	46,5	46,9	57,8
1281	21,35	46,5	46,8	57,7
1285	21,42	46,4	46,8	57,7
1288	21,47	46,4	46,8	57,6
1292	21,53	46,3	46,8	57,6
1295	21,58	46,3	46,7	57,6
1299	21,65	46,3	46,6	57,5
1302	21,70	46,2	46,6	57,5
1306	21,77	46,1	46,6	57,5
1309	21,82	46,1	46,5	57,4
1313	21,88	46,1	46,5	57,4
1316	21,93	46	46,5	57,3
1320	22,00	46	46,4	57,3
1323	22,05	46	46,3	57,3
1327	22,12	46	46,3	57,2
1330	22,17	45,9	46,3	57,2
1334	22,23	45,8	46,3	57,1
1337	22,28	45,8	46,2	57,1
1341	22,35	45,8	46,2	57,1
1344	22,40	45,7	46,1	57
1348	22,47	45,7	46,1	57
1351	22,52	45,6	46,1	57

1	2	3	4	5
1355	22,58	45,6	46	57
1358	22,63	45,6	46	56,9
1362	22,70	45,5	46	56,9
1365	22,75	45,5	45,9	56,8
1369	22,82	45,5	45,9	56,8
1372	22,87	45,4	45,8	56,8
1376	22,93	45,4	45,8	56,7
1379	22,98	45,3	45,8	56,7
1383	23,05	45,3	45,7	56,6
1386	23,10	45,3	45,6	56,6
1390	23,17	45,2	45,6	56,6
1393	23,22	45,2	45,6	56,6
1397	23,28	45,1	45,6	56,5
1400	23,33	45,1	45,5	56,5
1404	23,40	45,1	45,5	56,5
1407	23,45	45	45,5	56,4
1411	23,52	45	45,4	56,4
1414	23,57	45	45,4	56,3
1418	23,63	44,9	45,3	56,3
1421	23,68	44,9	45,3	56,3
1425	23,75	44,8	45,3	56,3
1428	23,80	44,8	45,3	56,2
1432	23,87	44,8	45,2	56,2
1435	23,92	44,7	45,1	56,2
1439	23,98	44,7	45,1	56,2
1442	24,03	44,6	45,1	56,1
1446	24,10	44,6	45	56,1
1449	24,15	44,6	45	56,1
1453	24,22	44,5	45	56
1456	24,27	44,5	45	56
1460	24,33	44,5	44,9	56
1463	24,38	44,5	44,8	56
1467	24,45	44,4	44,8	55,9
1470	24,50	44,3	44,8	55,9
1474	24,57	44,3	44,8	55,8
1477	24,62	44,3	44,7	55,8
1481	24,68	44,3	44,7	55,8
1484	24,73	44,2	44,6	55,8
1488	24,80	44,2	44,6	55,8
1491	24,85	44,1	44,6	55,8
1495	24,92	44,1	44,5	55,7
1498	24,97	44,1	44,5	55,7
1502	25,03	44	44,5	55,6
1505	25,08	44	44,5	55,6
1509	25,15	44	44,4	55,6

1	2	3	4	5
1512	25,20	44	44,4	55,6
1516	25,27	43,9	44,3	55,6
1519	25,32	43,9	44,3	55,5
1523	25,38	43,8	44,3	55,5
1526	25,43	43,8	44,3	55,5
1530	25,50	43,8	44,2	55,5
1533	25,55	43,7	44,2	55,4
1537	25,62	43,7	44,1	55,4
1540	25,67	43,6	44,1	55,4
1544	25,73	43,6	44,1	55,3
1547	25,78	43,6	44	55,3
1551	25,85	43,6	44	55,3
1554	25,90	43,5	44	55,3
1558	25,97	43,5	44	55,3
1561	26,02	43,5	43,9	55,3
1565	26,08	43,4	43,9	55,3
1568	26,13	43,4	43,8	55,2
1572	26,20	43,4	43,8	55,2
1575	26,25	43,3	43,8	55,1
1579	26,32	43,3	43,7	55,1
1582	26,37	43,3	43,7	55,1
1586	26,43	43,2	43,6	55,1
1589	26,48	43,2	43,6	55,1
1593	26,55	43,1	43,6	55,1
1596	26,60	43,1	43,6	55
1600	26,67	43,1	43,5	55
1603	26,72	43,1	43,5	55
1607	26,78	43	43,5	55
1610	26,83	43	43,4	55
1614	26,90	43	43,4	55
1617	26,95	43	43,3	55
1621	27,02	43	43,3	54,9
1624	27,07	42,9	43,3	54,9
1628	27,13	42,9	43,3	54,9
1631	27,18	42,8	43,3	54,9
1635	27,25	42,8	43,2	54,8
1638	27,30	42,8	43,1	54,8
1642	27,37	42,8	43,1	54,8
1645	27,42	42,7	43,1	54,8
1649	27,48	42,7	43,1	54,8
1652	27,53	42,7	43,1	54,8
1656	27,60	42,6	43	54,8
1659	27,65	42,6	43	54,8
1663	27,72	42,6	43	54,7
1666	27,77	42,6	42,9	54,7

1	2	3	4	5
1670	27,83	42,5	42,9	54,7
1673	27,88	42,5	42,9	54,7
1677	27,95	42,5	42,8	54,6
1680	28,00	42,5	42,8	54,6
1684	28,07	42,5	42,8	54,6
1687	28,12	42,4	42,8	54,6
1691	28,18	42,4	42,7	54,6
1694	28,23	42,3	42,7	54,6
1698	28,30	42,3	42,6	54,6
1701	28,35	42,3	42,6	54,6
1705	28,42	42,3	42,6	54,6
1708	28,47	42,3	42,6	54,5
1712	28,53	42,2	42,6	54,5
1715	28,58	42,2	42,5	54,5
1719	28,65	42,1	42,5	54,5
1722	28,70	42,1	42,5	54,5
1726	28,77	42,1	42,5	54,5
1729	28,82	42,1	42,4	54,5
1733	28,88	42,1	42,4	54,5
1736	28,93	42	42,3	54,5
1740	29,00	42	42,3	54,5
1743	29,05	42	42,3	54,5
1747	29,12	42	42,3	54,5
1750	29,17	41,9	42,3	54,5
1754	29,23	41,9	42,2	54,4
1757	29,28	41,8	42,1	54,4
1761	29,35	41,8	42,1	54,4
1764	29,40	41,8	42,1	54,4
1768	29,47	41,8	42,1	54,4
1771	29,52	41,8	42,1	54,4
1775	29,58	41,7	42	54,3
1778	29,63	41,7	42	54,3
1782	29,70	41,6	42	54,4
1785	29,75	41,6	42	54,3
1789	29,82	41,6	41,9	54,3
1792	29,87	41,6	41,9	54,3
1796	29,93	41,6	41,8	54,3
1799	29,98	41,5	41,8	54,3
1803	30,05	41,5	41,8	54,3
1806	30,10	41,5	41,8	54,3
1810	30,17	41,5	41,8	54,3
1813	30,22	41,4	41,7	54,3
1817	30,28	41,4	41,7	54,2
1820	30,33	41,3	41,6	54,2
1824	30,40	41,3	41,6	54,2

1	2	3	4	5
1827	30,45	41,3	41,6	54,2
1831	30,52	41,3	41,6	54,2
1834	30,57	41,3	41,6	54,2
1838	30,63	41,2	41,5	54,1
1841	30,68	41,2	41,5	54,1
1845	30,75	41,1	41,5	54,1
1848	30,80	41,1	41,5	54,1
1852	30,87	41,1	41,4	54,1
1855	30,92	41,1	41,4	54,1
1859	30,98	41	41,3	54,1
1862	31,03	41	41,3	54,1
1866	31,10	41	41,3	54,1
1869	31,15	41	41,3	54
1873	31,22	41	41,3	54
1876	31,27	40,9	41,2	54
1880	31,33	40,9	41,1	54
1883	31,38	40,9	41,1	54
1887	31,45	40,9	41,1	54
1890	31,50	40,8	41,1	54
1894	31,57	40,8	41,1	54
1897	31,62	40,8	41	54
1901	31,68	40,8	41	54
1904	31,73	40,8	41	54
1908	31,80	40,7	41	54
1911	31,85	40,7	41	53,9
1915	31,92	40,6	41	53,9
1918	31,97	40,6	40,9	53,9
1922	32,03	40,6	40,9	53,9
1925	32,08	40,6	40,8	53,9
1929	32,15	40,6	40,8	53,8
1932	32,20	40,5	40,8	53,8
1936	32,27	40,5	40,8	53,8
1939	32,32	40,5	40,7	53,8
1943	32,38	40,5	40,7	53,8
1946	32,43	40,5	40,6	53,8
1950	32,50	40,4	40,6	53,8
1953	32,55	40,4	40,6	53,8
1957	32,62	40,3	40,6	53,8
1960	32,67	40,3	40,6	53,7
1964	32,73	40,3	40,6	53,7
1967	32,78	40,3	40,5	53,7
1971	32,85	40,3	40,5	53,7
1974	32,90	40,2	40,5	53,7
1978	32,97	40,2	40,5	53,7
1981	33,02	40,2	40,4	53,7

1	2	3	4	5
1985	33,08	40,1	40,4	53,6
1988	33,13	40,1	40,4	53,6
1992	33,20	40,1	40,3	53,6
1995	33,25	40,1	40,3	53,6
1999	33,32	40,1	40,3	53,6
2002	33,37	40	40,3	53,6
2006	33,43	40	40,3	53,6
2009	33,48	40	40,2	53,6
2013	33,55	40	40,2	53,6
2016	33,60	39,9	40,1	53,5
2020	33,67	39,9	40,1	53,6
2023	33,72	39,9	40,1	53,5
2027	33,78	39,8	40,1	53,5
2030	33,83	39,8	40,1	53,5
2034	33,90	39,8	40	53,5
2037	33,95	39,8	40	53,5
2041	34,02	39,8	40	53,5
2044	34,07	39,7	40	53,5
2048	34,13	39,7	40	53,5
2051	34,18	39,6	40	53,5
2055	34,25	39,6	39,9	53,4
2058	34,30	39,6	39,9	53,5
2062	34,37	39,6	39,9	53,4
2065	34,42	39,6	39,8	53,4
2069	34,48	39,6	39,8	53,4
2072	34,53	39,5	39,8	53,3
2076	34,60	39,5	39,8	53,3
2079	34,65	39,5	39,8	53,3
2083	34,72	39,5	39,7	53,3
2086	34,77	39,5	39,7	53,3
2090	34,83	39,5	39,7	53,3
2093	34,88	39,4	39,7	53,3
2097	34,95	39,4	39,6	53,3
2100	35,00	39,4	39,6	53,3
2104	35,07	39,3	39,6	53,3
2107	35,12	39,3	39,6	53,3
2111	35,18	39,3	39,6	53,2
2114	35,23	39,3	39,5	53,2
2118	35,30	39,3	39,5	53,2
2121	35,35	39,3	39,5	53,2
2125	35,42	39,2	39,5	53,2
2128	35,47	39,2	39,5	53,1
2132	35,53	39,2	39,4	53,1
2135	35,58	39,1	39,4	53,1
2139	35,65	39,1	39,4	53,1

1	2	3	4	5
2142	35,70	39,1	39,3	53,1
2146	35,77	39,1	39,3	53,1
2149	35,82	39,1	39,3	53,1
2153	35,88	39,1	39,3	53,1
2156	35,93	39	39,3	53,1
2160	36,00	39	39,3	53,1
2163	36,05	39	39,2	53,1
2167	36,12	39	39,2	53
2170	36,17	39	39,1	53
2174	36,23	39	39,1	53
2177	36,28	38,9	39,1	53
2181	36,35	38,9	39,1	53
2184	36,40	38,9	39,1	53
2188	36,47	38,8	39,1	53
2191	36,52	38,8	39,1	53
2195	36,58	38,8	39,1	53
2198	36,63	38,8	39	53
2202	36,70	38,8	39	52,9
2205	36,75	38,8	39	52,9
2209	36,82	38,8	39	52,9
2212	36,87	38,7	39	52,9
2216	36,93	38,7	38,9	52,8
2219	36,98	38,7	38,9	52,8
2223	37,05	38,6	38,9	52,8
2226	37,10	38,6	38,9	52,8
2230	37,17	38,6	38,8	52,8
2233	37,22	38,6	38,8	52,8
2237	37,28	38,6	38,8	52,8
2240	37,33	38,6	38,8	52,8
2244	37,40	38,6	38,8	52,8
2247	37,45	38,5	38,7	52,8
2251	37,52	38,5	38,7	52,8
2254	37,57	38,5	38,7	52,8
2258	37,63	38,5	38,6	52,7
2261	37,68	38,5	38,6	52,7
2265	37,75	38,5	38,6	52,7
2268	37,80	38,4	38,6	52,7
2272	37,87	38,4	38,6	52,6
2275	37,92	38,4	38,6	52,6
2279	37,98	38,3	38,5	52,6
2282	38,03	38,3	38,5	52,6
2286	38,10	38,3	38,5	52,6
2289	38,15	38,3	38,5	52,6
2293	38,22	38,3	38,5	52,6
2296	38,27	38,3	38,5	52,6

1	2	3	4	5
2300	38,33	38,3	38,5	52,6
2303	38,38	38,2	38,4	52,6
2307	38,45	38,2	38,4	52,5
2310	38,50	38,2	38,4	52,6
2314	38,57	38,1	38,3	52,5
2317	38,62	38,1	38,3	52,5
2321	38,68	38,1	38,3	52,5
2324	38,73	38,1	38,3	52,5
2328	38,80	38,1	38,3	52,5
2331	38,85	38	38,3	52,5
2335	38,92	38	38,2	52,5
2338	38,97	38	38,2	52,5
2342	39,03	38	38,2	52,5
2345	39,08	38	38,2	52,4
2349	39,15	38	38,1	52,4
2352	39,20	38	38,1	52,4
2356	39,27	38	38,1	52,3
2359	39,32	38	38,1	52,4
2363	39,38	37,9	38,1	52,3
2366	39,43	37,9	38,1	52,3
2370	39,50	37,9	38,1	52,3
2373	39,55	37,9	38,1	52,3
2377	39,62	37,8	38,1	52,3
2380	39,67	37,8	38	52,3
2384	39,73	37,8	38	52,3
2387	39,78	37,8	38	52,3
2391	39,85	37,8	38	52,3
2394	39,90	37,8	38	52,3
2398	39,97	37,8	38	52,2
2401	40,02	37,8	37,9	52,2
2405	40,08	37,7	37,9	52,2
2408	40,13	37,7	37,9	52,2
2412	40,20	37,7	37,9	52,2
2415	40,25	37,7	37,8	52,2
2419	40,32	37,6	37,8	52,1
2422	40,37	37,6	37,8	52,1
2426	40,43	37,6	37,8	52,1
2429	40,48	37,6	37,8	52,1
2433	40,55	37,6	37,8	52,1
2436	40,60	37,6	37,8	52,1
2440	40,67	37,6	37,7	52,1
2443	40,72	37,6	37,7	52,1
2447	40,78	37,5	37,7	52,1
2450	40,83	37,5	37,7	52
2454	40,90	37,5	37,6	52

1	2	3	4	5
2457	40,95	37,5	37,6	52
2461	41,02	37,5	37,6	52
2464	41,07	37,5	37,6	52
2468	41,13	37,5	37,6	52
2471	41,18	37,5	37,6	52
2475	41,25	37,4	37,6	52
2478	41,30	37,4	37,5	52
2482	41,37	37,4	37,6	52
2485	41,42	37,3	37,5	51,9
2489	41,48	37,4	37,5	51,9
2492	41,53	37,3	37,5	51,9
2496	41,60	37,3	37,5	51,9
2499	41,65	37,3	37,5	51,9
2503	41,72	37,3	37,5	51,9
2506	41,77	37,3	37,4	51,8
2510	41,83	37,3	37,4	51,8
2513	41,88	37,3	37,4	51,8
2517	41,95	37,2	37,4	51,8
2520	42,00	37,2	37,4	51,8
2524	42,07	37,2	37,3	51,8
2527	42,12	37,2	37,3	51,8
2531	42,18	37,2	37,3	51,8
2534	42,23	37,2	37,3	51,8
2538	42,30	37,1	37,3	51,8
2541	42,35	37,1	37,3	51,7
2545	42,42	37,1	37,3	51,7
2548	42,47	37,1	37,3	51,7
2552	42,53	37,1	37,2	51,7
2555	42,58	37,1	37,2	51,7
2559	42,65	37,1	37,2	51,6
2562	42,70	37,1	37,1	51,6
2566	42,77	37,1	37,1	51,6
2569	42,82	37,1	37,1	51,6
2573	42,88	37	37,1	51,6
2576	42,93	37	37,1	51,6
2580	43,00	37	37,1	51,6
2583	43,05	37	37,1	51,6
2587	43,12	37	37,1	51,6
2590	43,17	37	37,1	51,6
2594	43,23	37	37	51,5
2597	43,28	37	37	51,5
2601	43,35	36,9	37	51,5
2604	43,40	36,9	37	51,5
2608	43,47	36,9	37	51,5
2611	43,52	36,9	37	51,5

1	2	3	4	5
2615	43,58	36,8	37	51,5
2618	43,63	36,9	37	51,5
2622	43,70	36,9	37	51,5
2625	43,75	36,8	36,9	51,5
2629	43,82	36,8	36,9	51,5
2632	43,87	36,8	36,9	51,5
2636	43,93	36,8	36,9	51,4
2639	43,98	36,8	36,9	51,4
2643	44,05	36,8	36,8	51,4
2646	44,10	36,8	36,8	51,3
2650	44,17	36,8	36,8	51,4
2653	44,22	36,8	36,8	51,3
2657	44,28	36,8	36,8	51,3
2660	44,33	36,8	36,8	51,3
2664	44,40	36,7	36,8	51,3
2667	44,45	36,7	36,7	51,3
2671	44,52	36,7	36,7	51,3
2674	44,57	36,7	36,7	51,3
2678	44,63	36,7	36,7	51,3
2681	44,68	36,6	36,7	51,3
2685	44,75	36,6	36,6	51,2
2688	44,80	36,6	36,6	51,2
2692	44,87	36,6	36,6	51,2
2695	44,92	36,6	36,6	51,2
2699	44,98	36,6	36,6	51,2
2702	45,03	36,5	36,6	51,2
2706	45,10	36,5	36,6	51,2
2709	45,15	36,5	36,6	51,1
2713	45,22	36,5	36,6	51,1
2716	45,27	36,5	36,5	51,1
2720	45,33	36,5	36,5	51,1
2723	45,38	36,5	36,5	51,1
2727	45,45	36,5	36,5	51,1
2730	45,50	36,5	36,5	51,1
2734	45,57	36,5	36,5	51,1
2737	45,62	36,4	36,5	51
2741	45,68	36,4	36,5	51
2744	45,73	36,4	36,5	51
2748	45,80	36,3	36,4	51
2751	45,85	36,3	36,4	51
2755	45,92	36,3	36,4	51
2758	45,97	36,3	36,3	51
2762	46,03	36,3	36,3	51
2765	46,08	36,3	36,3	51
2769	46,15	36,3	36,3	51

1	2	3	4	5
2772	46,20	36,3	36,3	51
2776	46,27	36,3	36,3	51
2779	46,32	36,2	36,3	51
2783	46,38	36,2	36,3	50,9
2786	46,43	36,1	36,2	50,9
2790	46,50	36,2	36,3	50,9
2793	46,55	36,1	36,2	50,8
2797	46,62	36,1	36,2	50,8
2800	46,67	36,1	36,2	50,8
2804	46,73	36,1	36,2	50,8
2807	46,78	36,1	36,2	50,8
2811	46,85	36,1	36,1	50,8
2814	46,90	36,1	36,1	50,8
2818	46,97	36,1	36,1	50,8
2821	47,02	36,1	36,1	50,8
2825	47,08	36,1	36,1	50,8
2828	47,13	36	36,1	50,8
2832	47,20	36	36,1	50,7
2835	47,25	36	36,1	50,8
2839	47,32	36	36,1	50,7
2842	47,37	36	36	50,7
2846	47,43	36	36	50,7
2849	47,48	36	36	50,7
2853	47,55	36	36	50,6
2856	47,60	36	36	50,6
2860	47,67	35,9	36	50,6
2863	47,72	35,9	36	50,6
2867	47,78	35,9	36	50,6
2870	47,83	35,9	36	50,6
2874	47,90	35,9	35,9	50,6
2877	47,95	35,9	35,9	50,6
2881	48,02	35,8	35,9	50,6
2884	48,07	35,8	35,9	50,6
2888	48,13	35,8	35,9	50,6
2891	48,18	35,8	35,9	50,5
2895	48,25	35,8	35,8	50,5
2898	48,30	35,8	35,8	50,5
2902	48,37	35,8	35,8	50,5
2905	48,42	35,8	35,8	50,5
2909	48,48	35,8	35,8	50,5
2912	48,53	35,8	35,8	50,5
2916	48,60	35,8	35,8	50,5
2919	48,65	35,8	35,8	50,5
2923	48,72	35,7	35,8	50,5
2926	48,77	35,8	35,8	50,4

1	2	3	4	5
2930	48,83	35,7	35,8	50,5
2933	48,88	35,7	35,7	50,4
2937	48,95	35,7	35,7	50,4
2940	49,00	35,7	35,7	50,4
2944	49,07	35,7	35,7	50,3
2947	49,12	35,6	35,6	50,3
2951	49,18	35,7	35,6	50,3
2954	49,23	35,7	35,6	50,3
2958	49,30	35,6	35,6	50,3
2961	49,35	35,6	35,6	50,3
2965	49,42	35,6	35,6	50,3
2968	49,47	35,6	35,6	50,3
2972	49,53	35,6	35,6	50,3
2975	49,58	35,6	35,6	50,3
2979	49,65	35,6	35,6	50,3
2982	49,70	35,6	35,6	50,2
2986	49,77	35,6	35,6	50,2
2989	49,82	35,6	35,5	50,2
2993	49,88	35,6	35,5	50,2
2996	49,93	35,6	35,5	50,2
3000	50,00	35,6	35,5	50,2
3003	50,05	35,5	35,5	50,1
3007	50,12	35,5	35,5	50,1
3010	50,17	35,5	35,5	50,1
3014	50,23	35,5	35,5	50,1
3017	50,28	35,5	35,5	50,1
3021	50,35	35,5	35,4	50,1
3024	50,40	35,5	35,4	50,1
3028	50,47	35,5	35,4	50,1
3031	50,52	35,5	35,4	50,1
3035	50,58	35,5	35,4	50,1
3038	50,63	35,4	35,3	50
3042	50,70	35,4	35,3	50
3045	50,75	35,4	35,3	50
3049	50,82	35,4	35,3	50
3052	50,87	35,4	35,3	50
3056	50,93	35,3	35,3	50
3059	50,98	35,3	35,3	50
3063	51,05	35,3	35,3	50
3066	51,10	35,3	35,3	50
3070	51,17	35,3	35,3	50
3073	51,22	35,3	35,2	49,9
3077	51,28	35,3	35,2	49,9
3080	51,33	35,3	35,2	49,9
3084	51,40	35,2	35,2	49,9

[illegible]

Приложение Б

Результаты экспериментального наблюдения за динамикой роста фронта кристаллизации ТАМ вокруг теплообменной трубки во времени

Таблица Б.1

Показания наблюдений за динамикой роста фронта кристаллизации ТАМ вокруг теплообменной трубки во времени. Условия: скорость теплоносителя в теплообменной трубке 0,09м/с (ламинарный режим); удаление датчика от поверхности трубки – 1мм.

№	Значение радиуса закр. цилиндра r в момент времени τ , м.	Время кристаллизации в i -ом опыте τ , мин.					Время крист-ии $\tau_{\text{ср}}$, мин.
		1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,008	0	0	0	0	0	0
2	0,009	3	3	3	3	3	3
3	0,01	6	6	7	6	6	6,2
4	0,011	10	11	10	10	10	10,2
5	0,012	15	14	14	14	14	14,2
6	0,013	19	18	19	18	19	18,6
7	0,014	24	23	24	23	23	23,4
8	0,015	28	28	29	28	28	28,2
9	0,016	32	33	34	34	34	33,4
10	0,017	36	38	39	39	39	38,2

Таблица Б.2

Показания наблюдений за динамикой роста фронта кристаллизации ТАМ вокруг теплообменной трубки во времени. Условия: скорость теплоносителя в теплообменной трубке 0,12м/с (переходной режим); удаление датчика от поверхности трубки – 6мм.

№	Значение радиуса закр. цилиндра r в момент времени τ , м.	Время кристаллизации в i -ом опыте τ , мин.					Время крист-ии $\tau_{\text{ср}}$, мин.
		1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,008	0	0	0	0	0	0
2	0,009	3	3	3	3	3	3
3	0,01	6	6	6	6	6	6

1	2	3	4	5	6	7	8
4	0,011	10	10	10	10	10	10
5	0,012	14	14	14	14	14	14
6	0,013	18	17,5	18	19	18	18,1
7	0,014	22	22,5	22	23	23	22,5
8	0,015	26	27	26	27	28	26,8
9	0,016	31	32	31	32	33	31,8
10	0,017	36	38	37	38	39	37,6

Таблица Б.3

Показания наблюдений за динамикой роста фронта кристаллизации ТАМ вокруг теплообменной трубки во времени. Условия: скорость теплоносителя в теплообменной трубке 0,16м/с (переходной режим); удаление датчика от поверхности трубки – 4мм.

№	Значение радиуса закр. цилиндра r в момент времени τ , м.	Время кристаллизации в i -ом опыте τ , мин.					Время крист-ии $\tau_{\text{ср}}$, мин.
		1	2	3	4	5	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,008	0	0	0	0	0	0
2	0,009	3	3	3	3	3	3
3	0,01	6	6	6	6	6	6
4	0,011	9	10	9	10	10	9,6
5	0,012	13	13	14	13	14	13,4
6	0,013	18	18	17	18	18	17,8
7	0,014	22	22	22	22	23	22,2
8	0,015	27	27	28	27	29	27,6
9	0,016	32	32	34	33	34	33
10	0,017	36	36	38	38	38	37,2

Публічне акціонерне товариство
«ДРУЖКІВСЬКИЙ ЗАВОД МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ»

84205, м. Дружківка Донецької обл., вул. Леніна, 3
Р/с 26004000003625 ПАТ «Креди Агриколь Банк» МФО 300614
Р/р 26008011597901 ПАТ «УкрСиббанк» МФО 351005
код ЄДРПОУ 00191052
Свідоцтво № 100324942, ПІН 001910505109
e-mail: dmf@dmf.com.ua
тел./факс: (06267) 4-47-11



ДСТУ
ISO 9001-2009

Публичное акционерное общество
«ДРУЖКОВСКИЙ МЕТИЗНЫЙ ЗАВОД»

84205, г. Дружковка Донецкой обл., ул. Ленина, 3
Р/с 26004000003625 ПАО «Креди Агриколь Банк» МФО 300614
Р/с 26008011597901 ПАО «УкрСиббанк» МФО 351005
код ЄДРПОУ 00191052
Свидетельство № 100324942, ИНН 001910505109
e-mail: dmf@dmf.com.ua
тел./факс: (06267) 4-47-11



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Генеральний директор

ПАТ «Дружковський метизний завод»

Я.Ю. Степанов

« 7 » жовтня 2014 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів і висновків дисертаційної роботи Остапенка Віталія Валерійовича
«Фазоперехідний акумулятор теплоти для потреб систем теплопостачання»

Комісія у складі голови

Технічного директора – Галицького С.С.

і членів:

Шаповалова А.Л. – головного технолога,

Рябченко М.В. – начальника відділу

технічного контролю

склала даний акт по факту використання ПУБЛІЧНИМ АКЦІОНЕРНИМ
ТОВАРИСТВОМ «ДРУЖКОВСЬКИЙ МЕТИЗНИЙ ЗАВОД» результатів і
висновків досліджень, виконаних у дисертаційній роботі В.В. Остапенко на тему
«Фазоперехідний акумулятор теплоти для потреб систем теплопостачання» з
метою підвищення ефективності роботи системи теплопостачання підприємства.

До ПАТ «Дружковський метизний завод» було передано:

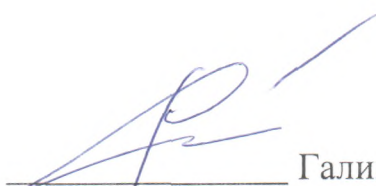
- методику теплового та конструктивного розрахунку акумуляторів теплоти фазового переходу (АТФП) твердих матеріалів;
- схеми підключення акумуляторів до джерел теплопостачання.

На підставі переданих матеріалів було розроблено та сконструйовано акумулятор теплоти потужністю 200кВт для потреб системи теплопостачання ковальсько-пресового цеху №4 (КПЦ-4) за паралельною схемою його роботи з генераторами теплоти на природному газі.


Вивчивши передані матеріали та результати роботи джерела теплоти КПЦ-4 за опалювальний період 2013-2014 років комісія встановила таке:

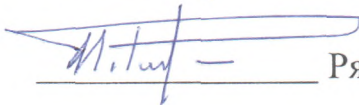
- методика розрахунку акумуляторів теплоти фазового переходу твердих матеріалів дозволяє обґрунтовано підходити до проектування зазначених апаратів;
- використання АТФП в схемах роботи газових котелень забезпечує рівномірну роботу усього теплогенеруючого обладнання у перехідний період опалювального сезону;
- впровадження акумулятора у систему котельні КПЦ-4 забезпечило отримання економічного ефекту у розмірі 17,8 тис. грн. у порівнянні з аналогічною котельнею КПЦ-5 (без акумулятора) за опалювальний період 2013-2014 років.

Голова комісії


Галицький С.С.

Члени комісії


Шаповалов А.Л.


Рябченко М.В.

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе

Донбасской национальной академии
строительства и архитектуры

д.т.н., профессор Зайченко Н.М.

«__» 20__ г.

АКТ

про внедрение результатов диссертационного исследования Остапенко Виталия Валериевича на тему «Фазопереходной аккумулятор теплоты для нужд систем теплоснабжения» на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 - теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение.

Этим актом свидетельствуем, что результаты диссертационного исследования Остапенко В.В.: физическая и математическая модели рабочего процесса аккумуляторов теплоты фазового перехода твердых материалов, методика теплового и конструктивного расчета натуральных аппаратов, схемы подключения аккумуляторов к источникам теплоснабжения – используются сотрудниками кафедры Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция ДонНАСА при чтении дисциплин «Теплогенерирующие установки», «Теплоснабжение», «Нетрадиционные источники энергии» и включены в рабочие программы указанных дисциплин специальностей 7.06010107 и 8.06010107 «Теплоснабжение и вентиляция».

Зав. кафедрой

Теплотехники, теплогазоснабжения

и вентиляции, д.т.н., профессор



А.В. Лукьянов