

ОДЕССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА

На правах рукописи

Хаддад Самир Наджиб Айюб

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АБСОРБЦИОННЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ ХОЛОДА НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Специальность 05.04.03 - Холодильная и криогенная техника,
системы кондиционирования

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Одесса - 1996



Работа выполнена в Одесской государственной академии холода

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
В.А.Мизур
Научный консультант: кандидат технических наук,
профессор Б.И.Псахис
Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
А.В.Дорошенко
кандидат технических наук, доцент
Л.И.Морозюк

Ведущая организация: НПО "ШТОРМ"

Защита диссертации состоится ¹³ мая 1996 года в _____ часов на
заседании специализированного совета Д.05.20.01 при Одесской
государственной академии холода по адресу: 270100, Одесса, ул.
Дворянская 1/3, ОГАХ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОГАХ

Автореферат разослан " ____ " апреля 1996 г.

Ученый секретарь специализированного совета Д.05.20.01

доктор технических наук, профессор

В.А.Календерьян

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Исх. N _____

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Опасность необратимого изменения климата за счет производства всех видов энергии в результате антропогенной технологической деятельности по оценкам различных специалистов может возникнуть перед человечеством, когда будет преодолен порог производства энергии, превышающий 1% от общей энергии падающего солнечного излучения. Поэтому применение экологически чистых возобновляемых источников энергии, в первую очередь, солнечной энергии, в холодильной технике и кондиционировании воздуха является актуальной и перспективной научно-технической проблемой.

В настоящее время более 60 государств имеют национальные программы в области использования возобновляемых источников энергии. Основные усилия направлены на создание систем и установок по преобразованию солнечной энергии в электрическую, отопление, горячее водоснабжение, кондиционирование воздуха и сушку сельскохозяйственной продукции. Ежегодное мировое производство солнечных коллекторов превышает 3 млн м² и является косвенным подтверждением внедрения солнечной энергетики в экономику многих стран. Однако наименее изученными объектами являются солнечные генераторы холода.

В современных условиях роста цен на электрическую энергию поиск новых технических решений в процессах и технологиях производства холода, ориентированный на использование дешевых термических источников энергии (солнечное излучение, сбросная теплота промышленных производств, сжигание газов и др.), представляет собой важную научно-техническую проблему, которая определяет уровень развития холодильной техники и кондиционирования воздуха.

Перспективность использования возобновляемых источников энергии для генерации холода в странах с жарким климатом и ограниченность научной информации о термодинамических процессах, определяющих, в конечном итоге, экономическую конкурентоспособность новых технических решений и новых рабочих тел, стимулировали интерес к созданию новых компьютерно-ориентированных методов моделирования, предсказания и селекций циклов абсорбционных холодильных машин.

Основная цель настоящей работы - разработка расчетно-теоретических методов прогнозирования термодинамической эффективности циклов абсорбционных генераторов холода на основе возобновляемых источников энергии для различных перспективных рабочих тел.

Для достижения сформулированных целей были поставлены и решены следующие основные задачи:

- моделирования термодинамических свойств основных перспективных рабочих тел абсорбционных холодильных машин (системы: LiBr - H₂O, NH₃ - H₂O, LiBr - NH₃ - H₂O, LiBr/ZnBr₂ - CH₃OH, CH₃OH, LiNO₃/KNO₃/NaNO₃ - H₂O и др.);
- моделирования процессов аккумуляции энергии в форме теплоты для материалов с изменяющимися фазовыми состояниями с целью эффективной утилизации солнечной энергии.

- оптимизационного термодинамического анализа предельных возможностей необратимых циклов абсорбционных холодильных машин;
- поиска и сравнительного термодинамического анализа основных проектных характеристик для рекомендуемых схем абсорбционных генераторов холода;
- разработки программных продуктов в форме электронных активных книг для расчетов показателей энергетической эффективности различных схем абсорбционных холодильных машин.

Научную новизну работы составляют:

- расширение методов равновесного термодинамического анализа циклов абсорбционных холодильных машин с учетом неравновесности процессов тепло- и массопереноса;
- адаптация одномерной нестационарной модели пористой среды к анализу температурных полей аккумуляторов энергии, использующих материалы с изменяющимися фазовыми состояниями;
- подход к решению задач компьютерно-ориентированного проектирования абсорбционных генераторов холода в рамках CASE - технологии на основе методов интеллектуального моделирования и создания электронных книг;
- результаты моделирования энергетической эффективности перспективных циклов абсорбционных систем на различных рабочих телах.

Научное положение, защищаемое в работе:

В интегрированных компрессорно-абсорбционных гибридных системах генерации холода, утилизирующих солнечную энергию, включение в систему высокотемпературных аккумуляторов энергии (например, емкостей для хранения горячей воды) более энергетически выгодно по сравнению с дополнительной аккумуляцией низкотемпературных холодильных агентов (например, аммиака), для обеспечения одинаковых условий охлаждения объектов.

Практическая ценность работы. Разработанная в диссертации технология моделирования термодинамических свойств рабочих веществ и основных критериев энергетической эффективности может быть применена в практике компьютерно-ориентированного проектирования абсорбционных холодильных машин и тепловых насосов. Компьютерные работы файлы, представленные в системе MathCAD, могут быть использованы производителями холодильной техники при проектировании конкурентноспособных, по сравнению с компрессионными машинами, объектов на возобновляемых или вторичных источниках энергии, таких как: солнечные генераторы холода, домашние тепловые насосы на газовом топливе, промышленные нагреватели на сбросной теплоте химических производств и т.д. В учебном процессе полученные результаты используются при разработке электронных книг для обучения специалистов в области холодильной техники и химической технологии.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на ежегодных научных конференциях Одесской государственной академии холода (1994 - 1995), межвузовском семинаре по применению методов математического моделирования в прикладных исследованиях (1994), IV Международной конференции по экологии (1995).

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 102 наименования. Работа изложена на 112 страницах машинописного текста, содержащего 20 рисунков и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследований, указана научная новизна защищаемых положений и результатов. Рассмотрено современное состояние вопроса о конкурентноспособности абсорбционных систем в условиях роста цен на электроэнергию. На основе литературных данных сделан вывод о расширении возможных приложений абсорбционных генераторов холода в холодильной технике, кондиционировании воздуха и химической технологии, что явилось стимулом для появления разработок в области моделирования эффективности абсорбционных систем.

В зависимости от природы межмолекулярных взаимодействий классифицированы три типа явлений: абсорбция (в системах жидкость-пар), адсорбция (в системах газ-твердое тело) и химические реакции. Для осуществления указанных явлений необходимо подвести теплоту от внешнего источника для того, чтобы осуществить процесс перехода из одной фазы в другую. Источники энергии для указанных переходов могут быть обеспечены за счет сгорания органических топлив, утилизации низкопотенциальной теплоты или солнечного излучения. Рассмотрены термодинамические основы работы сорбционных холодильных машин, базирующиеся на различии свойств на линии насыщения при заданной температуре для хладагента (компонент 1) и сорбента (компонент 2). Основные области применения в условиях Ближнего Востока абсорбционных холодильных машин, работающих на солнечной энергии, - это производство льда и хранение пищевых продуктов.

Классическая схема цикла абсорбционной машины непрерывного действия, в которой подвод теплоты происходит от источника солнечной энергии обладает следующими свойствами:

- производство холода осуществляется только в дневное время;
- диапазон рабочих температур в коллекторе от 80°C до 120°C;
- в качестве пары хладагент-абсорбент обычно используют либо $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ для холодильных систем, либо $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ для систем кондиционирования воздуха;
- управление установкой адаптировано по отношению к нестационарным изменениям теплового потока от коллектора.

- отношение производства холода к поступающему потоку солнечной энергии достаточно высоко - $\epsilon_c \sim 15\%$;
- автономность системы обычно обеспечивается за счет выработки электроэнергии с помощью фотоэлектрических элементов;
- табаритные показатели такой схемы относят к числу средних или больших.

Установки периодического действия характеризуются тем, что солнечный коллектор является генератором в дневное время и абсорбером ночью. Поэтому производство холода осуществляется в ночное время.

Исследования солнечного излучения в странах Ближнего Востока достаточно хорошо известны. Было установлено, что максимальный поток солнечной энергии может быть воспринят коллектором, если его угол наклона выбран равным широте местности. В реальных условиях угол наклона коллектора должен устанавливаться на $5^\circ - 10^\circ$ больше (меньше) в зависимости от конечной цели - нагревания или охлаждения. Минимальная величина потока солнечного излучения необходимая для работы холодильной установки находится в пределах от 3 до 10 МДж/м².

Эффективная утилизация возобновляемых источников энергии с периодическим максимумом интенсивности во многом может быть достигнута применением различных конструкций аккумуляторов энергии. В странах с жарким климатом экономно дорогостоящего искусственного холода получают от таких возобновляемых источников, как холод зимнего периода и низкотемпературный ночной воздух. Аккумуляцию солнечной энергии обычно реализуют в устройствах, использующих теплоту фазовых переходов, где накопление энергии осуществляется за счет нагрева или охлаждения рабочих сред с высокой теплоемкостью (газовые или водные аккумуляторы, обладающие простой конструкцией, но имеющие плохие характеристики компактности). В настоящее время более эффективными аккумуляторами энергии являются устройства, использующие скрытую теплоту плавления и кристаллизации рабочих веществ, что позволяет добиться хороших экономических показателей за счет большей энергоемкости и приближения к изотермичности процессов нагрева и охлаждения теплоносителей. Стремление увеличить поверхности контакта между веществом, изменяющим свое фазовое состояние, и теплоносителем привело к созданию систем с аккумулирующими элементами, которые имеют максимально развитые поверхности теплообмена.

Рассмотрена принципиальная схема конструкции и представлена математическая модель аккумулятора энергии, в котором вещество с изменяющимся фазовым состоянием находится внутри упакованных сферических капсул, помещенных в цилиндрический контейнер. Сложная геометрическая структура такой аккумулирующей системы затрудняет получение информации о распределении температурных полей непосредственно из уравнений энергии.

В режиме зарядки теплота от холодного источника передается к аккумулирующему веществу, которое изменяет свое фазовое состояние, например, затвердевает, а в режиме разрядки происходит передача энергии от аккумулирующего вещества за счет теплоты плавления к потоку

технологического вещества. Таким образом, аккумуляция энергии позволяет снизить мощность холодильных машин и сгладить графики энергопотребления, что характерно для систем утилизации солнечной энергии.

Принципиальные схемные решения для аккумуляторов энергии в большинстве случаев связаны с термодинамическими свойствами и фазовым поведением энергоаккумулирующего вещества. Основные проблемы можно суммировать следующим образом:

- фазовое расслоение вещества в процессе циклических температурных воздействий;
- увеличение термического сопротивления между поверхностью теплообмена и движущейся границей раздела фаз;
- изменение объема вещества при фазовом переходе.

Различные конструктивные решения, устраняющие указанные трудности, включают введение специальных теплообразующих добавок, теплопроводящих матриц, эластичных вкладышей и т.п. Среди возможных решений, устраняющих рассмотренные выше проблемы, наиболее привлекательной представляется идея Fraid, Kanzawa (1980) по использованию аккумулирующих веществ в специальных капсулах, что позволяет совместить высокую плотность энергии хранения с прекрасными габаритными характеристиками. Простота технического решения, подтвержденная в экспериментальных работах, в то же время представляет значительные трудности для моделирования температурных полей в таких системах, поскольку геометрическая структура объектов является достаточно сложной для гидродинамического и термодинамического описания. Компромисс может быть достигнут при рассмотрении таких сред как капиллярно-пористых. На рис. 1 представлена принципиальная схема системы аккумуляции энергии, анализируемая в данной работе.

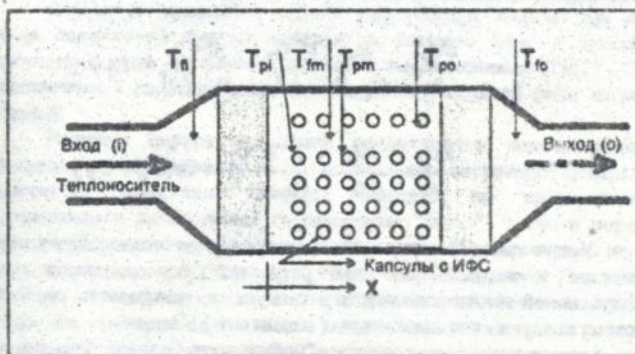


Рис. 1. Принципиальная схема устройства аккумуляции энергии с материалами, изменяющими фазовое состояние

Модель геометрической структуры в контейнере была рассмотрена в приближении одномерной капиллярно-пористой среды, в которой поток теплоносителя движется в аксиальном направлении. Вещество, изменяющее свое фазовое состояние первоначально находится в жидком состоянии в сферических капсулах, которые упакованы в цилиндрическом контейнере. Во время зарядки теплоноситель обменивается энергией с капсулами, в которых осуществляется процесс поглощения и аккумуляция теплоты. На стадии разрядки, например, в процессе кондиционирования воздуха происходит отвод энергии от капсул в рабочее пространство. Механизмы процессов теплообмена на этапах зарядки и разрядки не совпадают друг с другом. Здесь мы ограничимся процессом зарядки, который для большинства аккумуляторов энергии носит универсальный характер, в отличие от процесса разрядки, который определяется внешними условиями, зависящими от технологии утилизации аккумулированной энергии.

Основная проблема определения температурного поля вещества в капсулах за период времени зарядки сопряжена с переходом от жидкого состояния в переохлажденное твердое состояние. Удобно выделить три временных диапазона в зависимости от фазовых состояний и тем самым упростить модель аккумулятора энергии. Другие допущения связаны с теплофизическими характеристиками теплоносителя и аккумулирующего вещества, которые предполагаются постоянными. Контейнер, содержащий капсулы, предполагается адиабатически изолированным. Для каждой из временных областей представлены математические модели, описывающие каждое из перечисленных фазовых состояний.

Модель аккумуляции энергии в капсуле с жидкой фазой

Уравнения энергии для пористой среды в безразмерных переменных записываются отдельно, как для капсул, содержащих аккумулирующее вещество в жидкой фазе, так и для теплоносителя:

$$\frac{\partial \theta_p}{\partial \alpha} = \frac{R_{KL}}{R_{cl} Pe} \frac{\partial^2 \theta_p}{\partial \alpha^2} - \frac{St}{R_{cl}} (\theta_p - \theta_f), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial \alpha} + \frac{\partial \theta_f}{\partial \alpha} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial \alpha^2} + St(\theta_p - \theta_f). \quad (2)$$

Уравнение (1) описывает температурное поле аккумулирующего вещества в жидкой фазе как результат суперпозиции процессов кондуктивной теплопроводности в капсуле и межфазного теплообмена в системе капсула - теплоноситель (хладагент). Эволюция температурного поля теплоносителя определяется уравнением баланса энергии (2), в котором наблюдается конкуренция процессов конвекции, теплопроводности и межфазного теплообмена.

Начальные и граничные условия для уравнений (1) и (2) записываются в виде:

$$\tau = 0, \quad \theta_p = \theta_{pi}, \quad \theta_f = \theta_{fi}; \quad (3)$$

$$x = 0, \quad \theta_f = \theta_{fi}, \quad \frac{\partial \theta_p}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

$$x = 1; \quad \frac{\partial \theta_f}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \theta_p}{\partial x} = 0. \quad (5)$$

Модель аккумуляции энергии в капсуле в процессе фазового перехода

Вторая область, для которой рассмотрен механизм аккумуляции энергии при переходе из жидкого состояния в твердое, описана системой уравнений энергии для капсулы и теплоносителя:

$$\frac{\partial \beta}{\partial \tau} = \frac{StSte}{Re_{cl}} (\theta_s - \theta_f), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial \tau} + \frac{\partial \theta_f}{\partial x} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial x^2} + St (\theta_s - \theta_f), \quad (4)$$

дополненными условиями на границах рассматриваемой временной области:

$$\tau = \tau_s, \quad \theta_p = \theta_s, \quad \theta_f = \theta_{fs}, \quad \beta = 0.$$

Величина θ_{fs} может быть найдена из решения системы уравнений баланса для жидкой фазы (1), (2).

Модель аккумуляции энергии в капсуле с твердой фазой

Структура уравнений модели аккумуляции энергии для области, когда содержимое капсулы перешло в твердую фазу и находится в переклажденном состоянии, совпадает с уравнениями (1)-(2). Отличие заключается в необходимости замены свойств жидкой фазы на свойства твердой.

Решение систем уравнений осуществляли конечно-разностным методом с аппроксимацией дифференциальных операторов центральными конечными разностями второго порядка по пространственным переменным и разностными отношениями "назад" второго порядка по времени. Первая и вторая области были разделены по критериям перехода, принятым равными 0.2°C и $\beta = 0.99$ ($\beta = 1$ соответствует твердой фазе). В качестве материала, изменяющего фазовое состояние выбрана вода (лед). Для проверки адекватности модели по имеющимся ограниченным экспериментальным данным S. Chen (1991) коэффициент теплопередачи подбирали таким образом, чтобы наилучшим образом описать температуры теплоносителя на входе и выходе. Общая картина поведения температуры вещества, изменяющего свое фазовое состояние, внутри капсулы изображена на рис. 2.

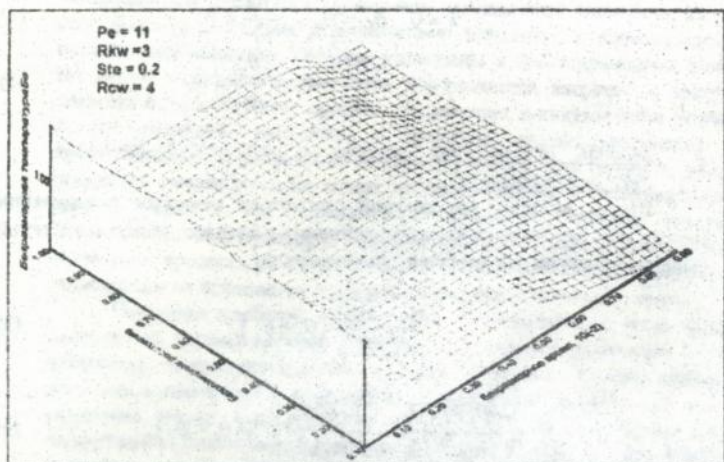


Рис. 2. Распределение температуры среды, изменяющей фазовое состояние, в канистре

Решение уравнений баланса совместно с начальными и граничными условиями определяет температурное поле для каждой из областей в аккумуляторе энергии и позволит найти инженерную оценку полноты зарядки аккумулятора из неравенства

$$\Pi_1 > \Pi_2, \Pi_1 = (t_0 - t^1(x))\tau_1,$$

где индекс 1 отвечает режимам зарядки и разрядки, соответственно. Данное условие может быть достигнуто подбором величины температуры фазового перехода t_0 и соответствующих длительностей периодов зарядки и разрядки τ_1 . Результаты предсказания температурных полей сопоставлены с экспериментальными данными и проведена идентификация модели аккумулятора энергии для водной системы с изменяющимся фазовым состоянием.

Термодинамические модели абсорбционных циклов

Появление новых рабочих тел и циклов для абсорбционных систем на возобновляемых источниках энергии привело к необходимости создания надежных и эффективных методов моделирования, что позволяет значительно сократить финансовые издержки экспериментальной проверки потенциально работоспособных схемных решений. В диссертации предпринята попытка применения современных компьютерных средств проектирования в рамках информационной CASE (Computer Aided Software Engineering) - технологии для создания простых и доступных средств моделирования энергетической эффективности абсорбционных систем в различных приложениях.

Абсорбционная система рассматривается как некоторая абстрактная система, состоящая из определенного набора стандартных элементов - подсистем (например, абсорбер, испаритель, генератор, конденсатор и т. д.), которым поставлено в соответствие математическое описание физических процессов, протекающих в данном элементе системы.

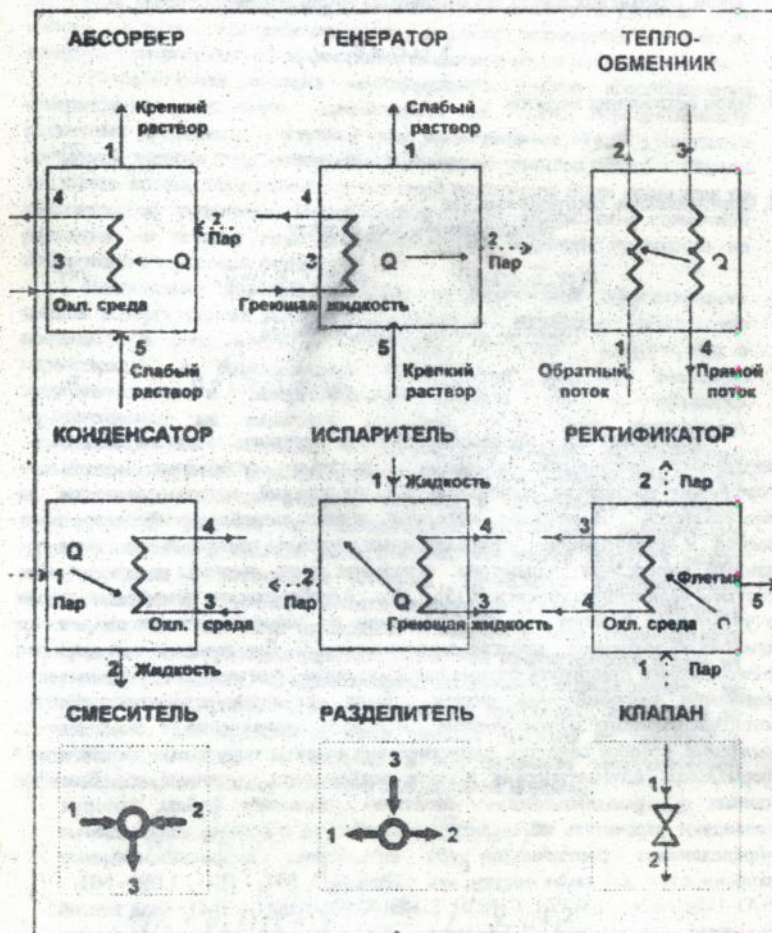


Рис. 3. Модели основных структурных элементов абсорбционных систем

На рис. 3 изображены графические представления моделей основных элементов абсорбционных холодильных машин, из которых можно конструировать всевозможные схемы абсорбционных

систем. Основные уравнения представлены в форме уравнений баланса массы и энергии в алгебраической форме.

1. Закон сохранения общей массы:

$$\sum_i G_i = 0 \quad (5)$$

2. Закон сохранения массы для каждого из компонентов раствора:

$$\sum_i G_i c_i = 0 \quad (6)$$

3. Закон сохранения энергии:

$$\sum_i h_i G_i = 0 \quad (7)$$

4. Определяющие соотношения для:

термодинамических свойств

$$h(p_i, T_i, c_i) = 0; \quad \varphi(p_i, T_i, c_i) = 0; \quad (8)$$

тепловых и диффузионных потоков

$$q_i - \alpha^i \langle \Delta T \rangle = 0, \quad \Delta \mu(p_i, T_i, c_i) = 0. \quad (9)$$

Характеристики процессов переноса теплоты и массы можно определить различными способами, используя возможные методы усреднения градиентов температур и концентраций, которые задаются пользователем. В качестве исходных данных задавали температуру, расход и концентрацию в определенных узловых точках и по этим данным определяли параметры остальных точек системы из решения системы нелинейных уравнений (5)...(9). Алгебраическое суммирование в уравнениях баланса (5)...(7) проводили по значениям индексов для каждого из элементов, представленных на рис. 3. Для создания software, позволяющего принимать оптимальные решения при выборе различных вариантов абсорбционных систем была использована методология интеллектуального моделирования - нового направления в системах имитации, которое сочетает эвристические аспекты экспертных систем и формальные математические модели исследуемых процессов. База данных о термодинамических свойствах включает файлы, которые позволяют рассчитать по заданным температуре и составу необходимые определяющие соотношения (9) на основе аппроксимационных зависимостей для таких систем, как: LiBr - H₂O, NH₃ - H₂O, LiBr - NH₃ - H₂O, LiBr/ZnBr₂ - CH₃OH, CH₃OH, LiNO₃/KNO₃/NaNO₃ - H₂O. База знаний содержит информацию об элементах абсорбционной системы, основные расчетные зависимости и эвристические правила формирования различных схем. Абсорбционный цикл рассмотрен как ориентированный граф, в котором узлы и соединения трактуются как ребра упорядоченные парами вершин. Линейные уравнения баланса описывают распределение потоков

в узлах графа и число независимых уравнений равно рангу матрицы инцидентий графа. Такая матрица формируется для проверки и исключения возможных линейно зависимых уравнений.

Программная реализация общего подхода к моделированию абсорбционных циклов была осуществлена с помощью системы MathCAD в форме электронной книги, ориентированной на приложения в среде Windows-95. В диссертации приведены листинги программ, основные расчетные зависимости для термодинамических свойств и узловых точек циклов на различных рабочих телах, а также результаты вычислений критериев энергетической эффективности циклов абсорбционных систем.

Разработанная система моделирования циклов абсорбционных генераторов холода была использована для оценки перспективности различных предложений, улучшающих традиционные схемы утилизации солнечной энергии либо низкопотенциальных источников теплоты. Оценка теплового потока для плоского солнечного коллектора была проведена по классическому уравнению Hottel-Whillier (1955). Вычисление солнечной радиации в течение года для условий юга Украины проводили по корреляции в гауссовой форме.

Нахождение целевых функций энергетической эффективности циклов абсорбционных генераторов холода для различных рабочих тел проводили в зависимости от имеющейся исходной информации о параметрах в определяющих соотношениях (9) как методами энергетического и эксергетического анализа, так и методами термодинамики на конечных временах. Для более адекватного термодинамического анализа абсорбционных циклов, использующих малые температурные градиенты, были учтены динамические ограничения на конечность величин потоков теплоты и конечность протекания процессов. В отличие от классической концепции равновесного термодинамического анализа здесь считали, что обмен энергией между рабочим телом и источником (стоком) происходит принципиально необратимо из-за конечной разности температур и в течение конечного промежутка времени. Это позволило ввести законы теплопередачи непосредственно в критерии термодинамической эффективности и дать их более реальную оценку. Энергетические показатели, определенные на оптимальных необратимых термодинамических процессах, вычисляли по соотношениям для средних за цикл потоков теплоты от горячего и холодного источников в систему и коэффициента энергетической эффективности цикла абсорбционной холодильной машины:

$$\langle q \rangle = \alpha_H T_H \left(1 - \sqrt{\frac{T_H}{T_{0r}}} \right) / \left(\sqrt{\frac{\alpha_H}{\alpha_0}} + 1 \right)^2,$$

$$\langle q \rangle_0 = \alpha_L T_L \left(1 - \sqrt{\frac{T_{lr}}{T_0}} \right) \frac{\alpha_0}{\alpha_L} / \left(\sqrt{\frac{\alpha_0}{\alpha_L}} + 1 \right)^2, \quad (10)$$

$$COP = \langle q_0 \rangle / \langle q \rangle$$

В работе рассмотрены примеры расчетов критериев энергетической эффективности для различных абсорбционных циклов. Особое внимание было уделено комбинированным системам, которые могут быть, при определенных условиях, конкурентноспособными при анализе корреляций "затраты - прибыль" по сравнению с компрессионными системами. Проверка адекватности термодинамических моделей абсорбционных систем является достаточно сложной задачей из-за отсутствия опубликованных данных о работе таких систем. Корректность предложенного подхода была проверена на примере хорошо исследованной абсорбционной бромистолитиевой машины с воздушным охлаждением АБХМ-ВО, а также холодильных циклов различного назначения с использованием солнечной энергии. Схемы и результаты расчетов приведены в четвертой главе. На примере моделирования гибридной компрессионно-абсорбционной системы исследован вопрос о предпочтительности выбора между высоко- и низкотемпературной аккумуляцией энергии. В первом случае для сглаживания режима работы установки используются емкости для хранения горячей воды, во втором - емкости для хранения хладагента (аммиака). Избыточное количество аммиака позволяет уменьшить концентрацию раствора, входящего в генератор, снизить давление в абсорбере и повысить максимум температуры кипения раствора. Проведенный термодинамический анализ и моделирование возможных вариантов подтвердило правомерность научного положения о преимуществе включения в систему высокотемпературных аккумуляторов энергии.

ВЫВОДЫ

- Термодинамические модели абсорбционных генераторов холода, реализованные в данной работе в форме электронных книг, позволяют исследовать широкий спектр конфигураций циклов с различными рабочими телами и не требуют от пользователя специальных знаний языков программирования.
- Создание надежных и эффективных методов моделирования абсорбционных систем дает возможность значительно сократить финансовые издержки опытной проверки, потенциально работоспособных схемных либо конструктивных решений и осуществить планирование минимально необходимых экспериментов.
- Одномерная модель пористой среды с параметрами идентифицированными по данным о температурах теплоносителя на входе и выходе из аппарата адекватно передает и достаточно надежно предсказывает распределение температур в материалах с изменяющимся фазовым состоянием - наиболее перспективных аккумуляторах энергии, используемых для эффективной утилизации солнечной энергии.
- Оценки предельных возможностей энергетической эффективности реальных абсорбционных генераторов холода, учитывающие конечные

времена процессов тепло- и массопереноса от источников (стоков) к рабочим телам, дают более адекватную картину степени совершенства абсорбционных систем по сравнению с традиционными методами термодинамического анализа (энергетическим и эксергетическим).

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Зейтер А., Хаддл С., Мазур В.А. Компьютерные модели энергетической эффективности абсорбционных и компрессионных холодильных машин. В кн. "Применение вычислительной техники и математического моделирования в прикладных научных исследованиях". ОГИИ, 1994, с.34.
2. Хаддл С. Термодинамические модели рабочих тел абсорбционных холодильных машин. Тезисы докладов научно-методической конференции "Теория и практика вузовской науки", ОГАХ, 1995, с.36.
3. С.Хаддл Перспективы применения солнечных генераторов холода. Труды IV Международной конференции по экологии. Одесса - 1995, с. 36.

Обозначения:

$\theta = (T - T_{\mu}) / (T - T_{\mu})$, $\tau = \nu / \alpha$, $\chi = X/L$, $t_c = L/\nu$, T - температура ($^{\circ}\text{C}$), C - теплоемкость (Дж/кг К), t - время (с), α - коэффициент теплопроводности ($\text{Вт/м}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$), u - скорость (м/с), X - координата, k - теплопроводность ($\text{Вт/м }^{\circ}\text{C}$), λ - теплота фазового перехода (Дж/кг), ρ - плотность (кг/м^3), ϵ - пористость, L - общий размер цилиндрического контейнера (м), $R_{\text{ад}} = (1-\epsilon)\rho_s C_{\text{л}} / \epsilon \rho C_{\text{г}}$ - отношение эффективных теплоемкостей аккумулирующего вещества и теплоносителя, $R_{\text{д}} = k_{\text{л}}/k_{\text{г}}$ - отношение теплопроводностей аккумулирующего вещества и теплоносителя, $St = \alpha L / \epsilon \rho C_{\text{г}}$ - число Стентона, $Ste = C_{\text{г}}(T_{\mu} - T_{\text{д}}) / \lambda$ - число Стефана, Pe - число Пекле, d - эквивалентный диаметр капсул (м), β - массовая доля аккумулирующего вещества в твердой фазе внутри капсулы, G - массовый расход; h - энтальпия; c - концентрация; $\langle \Delta T \rangle$ - среднелогарифмический температурный напор, f - теплопередающая поверхность (м^2), $\Delta \mu$ - поток массы, обусловленный градиентом концентраций. Индексы f, p характеризуют теплоноситель и вещество с изменяющимся фазовым состоянием, соответственно. Индексы H и L - характеризуют высокотемпературный и низкотемпературный источники энергии, θ - параметры окружающей среды.

ЛНБ ім. В. Стефанива
АН України

Хаддал С. Термодинамічні моделі зберігання енергії в основі відновлюваних джерел енергії

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.04.03 - Холодильна і криогена техніка, системи кондиціонування, Одеська державна академія холоду, Одеса, 1996 р.

Термодинамічні моделі були розвинені для гнучкого аналізу різноманітних конфігурацій абсорбційних циклів з різними робочими речовинами. Одномірна модель пористого середовища була запропонована для визначення термічних характеристик акумулятора енергії, що наповнюється капсулами із змінюваним фазовим станом. Електронна книжка в MathCAD презентації була зроблена та теоретичні характеристики деяких перспективних абсорбційних циклів були протестовані як стандартними методами термодинамічного аналізу, так й методами термодинаміки на кінцевих часах. Було показано, що у гібридних абсорбційно-компресорних систем використання ємкості для акумуляції горячої води більш ефективно у порівнянні зі зберіганням додаткової маси холодоагенту.

Ключові слова: абсорбційні системи; термодинамічні властивості; акумулятори енергії; відновлювані джерела енергії; гібридні холодильні цикли.

SUMMARY

Haddad S. Thermodynamic Models of Absorption Refrigerating Generators on the Renewable Energy Sources.

Thesis for a scientific degree of Doctor of Science (Engineering). Specialty: 05.04.03 - Refrigerating machines and apparatus, cryogenics and air-conditioning systems. Odessa State Academy of Refrigeration, Odessa, 1996

The thermodynamic models have been developed for flexible simulation of a wide variety of absorption cycle configurations with different working fluids. One-dimensional porous-medium model to determine the thermal characteristics of energy storage for the utilization of phase change material in packed capsules has been developed. The MathCAD electronic book for absorption cycles selection has been made and the theoretical performances of some perspective cycles have been assessed by using both a standard equilibrium thermodynamic analysis and new finite-time thermodynamics methods. The simulation of integrated hybrid absorption-compressor systems shows that a hot water thermal storage performs more efficiently than a refrigerant storage.

Keywords: solar-powered absorption systems; thermodynamical properties; energy storage; renewable energy sources; hybrid refrigeration cycle; theoretical perform