

На правах рукописи

КУКОЛЕВ
Максим Игоревич

**МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В НАКОПИТЕЛЯХ ЭНЕРГИИ
ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ**

05.14.04 — Промышленная теплоэнергетика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ — 2006

Работа выполнена на кафедре «Технологии металлов и ремонта» в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Петрозаводский государственный университет»

Официальные оппоненты:

— доктор техн. наук, профессор	Сапожников Сергей Захарович
— доктор техн. наук, профессор	Кавтарадзе Реваз Зурабович
— доктор техн. наук, профессор	Лабейш Владимир Георгиевич

Ведущая организация — *ОАО "Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И.Ползунова" (НПО ЦКТИ), Санкт-Петербург.*

Защита диссертации состоится 13 июня 2006 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29
в аудитории 411 ПГК

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «12» мая 2006 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812)552-1630

E-mail: kg1210@mail.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета



К. А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Неравномерность рабочих процессов в энергетических установках (ЭУ) снижает их эффективность. Одним из путей снятия пиковых нагрузок, повышения маневренности ЭУ является применение тепловых накопителей (аккумуляторов) энергии (ТН) – устройств, в которых энергия «запасается» путем повышения температуры или изменения фазового состояния нагреваемого теплоаккумулирующего материала (ТАМ). Затем, при понижении температуры или обратном фазовом переходе, энергия «выделяется» и может быть полезно использована.

В пароводяных энергетических циклах ТН применяются давно и успешно. Ситуация с применением ТН в «малой» энергетике, в автотранспортной технике, судостроении и авиакосмической технике хуже. Используемые там ТН, в которых повышается энтальпия промежуточного рабочего тела, плохо поддаются инженерному расчету, а их численное моделирование громоздко и не дает материалов для обобщений.

Существующие модели и методики расчета тепловых процессов в ТН в большинстве своем применимы к отдельным конструктивным схемам, требуют применения численных методов. Это затрудняет обоснование проектных решений, особенно на начальных стадиях, когда при минимуме информации о будущем устройстве и обилии возможных схем требуется провести выбор наиболее перспективных.

На наш взгляд, целесообразно с помощью приближенных аналитических методов расчета выбрать наиболее перспективные варианты и уже их рассчитывать, применяя численные методы.

Поэтому актуальными остаются разработка обобщенной аналитической модели и методик расчета ТН, применение подхода, позволяющего уже на начальных стадиях проектирования получать более полную информацию о создаваемом устройстве для лучшего обоснования принимаемых решений. Этому и посвящена данная работа.

Предметом исследования являются тепловые процессы в ТН и их влияние на эффективность этих устройств.

Объект исследования – ТН с однофазными и фазопереходными (плавающими) ТАМ.

Цель исследования – Научное и расчетное обеспечение проектных решений при проектировании теплоэнергетического оборудования.

Задачи исследования:

- 1) Разработка единого подхода к оценке эффективности ТН;
- 2) Создание моделей тепловых процессов в ТН типовых схем на основе уравнений теплового баланса;
- 3) Проверка достоверности и адекватности построенных моделей;
- 4) Исследование влияния параметров ТН на их эффективность;
- 5) Создание методик расчета ТН различного назначения.

Методы исследования. Работа выполнялась на основе аналитических решений систем уравнений теплового баланса в ТН с однофазными и плавящимися ТАМ.

Научная новизна работы определяется тем, что в ней:

- предложена обобщенная аналитическая модель тепловых процессов в ТН с однофазными и плавящимися ТАМ;
- при моделировании ТН совместно использованы энергетические и эксергетические показатели;
- для обоснования проектных решений предложено применять новый критерий эффективности ТН – максимум коэффициента использования массы ТАМ;
- разработаны методики расчета ТН типовых схем с одним или несколькими ТАМ;
- введен коэффициент, позволяющий рассчитывать ТН с плавящимися ТАМ, размещенными в ячейках любой конструктивной формы.

Практическая ценность работы определяется тем, что:

- предложенный подход, основанный на совместном использовании энергетических и эксергетических показателей, позволяет более обоснованно принимать решения о направлении дальнейшего проектирования ТН различного назначения для конкретных условий применения.

Результаты исследований реализованы. В частности:

- методика расчета и модель ТН последовательного включения с плавящимися ТАМ применены при разработке системы предпускового разогрева дизельного двигателя КамАЗ-7408.10 в Военном инженерно-техническом университете (г. Санкт-Петербург). Данная система была смонтирована на автобусе ЛиАЗ-5256 Санкт-Петербургского ГУП «Пассажиравтотранс» и успешно испытана в зимние периоды 2003-2004 гг.;
- модели ТН последовательного и параллельного включения с плавящимися ТАМ использовались Московским авиационным институтом (Государственным техническим университетом) при исследовании мощных энергосиловых установок для перспективных космических систем, при формировании концепций марсианской экспедиции 2020 г., при разработке методического обеспечения для анализа применения комбинированных транспортных систем (Номера и шифры НИР: «Формант-МВО», «Развитие-Ц», 610-9102, 601-01-К2);
- обобщающие зависимости для определения эксергетического КПД ТН с однофазными и плавящимися ТАМ использованы в курсах лекций «Расчет и проектирование двигательных установок», «Системное проектирование энергетических установок» в Московском авиационном институте (Государственном техническом университете); «Теплотехника», «Тепловые насосы и холодильники» в Петрозаводском государственном университете;

- методика расчета ТН с плавящимися ТАМ принята к внедрению на Балаковской АЭС для анализа решений при выборе возможных вариантов ТН;

- методики расчета ТН с однофазными и плавящимися ТАМ приняты к внедрению при проектировании и сооружении второй очереди Астраханской «ТЭЦ-Северная».

Достоверность научных положений и полученных в работе результатов базируется на применении фундаментальных законов физики при моделировании; на сопоставлении с результатами аналитических и численных расчетов, а также удовлетворительном совпадении с данными экспериментальных работ других авторов. Она подтверждается также опытом внедрения результатов в ряде организаций.

На защиту выносятся:

1) обобщенная аналитическая модель тепловых процессов в накопителях энергии с однофазными и плавящимися ТАМ;

2) подход, основанный на совместном использовании энергетических и эксергетических показателей;

3) критерий эффективности ТН для обоснования проектных решений – максимум коэффициента использования массы ТАМ;

4) методики расчета ТН типовых схем с одним или несколькими ТАМ.

Основные научные положения и результаты работы докладывались и обсуждались:

- на Всесоюзной научно-технической конференции в ВИКИ им. Можайского (Ленинград, 1990 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Теория, проектирование и методы расчета лесных и деревообрабатывающих машин» (Москва, 1997 г.), Второй Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 1998 г.), Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике» (Москва, 2001 г.), Всероссийской научной школе при Институте прикладных математических исследований КарНЦ РАН «Математические методы в экологии» (Петрозаводск, 2001 г.);

- на Международном астронавтическом конгрессе (Осло, 1995 г.), Международной научно-технической конференции «Проблемы развития лесного комплекса Северо-Западного региона» (Петрозаводск, 1996 г.), Четвертом международном семинаре «Зеленая энергетика: от современной технологии к новой философии» (Петрозаводск, 1998 г.), Международной конференции «Проблемы развития лесного комплекса» (Петрозаводск, 1998 г.), Международном конгрессе канадского общества инженеров-механиков (Торонто, 1998 г.), Третьей международной научно-технической конференции «Чкаловские чтения: инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники» (Егорьевск, 1999 г.), Второй, Четвертой и Шестой международных научно-технических конференциях «Новые информационные технологии в целлюлозно-бумажной промышленности и энергетике» (Петрозаводск, 1996, 2000 и 2004

гг.), Международной конференции «Новые технологии и устойчивое управление в лесах Северной Европы» (Петрозаводск, 2001 г.), Международной конференции «Энергоресурсосбережение на предприятиях металлургической, горной и химической промышленности» (Санкт-Петербург, 2005 г.);

- на республиканских научно-практических конференциях в г. Петрозаводске: «Проблемы механизации лесной промышленности и лесного хозяйства Карелии» (1995 г.), «Проблемы развития лесного комплекса Карелии» (1996 г.), «Ресурсосберегающие технологии лесного комплекса» и «Региональные проблемы развития лесного комплекса» (1998 г.), «Научно-методическое обеспечение лесного комплекса Карелии» и «Актуальные проблемы лесного комплекса» (1999 г.), «Устойчивое развитие региона: лесопромышленный комплекс» (2000 г.);

- на Второй научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей лесного комплекса Республики Карелия (Петрозаводск, 2000 г.), научно-технической конференции в Военном инженерно-техническом университете (Санкт-Петербург, 2002 г.) и межвузовских научных конференциях в рамках ежегодной недели науки Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (2002 и 2003 гг.).

Материалы работы вошли в отчеты Лесоинженерного факультета Петрозаводского государственного университета по теме 100-95 «Пути повышения надежности машин и оборудования лесного комплекса при проектировании, изготовлении и эксплуатации» и заключительный отчет международной исследовательской программы при Совете Министров Северных Стран «Социальная устойчивость лесопользования в Северной Европе: исследования и образование» (Копенгаген, 2001 г.).

Материалы диссертации докладывались на семинарах в Московском государственном авиационном институте (1996 г.), на расширенной секции 4 Научно-Технического Совета Центрального научно-исследовательского института машиностроения (1996 г.), в Петрозаводском государственном университете (2001, 2006 гг.) и Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (2001, 2003, 2006 гг.).

Основной материал диссертации опубликован в 42 печатных работах. Среди них: 2 монографии; 16 статей в научных журналах и сборниках трудов, 24 доклада на международных, всероссийских и отраслевых конференциях.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 190 отечественных и зарубежных источников и пяти приложений. Она содержит 280 страниц текста, 129 рисунков, 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, приводится постановка задачи и краткая аннотация содержания работы по главам, дана оценка новизны, достоверно-

сти и практической ценности полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В главе 1 проведен обзор современных конструкций ТН и опыта их применения в аэрокосмической технике, судовых энергетических установках, автотранспортной технике, стационарных энергетических установках.

Основы моделирования тепловых процессов в ТН и оценки их эффективности заложены в исследованиях Кирсанова И.Н., Чаховского В.М., Бекмана Г., Гилли П., Богословского В.Н., Шамсундара Н., Спэрроу Е., Грилихеса В.А., Матвеева В.М., Полуэктова В.П., Алексеева В.А., Бежана А., Висканты Р., Оцисика М., Чукаева А.Г., Розена М., Дихтиевского О.В., Юревича И.Ф., Мартыненко О.Г., Карнаухова Н.Н., Севрука Д.Д., Паневина И.Г., Квасникова Л.А., Грибкова В.М., Ерошенко В.М., Кармастина К.В., Шульгина В.В., Токаря Б.З., Быковцова Ю.С., Котенко Э.В., Столяревского А.Я., других отечественных и зарубежных авторов.

Основным замечанием к работам, содержащим общие уравнения теплового баланса для процессов заряда и разряда ТН с однофазными и фазопереходными ТАМ, является либо отсутствие вывода уравнений, либо учет лишь отдельных составляющих, что сужает рамки применимости моделей, разрабатываемых на основе этих уравнений.

Применимость известных численных и аналитических моделей ТН с однофазными и фазопереходными ТАМ ограничена. Это связано прежде всего с тем, что в них рассматриваются частные случаи, иногда принимаются допущения не соответствующие действительности. Так, к примеру, для того, чтобы работали численные методы расчета ТН с фазопереходными ТАМ, большинство авторов делают допущение о равенстве плотностей ТАМ в твердой и жидкой фазах. В то же время у реальных ТАМ изменение плотности может достигать 30 %. Лишь у металлов при плавлении плотность меняется на 3÷5 % но из-за невысокой теплоты плавления область их применения в ТН ограничена.

Проведенный анализ работ по вопросам применения и проектирования ТН с однофазными и фазопереходными (плавящимися) ТАМ подтверждает, что:

1. Для ранних стадий проектирования устройств остается актуальной разработка моделей, учитывающих потери – т. е. таких, у которых энергетический КПД < 1 ;
2. В целях получения более полной информации о характеристиках проектируемых устройств требуется дополнение традиционного «энергетического» подхода «эксергетическим», позволяющим установить степень термодинамического совершенства конструкции;
3. Разработанные до настоящего времени модели ТН являются частными случаями. Вывод обобщающих балансовых уравнений теплоты для процессов заряда и разряда устройств с помощью метода энтальпии и разработка на их основе расчетных моделей позволит проводить процесс проектирования с единых позиций, учитывая

влияние чистой теплопроводности, конвекции, различных конструктивных форм ячеек с ТАМ и условий подвода и отвода теплоты.

В главе 2 введен критерий эффективности ТН. Масса ТН складывается из масс конструктивных элементов и ТАМ. В свою очередь, суммарная масса ТАМ, необходимая для функционирования энергоустановки с ТН в качестве источника энергии

$$M_{tsm\Sigma} = \frac{P_d \cdot t_d}{c_\Sigma \cdot \Delta T \cdot \eta_\Sigma}, \quad (1)$$

для однофазных ТАМ и

$$M_{tsm\Sigma} = \frac{P_d \cdot t_d}{L \cdot \eta_\Sigma}, \quad (2)$$

для плавящихся.

Выделим условно массу M_{ex} ТАМ, которая обеспечивает полезную работу, получаемую от ТН при разряде:

$$M_{ex} = \frac{\sum c_i \cdot \psi_\Sigma}{c_\Sigma \cdot \Delta T} \quad (\text{однофазные ТАМ}), \quad (3)$$

$$M_{ex} = \frac{\sum c_i \cdot \psi_\Sigma}{L} \quad (\text{плавящиеся ТАМ}). \quad (4)$$

О степени совершенства конструкции можно судить по отношению этой массы к массе $M_{tsm\Sigma}$:

$$\mu_{ex} = \frac{M_{ex}}{M_{tsm\Sigma}}, \quad (5)$$

При проектировании необходимо так подбирать ТАМ и элементы конструкции, чтобы не только снизить массу ТН, но и выполнить условие $\mu_{ex} \rightarrow \max$.

Применение коэффициента использования массы μ_{ex} позволяет произвести явный учет потерь внутри накопителя и, при необходимости, сравнить альтернативные варианты конструкций, имеющих одинаковые энергетические КПД, но отличные по эксергетическим параметрам.

После введения допущений и ограничений из рассмотрения баланса энтальпии ТН при заряде и разряде получены общие уравнения состояния ТН:

$$\begin{aligned} Q_c' = & (c_s \cdot (T_m - T_s(t)) + L + c_l \cdot (T_l(t) - T_m)) \cdot \frac{dM_l(t)}{dt} + \\ & + (M_\Sigma - M_l(t)) \cdot c_s \cdot \frac{dT_s(t)}{dt} + M_l(t) \cdot c_l \cdot \frac{dT_l(t)}{dt}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$Q'_d = (c_s \cdot (T_m - T_s(t)) + L + c_l \cdot (T_l(t) - T_m)) \cdot \frac{dM_s(t)}{dt} - (M_\Sigma - M_s(t)) \cdot c_l \cdot \frac{dT_l(t)}{dt} - M_s(t) \cdot c_s \cdot \frac{dT_s(t)}{dt} \quad (7)$$

На практике чаще встречается частичное использование тех или иных составляющих уравнений (6) и (7) (табл. 1).

Таблица 1

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ (6) И (7)

№ пп	ИЗМЕНЕНИЕ ЭНТАЛЬПИИ ТН	ПРОЦЕССЫ	
		ЗАРЯД	РАЗРЯД
1.	за счет нагрева (охлаждения) твердого тела	$Q'_c = M_\Sigma \cdot c_s \cdot \frac{dT_s(t)}{dt}$	$Q'_d = -M_\Sigma \cdot c_s \cdot \frac{dT_s(t)}{dt}$
2.	за счет фазового перехода «твердое тело-жидкость»	$Q'_c = L \cdot \frac{dM_l(t)}{dt}$	$Q'_d = -L \cdot \frac{dM_s(t)}{dt}$
3.	за счет нагрева (охлаждения) жидкости	$Q'_c = M_\Sigma \cdot c_l \cdot \frac{dT_l(t)}{dt}$	$Q'_d = -M_\Sigma \cdot c_l \cdot \frac{dT_l(t)}{dt}$
4.	за счет фазового перехода «твердое тело-жидкость» и нагрева (охлаждения) твердой фазы (ТН с переохлаждением)	$Q'_c = (c_s \cdot (T_m - T_s(t)) + L) \cdot \frac{dM_l(t)}{dt} + (M_\Sigma - M_l(t)) \cdot c_s \cdot \frac{dT_s(t)}{dt}$	$Q'_d = (c_s \cdot (T_m - T_s(t)) + L) \cdot \frac{dM_s(t)}{dt} - M_s(t) \cdot c_s \cdot \frac{dT_s(t)}{dt}$
5.	за счет фазового перехода «твердое тело-жидкость» и нагрева (охлаждения) жидкой фазы (ТН с перегревом)	$Q'_c = (L + c_l \cdot (T_l(t) - T_m)) \times \frac{dM_l(t)}{dt} + M_l(t) \cdot c_l \cdot \frac{dT_l(t)}{dt}$	$Q'_d = (L + c_l \cdot (T_l(t) - T_m)) \times \frac{dM_s(t)}{dt} - (M_\Sigma - M_s(t)) \cdot c_l \cdot \frac{dT_l(t)}{dt}$

В соответствии с главой 1 моделировались следующие конструктивные схемы ТН:

1) последовательного включения, когда ТН включается в контур энергетической установки за источником энергии;

2) параллельного включения, когда нагревается поверхность емкости с ТАМ (например, сконцентрированным солнечным излучением) и одновременно трубки нагревателя контура;

3) с тепловыми трубами.

ТАМ могут быть однофазными, фазопереходными (плавящимися) и их смесью.

Рассмотрим схему ячейки ТН последовательного включения с однофазным ТАМ при заряде (рис. 1). Вокруг канала с протекающим по нему горячим теплоносителем расположен однофазный ТАМ. При заряде температура теплоносителя на входе в накопитель T_{ci} больше температуры на выходе из него T_{co} . Протекая по каналу и остывая, горячий теплоноситель нагревает ТАМ, температура материала T_n возрастает.

Если для заряда ТН от источника с температурой T_{ci} применяется тепловое излучение, то происходит нагрев однофазного ТАМ в герметичной емкости (рис. 2). Стенка имеет температуру T_{cw} , а ТАМ - T_n .

При осуществлении заряда ТН с помощью тепловых труб ТАМ имеет температуру T_n , температура испарительного участка тепловой трубы T_{ci} , конденсационного - T_{cw} (рис. 3).

При разряде накопителя могут быть использованы также различные схемы, но наиболее распространенными являются конструкции с отводом энергии путем нагрева протекающего по каналам через ТАМ холодного теплоносителя, который с температурой T_{di} поступает в ТН, нагревается до температуры T_{do} и затем направляется в преобразователь (рис. 4).

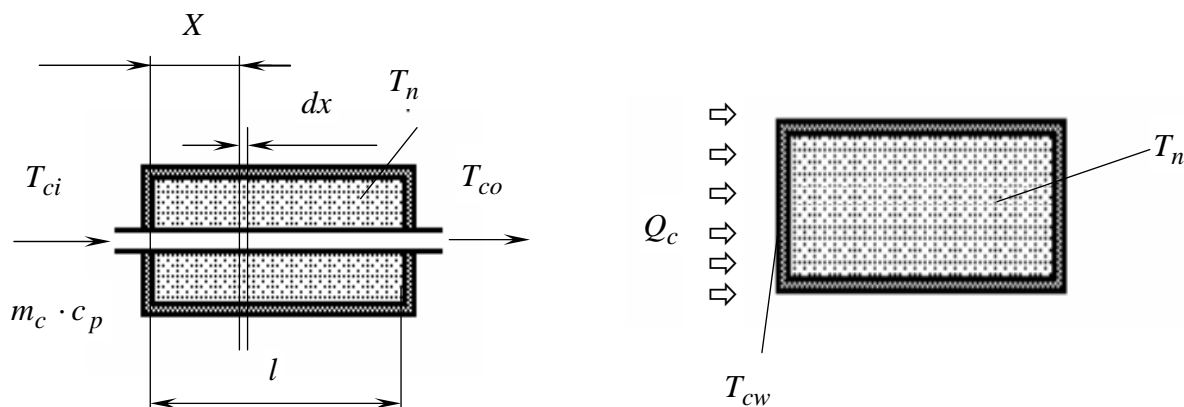


Рис. 2. Схема ТН параллельного включения с однофазным ТАМ (заряд)

Рис. 1. Схема ТН последовательного включения с однофазным ТАМ (заряд)

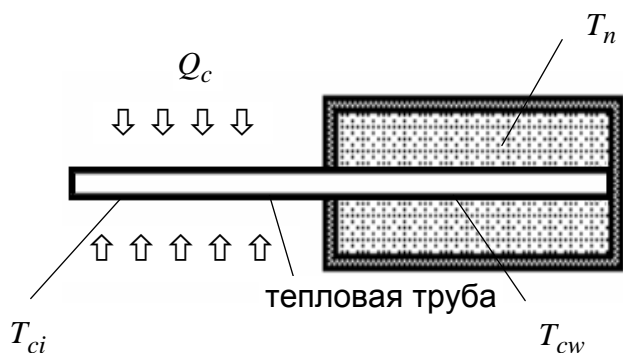


Рис. 3. Схема ТН с однофазным ТАМ и тепловыми трубами (заряд)

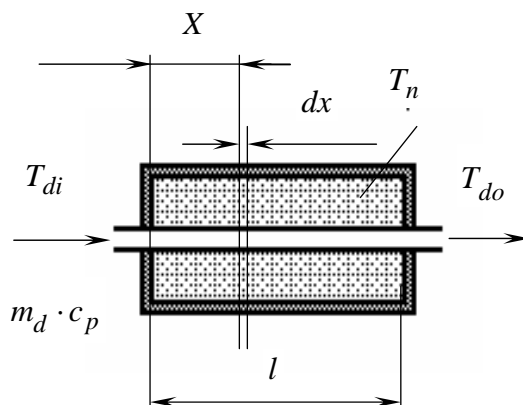


Рис. 4. Схема ТН последовательного включения с однофазным ТАМ (разряд)

На рис. 5 представлена схема ТН последовательного включения с плавящимся ТАМ. Нагретый в источнике энергии теплоноситель поступает в накопитель с температурой T_{ci} , где частично охлаждается, расплавляя ТАМ, и на выходе из ТН он имеет температуру T_{co} . Материал плавится при постоянной температуре T_m , а теплоноситель после накопителя поступает в преобразователь энергии. Начальное положение границы фазового перехода x_1 , конечное - x_2 .

У ТН параллельного включения (рис. 6) часть подводимой энергии расплавляет ТАМ в емкости, другая часть отводится теплоносителем контура к преобразователю энергии.

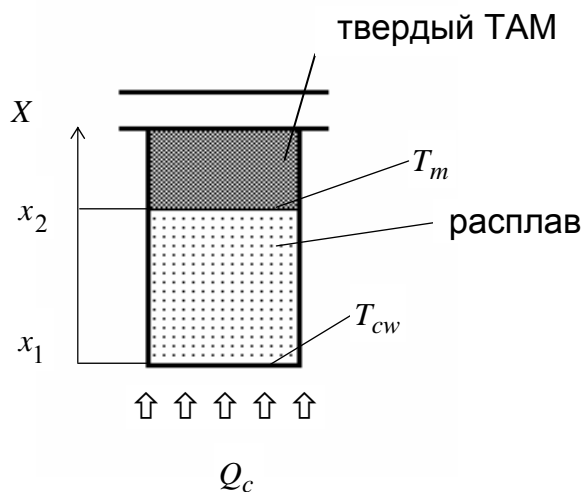
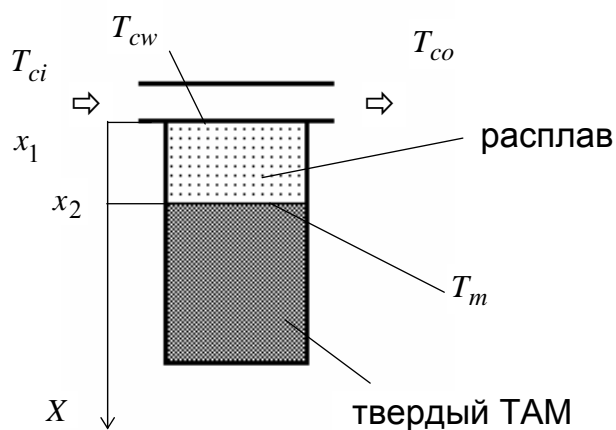


Рис. 5. Схема ТН последовательного включения с плавящимся ТАМ (заряд)

Рис. 6. Схема ТН параллельного включения с плавящимся ТАМ (заряд)

Аналогично рассмотренной выше работает схема с тепловыми трубами (рис. 7). Отличие заключается в том, что при заряде ТН нагревается не поверхность емкости, а испарительный участок тепловой трубы, имеющий температуру T_{ci} . Конденсационный участок имеет температуру T_{cw} и проходит сквозь ТАМ, что обеспечивает его расплавление и, собственно, заряд ТН.

На рис. 8 показана схема ТН последовательного включения (разряд), общая для всех рассматриваемых случаев.

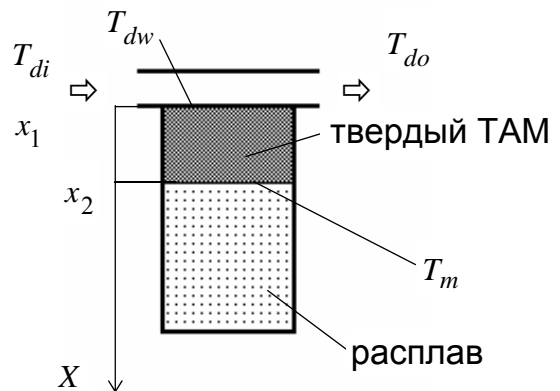
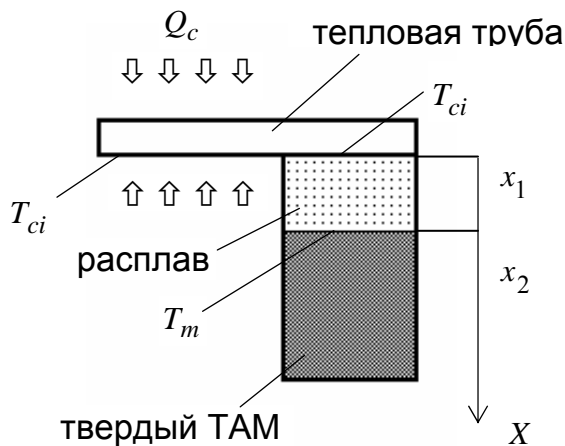


Рис. 7. Схема ТН с плавящимся ТАМ и тепловыми трубами (заряд)

Рис. 8. Схема ТН последовательного включения с плавящимся ТАМ (разряд)

Для ТН с плавящимся ТАМ иногда необходимо учитывать изменение площади поверхности границы фазового перехода. В качестве примеров в диссертации рассмотрены ячейки канонических форм — плоская, цилиндрическая и сферическая.

Далее моделировались тепловые процессы в ТН.

В результате моделирования ТН последовательного включения (рис. 1 и 4) с однофазными ТАМ получены зависимости для температуры ТАМ:

$$T_n(t) = T_o + (T_{ci} - T_o) \cdot (1 - e^{-y_c \cdot \theta_c}), \quad (8)$$

$$T_n(t) = T_{end} - (T_{end} - T_{di}) \cdot (1 - e^{-y_d \cdot \theta_d}), \quad (9)$$

для температуры теплоносителя в канале на выходе из ТН:

$$T_{co}(t) = T_o + (T_{ci} - T_o) \cdot (1 - y_c \cdot e^{-y_c \cdot \theta_c}), \quad (10)$$

$$T_{do}(t) = T_{end} - (T_{end} - T_{di}) \cdot (1 - y_d \cdot e^{-y_d \cdot \theta_d}). \quad (11)$$

При моделировании вводились безразмерные числа теплопередачи:

$$N_c = \frac{K_c \cdot F(x)}{m_c \cdot c_p}, N_d = \frac{K_d \cdot F(x)}{m_d \cdot c_p}, \quad (12)$$

безразмерные времена процессов:

$$\theta_c = \frac{m_c \cdot c_p \cdot \eta_c}{M_\Sigma \cdot c_n} \cdot t_c, \theta_d = \frac{m_d \cdot c_p}{M_\Sigma \cdot c_n \cdot \eta_d} \cdot t_d, \quad (13)$$

соотношения:

$$y_c = 1 - e^{-\frac{N_c}{\eta_c}}, y_d = 1 - e^{-N_d \cdot \eta_d}. \quad (14)$$

Схемы ТН параллельного включения (рис. 2) и с тепловыми трубами (рис. 3) с однофазным ТАМ моделировались аналогично. В результате получена зависимость температуры ТАМ при заряде:

$$T_n(t) = T_{cw} - (T_{cw} - T_o) \cdot e^{-\theta_c}. \quad (15)$$

где:

$$\theta_c = \frac{K_u \cdot F(x) \cdot \eta_c \cdot t_c}{M_\Sigma \cdot c_n}, \quad (16)$$

При моделировании тепловых процессов в ТН последовательного включения (рис. 5 и 8) с плавящимися ТАМ получены зависимости безразмерных скоростей передвижения границы фазового перехода при заряде и разряде:

$$\bar{w}_c = -0,5 \cdot \frac{N_c + 1}{\tau_c \cdot \eta_c} + \left[\left(0,5 \cdot \frac{N_c + 1}{\tau_c \cdot \eta_c} \right)^2 + \frac{1}{R_c \cdot \tau_c} \right]^{0,5}, \quad (17)$$

$$\bar{w}_d = -0,5 \cdot \frac{(N_d + 1) \cdot \eta_d}{\tau_d} + \left[\left(0,5 \cdot \frac{(N_d + 1) \cdot \eta_d}{\tau_d} \right)^2 + \frac{1}{R_d \cdot \tau_d} \right]^{0,5}, \quad (18)$$

если в ТАМ основным процессом теплообмена является теплопроводность, и:

$$\bar{w}_c = \frac{1 - \exp(-N_c)}{N_c \cdot R_c} \cdot \eta_c, \quad (19)$$

$$\bar{w}_d = \frac{1 - \exp(-N_d)}{N_d \cdot R_d \cdot \eta_d}, \quad (20)$$

если основной процесс – конвекция.

Зависимости температур стенки ячейки с ТАМ и теплоносителя в канале на выходе из ТН определяется как:

$$T_{cw} = T_m + (T_{ci} - T_m) \cdot \bar{w}_c \cdot \tau_c \cdot R_c, \quad (21)$$

$$T_{dw} = T_m - (T_m - T_{di}) \cdot \bar{w}_d \cdot \tau_d \cdot R_d, \quad (22)$$

$$T_{co} = T_{ci} - (T_{ci} - T_m) \cdot \frac{N_c \cdot \bar{w}_c}{\eta_c} \cdot R_c, \quad (23)$$

$$T_{do} = T_{di} + (T_m - T_{di}) \cdot N_d \cdot \bar{w}_d \cdot \eta_d \cdot R_d. \quad (24)$$

В уравнениях (17) - (24) использованы безразмерные числа теплопередачи:

$$N_c = \frac{K_c \cdot F(x_1)}{m_c \cdot c_p}, \quad N_d = \frac{K_d \cdot F(x_1)}{m_d \cdot c_p}; \quad (25)$$

безразмерные времена процессов:

$$\tau_c = \frac{t_c \cdot K_c^2 \cdot (T_{ci} - T_m)}{\lambda_l \cdot \rho_l \cdot L}, \quad \tau_d = \frac{t_d \cdot K_d^2 \cdot (T_m - T_{di})}{\lambda_s \cdot \rho_s \cdot L}; \quad (26)$$

коэффициенты формы ячеек с ТАМ:

$$R_c = \frac{\Phi \cdot \tau_c \cdot \frac{d\Phi^{-1}}{d\tau_c} + 1}{\Phi}, \quad R_d = \frac{\Phi \cdot \tau_d \cdot \frac{d\Phi^{-1}}{d\tau_d} + 1}{\Phi}. \quad (27)$$

Для ТН параллельного включения (рис. 6) и ТН с тепловыми трубами (рис. 7) при решении получаем:

$$\bar{w}_c = R_c^{-1} \cdot \eta_c. \quad (28)$$

Коэффициент формы ячеек с ТАМ R_c для этих схем рассчитывается по (31), а температура стенки ячейки T_{cw} - по (21).

Для всех трех рассмотренных вариантов ТН отношение начальной и конечной площадей границы фазового перехода Φ в (27) для плоской, цилиндрической и сферической геометрии при заряде и разряде:

$$\Phi_{flat_c} = 1, \quad \Phi_{cyl_c} = e^{-\frac{\bar{w}_{c,cyl} \cdot \tau_c}{p_c}}, \quad \Phi_{sp_c} = 1 - \frac{\bar{w}_{c,sp} \cdot \tau_c}{p_c}, \quad (29)$$

$$\Phi_{flat_d} = 1, \quad \Phi_{cyl_d} = e^{-\frac{\bar{w}_{d,cyl} \cdot \tau_d}{p_d}}, \quad \Phi_{sp_d} = 1 - \frac{\bar{w}_{d,sp} \cdot \tau_d}{p_d}. \quad (30)$$

В выражениях (29) и (30) обозначены $p_c = \frac{K_c \cdot d_{c1}}{2 \cdot \lambda_l}$ и $p_d = \frac{K_d \cdot d_{d1}}{2 \cdot \lambda_s}$.

При моделировании полагалось, что общий эксергетический КПД ТН ψ_Σ равен произведению эксергетических КПД процессов заряда ψ_c и разряда ψ_d .

Если при заряде после ТН последовательного включения с однофазным ТАМ теплоноситель поступает в преобразователь энергии или другой ТН, то:

$$\psi_c = \frac{(\tau_1 - \tau_2) \cdot (1 - e^{-y_c \cdot \theta_c}) - \ln(1 + \frac{\tau_1 - \tau_2}{1 + \tau_2} \cdot (1 - e^{-y_c \cdot \theta_c}))}{\theta_c \cdot ((\tau_1 - \tau_2) \cdot y_c \cdot e^{-y_c \cdot \theta_c} - \ln(1 - \frac{\tau_1 - \tau_2}{1 + \tau_1} \cdot y_c \cdot e^{-y_c \cdot \theta_c}))}. \quad (31)$$

Если же протекающий в канале теплоноситель за ТН не поступает в какое-либо устройство и происходит его охлаждение до температуры, близкой к температуре окружающей среды T_{ds} , то:

$$\psi_c = \frac{(\tau_1 - \tau_2) \cdot (1 - e^{-y_c \cdot \theta_c}) - \ln(1 + \frac{\tau_1 - \tau_2}{1 + \tau_2} \cdot (1 - e^{-y_c \cdot \theta_c}))}{\theta_c \cdot (\tau_1 - \ln(1 + \tau_1))}. \quad (32)$$

Для частного случая $T_o = T_{ds}$, $\eta_c = 1$ соотношение $1 - \psi_c$, где ψ_c определяется по (32) было получено А. Бежаном. В (31) и (32) обозначены:

$$\tau_1 = \frac{T_{ci} - T_{ds}}{T_{ds}}, \quad \tau_2 = \frac{T_o - T_{ds}}{T_{ds}}. \quad (33)$$

При разряде ТН с однофазным ТАМ от температуры T_{end} до $T_n(t)$:

$$\psi_d = \theta_d \cdot \frac{(\tau_3 - \tau_4) \cdot y_d \cdot e^{-y_d \cdot \theta_d} - \ln(1 + \frac{\tau_3 - \tau_4}{1 + \tau_4} \cdot y_d \cdot e^{-y_d \cdot \theta_d})}{\tau_3 \cdot (1 - e^{-y_d \cdot \theta_d}) - \ln(\frac{1 + \tau_3}{1 + \tau_4 + (\tau_3 - \tau_4) \cdot e^{-y_d \cdot \theta_d}})}, \quad (34)$$

Если на вход ТН подается теплоноситель с температурой окружающей среды:

$$\psi_d = \theta_d \cdot \frac{\tau_3 \cdot y_d \cdot e^{-y_d \cdot \theta_d} - \ln(1 + \tau_3 \cdot y_d \cdot e^{-y_d \cdot \theta_d})}{\tau_3 \cdot (1 - e^{-y_d \cdot \theta_d}) - \ln(\frac{1 + \tau_3}{1 + \tau_3 \cdot e^{-y_d \cdot \theta_d}})}. \quad (35)$$

В (34) и (35) обозначены $\tau_3 = \frac{T_{end} - T_{ds}}{T_{ds}}$, $\tau_4 = \frac{T_{di} - T_{ds}}{T_{ds}}$.

Для двух других схем эксергетический КПД при заряде ψ_c должен включать в себя составляющую, характеризующую совершенство процесса подвода энергии к ТН от источника.

$$\psi_c = \psi_{c1} \cdot \psi_{c2}, \quad (36)$$

где ψ_{c1} - эксергетический КПД процесса подвода энергии, ψ_{c2} - эксергетический КПД непосредственного накопления энергии в ТН. Первый определяется как:

$$\psi_{c1} = \frac{\bar{T}_{ci}}{\bar{T}_{cw}} \cdot \frac{\bar{T}_{cw} - 1}{\bar{T}_{ci} - 1} \cdot \eta_c. \quad (37)$$

В (37) температуры входят в безразмерном виде:

$$\bar{T}_{ci} = \frac{T_{ci}}{T_{ds}}; \bar{T}_{cw} = \frac{T_{cw}}{T_{ds}}.$$

Эксергетический КПД непосредственно накопления энергии:

$$\psi_{c2} = \frac{\tau_5 + 1}{\tau_5 \cdot \eta_c} \cdot \left(1 - \frac{\ln \frac{\tau_5 + 1 - (\tau_5 - \tau_6) \cdot e^{-\theta_c}}{\tau_6 + 1}}{(\tau_5 - \tau_6) \cdot (1 - e^{-\theta_c})} \right). \quad (38)$$

Если же начальная температура ТАМ $T_o = T_{ds}$, то $\tau_6 = 0$ и (38) упростится:

$$\psi_{c2} = \frac{\tau_5 + 1}{\tau_5 \cdot \eta_c} \cdot \left(1 - \frac{\ln(\tau_5 + 1 - \tau_5 \cdot e^{-\theta_c})}{\tau_5 \cdot (1 - e^{-\theta_c})} \right). \quad (39)$$

В (38) и (39) обозначены $\tau_5 = \frac{T_{cw} - T_{ds}}{T_{ds}}$; $\tau_6 = \frac{T_o - T_{ds}}{T_{ds}}$.

Для ТН последовательного включения с плавящимся ТАМ получено:

$$\psi_{c,I} = \frac{\bar{T}_m - 1}{\bar{T}_m} \cdot \eta_c \cdot \frac{\bar{T}_{ci} \cdot A}{\bar{T}_{ci} \cdot A + \eta_c \cdot \ln(1 - A \cdot \eta_c^{-1})}, \quad (40)$$

где $A = (1 - \frac{\bar{T}_m}{\bar{T}_{ci}}) \cdot N_c \cdot \bar{w}_c \cdot R_c$. В случае охлаждения протекающего в канале теплоносителя до температуры, близкой к температуре окружающей среды T_{ds} :

$$\psi_{c,I} = \frac{\bar{T}_m - 1}{\bar{T}_m} \cdot \frac{\bar{T}_{ci} \cdot A}{\bar{T}_{ci} - 1 - \ln \bar{T}_{ci}}. \quad (41)$$

Эксергетические КПД ТН параллельного включения и с тепловыми трубами для плавящихся ТАМ определяются как:

$$\psi_{c,II} = \frac{\bar{T}_{ci}}{\bar{T}_m} \cdot \frac{\bar{T}_m - 1}{\bar{T}_{ci} - 1} \cdot \eta_c, \quad (42)$$

и

$$\psi_{c,III} = \frac{\bar{T}_{ci} \cdot \bar{T}_{m-1}}{\bar{T}_m \cdot \bar{T}_{ci-1}} \cdot \eta_{HP} \cdot \eta_c, \quad (43)$$

где η_{HP} - энергетический КПД тепловой трубы.

В (40) - (43) температуры представлены в безразмерном виде:

$$\bar{T}_m = \frac{T_m}{T_{ds}}, \quad \bar{T}_{ci} = \frac{T_{ci}}{T_{ds}}.$$

Эксергетический КПД процесса разряда рассчитывается по формуле:

$$\psi_d = \frac{\bar{T}_m}{\bar{T}_{m-1}} \cdot R_d \cdot \left[\eta_d - \frac{\ln(1 + A \cdot \eta_d)}{\bar{T}_{di} \cdot A} \right], \quad (44)$$

$$\text{где } A = \frac{\bar{T}_m}{\bar{T}_{di}} - 1 \cdot N_d \cdot \bar{w}_d \cdot R_d.$$

Если теплоноситель в канале предварительно не подогреет до T_{di} , то на входе в ТН он имеет температуру окружающей среды T_{ds} , и:

$$\psi_d = \frac{\bar{T}_m}{\bar{T}_{m-1}} \cdot R_d \cdot \left[\eta_d - \frac{\ln(1 + (\bar{T}_m - 1) \cdot N_d \cdot \bar{w}_d \cdot R_d \cdot \eta_d)}{(\bar{T}_m - 1) \cdot N_d \cdot \bar{w}_d \cdot R_d} \right]. \quad (45)$$

Как и при заряде, в формулах (44) и (45) температуры представлены в безразмерном виде:

$$\bar{T}_m = \frac{T_m}{T_{ds}}, \quad \bar{T}_{di} = \frac{T_{di}}{T_{ds}}.$$

На практике нередко возникает необходимость расчета ТН с несколькими однофазными, плавящимися или и однофазными и плавящимися ТАМ. В этом случае вышеприведенные формулы также справедливы, но следует учесть, что суммарная теплоемкость материала, состоящего из n -твердых и k -жидких ТАМ, определится по формуле:

$$c_{\Sigma} = g_{\Sigma s} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} c_{s_i} \cdot g_{s_i} + g_{\Sigma l} \cdot \sum_{i=1}^{i=k} c_{l_i} \cdot g_{l_i}. \quad (46)$$

А суммарная теплоемкость материала из n -фазопереходных ТАМ, при k -расплавленных, будет:

$$c_{\Sigma m} = g_{\Sigma m, s} \cdot \sum_{i=1}^{i=n-k} c_{m, s_i} \cdot g_{m, s_i} + g_{\Sigma m, l} \cdot \sum_{i=1}^{i=k} c_{m, l_i} \cdot g_{m, l_i} \quad (47)$$

В (46) и (47) g - массовые доли ТАМ.

После построения моделей тепловых процессов в ТН производилась проверка – оценивалась их адекватность и достоверность.

Сначала были использованы экспериментальные данные и данные численного расчета тепловых накопителей М. Фариды (М. Farid), Ю. Кима (Y. Kim) и А. Канзавы (А. Kansawa) (Экспериментальная установка №1); М. Камимото (М. Kamimoto), Ю. Абе (Y. Abe), С. Саваты (S. Savata), Т. Тани (T. Tani), Т. Озавы (T. Ozava) (Экспериментальная установка №2) и Т. Б. Ворониной, В. И. Гудкова, О. Б. Шимановского (Экспериментальная установка №3). Проведенные по разработанным моделям расчеты показали, что максимальная относительная ошибка данных расчета и экспериментальных данных не превышала 9,4 % при заряде и 16,2 % при разряде; по отношению к данным численного расчета соответственно 7,3 % и 10 %.

Так как в литературе отсутствуют экспериментальные данные по определению эксергетического КПД ТН, то было произведено сравнение предлагаемых моделей (К–модель учитывает только теплопроводность, Кс– учитывает конвекцию) с математическими моделями других авторов:

- 1) LBM и LBMс – модели, предложенные Де Лусией (M. De Lucia) и Бежаном (A. Bejan). Первая позволяет рассчитать процесс заряда ТН с плавящимся ТАМ при передаче теплоты теплопроводностью, вторая – при передаче теплоты конвекцией;
- 2) ASNR – модель, предложенная Акевес-Саборио (S. Aceves-Saborio), Накамура (H. Nakamura) и Рейстадом (G. M. Reistad). Модель позволяет производить расчет параметров ТН с плавящимся ТАМ при заряде и разряде. Теплота передается конвекцией.

Исследование показало, что при определении зависимостей безразмерной температуры стенки ячейки ТН (стенки канала с теплоносителем) Θ_{cw} от изменения безразмерных числа теплопередачи N и времени τ по К и LBM-моделям максимальная относительная ошибка δ составила 10 %.

Анализ зависимостей безразмерной температуры теплоносителя на выходе из ТН Θ_{co} от изменения безразмерного числа теплопередачи N и времени τ показывает, что максимальная относительная ошибка δ составила 4,8 %. Относительная погрешность результатов расчетов по рассматриваемым моделям при определении зависимостей эксергетического КПД ψ_c от изменения безразмерного числа теплопередачи N с увеличением времени τ увеличивалась и достигала 24 % для $\tau = 10$ и $N \rightarrow 0$, снижаясь с ростом безразмерного числа теплопередачи.

При расчетах характеристик ТН с конвекцией в качестве определяющего процесса теплопереноса использовались три модели (LBMс, ASNR и Кс-модели) при заряде и две модели (ASNR и Кс-модели) при разряде.

Рассмотрение зависимостей безразмерной температуры теплоносителя на выходе из ТН Θ_{co} , эксергетического КПД ψ_c , безразмерной температуры теплоносителя на выходе из ТН Θ_{do} , эксергетического КПД устройства ψ_d от изменения безразмерного числа теплопередачи N показывает, что Кс и ASNR-модели дают полное совпадение результатов. Результаты расчетов по модели LBMс существенно отличаются от всех других моделей и ее применимость при проектировании ТН сомнительна.

Проведенные расчеты показали, что предлагаемые модели достоверны, адекватны и применимы для обоснования проектных решений.

В **главе 3** оценивалось влияние на эффективность ТН температур, длительности процессов заряда и разряда, чисел теплопередачи и энергетических КПД. Рассмотрен вопрос совершенствования ТН на ранних стадиях проектирования. В качестве примера представлены методики расчета ТН последовательного включения с несколькими однофазными ТАМ и с плавящимся ТАМ.

Для ТН последовательного включения с однофазным ТАМ исследовано влияние на зависимость:

- эксергетического КПД ψ_c от безразмерного числа теплопередачи N_c , безразмерного времени θ_c и энергетического КПД η_c при $\tau_2 = 0,024$ (31, 32). Значение безразмерного времени изменялось от 0,01 до 6; соотношение τ_1 - от 0,05 до 0,9. Энергетический коэффициент полезного действия менялся от 0,1 до 1;

- эксергетического КПД ψ_c от безразмерного времени θ_c , безразмерного числа теплопередачи N_c и энергетического коэффициента полезного действия η_c при $\tau_2 = 0,024$ (31, 32). Как и в предыдущем случае, соотношение τ_1 менялось от 0,05 до 0,9; энергетический коэффициент полезного действия изменялся от 0,1 до 1. Безразмерный коэффициент теплопередачи принимал значения от 0,01 до 6.

При разряде, в случае подачи на вход ТН теплоносителя с начальной температурой T_{di} , эксергетический коэффициент полезного действия ψ_d будет определяться формулой (34). Если же на вход ТН подается теплоноситель с начальной температурой, равной температуре окружающей среды T_{ds} , то применяется формула (35).

Исследовано влияние на зависимость:

- эксергетического КПД ψ_d от безразмерного числа теплопередачи N_d , принимавшего значения от 0 до 6, и энергетического КПД η_d при $\tau_3 = 0,706$ и изменении τ_4 от 0,02 до 0,4 (34). Безразмерное время разряда θ_d изменялось от 0,5 до 6.

- эксергетического КПД ψ_d (34) от безразмерного времени θ_d безразмерного числа теплопередачи N_d и энергетического коэффициента полезного действия η_d при $\tau_3 = 0,706$ и изменении τ_4 от 0,02 до 0,4. N_d принимал значения 1; 2,5; 4 и 6.

- эксергетического КПД ψ_d от безразмерного числа теплопередачи N_d , безразмерного времени θ_d и энергетического КПД η_d при $\tau_3 = 0,706$ (35). При этом θ_d принимало значения 0,5; 1; 3 и 6.

- эксергетического КПД ψ_d от безразмерного времени θ_d безразмерного числа теплопередачи N_d , принимавшего значения 1; 2,5; 4 и 6, и энергетического коэффициента полезного действия η_d при $\tau_3 = 0,706$ (35).

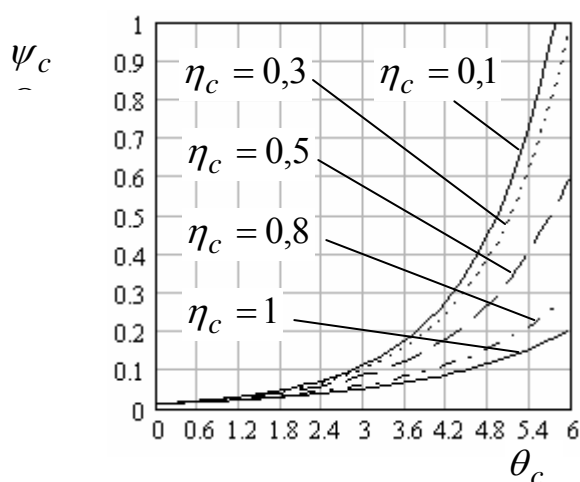


Рис. 9. Влияние на зависимость эксергетического КПД ψ_c от безразмерного времени θ_c энергетического КПД η_c при $\tau_1 = 0,05$, $\tau_2 = 0,024$, $N_c = 1$ (31)

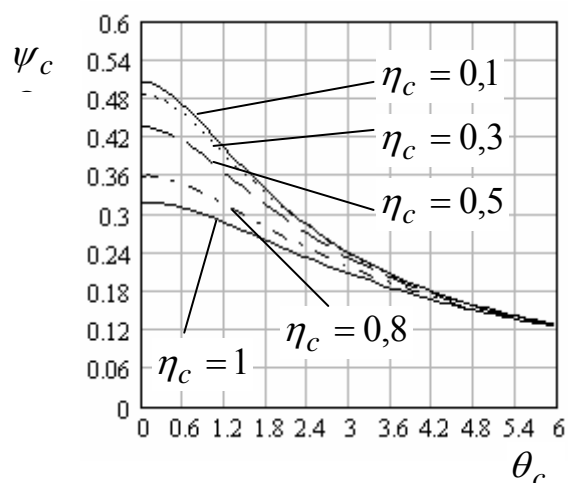


Рис. 10. Влияние на зависимость эксергетического КПД ψ_c от безразмерного времени θ_c энергетического КПД η_c при $\tau_1 = 0,05$ и $\tau_2 = 0,024$, $N_c = 1$ (32)

Для рассматриваемых схем ТН параллельного включения и ТН с тепловыми трубами с однофазным ТАМ оценивалось влияние на зависимости:

- эксергетического КПД ψ_{c2} от безразмерного времени θ_c энергетического КПД η_c при $\tau_6 = 0,024$ (38) для τ_5 равных 0,05; 0,1; 0,5; 0,7 и 0,9.

- эксергетического КПД ψ_{c2} от безразмерного времени θ_c энергетического КПД η_c при тех же значениях τ_5 (39).

Рассматривая процесс заряда ТН с плавящимся ТАМ, оценивалось влияние на зависимость:

- эксергетического КПД $\psi_{c,I}$ от безразмерного числа теплопередачи N_c при $T_{ds} = 273$ К и $T_m = 1100$ К (40, 41) понижения температуры теплоносителя T_{ci} в ка-

нале на входе в ТН и изменения энергетического КПД η_c (значения T_{ci} были равны 3000 К, 2500 К, 2000 К и 1500 К);

- эксергетического КПД $\psi_{c,II}$ ($\psi_{c,III}$) от температуры горячего источника (испарительного участка тепловой трубы) T_{ci} энергетического КПД η_c при $T_{ds} = 273$ К и $T_m = 1100$ К (42, 43);

- эксергетического КПД $\psi_{c,II}$ ($\psi_{c,III}$) от температуры плавления ТАМ T_m энергетического КПД η_c при $T_{ds} = 273$ К и $T_{ci} = 2000$ К (42, 43).

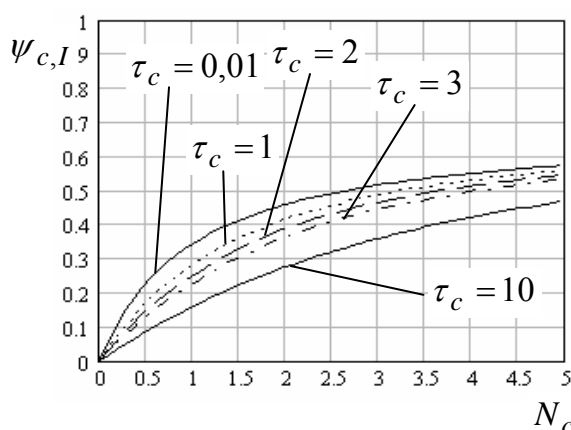


Рис. 11. Влияние на зависимость эксергетического КПД ψ_c от безразмерного числа теплопередачи N_c безразмерного времени τ_c при $\eta_c = 1$, $T_{ds} = 273$ К, $T_m = 1100$ К, $T_{ci} = 3000$ К (41)

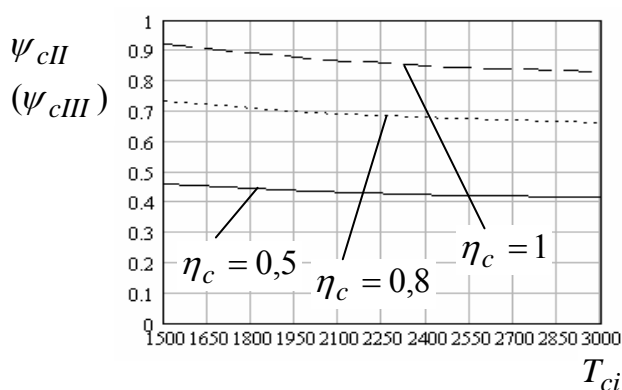


Рис. 12. Влияние на зависимость эксергетического КПД ψ_{cII} (ψ_{cIII}) от температуры горячего источника (испарительного участка тепловой трубы) T_{ci} энергетического коэффициента полезного действия η_c при $T_{ds} = 273$ К и $T_m = 1100$ К (42, 43)

При разряде оценивалось влияние на зависимости:

- эксергетического КПД ψ_d от безразмерного числа теплопередачи N_d энергетического КПД η_d и температуры теплоносителя на входе в канал T_{di} при $T_{ds} = 273$ К и $T_m = 1100$ К (45). T_{di} принимала значения 1000 К; 800 К; 600 К и 400 К;

- эксергетического КПД ψ_d от безразмерного числа теплопередачи N_d безразмерного времени τ_d и температуры теплоносителя на входе в канал T_{di} при $\eta_d = 0,5; 0,8; 1$, $T_{ds} = 273$ К и $T_m = 1100$ К (45).

Моделирование ТН с однофазными и плавящимися ТАМ последовательного, параллельного включения и с тепловыми трубами, а также оценка влияния различных параметров на характеристики устройств позволяет говорить о возможности совершенствования ТН на ранних стадиях проектирования, применяя в качестве критерия эффективности максимум коэффициента использования массы μ_{ex} (5).

Под совершенствованием ТН понимается задача максимизации величины μ_{ex} :

$$\mu_{ex} = f_0(\bar{x}) \rightarrow \max, f_i(\bar{x}) \leq 1, i = 1, \dots, N. \quad (48)$$

Величины P_d , t_d и Σ_{ci} являются заданными из тех начальных условий, для которых проектируется новое устройство. Изменяться могут лишь энергетический и эксергетический КПД, так как их значения зависят от конструкции ТН, теплофизических свойств применяемых материалов. Учитывая, что эксергетический КПД, в свою очередь, зависит от энергетического и равен произведению эксергетических КПД процессов заряда и разряда, целесообразно на ранних стадиях проектирования решать последовательно частные задачи максимизации эксергетических КПД отдельных процессов:

$$\psi_c = f_0(\bar{x}) \rightarrow \max; \psi_d = f_0(\bar{x}) \rightarrow \max, \quad (49)$$

где $f_i(\bar{x}) \leq 1, i = 1, \dots, N$.

Для каждого типа ТН вид функций $f(\bar{x})$ будет своим. Так, у ТН с однофазными ТАМ:

$$\psi_c = f(\tau_1, \tau_2, y_c, \theta_c), \psi_d = f(\tau_3, \tau_4, y_d, \theta_d), \quad (50)$$

для ТН последовательного включения. Схемы ТН параллельного включения и ТН с тепловыми трубами:

$$\psi_{c2} = f(\tau_5, \tau_6, \theta_c, \eta_c), \psi_d = f(\tau_3, \tau_4, y_d, \theta_d). \quad (51)$$

У ТН с плавящимися ТАМ функции будут иметь вид:

$$\psi_{c,I} = f(\bar{T}_m, \bar{T}_{ci}, N_c, \bar{w}_c, R_c, \eta_c), \psi_d = f(\bar{T}_m, N_d, \bar{w}_d, R_d, \eta_d), \quad (52)$$

для ТН последовательного включения. Схема параллельного включения:

$$\psi_{c,II} = f(\bar{T}_m, \bar{T}_{ci}, \eta_c), \psi_d = f(\bar{T}_m, N_d, \bar{w}_d, R_d, \eta_d), \quad (53)$$

и ТН с тепловыми трубами:

$$\psi_{c,III} = f(\bar{T}_m, \bar{T}_{ci}, \eta_{HP}, \eta_c), \psi_d = f(\bar{T}_m, N_d, \bar{w}_d, R_d, \eta_d). \quad (54)$$

В общем случае такая задача решается численными методами с использованием компьютерных пакетов прикладных программ. Отметим, однако, что иногда есть возможность получить аналитические зависимости для расчета максимального значения эксергетического КПД.

В качестве примера рассмотрим процесс заряда ТН последовательного включения с плавящимся ТАМ. Оптимальная температура плавления равна среднему геометрическому температур окружающей среды и теплоносителя в канале энергоустановки на входе в ТН:

$$T_m = \sqrt{T_{ci} \cdot T_{ds}} . \quad (55)$$

Оптимальное значение температуры плавления с точки зрения получения максимального эксергетического КПД обуславливается балансом между необратимостью процесса теплопередачи при плавлении из-за разности температур T_{ci} и T_m , а также необратимостью процесса теплопередачи при остывании уходящего из ТН теплоносителя до температуры, близкой к температуре окружающей среды, т. е. разностью T_{co} и T_{ds} .

Выражение (55) совпадает с полученным Де Лусией (M. De Lucia) и Бежаном (A. Bejan) для случая чистой теплопроводности и Акевес-Саборио (S. Aceves-Saborio), Накамурой (H. Nakamura) и Рейстадом (G. M. Reistad) для конвекции.

С учетом (55), запишем выражение для оптимального эксергетического КПД при заряде:

$$\psi_{c,I_opt} = \frac{(\sqrt{\bar{T}_{ci}} - 1)^2 \cdot N_c \cdot \bar{w}_c \cdot R_c}{\bar{T}_{ci} - 1 - \ln \bar{T}_{ci}} . \quad (56)$$

На основе разработанных в главе 2 моделей тепловых процессов возможно построение различных методик расчета ТН. В диссертации приводятся примеры методик расчета ТН последовательного включения с несколькими однофазными ТАМ (рис. 13) и с плавящимся ТАМ (рис. 14).

Цель расчета – получить информацию для обоснования принимаемых решений при проектировании ТН, в частности: определить величину коэффициента использования массы ТАМ.

При расчете оценивают – укладываются ли полученные значения температур в заданные диапазоны. Если да, то расчет продолжают. Если нет, то необходима корректировка значений, выбираемых проектантом.

По полученным значениям μ_{ex} оценивают степень соответствия ТН выполнению задачи. Если коэффициент использования массы мал, то корректируют значения, выбираемые проектантом, и проводят расчет заново.

В **главе 4** диссертации показаны примеры реализации предлагаемых технических решений. Рассмотрены задачи проектирования ТН для солнечной ЭУ с динамическим преобразователем энергии, ТН подводного аппарата и стационарной ЭУ.

Примеры результатов расчетов приведены на рис. 15 - 17.

По расчетам ТН для солнечной ЭУ можно сделать следующие выводы:

- 1) Из трех рассматриваемых схем наилучшие результаты будут получены при использовании ТН последовательного включения;
- 2) ТН более эффективен при применении в качестве ТАМ 100 % LiF;
- 3) Для увеличения эксергетического КПД и коэффициента использования массы следует стараться выбирать температуру теплоносителя в канале энергоустановки на входе в ТН как можно ближе к температуре плавления ТАМ как при заряде, так и при разряде для всех трех схем.

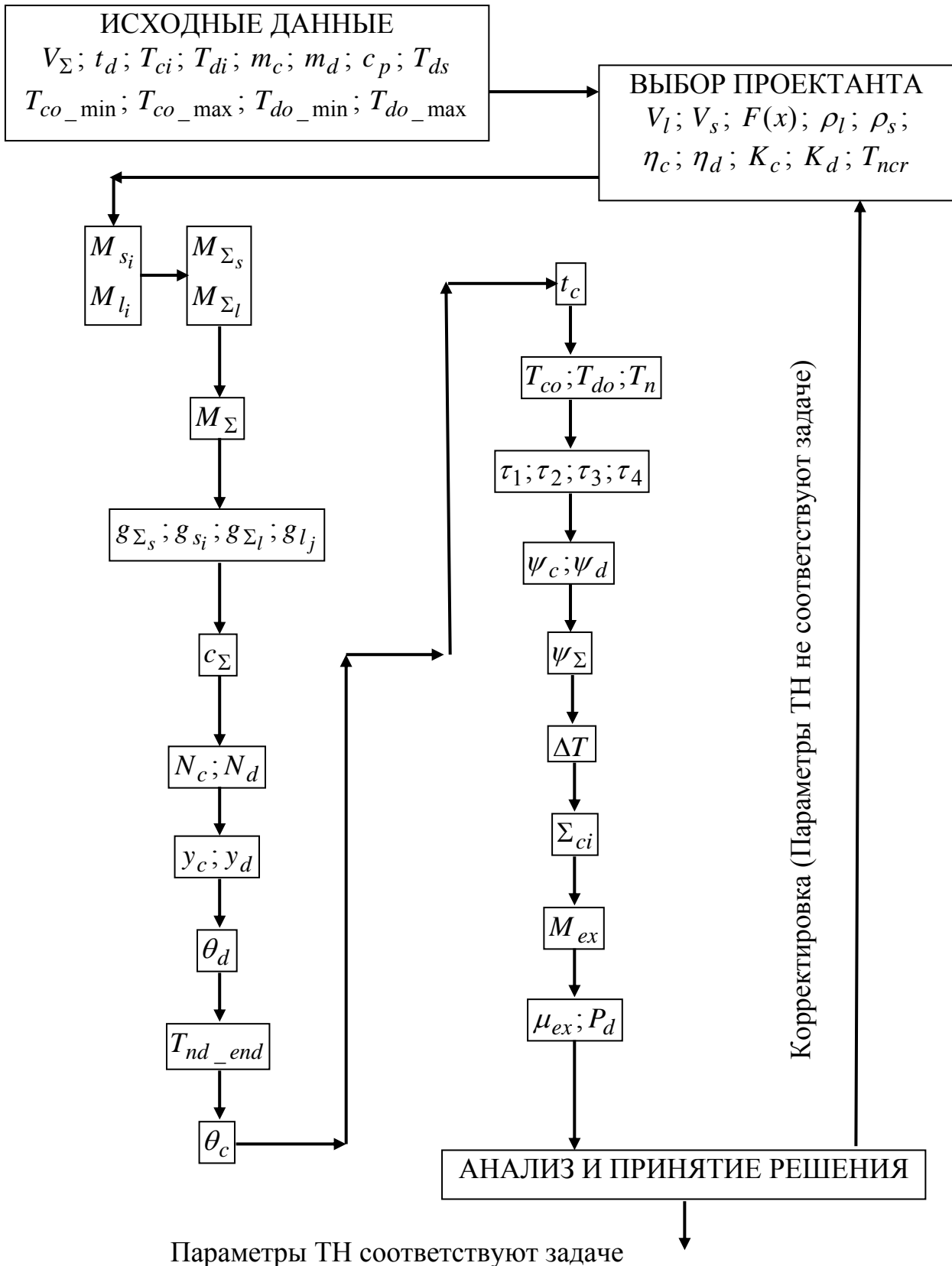


Рис. 13. Схема методики расчета ТН последовательного включения с несколькими однофазными ТАМ

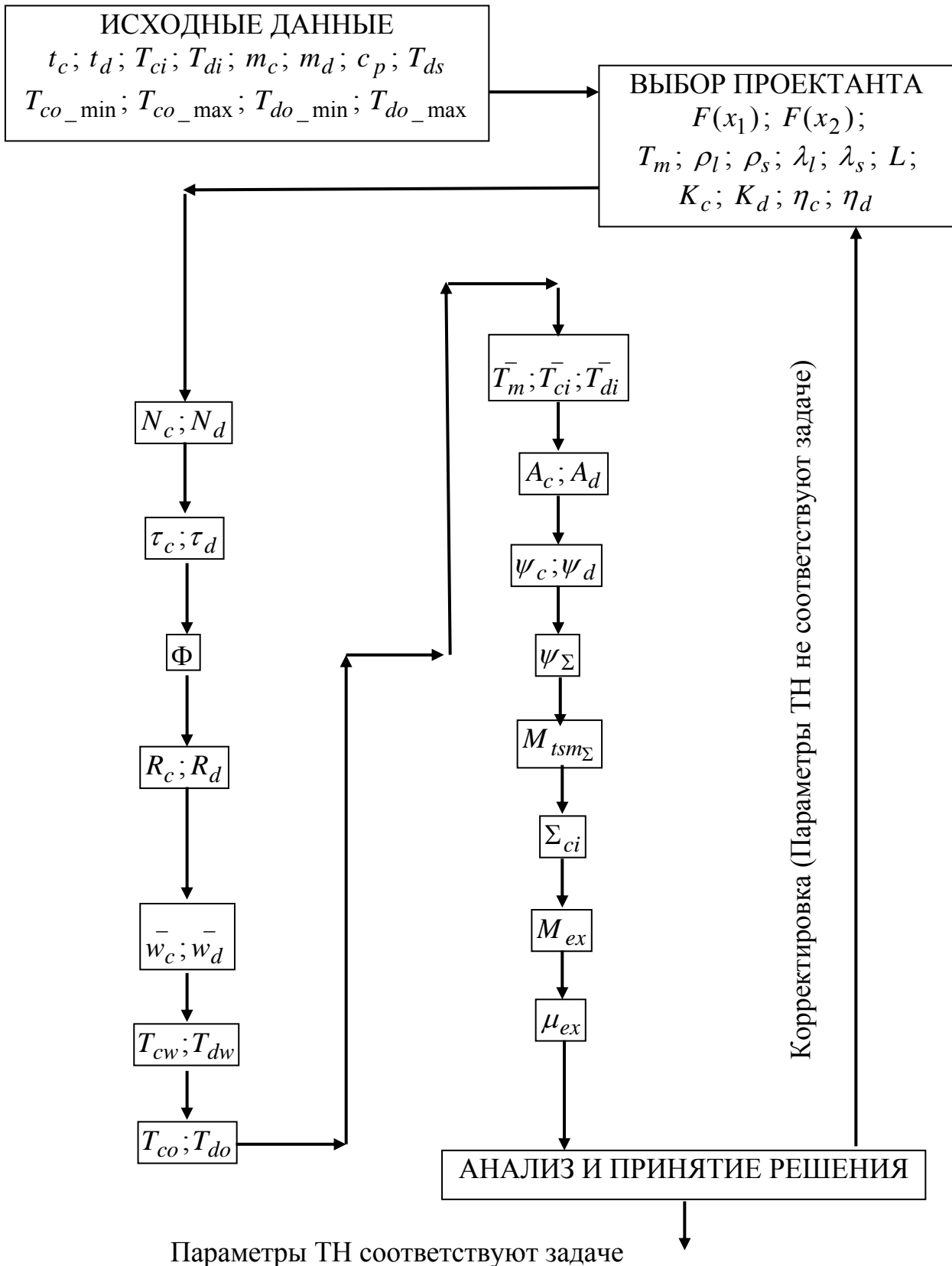


Рис. 14. Схема методики расчета ТН последовательного включения с плавящимся ТАМ

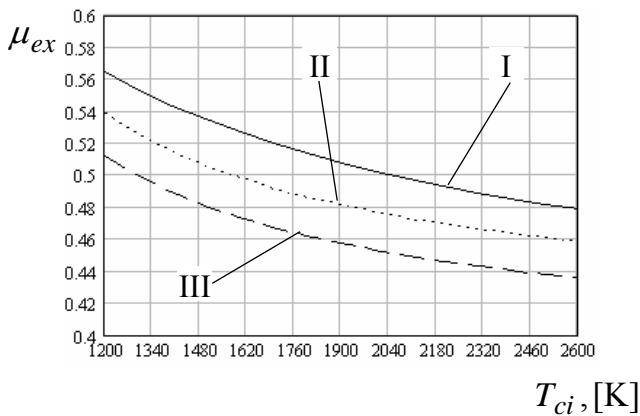


Рис. 15. Зависимость коэффициента использования массы μ_{ex} от изменения температуры T_{ci} для ТН параллельного включения (I), последовательного включения (II), с тепловыми трубами (III) (ТАМ - 100 % LiF: $T_{di} = 800$ К) солнечной ЭУ

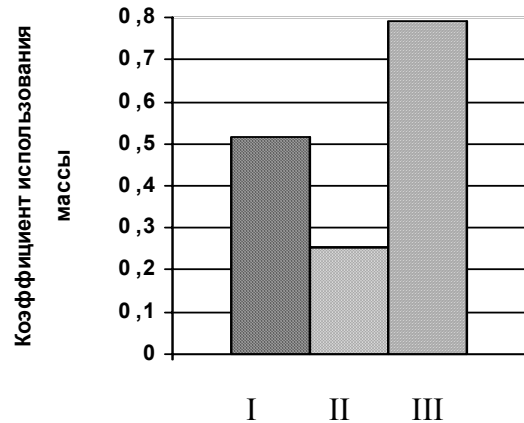


Рис. 16. Диаграмма коэффициента использования массы:

- I – Матрица заполнена на 80 % LiH;
- II – Матрица заполнена на 90 % графитом;
- III – Матрица заполнена на 50 % графитом и на 30 % LiF

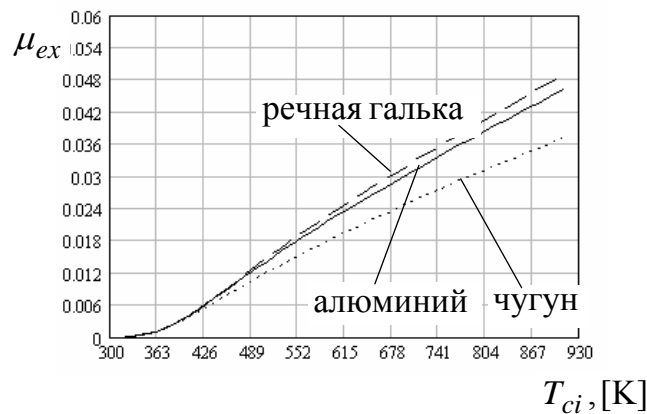


Рис. 17. Зависимость коэффициентов использования массы μ_{ex} ТАМ от изменения температуры T_{ci} теплоносителя на входе в ТН стационарной ЭУ при заряде

Расчет ТН подводного аппарата показывает, что:

- 1) Из трех рассматриваемых матриц для подводного аппарата наилучшие результаты будут получены при совместном использовании однофазного и плавящегося ТАМ (Третья матрица);
- 2) Применение в качестве ТАМ 100 % LiF обеспечивает стабильность температуры теплоносителя на выходе из ТН, что благоприятно с точки зрения преобразователя энергии;
- 3) Применение только однофазного ТАМ неблагоприятно как с точки зрения малого коэффициента использования массы, так и с точки зрения сложности обеспечения постоянства температуры теплоносителя контура энергоустановки на входе в преобразователь энергии.

Для ТН стационарной ЭУ при работе на газовом теплоносителе контура наилучший результат (речная галька) всего лишь 0,048. Поэтому применение ТН в составе энергетической установки для получения полезной работы независимо от используемых ТАМ для данных условий функционирования неэффективно. Теплота, получаемая от ТН, может быть использована в цикле энергоустановки без получения полезной работы. Улучшить характеристики ТН можно путем изменения расхода теплоносителя контура либо заменой газового теплоносителя жидкостью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Разработан, обоснован и апробирован подход к оценке эффективности ТН для обоснования проектных решений, основанный на совместном использовании энергетических и эксергетических показателей;
2. В качестве критерия эффективности проектируемых ТН предложено применять максимум коэффициента использования массы ТАМ;
3. Разработана обобщенная аналитическая модель тепловых процессов в ТН с однофазными и плавящимися ТАМ, позволяющая с единых позиций проводить сравнение различных конструктивных схем устройств для выбора наиболее перспективных в конкретных условиях применения;
4. На основе уравнений теплового баланса созданы модели тепловых процессов в ТН последовательного включения, параллельного включения и с тепловыми трубами при заряде и разряде. Полученные зависимости позволяют рассчитать эксергетические КПД, температуры ТАМ, стенок канала и теплоносителя на выходе из ТН;
5. Проверка адекватности и достоверности моделей осуществлена путем сравнения с данными экспериментальных исследований, аналитических и численных расчетов других авторов. Относительная ошибка расчетов по предлагаемым моделям находится в допустимых пределах, что позволяет рекомендовать разработанные на базе упомянутых моделей инженерные методики расчета для применения в широком масштабе;

6. Разработанные инженерные методики расчета ТН последовательного включения при использовании одного или нескольких ТАМ позволяют более эффективно использовать теплотехническое оборудование в режиме переменных нагрузок, повышая его маневренность;

7. В ТН с плавящимся ТАМ установлена качественная и количественная взаимосвязь протекания процессов теплообмена со скоростью передвижения границы фазового перехода;

8. Предложен метод расчета ТН, основанный на применении коэффициента формы ячеек с фазопереходным ТАМ, существенно упрощающий проектирование новых систем. Он позволяет проектировать ТН с размещением ТАМ в ячейках любой конструктивной формы;

9. Повышение эффективности схем ТН параллельного включения и с тепловыми трубами достигается в случае, если ТАМ выбирается с температурой плавления практически равной температуре источника энергии;

10. Для схемы ТН последовательного включения максимальная эффективность достигается в случае, если температура плавления ТАМ равна среднему геометрическому температур окружающей среды и теплоносителя в канале энергоустановки на входе в ТН при заряде;

11. Проведенные исследования и созданные методики расчета доказывают возможность и необходимость сооружения ТН различного типа для ТЭС и АЭС различной мощности;

12. В связи с развитием планов перевода атомных и промышленных котельных в режим мини-ТЭЦ, все большее значение приобретает сооружение ТН с однофазными и плавящимися ТАМ относительно малого объема для эффективных и надежных систем теплоснабжения (отопления и горячего водоснабжения).

ПУБЛИКАЦИИ

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Куколев М.И. Принцип поверочного расчета теплового аккумулятора солнечной энергетической установки // Энергосиловые установки для космической техники (исследования, проектирование, применение): Тем. сб. науч. тр. – М.: МАИ, 1991. – С. 6 – 9.

2. Kurkin I., Sevruk D., Sidorov D., Kukolev M., Gorchakov V. Modeling of the Development and Infrastructure of Solar Power Stations / Proc. of Second International Symposium 'SPS-91. Power from Space'. – Paris, 1991. – P. 260 – 262.

3. Kurkin I., Kukolev M. Computer-assisted Expert Analysis of Combined Space Power/Propulsion System // Abstract of Papers, 18th ISTS, Kagoshima, 1992. – P. 7.

4. Kurkin I., Sevruk D., Sidorov D., Kukolev M., Kotelnikov A. Development of the Infrastructure and Simulation of the Energy Series assemblies for Solar Space Electric Power

Stations // Solar Power Satellites: the Emerging Energy Option. – N.Y.: Ellis Harwood, 1993. – P. 152 – 161.

5. Kurkin I., Kukolev M. The Possible Domains of Application of Combined Solar-Nuclear Space Power and Propulsion Systems // European Space Power Conference ESPC-93: Book of Abstracts, Graz, Austria, 1993. – p. 500 – 506.

6. Куколев М.И., Нестерова И.Л. Возможность применения аккумуляторов тепловой энергии в лесохозяйственной технике // Проблемы механизации лесной промышленности и лесного хозяйства Карелии: Тез. докл. республик. науч.-практ. конф. / КарНИИЛП. – Петрозаводск, 1995. – С.46 – 47.

7. Kurkin I., Sidorov D., Kukolev M. Development of Aerospace and Space Interception Concepts for Payload and Rocket Stages at System of Conceptual Projecting // Book of abstracts of 46-th International Astronautical Congress. – Oslo, 1995. – P. 116.

8. Куколев Ю.К., Куколев М.И. Тепловая подготовка лесовозных машин с помощью аккумуляторов тепла // Проблемы развития лесного комплекса Карелии: Тез. докл. республик. науч.-практ. конф. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1996. – С.24 – 25.

9. Куколев М.И. Оценка эффективности использования массы теплового аккумулятора // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. Вып. 1. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1996. – С. 40 – 42.

10. Куколев М.И. Математические модели для контроля процессов преобразования энергии // Новые информационные технологии в целлюлозно-бумажной промышленности: Материалы 2-ой междун. науч.-техн. конф. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1996. – С.56 – 57.

11. Куколев М.И., Куколев Ю.К. Проектирование тепловых аккумуляторов для лесозаготовительной техники // Теория, проектирование и методы расчета лесных и деревообрабатывающих машин: Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. – М.: Изд-во МГУЛ, 1997. – С.47 – 49.

12. Куколев М.И., Куколев Ю.К., Луценко Л.А. Расчет термодинамической эффективности проектируемой ячейки теплового аккумулятора с помощью безразмерной скорости передвижения границы фазового перехода // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – Т.3. – С. 206 – 209.

13. Куколев М.И., Куколев Ю.К. Методика расчета аккумулирующих систем // Региональные проблемы развития лесного комплекса: Тез. докл. republ. науч.-практ. конф. / КарНИИЛП. – Петрозаводск, 1998. – С.27 – 28.

14. Kukolev M.I. Using Nondimensional Melting Boundary Velocity for the Design of Thermal Energy Storage // Forest Sector Development: Extended Abstracts of International Conference. – Petrozavodsk, 1998. – P. 18 – 20.

15. Kukolev M.I., Kukelev Yu.K., Lutsenko L.A. Analytical Equations for the Design of Heat Storage Systems // Proc. of CSME Forum'98. – Toronto, 1998. – V.1. – P. 584 – 588.

16. Куколев М.И. Влияние процессов переноса тепла на эффективность энергосберегающего оборудования // Ресурсосберегающие технологии лесного комплекса: Тез. докл. республ. науч.-практич. конф. – Петрозаводск: КарНИИЛП, 1998. – С. 11-12.

17. Куколев М.И., Кукелев Ю.К., Луценко Л.А. Аналитические формулы для проектирования теплоаккумулирующих систем // Труды Лесоинженерного факультета ПетрГУ. Вып. 2. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. – С. 62 – 67.

18. Куколев М.И., Кукелев Ю.К., Елкин А.П. Проектирование теплового накопителя для тракторов АО «ОТЗ» // Актуальные проблемы лесного комплекса: Тез. докл. республ. науч.-практич. конф. / КарНИИЛП. – Петрозаводск, 1999. – С.15 – 16.

19. Куколев М.И. Определение эффективности теплового накопителя лесной машины // Вестник Центрально-Черноземного регионального отделения наук о лесе Академии естественных наук Воронежской государственной лесотехнической академии. Вып. 2. – Воронеж, 1999. – С. 127 – 130.

20. Питухин Е.А., Куколев М.И., Янюк Ю.В., Демьяненко Г.И. Синтез системы оптимального управления солнечной космической энергоустановкой // Труды петрозаводского государственного университета: Сер. Прикладная математика и информатика, Вып. 8. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. – С. 67 – 78.

21. Куколев М.И. Моделирование теплового накопителя энергии // Научно-методическое обеспечение лесного комплекса Карелии: Тез. докл. науч.-практич. конф. Лесоинженерного факультета ПетрГУ. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1999. – С. 10 – 11.

22. Куколев М.И. Устойчивое развитие Республики Карелия: Энергетический аспект // Тез. докл. 2 науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и соискателей лесного комплекса Республики Карелия, посв. 60-летию ПетрГУ. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2000. – С.3.

23. Куколев М.И. Обеспечение пуска двигателей в условиях низких температур Северо-Запада России // Проблемы устойчивого развития лесного комплекса Республики Карелия: Сб науч. трудов Карельской инженерной академии №3. – Петрозаводск, 2000. – С. 39-46.

24. Kvasnikov L., Kukelev Yu., Kukolev M. Prospects of Thermal Energy Stores Use for North-West Russia // Green Energetics: From the Modern Technologies to the New Philosophy: Proceedings from the Fourth International Seminar. – Joensuu, 2000. – P. 133 – 135.

25. Куколев М.И. Основы проектирования тепловых накопителей энергии. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. – 240 с.

26. Куколев М.И., Кукелев Ю.К. Учет необратимости процессов теплообмена при проектировании тепловых накопителей энергии / Необратимые процессы в природе и

технике: Тез. докл. Всерос. конф. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – С. 14 - 15.

27. Куколев М.И. Эффективность тепловых накопителей для автотракторной техники / Научные и практические вопросы совершенствования эксплуатации мобильных машин в современных условиях: Вып. 2. – СПб: ВИТУ, 2001. – С. 142-148.

28. Куколев М.И., Кукелев Ю.К. Расчет процессов заряда и разряда в тепловом накопителе энергии (Часть I) // Труды Лесоинженерного факультета ПетрГУ. Вып. 3. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. – С. 48 – 51.

29. Olkhin Yu., Kukolev M., Egipti A. Economic activities and organization of natural protected territories / Social sustainability of forestry in northern Europe: research and education / Marjatta Hyttinen (Ed.) – Naraino Oy, Helsinki, 2001. - P. 213-220.

30. Куколев М.И. Расчет тепловых накопителей с плавящимися веществами / Физические эффекты в промышленности: Сб. науч. тр. ПетрГУ. –Петрозаводск, 2002. - Деп. в ВИНТИ 18.12.2002, №2208-B2002. – С. 74-78.

31. Куколев М.И., Кукелев Ю.К. Определение технического совершенства теплового накопителя мобильной машины на ранних стадиях проектирования // Научные и практические вопросы совершенствования эксплуатации мобильных машин в современных условиях: Сб науч. трудов ВИТУ, Вып. 3. – Санкт-Петербург, 2003. – С. 106-112.

32. Куколев М.И., Кукелев Ю.К. Расчет процессов заряда и разряда в тепловом накопителе энергии (Часть II) // Труды Лесоинженерного факультета ПетрГУ. Вып. 4. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. – С. 68 – 72.

33. Шульгин В.В., Кукелев Ю.К., Питухин Е.А., Куколев М.И. Математическая модель функционирования и термодинамическая оценка эффективности теплового аккумулятора автомобиля // Автомобильная промышленность, 2003. – № 9. – С. 16-19.

34. Куколев М.И., Кукелев Ю.К., Питухин Е.А. Тепломеханический накопитель для маршрутных такси // Экологизация автомобильного транспорта: передовой опыт России и стран Европейского Союза: Труды II Всеросс. науч.-практ. семинара. – Санкт-Петербург: МАНЭБ, 2004. – С. 89-90.

35. Кукелев Ю.К., Куколев М.И. Оценка перспективности вторичного использования теплоты технологических установок // Новые информационные технологии в целлюлозно-бумажной промышленности и энергетике: Материалы VI Международной науч.-практ. конференции. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. – С. 110 – 111.

36. Куколев М.И., Кукелев Ю.К. Энергетическая эффективность тепловых накопителей с однофазными теплоаккумулирующими материалами // Фундаментальные исследования в технических университетах: Материалы VIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы. – СПб: Изд-во СПбГПУ, 2004. – С. 175-176.

ПЕРЕЧЕНЬ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Латинский алфавит: c - удельная теплоемкость (изобарная); d - диаметр; F - площадь; g - массовая доля; K - коэффициент теплопередачи; L - скрытая удельная теплота плавления; M - масса; m - секундный массовый расход теплоносителя в канале; N - безразмерное число теплопередачи; P - мощность; Q' - тепловой поток; R - коэффициент формы ячеек с ТАМ; T - температура; ΔT - перепад температур; t - время (длительность) процесса; \bar{w} - безразмерная скорость передвижения границы фазового перехода; V - объем; x - координата; y - параметр, характеризующий ТН с однофазным ТАМ.

Греческий алфавит: Φ - отношение начальной и конечной площадей границы фазового перехода; η - энергетический КПД; λ - коэффициент теплопроводности; μ - коэффициент использования массы; Σ - эксергия; Θ - безразмерная избыточная температура; θ - безразмерное время (для ТН с однофазными ТАМ); ρ - плотность; τ - безразмерное время (для ТН с фазопереходными ТАМ); ψ - эксергетический КПД.

Индексы: 1 – начальное; 2 – конечное; c - заряд; ci - вход в ТН при заряде; co - выход из ТН при заряде; sw - стенка ячейки с ТАМ при заряде; cyl - цилиндр; d - разряд; di - вход в ТН при разряде; do - выход из ТН при разряде; ds - окружающая среда; dw - стенка ячейки с ТАМ при разряде; end - окончание заряда; ex - эксергетическая; $flat$ - пластина; HP - тепловая труба; cr - критическое; l - жидкая фаза; m - плавление; n - однофазный ТАМ; o - начальное состояние; opt - оптимальная величина; s - твердая фаза; sp - сфера; tsm - ТАМ; u - условный; Σ - суммарная величина.

Сокращения: КПД – коэффициент полезного действия; ТАМ – теплоаккумулирующий материал; ТН – тепловой накопитель; ЭУ – энергетическая установка.