

М 454340
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище им. Н.Э.Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

КУКС АЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

УДК 536.538.1

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА АККУМУЛЯТОРОВ ТЕПЛОВОЙ
ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВ,
ИЗМЕНЯЮЩИХ АГРЕГАТНОЕ СОСТОЯНИЕ

05.14.05 - Теоретические основы теплотехники
(включая техническую термодинамику
и тепло- и массообмен)

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

МОСКВА - 1987

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

Научный руководитель – кандидат технических наук,
доцент Чукаев А.Г.

Официальные оппоненты – доктор технических наук,
профессор Брдлик П.М.,
кандидат технических наук,
начальник отдела Макиенко А.И.

Ведущее предприятие – Энергетический институт
им. Г.М.Кржижановского

Защита состоится " 11 " мая 1987 г. в 14 часов
на заседании специализированного совета К.053.15.05 "Тепловые
машины и теоретические основы теплотехники" при Московском
высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005,
Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус "Энергомашиностроение".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им.
Н.Э.Баумана

заверенные пе-
сква, Б-5, 2-я
ному секретарю

1987 г.

М 454540

И.Ефимов

П.Л.

Актуальность проблемы. Повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в различных областях народного хозяйства, а также создание и применение новых нетрадиционных способов получения энергии и ее утилизации относятся к числу важнейших задач, определенных XXVII съездом КПСС. Решение этих проблем может быть достигнуто, в частности, через создание новых высокоэффективных аккумуляторов тепловой энергии, обеспечивающих необходимый температурный режим работы приборов, машин и агрегатов. Широкое применение аккумуляторов тепловой энергии на основе фазовых переходов в установках для утилизации теплоты отработанных газов, в металлургии при плавлении и затвердевании металлических слитков, в системах для обогрева промышленных зданий и сооружений, при охлаждении электронного оборудования ЭВМ, радиотехнических систем и в некоторых других целях обусловлено отсутствием в них громоздких и подвижных устройств, малогабаритностью и экономичностью.

Теоретическому и экспериментальному исследованию теплообмена в аккумуляторах тепловой энергии на основе фазовых переходов (АФП), разработке методов их расчета и анализу протекающих процессов посвящено достаточно большое количество работ. Их анализ показывает, что до недавнего времени основным механизмом переноса теплоты в процессах плавления и затвердевания считалась теплопроводность. Однако, экспериментальные работы последних лет показали, что под действием сил тяжести из-за неоднородности температуры жидкой фазы в ней возникает естественная конвекция, приводящая в ряде случаев к существенной интенсификации процесса плавления. Так, при числах Релея $Ra > 10^7$ перенос теплоты конвекцией может в 50 раз превышать перенос теплоты теплопроводностью. В связи с этим возникает задача разработки методики расчета АФП, учитывающей естественную конвекцию в жидкой фазе и позволяющей исследовать влияние различных факторов на процесс аккумуляции энергии.

Цель диссертационной работы заключается в создании математической модели и метода численного расчета конвективного теплообмена в аккумуляторах на основе фазовых переходов, накапливающих тепловую энергию при плавлении теплоаккумулирующих материалов



(ТАМ).

Для решения этой задачи необходимо:

- разработать математическую модель теплообмена при плавлении ТАМ в АФП с учетом конвекции в жидкой фазе и отвода теплоты в твердую фазу;
- разработать алгоритм численного расчета теплообмена, включающий: расчет температурных полей в жидкой и твердой фазах, поля скоростей, а также определение положения границы раздела фаз;
- исследовать влияние: естественной конвекции в расплаве, ориентации аккумулятора фазового перехода, а также переохлаждения и перегрева ТАМ на процесс плавления;
- получить информацию о физической картине процесса плавления в АФП;
- обобщить результаты численного и экспериментального исследования с целью получения расчетных зависимостей по теплоотдаче и росту массы расплава ТАМ.

Методы исследования. Поставленные задачи реализуются:

- численным решением системы дифференциальных уравнений, включающей уравнения Навье-Стокса, энергии для жидкой и твердой фаз, баланса энергии на границе раздела фаз и уравнение неразрывности с соответствующими краевыми условиями;

- экспериментальным исследованием процессов плавления, выполненных на лабораторных стендах в МВТУ им.Н.Э.Баумана и МИРЭА.

Научная новизна диссертационной работы заключается:

- в разработке математической модели конвективного теплообмена при плавлении ТАМ в АФП и метода численного расчета этой нелинейной задачи в системе с криволинейными и изменяющимися во времени границами расчетной области;

- в оценке влияния на теплообмен критериев Ste и Ra , ориентации АФП, переохлаждения и перегрева ТАМ в процессе его плавления.

Практическая ценность. Разработанный численный метод позволяет рассчитать теплообмен при плавлении ТАМ в АФП, исследовать физическую картину процесса плавления, а также оценить влияние различных факторов таких, например, как: ориентация АФП, степень переохлаждения и перегрева, теплофизические свойства и размеры АФП на процесс теплообмена.

Внедрение результатов работы. Разработанная методика расче-

та используется в Научно-производственном объединении "Солнце" Туркменской АН ССР г.Ашхабаде при расчетах АФП для опреснительных установок, а также в лаборатории теплоаккумулирующих энергетических установок Энергетического института им. Г.М.Крижановского для расчетов экспериментального аккумулятора теплоты на фазовых переходах для СЭС-5.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались: на 2-й Всесоюзной конференции "Возобновляемые источники энергии" (г.Ереван, 1985 г.); на научно-техническом семинаре лаборатории энергетических установок Энергетического института им. Г.М.Крижановского (г.Москва, 1986 г.); на 5-й Всесоюзной школе-семинаре "Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок" (г.Норус, 1985 г.); на межвузовском научном семинаре по вопросам теплопередачи в МЛТИ (г.Мытищи, Моск. обл., 1986 г.).

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 10 печатных работах и в двух научно-технических отчетах по теме 3067081. Г.Р. № 81008727. Пакет программы для расчета характеристик теплообмена в АФП зарегистрирован в ВАП. Перечень печатных работ прилагается.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, приложения с актами о внедрении результатов работы и содержит 125 страниц основного текста, 61 рисунок, библиографию из 82 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, перечислены основные положения, разработанные в диссертации.

В первой главе дан аналитический обзор современного состояния экспериментальных и теоретических исследований процессов теплообмена при плавлении и затвердевании в аккумуляторах фазовых переходов.

Показано, что математическое описание этих проблем ранее сводилось к формулировке задачи теплопроводности Стефана в системах с подвижными границами.

Вместе с тем, специфика использования возобновляемых источ-

низов энергии, в частности, Солнца, характеризующегося неравномерностью графика поступления энергии, приводит к необходимости аккумулирования энергии с помощью специальных тепловых устройств — аккумуляторов на фазовых переходах.

Как показали эксперименты по исследованию теплообмена на моделях АФИ значительный вклад в процесс плавления ТАМ вносит конвекция. Поэтому традиционные, ранее использовавшиеся методы расчета становятся непригодными и требуется новый подход для их решения. В связи с этим возникает необходимость в разработке математической модели и метода численного расчета теплообмена в аккумуляторах на основе фазовых переходов, учитывающего конвекцию в жидкой фазе ТАМ.

Во второй главе описывается математическая модель конвективного теплообмена в аккумуляторе фазового перехода в приближении Буссинеска с учетом отвода теплоты в твердую фазу ТАМ, которая включает уравнение неразрывности (1), уравнение движения Навье-Стокса (2), уравнение баланса энергии на границе раздела фаз (3), уравнения энергии жидкой (4), и твердой (5) фаз:

$$\nabla \vec{u} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t'} + \vec{u} \nabla \vec{u} = -\frac{\nabla P}{\rho_*} + \nu \nabla^2 \vec{u} + \vec{g} \frac{\rho}{\rho_*}; \quad (2)$$

$$\left[\frac{\lambda_r}{\rho_* Q_{пл.}} \cdot \frac{\partial T_r}{\partial r} - \frac{\lambda_*}{\rho_* Q_{пл.}} \cdot \frac{\partial T_*}{\partial r} \right] \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{\partial r_i}{\partial y} \right)^2 \right\} = \frac{\partial r_i}{\partial t'}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_*}{\partial t'} + \vec{u} \nabla T_* = \alpha_* \nabla^2 T_*; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_r}{\partial t'} = \alpha_r \nabla^2 T_r; \quad (5)$$

Граничные условия имеют вид:

$$T = T_{гр.}, \text{ при } r = r_{гр.}; \quad T = T_{пл.}, \text{ при } r = r_i(y, t'); \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \text{ при } r = r_{вн.}; \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \text{ при } \begin{cases} y = 0 \\ y = H \end{cases}.$$

$\bar{u} = 0$, на всех границах.

После введения характерного размера H и температуры $(T_{rp} - T_{пл})$, а также безразмерных величин:

$$\bar{u} = \bar{u} H / \nu; \quad \theta = \frac{T - T_{пл}}{T_{rp} - T_{пл}}; \quad \rho = \frac{\rho H^2}{\eta^2};$$

$$r/H = R; \quad y = y/H; \quad t = \eta t' / H^2;$$

система уравнений (I) - (5) преобразуется к безразмерному виду.

Так как области, занятые расплавом и твердой фазой в ходе процесса, имеют криволинейную форму, изменяющуюся во времени, то было применено преобразование координат, позволяющее отобразить их в прямоугольные, независимые от времени области. Сшивка областей выполнялась по границе раздела фаз.

Система уравнений (I)-(5) решалась методом С.Патанкара. На основе этой модели и была разработана численная методика расчета теплообмена при плавлении ТАМ в АФП, схема которой представлена на рис. I.

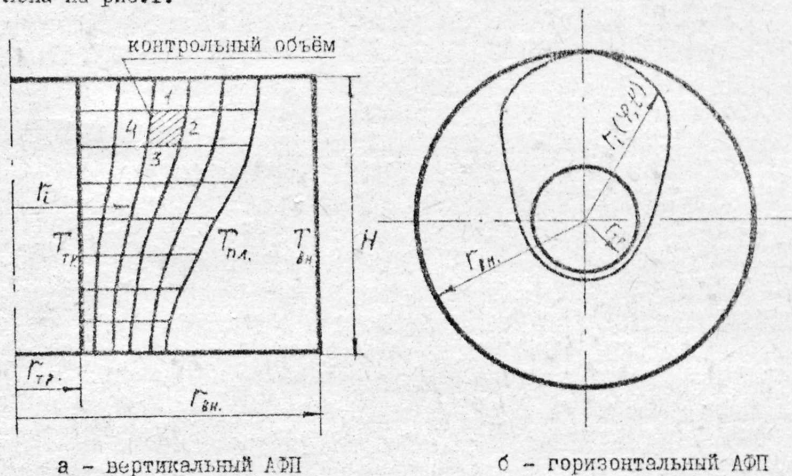


Рис. I. Схема плавления теплоаккумулирующего материала в аккумуляторе фазового перехода (АФП)

В силу симметрии геометрической формы и тепловых нагрузок рассматриваемая расчетная область представляет собой половину модели аккумулятора, а плоскость симметрии принимается за адiabатическую поверхность. Задание начальных условий предполагает существование незначительной толщины слоя расплава вокруг нагревателя ($\delta = 0,0025$). Эта величина определяется из решения задачи теплопроводности для начального момента времени в предположении линейного распределения температуры в жидкой тонкой прослойке и логарифмического - в твердой фазе ТАМ. На основе имеющихся рекомендаций величина перегрева выбирается в пределах 10-25°C и меняется в зависимости от степени переохлаждения.

По заданным геометрическим размерам и теплофизическим свойствам вычисляются критерии $Ste_{ж}$, Gr , Pr , $Ste_{т}$, которые вместе с геометрическими характеристиками $R_{тр}$ и $R_{вн}$ являются исходными данными для программы, реализующей численный метод расчета.

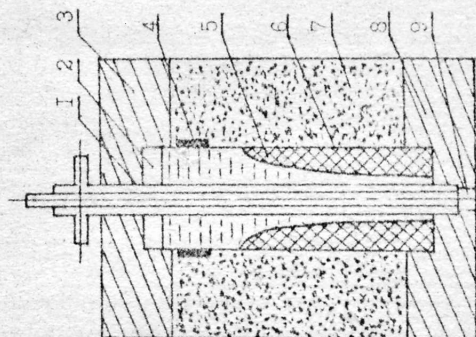
В результате вычислений определяются: поля вертикальной и горизонтальной составляющих скорости, поля температур в жидкой и твердой фазах, форма и положение криволинейной границы раздела фаз, изменение числа Nu в ходе процесса плавления на нагревателе и границе раздела фаз.

Заключает вторую главу анализ сходимости и точности численного решения.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования теплообмена при плавлении органических ТАМ с целью выявления влияния степени переохлаждения ТАМ и ориентации теплообменного устройства на процесс теплообмена в АФП. В качестве ТАМ использовался *n*-октадекан.

Схема аккумулятора фазового перехода показана на рис.2. Модель АФП для исследования теплообмена представляет вертикально (горизонтально) расположенный цилиндр с центральным нагревателем, внутреннее пространство АФП заполнено ТАМ. С внешней стороны АФП покрыт слоем асболокнистой теплоизоляции, обеспечивающим поддержание адиабатных условий на внешней поверхности АФП. Внешний диаметр нагревателя - 12 мм, внутренний диаметр оболочки АФП - 46 мм, высота - 120 мм. Размеры АФП соответствовали уменьшенному в 3 раза аккумулятору фазового перехода опреснительной установки.

Для исследования влияния первоначального переохлаждения на



1-нагреватель; 2-воздушная полость;
3, 8-торцевые фланцы; 4-электронагреватель;
5-твёрдый ТАМ; 6-АП; 7-теплоизоляция;
9-сливное отверстие

Рис. 2. Схема аккумулятора фазового
перехода (АП)

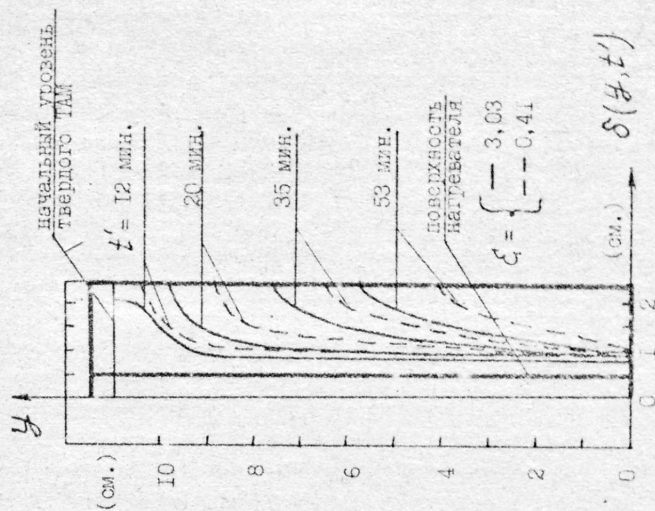


Рис. 3. Перемещение границы раздела фаз
при плавлении α -октадекана

характеристики теплообмена было проведено две серии экспериментов с величиной начальной степени переохлаждения $\xi = (T_{пл} - T_0)/T_0$ равной $\xi = 0,41$ и $3,03$. Величина степени перегрева для обоих случаев составила $\Psi = (T_{гр} - T_{пл})/T_{пл} = 0,92$. Было установлено, что средняя скорость перемещения границы раздела фаз не зависит от начальной степени переохлаждения, а отставание границы, наблюдаемое во втором случае, объясняется более длительным временем начального прогрева более переохлажденного ТАМ, что подтверждается перемещением границы на рис.3.

Таким образом, начальное переохлаждение существенно тормозит процесс плавления. Это вызвано двумя причинами. Во-первых, при увеличении степени начального переохлаждения зона расплава в соответствующие моменты времени уменьшается, что препятствует возникновению свободноконвективных течений, ускоряющих процесс плавления, и приводит, в конечном счете, к снижению количества аккумулированной энергии, т.е. в случае начального переохлаждения ТАМ, полная теплоотдача существенно меньше, чем при его отсутствии. Во-вторых, при наличии начального переохлаждения не вся энергия, подводимая к границе раздела фаз идет на процесс плавления: часть этой энергии отводится в твердую фазу, т.е. затрачивается на ее прогрев. Полученные экспериментальные данные позволяют оценить долю тепловой энергии, расходуемой на прогрев твердой фазы, собственно на плавление и на увеличение теплосодержания расплава. Доля теплоты на прогрев твердой фазы увеличивается с ростом степени переохлаждения и достигает при $\xi = 3,03$ примерно 60-70% в начале процесса и около 6% в конце. Доля теплоты, расходуемой собственно на процесс плавления, увеличивается по мере уменьшения степени переохлаждения и в среднем составляет 70-75% за процесс при $\xi = 0,41$ и $\sim 60\%$ при $\xi = 3,03$ от общего количества подводимой теплоты. Доля тепловой энергии, идущей на увеличение теплосодержания расплава, также увеличивается с уменьшением степени переохлаждения и достигает в среднем $\sim 10\%$ и $\sim 6\%$ при $\xi = 0,41$ и $3,03$ соответственно.

Таким образом, большая часть теплоты, подводимой к ТАМ, расходуется на процесс плавления ($3/4$ общего количества) и меньшая часть - на прогрев жидкой и твердой фаз, при значениях параметров: $Ste_{ж} = 0,24$, $Gr = 1,53 \cdot 10^7$, $\rho_r = 53,8$; $Ra = 8,24 \cdot 10^8$, $0,057 \leq Ste_r \leq 0,148$.

Для исследования влияния ориентации на процесс теплообмена при плавлении ТАМ в АПН были проведены эксперименты по плавлению И-октадекана в горизонтально ориентированном АПН при граничных условиях, аналогичных вышеприведенным. Анализируя полученные результаты можно заключить, что процесс плавления в этом случае происходит более интенсивно, чем при вертикальном АПН. В частности, процесс образования массы расплава в горизонтальном АПН превышает аналогичную величину в вертикальном, в среднем на 37-47%. Критериальные зависимости для расчета теплоотдачи от нагревателя в вертикальном АПН имеют вид $\dot{Nu}_p = 50,7 (F_0 \cdot Ste \cdot Gr^{1/4})^{0,44}$ (рис.8), а для роста массы расплава $M_{рас.}/M_0 = 2,46 (F_0 \cdot Ste)^{0,44} \cdot Gr^{0,27}$ при $\xi = 3,03$ (рис.9).

Четвертая глава посвящена моделированию процессов теплообмена в АПН с помощью ЭВМ. В ней проводится сопоставление результатов расчета с данными экспериментального исследования теплообмена при плавлении стеариновой кислоты в горизонтально ориентированных моделях АПН, позволяющих создавать на поверхности нагревателя граничные условия I-го и 2-го рода. Для визуализации перемещения границы раздела фаз проводилось фотографирование процесса через каждые две минуты. На рис. 4 дано сопоставление численных и экспериментальных результатов по форме и скорости перемещения границы раздела фаз, которое показало их удовлетворительное совпадение, с точностью не менее $\sim 8\%$.

Как видно из рис.5, в жидкой области расплава существует течение, обусловленное естественной конвекцией, что подтверждается существенным изменением тангенциальной составляющей скорости, особенно для больших времен процесса ($t' = 33,7$ мин). При этом ее величина в центральной части жидкой области уменьшается, приближаясь к нулю, и увеличивается у поверхности нагревателя и границы раздела фаз. Это свидетельствует о наличии течения типа пограничного слоя, сопровождающегося образованием вязкого ламинарного подслоя у нагревателя и границы раздела фаз. По мере развития процесса температура в жидкой фазе изменяется, в основном, в сравнительно тонких слоях у нагревателя и границы раздела, рис.6, что коррелируется с вышеприведенным распределением скоростей. Распределение температуры в твердой фазе стеариновой кислоты показывает, что в ходе процесса плавления происходит постепенный прогрев твердой фазы, но так как теплопроводность ТАМ довольно низкая, то этот процесс идет относительно медленно. Наиболее интен-

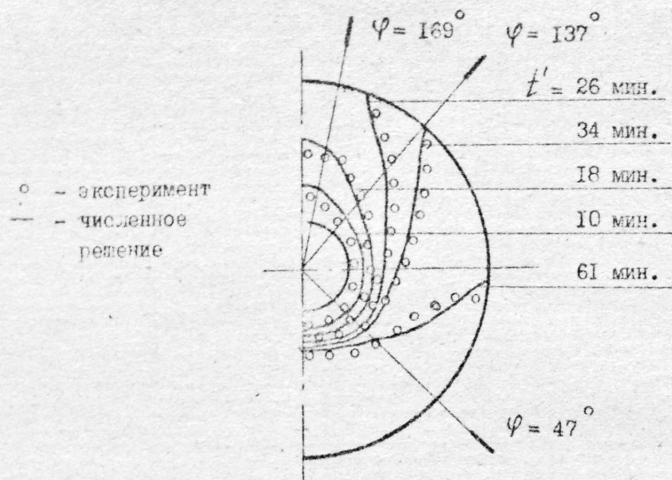


Рис.4. Перемещение границы раздела фаз при плавлении стеариновой кислоты

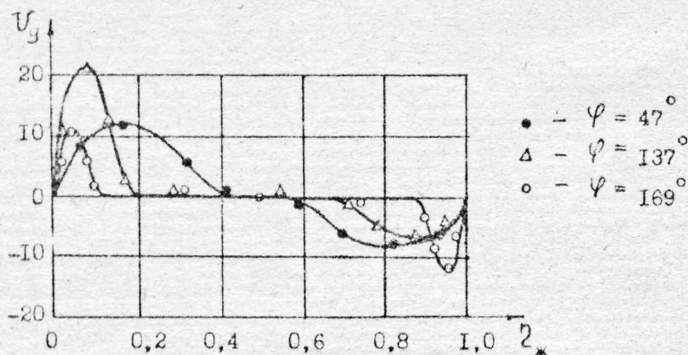


Рис.5. Изменение тангенциальной составляющей скорости расплава стеариновой кислоты ($t' = 38,7$ мин.)

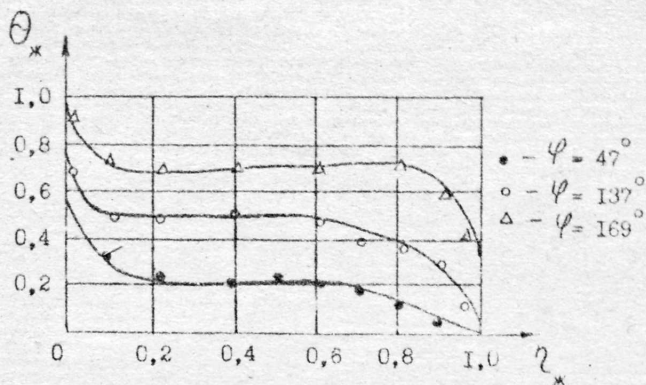
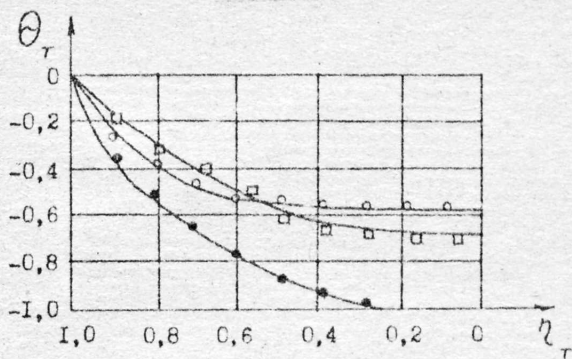


Рис.6. Распределение температуры в жидкой фазе стеариновой кислоты ($t' = 38,7$ мин.)



$t' = 38,7$ мин., $\bullet - \varphi = 47^\circ$; $\circ - \varphi = 137^\circ$;
 $t' = 62$ мин., $\square - \varphi = 169^\circ$

Рис.7. Распределение температуры в твердой фазе стеариновой кислоты

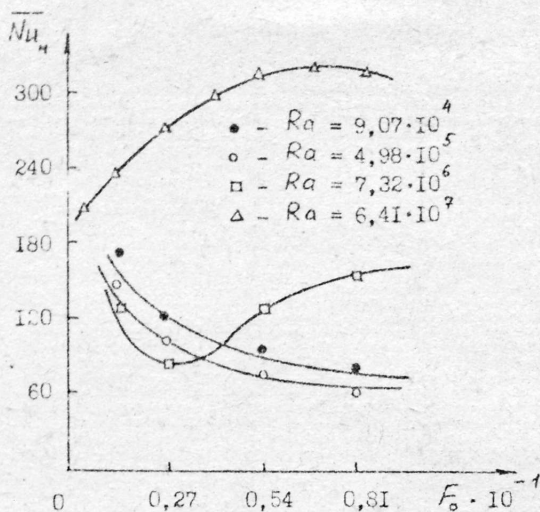


Рис.8. Теплоотдача на нагревателе в процессе плавления стеариновой кислоты для различных чисел Релея

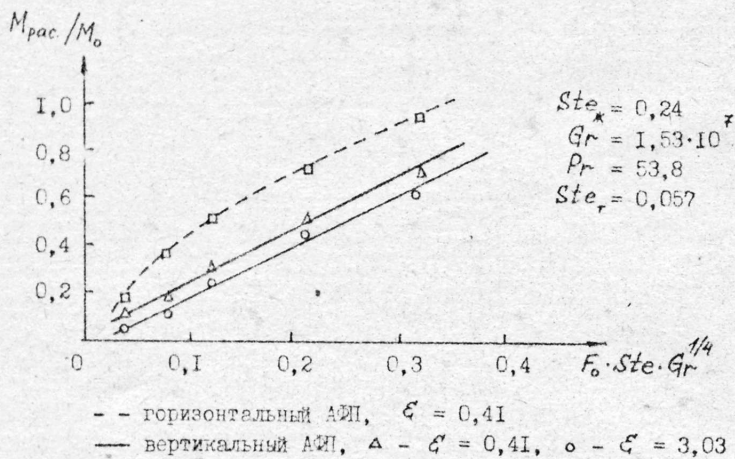


Рис.9. Рост массы расплава *n*-октадекана для вертикального и горизонтального АФИ в процессе плавления

сивный прогрев происходит в верхней области АФН, где находится расплав более высокой температуры, рис.7.

Активная роль естественной конвекции в процессе конвективного теплообмена в АФН подтверждается и характером изменения числа Нуссельта. В начале процесса число Нуссельта уменьшается, а затем увеличивается, достигая установившегося значения, что характерно для конвективного теплообмена, рис.8.

Заключает четвертую главу анализ погрешностей физического эксперимента.

В пятой главе приведены результаты численного исследования теплообмена при плавлении азотнокислого натрия и азотнокислого марганца, позволяющие раскрыть роль механизмов переноса теплоты, исследовать влияние числа Релея на интегральные характеристики теплообмена, проанализировать влияние ориентации АФН на теплообмен, а также исследовать теплоотдачу при использовании кристаллогидратов и сплавов в качестве теплоаккумулирующих материалов.

Численная оценка роли механизмов переноса теплоты в процессе теплообмена при плавлении проводилась на примере азотнокислого марганца и азотнокислого натрия в АФН вышеуказанного типа с $R_{гр} = 0,25$; $R_{н} = 0,75$. Процесс теплоотдачи анализировался в зависимости от перегрева ТАМ. Расчеты процесса проведены как с учетом конвекции так и при ее отсутствии, т.е. только при наличии чистой теплопроводности. Установлено, что величина перегрева 10-12°C является оптимальной, больший перегрев жидкости нежелателен, поскольку приводит не только к интенсификации теплообмена, но и к увеличению тепловых потерь. Анализ вклада конвекции в процесс плавления позволил сделать вывод о том, что число Нуссельта при конвективном переносе теплоты в 2-2,5 раза выше, чем при переносе теплоты теплопроводностью.

Проведено исследование по влиянию числа Релея на процесс теплоотдачи на границе раздела фаз и на нагревателе. Установлено, что увеличение числа Релея приводит к росту числа $\overline{Nu}_{гр}$. При малых значениях Ra , величина $\overline{Nu}_{гр}$ уменьшается постепенно, что свидетельствует о незначительном вкладе естественной конвекции и преобладании теплопроводности в процесс теплопереноса. Изменение теплоотдачи на нагревателе выражается критериальным уравнением:
$$\overline{Nu}_{гр} = 0,26 F_0^{-0,19} Ra^{0,4} Ste^{0,2} \quad \text{при изменении Релея и Стефана:}$$

$$9,07 \cdot 10^4 \leq Ra \leq 6,41 \cdot 10^7; \quad 0,065 \leq Ste_* \leq 1,91.$$

Выяснилось, что ориентация АФП в пространстве оказывает значительное влияние на процесс теплообмена. Предпочтительным является горизонтальное его расположение, которое приводит к росту числа Нуссельта в 3-3,5 раза по сравнению с его значениями для вертикально ориентированного аккумулятора.

Исследование возможности применения кристаллогидратов в качестве ТАМ показало, что процесс плавления этих веществ в АФП происходит также как и органических материалов. Однако, вопросы связанные с их поведением при многократных циклических тепловых нагрузках требуют дальнейшего изучения. Для сплава Вуда значения числа Прандтля ($Pr = 0,024$) существенно отличается от кристаллогидратов и органических ТАМ, поэтому отношение $Ste_*/Pr = 6,2$ у сплава Вуда намного выше для органических. $Ste_*/Pr = 0,0025$, что приводит к увеличению скорости перемещения границы раздела фаз (до 20%) и существенному уменьшению её кривизны. Это позволяет в диапазоне исследуемых параметров теплообмена рассчитывать процесс плавления ТАМ в АФП без учета конвекции.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель теплообмена при плавлении ТАМ в аккумуляторе фазового перехода с учетом конвекции в жидкой и отвода теплоты в твердую фазы.

2. Разработан алгоритм и программа численного расчета теплообмена в АФП. Сопоставление результатов вычислений с собственными экспериментами, а также с данными других авторов, показали удовлетворительную точность созданной методики.

3. С помощью разработанного метода расчета исследована роль естественной конвекции в процессе теплообмена при плавлении теплоаккумулирующих материалов органического и неорганического происхождения. Результаты расчетов подтверждают необходимость учета естественной конвекции, возникающей в процессе плавления и приводящей к росту числа Нуссельта в среднем в 2-2,5 раза по сравнению с переносом теплоты теплопроводностью при $0,094 \leq Ste_* \leq 1,23$, $7 \leq Pr \leq 9,4$, $1,29 \cdot 10^5 \leq Gr \leq 0,12 \cdot 10^7$.

4. Установлено, что ориентация АФП в пространстве оказывает существенное влияние на теплообмен при плавлении. Числа Нуссельта горизонтально расположенного аккумулятора в среднем в 3-3,5

раза выше аналогичных величин для вертикального АЭП.

5. Рассмотрены особенности процесса теплообмена при плавлении n -октадекана с различной начальной степенью переохлаждения. Установлено, что скорость перемещения границы раздела фаз не зависит от степени переохлаждения, а имеется лишь сдвиг процесса по времени на величину, необходимую для прогрева более переохлажденного ТАМ до температуры плавления.

6. Установлено влияние числа Рейля на характеристики теплообмена в виде зависимости $\overline{Nu}_{tr} = 0,26 \cdot Fo^{-0,19} \cdot Ra^{0,4} \cdot Ste_{ж}^{0,2}$, а также изменения массы расплава ТАМ для $\varepsilon = 3,03$

$$M_{рас.} / M_0 = 2,46 (Fo \cdot Ste)^{1,09} \cdot Gr^{0,27}.$$

Условные обозначения:

H - высота аккумулятора фазового перехода, r - радиус, $r(y, t')$ - положение границы раздела фаз, y - вертикальная координата, λ - коэффициент теплопроводности, $\rho_{ж}$ - плотность ТАМ при температуре плавления, α - коэффициент температуропроводности, T - температура, $Q_{пл.}$ - теплота плавления ТАМ, $M_{рас.}$ - масса расплава, M_0 - масса всего ТАМ, находящегося в АЭП, t' - время.

Безразмерные комплексы:

$\overline{U}$ - скорости, Θ - температура, P - давление, R - радиус, y - вертикальная координата, t - время.

Индексы:

пл. - плавление, ж - жидкая фаза, т - твердая фаза, тр. - труба нагревателя, см. - внешняя оболочка АЭП, гр. - граница раздела фаз, 0 - начальное значение.

$$Ste_{ж} = \frac{c_{рж}(T_{тр.} - T_{пл.})}{Q_{пл.}}; Ste_{т} = \frac{c_{т}(T_{пл.} - T_0)}{Q_{пл.}} - \text{критерии Стефана для жидкой и твердой фаз,}$$

$$Gr = gB(T_{тр.} - T_{пл.}) \cdot H^3 / \nu^2 - \text{критерий Грасгофа,}$$

$$Pr = \nu / \alpha_{ж} - \text{критерий Прандтля,}$$

$$Ra = Gr \cdot Pr - \text{число Рейля,}$$

$$\overline{Nu}_{tr.} = \overline{q} H / (T_{тр.} - \overline{T}_{ж}) \cdot \lambda_{ж} - \text{число Нуссельта,}$$

где: H - характерный размер; для вертикального АЭП - это высота, для горизонтального АЭП - наружный диаметр нагревателя.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих печатных работах:

1. Чукаев А.Г., Кукс А.М. Исследование теплообмена при плавлении теплоаккумулирующих материалов вокруг вертикальной и горизонтальной труб // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1982. - №11. - С. 46-52.

2. Чукаев А.Г., Кукс А.М. Влияние ориентации теплообменного устройства на теплообмен при плавлении в аккумуляторах тепловой энергии // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1984. - №1. - С. 67-71.

3. Чукаев А.Г., Кукс А.М. Естественная конвекция при аккумуляции тепловой энергии веществами, изменяющими агрегатное состояние // Известия ВУЗов. Авиационная техника. - 1984. - №1. - С. 55-59.

4. Чукаев А.Г., Кукс А.М. Влияние механизмов переноса тепла на теплообмен при плавлении в аккумуляторах тепловой энергии // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1984. - № 3. - С. 59-62.

5. Численное исследование теплообмена при плавлении теплоаккумулирующего материала в контейнере конечных размеров / Н.К. Корнейчук, А.М. Кукс, Н.А. Россихин, А.Г. Чукаев // Труды ММИ. - 1985. - Вып. 59. - С. 55-58.

6. Чукаев А.Г., Корнейчук Н.К., Кукс А.М. Численное исследование теплообмена в аккумуляторах на основе скрытой теплоты плавления / МВТУ. - М., 1985. - 6с. - Деп. в ИНФОРМЭНЕРГО, № 1805 эн.

7. Математическое моделирование процесса теплообмена в аккумуляторах с фазовыми переходами / А.Г. Чукаев, Н.К. Корнейчук, А.М. Кукс, Н.А. Россихин // Возобновляемые источники энергии: Тез. докл. 2-й Всесоюзной конф., г. Ереван, 1985. - С. 55.

8. Кукс А.М., Чукаев А.Г. Численное решение задачи о плавлении с учетом естественной конвекции в жидкой фазе вещества // Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок: Тез. докл. 5-й Всесоюзн. шк. сем., Норус, 1985. - С. 80.

9. Чукаев А.Г., Россихин Н.А., Кукс А.М. Метод расчета задачи Стефана при наличии двух границ раздела фаз // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1986. - № 1. - С. 63-67.

10. Чукаев А.Г., Кукс А.М., Россихин Н.А. Сравнение результатов численного исследования теплообмена при плавлении теплоаккумулирующего материала в замкнутой и полубесконечной полостях // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1986. - № 3. - С. 69-74.