

М87714

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
Государственный технический университет имени Н.Э.Баумана

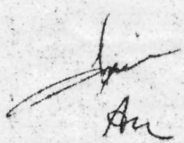
На правах рукописи

ЗОРИНА ИРИНА ГРИГОРЬЕВНА

РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ С
ВСТАВКАМИ С ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИМ МАТЕРИАЛОМ

06.14.06 - Теоретические основы теплотехники

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва 1993

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Государственном техническом университете им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук,
Чукаев А.Г.

Официальные оппоненты:

д.т.н., профессор Бекнев В.С.

к.т.н., ст.н.сотр. Галушкин С.Н.

Ведущая организация

НПО "Эко Энергетика"

Защита диссертации состоится "18" 10 1993 г. в 14⁰⁰ часов на заседании специализированного совета при Московском Государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, г. Москва.

Ф-т "

О диссертацией мо

Ваш отзыв на автор
по адресу: 107005, Мо
Н.Э.Баумана, ученому

автореферат разо

Ученый секретарь
специализированного С

МР7714

Подп. и печ. 15.06.93

Типография МТУ им.

Актуальность темы: В настоящее время остро стоит вопрос о рациональном использовании топливно-энергетических ресурсов, о создании и применении новых нетрадиционных способов получения энергии и ее утилизации, об использовании ресурсосберегающих процессов и технологий, в том числе и космических.

Важная роль при разработке устройств, предназначенных для решения возникающих при этом задач, отводится вопросам обеспечения оптимальных тепловых режимов систем терморегулирования и термостатирования. Существует обширный класс теплотехнических устройств, входящий в состав этих систем, в которых тепловые процессы сопровождаются фазовыми переходами. Причем такие процессы часто являются эндо- или экзотермическими.

Отличительная черта таких устройств - наличие перемещающейся во времени поверхности раздела, разграничивающей области с различными физическими свойствами, в окрестности которой происходит поглощение или высвобождение энергии. Условие на границе раздела фаз делает эту задачу нелинейной даже в случае кусочно-постоянных физических характеристик среды и требует разработки особых методов ее решения.

Классическим примером задач такого типа в теории нестационарной теплопроводности является задача Стефана о перемещающейся границей раздела фаз "твердое тело-жидкость", определяемой заданной температурой плавления и особым граничным условием.

Расчет процессов тепломассопереноса в системах с подвижными или внешними границами имеет важное значение для целого ряда отраслей современной техники, таких как авиационная и ракетно-космическая техника, металлургия, производство пищевых продуктов, выращивание кристаллов, электрофорез и т.д.

В настоящем исследовании рассматриваются проблемы математической физики для нелинейных задач со свободной границей. Это связано с необходимостью разработки аккумуляторов тепловой энергии на основе теплоты фазовых переходов (АФП) систем терморегулирования (СТР), предназначенных для поддержания постоянной температуры в среде с внутренними тепловыделениями или обеспечения повышенной тепловой инерции при циклических изменениях внешней тепловой нагрузки.

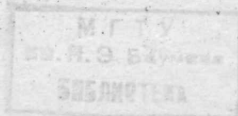
Известно, что широкое применение АФП, использующих теплоту

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1087714

Зорина И.Г. Расчет Гидрод



плавления материалов в установках для утилизации теплоты отработанных газов, в системах обогрева и охлаждения промышленных и жилых зданий и сооружений, при охлаждении радиоэлектронного приемно-передающего оборудования, ЭВМ, систем терморегулирования космических аппаратов и в целом ряде других случаев, обусловлено отсутствием в их конструкции громоздких и подвижных устройств, малогабаритностью и экономичностью.

Теоретическому и экспериментальному исследованию теплообмена в АФП, разработке методов их расчета и анализу протекающих процессов посвящено большое количество работ как отечественных так и зарубежных исследователей. Их анализ показывает, что до недавнего времени основным механизмом переноса теплоты в процессах плавления считалась теплопроводность. Однако экспериментальные работы последних лет показали, что под действием сил тяжести и из-за неоднородности температуры жидкой фазы в ней возникает естественная конвекция, приводящая в ряде случаев к существенной интенсификации процесса плавления. Этот факт, очевидно, необходимо учитывать в одном из наиболее активно развивающихся направлений - разработке АФП, предназначенных для накопления солнечной энергии.

Низкая плотность энергии падающего солнечного излучения и нерегулярный характер его поступления затрудняют создание эффективных АФП и выдвигают на первый план вопросы, связанные с интенсификацией теплообмена пассивными или активными методами. Таким образом, возникает задача исследования влияния естественной конвекции на теплообмен в АФП, создания методов расчета коллективного теплообмена и способов его интенсификации в этих устройствах.

Цель работы: Интенсификация тепло- и массообмена при фазовых превращениях в аппаратах систем терморегулирования и выбор их оптимальных параметров.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- изучением физических закономерностей тепломассообмена при фазовых превращениях в АФП;
- разработкой экспериментально проверенных математических моделей, методов и методик численного расчета на ЭВМ гидродинамики и теплообмена в различных конструкциях АФП на основе теплоаккумулирующих материалов (ТАМ), изменяющих агрегатное состо-

яние в интервале рабочих температур 313 - 383 К:

- выявлением факторов, влияющих на интенсивность теплообмена при фазовых превращениях;
- экспериментальными исследованиями по изучению воздействия естественной конвекции на теплообмен в АФП.

Правильность разработанных математической модели и методики расчета процессов гидродинамики и тепломассообмена подтверждена экспериментально.

Научная новизна : Автором впервые :

- изучены физические закономерности процессов и разработаны экспериментально проверенные математические модели, методы и методики численного расчета гидродинамики и нестационарного сопряженного конвективного теплообмена при фазовых превращениях в аппаратах систем терморегулирования (АФП), учитывающие естественную конвекцию в жидкой фазе ТАМ и позволяющие провести исследования по выбору оптимальных параметров этих аппаратов;
- установлено влияние на конвективный теплообмен в процессе зарядки и разрядки АФП естественной конвекции, влияние переохлаждения и перегрева ТАМ на значение локального и среднеинтегрального чисел Нуссельта.

Практическая ценность : Созданы пакеты прикладных программ и инженерные методики расчета гидродинамики и тепломассообмена для проектирования, разработки и эксплуатации различных типов АФП, позволяющие проводить выбор оптимальных параметров этих устройств, а также исследовать влияние на теплообмен геометрических размеров, переохлаждения и перегрева ТАМ, изменение теплофизических свойств и граничных условий.

Получены критериальные зависимости для расчета конвективного теплообмена в различных конструкциях АФП.

Апробация работы : Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на :

1. Конференции "Энергоустановки и двигательные установки летательных аппаратов" (Ленинград, 1990).
2. VIII Всесоюзной школе-семинаре "Современные проблемы газодинамики и тепломассообмена и пути повышения эффективности энергетических установок" (Москва, 1991).
3. Научно-техническом семинаре кафедры Э6 (МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1992).

Разработанный пакет прикладных программ внедрен и используется в ИВТАНе, г. Москва и в НПО "Солнце", г. Ашхабад.

Публикации : Основные положения и результаты исследований отражены в трех статьях и тезисах двух докладов.

Объем работы : Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и содержит страницы машинописного текста, включая таблиц, рисунков, список литературы из 110 наименований.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность работы, ее цель, научная новизна и практическая ценность результатов исследований.

В первой главе дается аналитический обзор литературных источников, касающихся принципов аккумулирования теплоты в процессе плавления материала. Анализируется влияние естественной конвекции и различия плотностей фаз плавящегося материала на характеристики теплообмена. Рассматриваются существующие методы расчета теплообмена при плавлении и затвердевании теплоаккумулирующего материала (ТАМ). Также дан обзор по вынужденному течению теплоносителя в каналах сложной формы и выбраны методики расчета для продольного и поперечного обтекания вставок с ТАМ, расположенных в этих каналах.

Проведенный критический обзор литературных источников по вопросу разработки теплоаккумулирующих устройств, использующих теплоту плавления, позволяет сделать следующие выводы:

1. Как отечественная, так и зарубежная наука и техника проявляют устойчивый интерес к разработке АФП и в ряде случаев (гелиотехника, пассивные системы терморегулирования) связывают с их использованием определенный интерес.

2. Существует потребность в разработке методов математического моделирования конвективного теплообмена при фазовых переходных процессах для разработки и исследования низкопотенциальных АФП (диапазон рабочих температур $313\text{ К} + 363\text{ К}$) и создания на их основе методик численного расчета, позволяющих выбрать оптимальные параметры таких аппаратов.

3. Практически неучтенными остаются вопросы, связанные с влиянием естественной конвекции, различием теплофизических свойств

ств фаз, формой теплообменных поверхностей на теплообмен в АФП.

4. Совершенно не рассмотрен целый класс компактных АФП, представляющих собой каналы, в конструкции которых используются вставки из ТАМ, изменяющего свое агрегатное состояние в процессе эксплуатации.

Таким образом, в результате выполнения комплекса систематических теоретических и экспериментальных исследований по выявлению физических закономерностей процессов должны быть разработаны экспериментально проверенные математические модели, методы и методики численного расчета конвективного теплообмена при фазовых превращениях для проектирования, разработки и эксплуатации неэкспотенциальных аккумуляторов с фазовыми переходами.

Во второй главе проведено математическое моделирование и разработка численных методов расчета теплообмена в АФП. Рассмотрен нестационарный сопряженный теплообмен с полностью развитым ламинарным движением теплоносителя при продольном и поперечном обтекании вставок с ТАМ, представляющих собой бруски в виде параллелепипедов. ТАМ изменяет свое агрегатное состояние: при зарядке теплового аккумулятора (ТА) происходит плавление ТАМ, а при разрядке - затвердевание.

Математические модели строились для продольного и поперечного обтекания вставок с ТАМ.

При построении математической модели принимаются следующие допущения:

1) теплоемкость и теплопроводность ТАМ не зависят от температуры и являются постоянными и различными для каждой из фаз;

2) справедливо приближение Буссинеска при плавлении ТАМ;

3) объем ТАМ $= \text{const}$;

4) имеет место полностью развитое, установившееся ламинарное движение теплоносителя;

5) конвективное движение в расплаве ТАМ также ламинарное;

6) теплофизические свойства воздуха не зависят от температуры;

7) ТАМ является изотропным;

8) энергия деформации ТАМ мала по сравнению с внутренней энергией ТАМ.

9) фазовый переход совершается при постоянной температуре.

При продольном обтекании, в силу геометрической симметрии и повторяемости конструкции, а также симметрии тепловых нагрузок можно выделить повторяющийся элемент конструкции (abcdefa) и для него строить математическую модель и проводить все необходимые расчеты (рис. I).

Так как движение воздуха считается установившимся, то в начале определяется поле скоростей воздуха из стационарного уравнения движения, а затем решается сопряженная нестационарная система дифференциальных уравнений для воздуха и ТАМ, включающая в себя уравнения движения для расплавленного ТАМ в проекциях на оси координат, уравнения неразрывности, уравнения энергии для ТАМ и воздуха, а также уравнение для определения энтальпии.

Система уравнений дополняется начальными, граничными условиями и условиями симметрии.

Таким образом получена замкнутая система уравнений.

При решении задачи Стефана наиболее трудным моментом является учет положения границы раздела фаз, которая может принимать сложную форму, особенно в условиях конвективного теплообмена. В данной работе для идентификации границы раздела фаз впервые используется энтальпийный метод, ранее применяемый к задачам теплопроводности Стефана. При таком подходе поверхность раздела фаз исключается из рассмотрения и задача становится эквивалентной одной из задач нелинейной теплопроводности без фазового перехода.

Энтальпийная форма уравнения сохранения энергии эквивалентна трем дифференциальным уравнениям сохранения энергии - в твердой и жидкой фазах, а также на границе их раздела.

Задача Стефана решается только в прямоугольных областях, представляющих собой части вставок, заполненных ТАМ.

Уравнение энергии решается так, как будто нет фазового перехода, но все время идет отслеживание значения энтальпии. При принятых допущениях плавление - затвердевание происходит при постоянной температуре. Поэтому, пока не произойдет накопление энтальпии до значения, равного значению энтальпии полного расплавления ТАМ (H_1), температура расти не будет, все приходящее тепло пойдет на накопление энергии. И только после того, как энтальпия станет равной H_1 , будет происходить дальнейший рост температуры ТАМ.

Для решения поставленной задачи использовался метод кон-

трольных объемов, предложенный Паталкарком. В соответствии с этим подходом все описанные выше уравнения могут быть формально представлены в одинаковой форме, выражающей обобщенную форму закона сохранения энергии. Если обозначить зависимую переменную через Φ , то обобщенное дифференциальное уравнение примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \Phi) + \text{div} (\rho \cdot \vec{W} \cdot \Phi) = \text{div} (\Gamma \text{ grad } \Phi) + S;$$

где Γ - коэффициент диффузии;

S - источниковый член.

Метод контрольных объемов позволяет получить консервативные конечно-разностные уравнения, аппроксимирующие исходную систему дифференциальных уравнений.

Интегрируя каждое дифференциальное уравнение из построенной системы уравнений по соответствующему контрольному объему и временному интервалу и записывая его в конечно-разностной форме, получаем уравнения, которые решаются методом продольно-поперечной прогонки. Для учета фазового перехода, на каждом временном слое применяется метод энтальпии.

Данный алгоритм реализуется с помощью процедуры SIMPLE.

При поперечном обтекании, поперечное сечение канала периодически изменяется в направлении потока. Для таких каналов, при постоянных свойствах теплоносителя, распределение скоростей потока автомодельно в периодически повторяющемся поперечном сечении и независимо от координат на существенном удалении от входа. Такое независимое распределение скоростей является свойством полностью развитого течения. Полностью развитый термический режим характеризуется тем, что форма температурного распределения периодических областей одинакова и численное значение температур областей, расположенных ниже по потоку, может быть определено через соседние области, расположенные выше по течению, по известному масштабированию. Таким же образом определяется и давление.

Для канала с периодически изменяющейся формой поперечного сечения выбирается повторяющийся элемент abcdef (рис.2).

Предполагается, что давление вычисляется по следующей формуле

$$p(x, y) = -\gamma \cdot x + P(x, y)$$

где γ - постоянная составляющая полного градиента давления,

$a \cdot p(x, y)$ - периодическая величина.

Течение теплоносителя описывается уравнениями неразрывности и движения, записанными в проекциях на оси координат:

$$\rho \cdot \left[u_s \cdot \frac{\partial u_s}{\partial x} + v_s \cdot \frac{\partial u_s}{\partial y} \right] = \gamma - \frac{\partial p_s}{\partial x} + \mu \cdot \left[\frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_s}{\partial y^2} \right];$$

$$\rho \cdot \left[u_s \cdot \frac{\partial v_s}{\partial x} + v_s \cdot \frac{\partial v_s}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p_s}{\partial y} + \mu \cdot \left[\frac{\partial^2 v_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_s}{\partial y^2} \right];$$

$$\frac{\partial u_s}{\partial x} + \frac{\partial v_s}{\partial y} = 0.$$

Периодичность течения и симметрия приводят к следующим граничным условиям:

на твердых граничных стенках

$$u_b = v_b = 0,$$

на граничных линиях симметрии

$$\frac{\partial u_s}{\partial y} = 0; \quad v_b = 0,$$

на концах вниз и вверх по течению расчетной области (ab и cd) периодические условия задаются

$$u_b(x, y) = u_b(x+L, y),$$

$$v_b(x, y) = v_b(x+L, y),$$

$$p_b(x, y) = p_b(x+L, y).$$

Уравнение энергии для воздуха в переменных $\hat{T}$ примет вид

$$\frac{\partial \hat{T}}{\partial t} + u_s \cdot \frac{\partial \hat{T}}{\partial x} + v_s \cdot \frac{\partial \hat{T}}{\partial y} = a \cdot \left[\frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial y^2} \right].$$

При температуре $T_{пл}$ равной или выше температуры плавления в теплоаккумулирующем материале начинается конвекция, теплообмен при которой описывается уравнениями Навье-Стокса, уравнением неразрывности, уравнением энергии и уравнением для энтальпии:

$$\rho \cdot \left[\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial U}{\partial y} \right] = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \cdot \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right];$$

$$\rho \cdot \left[\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial V}{\partial y} \right] = - \rho \cdot g \cdot \beta \cdot \theta - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \cdot \left[\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right];$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0;$$

$$\rho \cdot \left[\frac{\partial H}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial H}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial H}{\partial y} + c_p \cdot U \cdot \alpha \right] = \lambda \cdot \left[\frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{T}}{\partial y^2} \right];$$

где $H = \int c_p \cdot d\hat{T}$.

Система уравнений дополняется соответствующими начальными и граничными условиями. В результате мы получаем замкнутую математическую постановку задачи с полностью развитым ламинарным течением теплоносителя в канале при поперечном обтекании вставок с ТАМ.

Задача решается методом контрольных объемов. Получают уравнения аналогов, идентичные уравнениям аналогов при продольном обтекании. Вместе с тем имеется и существенное отличие в построении метода прогонки. Расчетная область, в силу периодичности имеет не M , а $M-1$ узел, т.е. при решении системы уравнений разностных аналогов используется циклический трехдиагональный матричный механизм.

В третьей главе дана схема экспериментальной установки, приведены все режимы экспериментов, а также даны результаты экспериментального численного исследования конвективного теплообмена в АФП.

При зарядке теплоноситель проходил через нагреватель, температура которого была выше температуры плавления ТАМ, затем поступал в модуль АФП, где отдавал свое тепло ТАМ. При достижении

заданной температуры теплоаккумулирующего материала, равной 65°C цикла зарядки считался завершенным. Расход теплоносителя в процессе всего эксперимента поддерживался постоянным. При разрядке температура теплоносителя равнялась температуре окружающей среды. Эксперимент завершался при температуре ТАМ, равной температуре окружающей среды. Замеры температур и расхода проводились через каждые 10 минут. Общее время эксперимента составило от 4,5 до 6 часов.

Контейнеры с ТАМ располагались в коридорном и шахматном порядке. Обдув контейнеров производился в продольном и поперечном направлениях. Режимы экспериментов приведены в таблице I.

Таблица I.

эксперимент	Поперечное обтекание				Продольное обтекание				
	в шахматном порядке				друг над другом шахм.				
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Параметры на входе									
T, c	75	75	85	85	75	75	85	85	85
W, м/с	10	12	10	12	10	12	10	12	10

С целью проверки достоверности математических моделей теплообмена и разработанных методик численного расчета, а также получения информации о температурных полях, форме и скорости перемещения границ раздела фаз проведен сравнительный анализ экспериментальных и численных результатов по теплообмену при плавлении ТАМ.

Обработка результатов эксперимента проводилась в естественных переменных, а также в критериальном виде. Были найдены зависимости $St \cdot Pr^{0.25}$ от критерия Re , $T_{\text{вх}}/T_{\text{пл}}$ и $Fo \cdot Ste$ для продольного и поперечного обтекания. Формулы применимы для критериев Re в диапазоне от 30 до 800. Усредненный квадрат нормы невязки этих зависимостей не превышает 0,25.

Сравнение температурных зависимостей позволяет сделать вывод о том, что разработанная методика расчета дает хорошие результаты по температурным полям. А поскольку в конвективной задаче температура зависит и от гидродинамической картины, то можно утверждать, что поля скорости и распределение давления в потоке считаются правильно.

Расхождение результатов по температуре в среднем сечении контейнера с ТАМ не превышает 2%, а обобщенные данные по теплоотдаче в переменных $lg(St \cdot Pr^{2/3}) = F(lg(Re \cdot Ste))$ дают расхождение значений численных и экспериментальных данных при шахматном расположении контейнеров до 15%, а при продольном расположении - до 20%. Такое расхождение является результатом того, что расчетные данные приведены для контрольного сечения, расположенного в центральной части контейнера, тогда как экспериментальные данные получены по осредненным характеристикам всего рабочего участка. Т.е. расчет дает изменение локального коэффициента теплоотдачи в контрольном сечении, а эксперимент - интегрального коэффициента теплоотдачи для всей сборки с ТАМ, куда входят начальный и конечный участки с неустановившимися характеристиками течения и теплообмена.

Сравнение осредненного коэффициента теплоотдачи с локальным расчетным показывает удовлетворительное совпадение результатов численного и физического экспериментов.

Следует также отметить, что это расхождение является результатом допущений, присутствующих в математической постановке задачи, а также погрешностями эксперимента, в том числе и по определению теплофизических свойств ТАМ.

Расчеты проводились на конечно-разностной сетке 40×40 с временным шагом 1 секунда. При этом время расчета одного варианта на IBM PC AT 386 составляло 10 часов.

Таким образом, разработанные методики могут быть использованы для расчета нестационарного сопряженного теплообмена при продольном и поперечном обтеканиях сборки с ТАМ, претерпевающей фазовый переход при зарядке и разрядке компактного АФП.

Тем не менее полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что разработанная математическая модель, метод расчета и машинная методика позволяют получить физически корректные результаты, находящиеся в удовлетворительном совпадении с физическими, даже для такого сложного явления, каким является нестационарный сопряженный теплообмен, осложненный фазовыми переходами.

Методика численного расчета реализована в виде пакета прикладных программ и может быть использована для расчета теплообмена в компактных АФП и выборе их оптимальных геометрических па-

метров.

В четвертой главе даны результаты численного исследования гидродинамики и теплообмена при продольном и поперечном обтекании вставок с ТАМ. Достоверность расчетов подтверждается сопоставлением с экспериментальными данными.

Расчеты проведены для коридорного и шахматного расположения вставок с ТАМ.

При исследовании гидродинамики в канале при продольном и поперечном обтекании вставок с ТАМ в рассмотренных диапазонах градиентов давления теплоносителя были получены следующие результаты:

1. При поперечном и продольном обтеканиях значение числа Рейнольдса возрастает с увеличением градиента давления;

2. Значение коэффициента сопротивления $f \cdot Re$ при продольном обтекании не зависит от градиента давления, а является функцией формы канала, т.е. зависит от формы вставок с ТАМ и их расположения, при поперечном же обтекании $f \cdot Re$ монотонно возрастает с ростом градиента давления.

При поперечном обтекании вставок, как видно из поведения линий тока (рис. 3) имеются зоны рециркуляции, расположенные перед и за вставками с ТАМ, причем размер этих зон тем больше, чем больше число Рейнольдса, поскольку более медленное движение и д-кости реализуется на участках с большим радиусом поворота при обтекании вставок.

Также было получено, что коридорное обтекание является менее благоприятным в гидродинамическом смысле и требует значительно больших градиентов давления для получения тех же средне-объемных скоростей теплоносителя, что и при шахматном расположении вставок с ТАМ.

В результате теплового расчета построены зависимости:

- распределения локального числа Нуссельта по всем поверхностям теплообмена,
- изменение средне-интегрального по каждой поверхности теплообмена числа Нуссельта во времени,
- а также зависимости средне-интегрального по поверхности числа Нуссельта от критерия Re .

При продольном обтекании вставок с ТАМ локальное число Нуссельта распределено по поверхностям теплообмена довольно равно-

мерно. При этом максимальное значение достигается на концах поверхностей теплообмена, а минимальное - в центре поверхности. Это можно объяснить тем, что плохо обтекаемые углы бруска находятся в наиболее интенсивном взаимодействии с потоком теплоносителя.

При поперечном обтекании наблюдается очень большой градиент изменения локального числа Nu по поверхности теплообмена, и только появление свободной конвекции в ТАМ выравнивает это распределение и делает его похожим на распределение локального числа Nu при продольном обтекании.

Как показывают расчеты, значения средне-интегральных чисел Nu при продольном обтекании по всем поверхностям теплообмена отличаются друг от друга мало. Другая же картина наблюдается при поперечном обтекании. Здесь выделяются три наиболее характерные поверхности теплообмена:

1-ая поверхность - поверхность до потока (или набегающего потока), de ;

2-ая поверхность - поверхность за потоком, bc ;

3-ая поверхность - поверхность вдоль потока, ih .

Если построить зависимости поведения средне-интегрального по этим поверхностям числа Nu , то наибольшее значение числа Нуссельта оказывается на поверхности вдоль потока ih , а минимальное - в лобовой части. Это распределение определяется видом обтекания данных поверхностей. Поверхность ih омывается развитым ламинарным потоком теплоносителя и полностью участвует в процессе теплообмена. Поверхность bc - за бруском, больше соприкасается с рециркуляционным вихрем, и по мере их контакта происходит теплообмен. А поверхность de является лобовой для потока, частично она соприкасается с концом рециркуляционного вихря, а частично с набегающим и соскальзывающим потоком, поэтому число Нуссельта здесь имеет минимальное значение. Однако, по мере нагрева ТАМ и появления в нем естественной конвекции происходит существенное перераспределение и изменение средне-интегрального числа Nu во времени. Значение числа Nu уменьшается за счет роста термического сопротивления увеличивающейся области расплава (рис. 4). Неучет свободной конвекции при расчете теплообмена вносит значительную ошибку при расчете реального АФП.

Результаты расчетов также подтвердили работы по исследованию влияния числа Re на значение числа Nu . Однако, в предыдущих

работах (Латанкар, Келкар, Ли, Сперроу) рассматривались стационарные тепловые процессы и вставки в каналах не содержали плавящегося вещества.

При нестационарных процессах в каналах со вставками из плавящегося материала, при поперечном их обтекании как видно из построенных кривых, большим числам Re также соответствуют большие числа Nu и т.к. при больших числах Рейнольдса происходит более интенсивный теплообмен, то и конвекция при одних и тех же тепловых режимах начинается раньше, чем при меньших числах Re , отсюда и более раннее падение числа Нуссельта во времени при больших числах Re (рис.5).

В процессе расчета теплообмена в АФП проводились наблюдения за естественной конвекцией в ТАМ и выводились файлы с линиями тока при конвективном движении. На картах линий тока отчетливо видно зарождение конвекции, начинающейся несколькими мелкими вихрями, которые по мере прогрева ТАМ растут и сливаются в более крупные.

Численный эксперимент был проведен и при более низкой температуре теплоносителя, равной $75^{\circ}C$. Локальное распределение числа Nu , а также поведение средне-интегрального числа Nu имеют такой же характер изменения, как и при температуре теплоносителя, равной $85^{\circ}C$, но более растянуты во времени.

В заключении сформулированы основные научные результаты, полученные в данном исследовании:

1. Разработаны математические модели теплообмена в аккумуляторах теплоты с фазовых переходах при продольном и поперечном обтеканиях теплоносителем вставок с теплоаккумулирующим веществом при граничных условиях I, II и III рода.

2. Проведена адаптация и тестирование метода энтальпий для численного расчета конвективного теплообмена в нелинейных задачах.

3. Создан пакет прикладных программ-методик численного расчета конвективного теплообмена при фазовопереходных процессах в АФП при продольном и поперечном обтекании пучка вставок с теплоаккумулирующим материалом и проведена их экспериментальная проверка.

4. Экспериментально и численно установлено, что при про-

дольном обтекании вставок с ТАМ ламинарным установившимся потоком теплоносителя процесс зарядки и разрядки АФП идет в среднем на 30 % интенсивнее, чем при поперечном обтекании.

5. Проведена оптимизация формы вставок с ТАМ при продольном обтекании теплоносителем. Вставки располагались в коридорном и шахматном порядках. В гидродинамическом смысле более удобообтекаемыми являются наиболее высокие и узкие вставки. В тепловом отношении - решающую роль играют заданные тепловые режимы и тепловые мощности.

6. В ходе экспериментального исследования АФП были получены критериальные зависимости $St \cdot Pr = f(fo \cdot Ste)$ для продольного и поперечного обтекания вставок с ТАМ.

7. В процессе численных исследований гидродинамики в АФП были построены зависимости $Re = f(\partial P / \partial Z)$ и $f \cdot Re = f(\partial P / \partial Z)$ при продольном обтекании и $Re = f(\partial P / \partial X)$ и $f \cdot Re = f(\partial P / \partial X)$ при поперечном обтекании. Получено, что для достижения одних и тех же средние-объемных скоростей при продольном обтекании нужно значительно меньше мощности на прокачку теплоносителя. А более высокие скорости при поперечном обтекании вставок достигаются ценой очень большого роста перепада давления и величины $f \cdot Re$.

8. В ходе численного исследования процессов теплообмена в АФП для продольного и поперечного обтекания вставок были получены зависимости:

- распределения локального числа Нуссельта по поверхностям теплообмена;
- изменение среднинегрального по поверхности теплообмена числа Nu во времени;
- влияние числа Re на значение среднинегрального числа Nu

9. Выявлено влияние температуры теплоносителя на значения локального и интегрального чисел Nu . Более низкие температуры теплоносителя приводят к более растянутым во времени процессам теплообмена.

10. Исследовано зарождение и развитие естественной конвекции в теплоаккумулирующем материале.

Таким образом, в результате проведения комплексных экспериментальных и численных исследований изучены физические особенности процессов плавления и затвердевания при зарядке и разрядке на моделях аккумуляторов фазовых переходов, а также влияние

на теплообмен естественной конвекции с целью использования этих факторов для интенсификации теплообмена в различных типах таких устройств.

Полученные закономерности положены в основу проектирования, изготовления и натурных испытаний полномасштабных образцов АФП, предназначенных для работы в составе системы солнечного отопления индивидуальных жилых домов Среднеазиатского региона.

На основе созданных математических моделей разработаны и экспериментально проверены методики численного расчета гидродинамики и сопряженного нестационарного теплообмена при фазово-переходных процессах в компактных АФП со вставками с ГАМ, изменяющего агрегатное состояние, и выбраны их оптимальные параметры.

Публикации по теме диссертации.

1. Зорина И.Г., Россихин Н.А., Чукаев А.Г. Решение трехмерной нестационарной задачи с фазовым переходом для теплового аккумулятора // Тезисы докладов конференции "Энергоустановки и двигательные установки летательных аппаратов", Ленинград, ВИАИ им. А.Ф.Можаевского, 1990. -С.64-63.

2. Зорина И.Г., Россихин Н.А., Чукаев А.Г. Решение двумерной нестационарной задачи с фазовым переходом для теплового аккумулятора // Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок: Тезисы докладов VIII Всесоюзной школы-семинара, -Москва, 13-24 мая, 1991. Ч.I. -С.64-66.

3. Чукаев А.Г., Арнаулиева Б.А., Зорина И.Г. Математическое моделирование нестационарного сопряженного теплообмена при фазово-переходных процессах в компактных аккумуляторах теплоты // Известия АН ТССР. -1992. № I. -С.93-96.

4. Чукаев А.Г., Арнаулиева Б.А., Зорина И.Г. Экспериментальное исследование теплообмена в компактном аккумуляторе фазового перехода на основе гидроксида натрия // Известия АН ТССР. -1992. № I. -С.96-100.

5. Байрамов Р.Б., Чукаев А.Г., Арнаулиева Б.А., Зорина И.Г. Исследование свойств гидроксида натрия как теплоаккумулирующего материала для аккумуляторов фазовых переходов // Известия АН ТССР. -1992. № I. -С.5-14.

Рис. 3 Линия тока при шахматном расположении вставок из ТАМ
 $\text{ДРДХ} = 0,48 \text{ Н/м}^3$; $\text{Re} = 861,13$

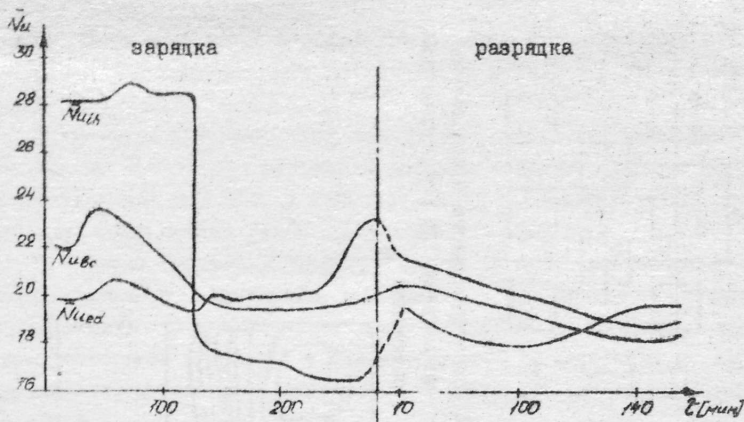


Рис. 4 Распределение среднеинтегрального числа Nu при $T_{max, \Delta x} = 85^\circ C$

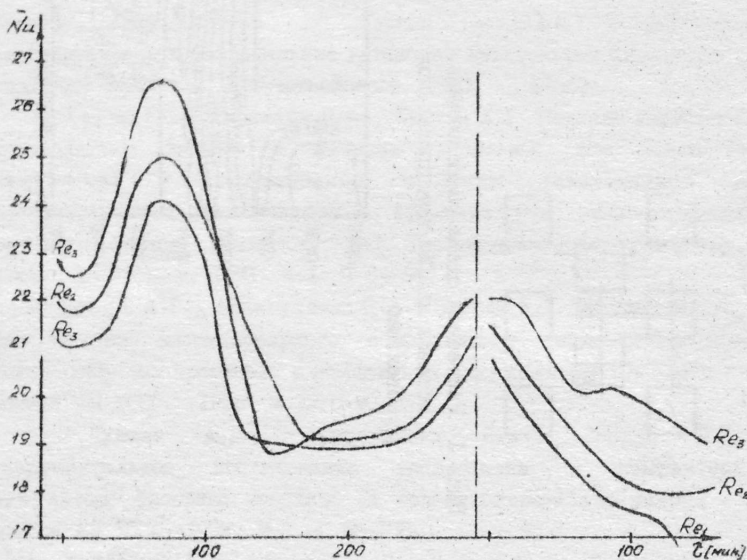


Рис. 5 Изменение среднеинтегрального числа Нуссельта во времени при разных значениях критериев Re :
 $Re_1 = 377,56$; $Re_2 = 477,86$; $Re_3 = 861,13$