

На правах рукописи

Вильдяева Светлана Николаевна

**МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО НАКОПИТЕЛЯ
ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ
ПОДВОДЕ И ОТВОДЕ ЭНЕРГИИ**

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена на кафедре «Двигатели, автомобили и гусеничные машины»
института «Энергетики и транспортных систем»
Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: **Куколев Максим Игоревич**
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор

Официальные оппоненты: **Ерофеев Валентин Леонидович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Государственный университет морского и
речного флота имени адмирала С.О. Макарова», профессор
кафедры «Теории и конструкции судовых двигателей внут-
реннего сгорания»

Столяров Сергей Павлович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный мор-
ской технической университет», декан факультета Кора-
бельной энергетики и автоматики

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана»

Защита диссертации состоится «___» _____ 2015 года в _____ на заседании диссерта-
ционного совета Д 212.229.09 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29, в аудитории ____

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»
<http://www.spbstu.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 201_ г.

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

Факс: (812) 552 89 45

E-mail: office@spbstu.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета



Б. С. Хрусталев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие перспективных наземных, надледных и подводных энергетических установок (ЭУ) гражданского и военного назначения для условий Арктики в настоящее время связывается, в том числе, с применением в их составе двигателей с внешним подводом теплоты. При использовании ряда источников энергии существует проблема нестабильности параметров теплоты, подводимой к преобразователю, в частности, к нагревателю двигателя Стирлинга (ДС). Возможным решением данной проблемы является применение теплового накопителя (ТН) с фазопереходным (плавящимся) теплоаккумулирующим материалом (ТАМ) в составе системы нагрева ДС. Это позволяет стабилизировать уровень температур и снижает тепловую напряженность деталей нагревателя, что и обеспечивает надежную работу ЭУ в целом. В том числе – при кратковременном отсутствии поступления энергии от источника.

При минимуме информации на начальных этапах проектирования и большом количестве возможных вариантов реализации, необходимо располагать аналитическими моделями и методиками расчета для оценки эффективности проектируемых ТН, для выбора перспективного направления дальнейших расчетов. Решению этой задачи посвящено данное исследование, что подтверждает его актуальность.

Степень разработанности темы исследования. Обзор опубликованных работ по моделированию ТН с фазопереходными (плавящимися) ТАМ показал, что в настоящее время данная тема изучена в недостаточной степени. Так, хорошо известны работы В. Н. Богословского (1982 г.), А. Бежана (1990 г.), Э. В. Котенко (1996 г.), В. В. Шульгина (2004 г.) и др. авторов посвященные моделированию ТН. Процессы заряда, хранения теплоты и разряда в этих моделях рассматривались отдельно.

Однако, в целом ряде приложений, при непосредственной работе ТН ДС, наблюдается одновременный подвод к ТН и отвод от него энергии. Модели, позволяющие рассчитывать ТН подобного типа, в известных литературных источниках практически не отражены, что подтверждает необходимость проведения дальнейших работ в данном направлении.

Цель исследования: Расчетное обеспечение проектных решений теплового накопителя системы нагрева двигателя Стирлинга при одновременном подводе и отводе энергии.

Для достижения поставленной цели исследования были решены **задачи:**

- Оценки современного уровня исследований в области проектирования тепловых накопителей двигателя Стирлинга.
- Построения расчетной модели теплового накопителя с одновременным подводом и отводом энергии.
- Получения зависимостей для определения эксергетического КПД накопителя.
- Проведения численного исследования модели.
- Рассмотрения примера реализации модели.

Научная новизна.

1. Предложен коэффициент направленности процесса в ТН с одновременным подводом и отводом энергии, позволяющий определить его состояние.
2. Построена расчетная модель ТН ДС при одновременном подводе и отводе энергии.

3. Получены зависимости для расчета эксергетического КПД четырех возможных схем реализации энергоустановки с ТН ДС.

Личный вклад автора состоит в: постановке цели и задач работы; предложении коэффициента направленности процесса в ТН с одновременным подводом и отводом энергии; построении расчетной модели и осуществлении ее численного исследования с последующей обработкой результатов; проведении расчета параметров для конкретной конструкции ТН ДС; формулировании выводов и практических рекомендаций.

Теоретическая и практическая значимость работы.

В работе предложен коэффициент направленности процесса, позволяющий определить состояние ТН с фазопереходным (плавающимся) ТАМ. Построена расчетная модель ТН ДС для накопителя в состоянии заряда и разряда, позволяющая учесть одновременность подвода энергии к ТН и отвода от него. Созданная модель реализована в среде MathCad.

Рассмотрены четыре возможных случая работы ЭУ и предложены зависимости для оценки их эксергетического КПД. В результате численного эксперимента определен диапазон допустимых значений параметров и возможности применения нескольких ТАМ для определенного состояния ТН.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанная обобщенная методика оценки режимов работы ТН, позволяет рассчитывать ТН ДС на ранних этапах проектирования при минимуме исходной информации.

Проведенный по предлагаемой методике расчет ТН для ДС 5,5/2,1 подтвердил применимость результатов работы для практики.

Методология и методы исследования. В работе использовались как теоретические методы (идеализации, формализации), так и экспериментальные (моделирования, сравнения).

Объект исследования - тепловой накопитель двигателя Стирлинга для энергетической установки. Предмет исследования - тепловые процессы, протекающие в тепловом накопителе с фазопереходным (плавающимся) теплоаккумулирующим материалом при одновременном подводе и отводе энергии.

Исследование базировалось на совместном применении первого и второго законов термодинамики, общепризнанных уравнений теплообмена для описания процессов протекающих в ТН с фазопереходным (плавающимся) ТАМ при одновременном подводе и отводе энергии.

На защиту выносятся:

1. Коэффициент, позволяющий определить состояние ТН и методика его расчета.
2. Модель ТН в состояниях заряда и разряда.
3. Зависимости эксергетического КПД для 4-х возможных схем энергоустановок с ТН ДС.

Достоверность результатов исследований подтверждена введением обоснованных допущений, применением фундаментальных уравнений теории теплообмена, сравнением предложенной модели с моделями других авторов.

Апробация.

Материалы исследований опубликованы в 18 печатных работах в Российской Федерации, Чешской Республике, Республике Болгария и США. Всего 11 статей (Из них 5 – в журналах из списка ВАК при Минобрнауки РФ) и 7 тезисов докладов.

Материалы работы были доложены на:

- XXX отраслевой научно-технической конференции молодых специалистов «Морское подводное оружие. Морские подводные роботы – вопросы проектирования, конструирования и технологий. МПО-МС» (ОАО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор», г. Санкт-Петербург - 2011 г.).
Доклад отмечен дипломом;
- IX молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее – 2011» (ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», г. Санкт-Петербург - 2011 г.).
Доклад отмечен дипломом;
- Международных научно-практических конференциях «Неделя науки СПбГПУ» (г. Санкт-Петербург – 2008, 2009, 2012, 2013 г.).

Результаты исследования были доложены и обсуждены на семинарах кафедры «Двигатели, автомобили и гусеничные машины» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (2013-2014 гг.).

В 2014 г. предложенная методика и полученные зависимости успешно внедрены в деятельность конструкторского бюро ООО «Тепловые моторы» (г. Москва).

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (91 источник), 1 приложения. Она изложена на 117 страницах текста, включающих 56 рисунков, 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** сформулированы и обоснованы актуальность, цель, задачи, научная новизна и методология исследования.

В **Главе I** приведен краткий обзор истории развития ДС, описание систем его нагрева с примерами применения. Рассмотрены подходы к моделированию тепловых процессов в ТН ДС. Установлено, что в настоящее время расчет ТН с фазопереходными (плавающими) ТАМ для ДС ведется с применением моделей отдельно описывающих процессы заряда, хранения теплоты и разряда. Показано, что на современном этапе для большого круга приложений требуются модели для расчета ТН с одновременным подводом и отводом энергии.

В **Главе II** приводится описание расчетной модели теплового накопителя с фазопереходными (плавающими) ТАМ, выводятся зависимости эксергетического КПД для четырех возможных систем ЭУ с ТН ДС и проводится оценка достоверности предложенной модели расчета.

Модель основана на следующих допущениях: параметры окружающей среды постоянны; изменения кинетической и потенциальной энергии системы незначительны; заряд и разряд ТН осуществляются однофазным теплоносителем с постоянной теплопроводностью, плотностью и потоком энтальпии; продолжительность процессов заряда и разряда конечна; процессы теплопередачи к ТАМ и от него считаются одномерными; коэффициенты теплопередачи к ТАМ и от него постоянны; объем ТН постоянен; теплофизические свойства ТАМ постоянны; определяющим процессом теплообмена в ячейке с ТАМ является теплопроводность; парообразование или конденсация в емкости с ТАМ отсутствует; процессы плавления и затвердевания ТАМ считаются одномерными; перегрев и переохлаждение ТАМ отсутствуют, в исходном состоянии ТАМ имеет однородное распре-

деление температуры T_m ; энергетический КПД равен единице; процессы подвода и отвода энергии протекают одновременно.

Режимы работы моделируемого ТН отличаются от известных случаев «чистых» заряда, разряда и хранения энергии (здесь и далее термин «чистый» говорит о том, что процесс в ТН проходит только с подводом или отводом энергии). Это связано с тем, что энергия подводится в систему и отводится от нее одновременно (рисунок 1).

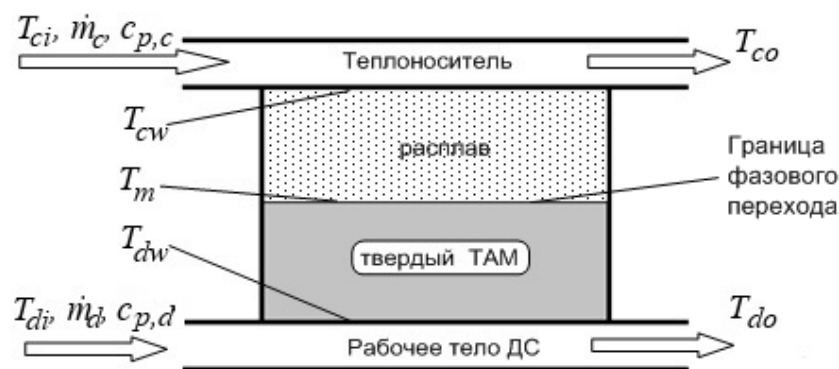


Рисунок 1 - Расчетная схема плоской ячейки теплового накопителя с одновременно протекающими процессами заряда и разряда

Можно выделить:

1. «Состояние заряда» соответствует ситуации, когда количество подводимой к ТН энергии превышает количество отводимой.
2. «Состояние разряда» соответствует ситуации, когда количество подводимой энергии меньше чем количество отводимой из ТН.
3. «Равновесное состояние» соответствует ситуации, когда количества поступающей в ТН и отводимой от него энергии равны.

Результирующая скорость передвижения границы фазового перехода определяется взаимодействием предельных скоростей заряда и разряда. Введем коэффициент направленности процесса:

$$\bar{v} = \frac{w_c}{w_d},$$

где $w_{c,d}$ - размерные скорости передвижения границы фазового перехода для «чистого» заряда и «чистого» разряда соответственно.

Если $\bar{v} > 1$, то ТН находится в состоянии заряда; $\bar{v} < 1$ - ТН находится в состоянии разряда; $\bar{v} = 1$ - ТН находится в равновесном состоянии.

Предложена обобщенная «методика оценки режимов работы ТН» (рисунок 2). Кратко рассмотрим ее блок-схему: Задаются исходные данные: длительность процесса t ; температуры теплоносителей на входе в ячейку ТН со стороны подвода T_{ci} и отвода T_{di} энергии; секундные массовые расходы теплоносителей в каналах ТН \dot{m}_c и \dot{m}_d ; удельные теплоемкости теплоносителей $c_{p,c}$ и $c_{p,d}$. Выбирается площадь поверхности теплообмена F , ТАМ с его теплофизическими свойствами (температура плавления T_m ; плотность материала ρ , коэффициенты теплопроводности материала λ в твердом и жидком состояни-

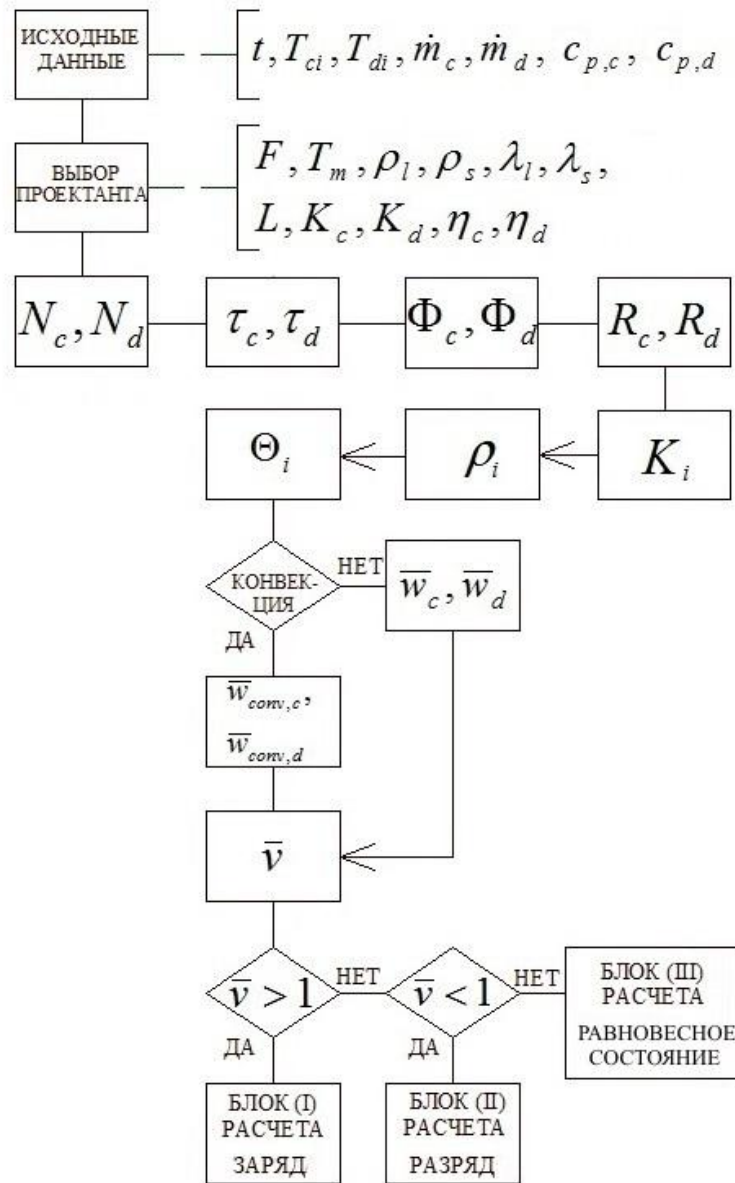


Рисунок 2 - Блок-схема методики оценки режимов работы теплового накопителя; скрытая теплота фазового перехода L), коэффициенты теплопередачи K_c , K_d и энергетические КПД η_c , η_d . Учитывая рассматриваемую конструктивную форму ячеек ТН, рассчитываются следующие безразмерные величины: число теплопередачи N ; безразмерное время процесса τ ; коэффициент формы Φ и зависящий от него комплекс R .

Рассчитываются безразмерные отношения коэффициентов теплопередачи K_i , плотностей ρ_i , перепадов между температурой плавления и температурами теплоносителя на входе в ячейку ТН Θ_i .

С учетом конструкции и условий функционирования ТН проводится предварительный расчет безразмерных скоростей передвижения границы фазового перехода по известным зависимостям. В случае чистой теплопроводности:

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

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

При наличии конвекции: $\bar{w}_{conv,c} = \frac{1 - \exp(-N_c)}{N_c \cdot R_c} \cdot \eta_c$, $\bar{w}_{conv,d} = \frac{1 - \exp(-N_d)}{N_d \cdot R_d \cdot \eta_d}$.

Далее определяется коэффициент направленности процесса в случае теплопроводности:

$$\bar{v} = \frac{\bar{w}_c}{\bar{w}_d} \cdot \frac{K_i}{\rho_i} \cdot \Theta_i, \text{ или конвекции: } \bar{v} = \frac{\bar{w}_{conv,c}}{\bar{w}_{conv,d}} \cdot \frac{K_i}{\rho_i} \cdot \Theta_i.$$

Проводится анализ полученного результата. Если $\bar{v} > 1$, то ТН находится в состоянии заряда; $\bar{v} < 1$ - ТН находится в состоянии разряда; $\bar{v} = 1$ - ТН находится в равновесном состоянии.

Дальнейшие расчеты осуществляются по формулам для соответствующего состояния ТН.

В качестве примера в работе рассматривался ТН последовательного включения с ячейкой ТАМ в форме пластины ($\Phi=1$ и, соответственно, $R=1$). Определяющий процесс теплообмена – теплопроводность.

На основе закона сохранения энергии при моделировании ТН записывались в размерном виде системы уравнений, описывающие различные состояния ТН.

ТН в состоянии заряда

$$\begin{cases} \dot{m}_c \cdot c_{p,c} \cdot (T_{ci} - T_{co}) \cdot t = K_c \cdot F \cdot (T_{co} - T_{cw}) \cdot t \\ K_c \cdot F \cdot (T_{co} - T_{cw}) \cdot t = \frac{\lambda_l}{f(x_1, x_2)} \cdot (T_{cw} - T_m) \cdot t, \\ \frac{\lambda_l}{f(x_1, x_2)} \cdot (T_{cw} - T_m) \cdot t = w_\Sigma \cdot L \cdot F \cdot \rho_\Sigma \cdot t \end{cases}$$

ТН в состоянии разряда

$$\begin{cases} w_\Sigma \cdot L \cdot F \cdot \rho_\Sigma \cdot t = \frac{\lambda_s}{f(x_1, x_2)} \cdot (T_m - T_{dw}) \cdot t \\ \frac{\lambda_s}{f(x_1, x_2)} \cdot (T_m - T_{dw}) \cdot t = K_d \cdot F \cdot (T_{dw} - T_{do}) \cdot t \cdot \\ K_d \cdot F \cdot (T_{dw} - T_{do}) \cdot t = \dot{m}_d \cdot c_{p,d} \cdot (T_{do} - T_{di}) \cdot t \end{cases}$$

Суммарная скорость передвижения границы фазового перехода при нахождении ТН в равновесном состоянии равна нулю. Этот случай требует отдельного исследования и в данной работе не рассматривался.

После введения ряда безразмерных величин системы преобразовывались к безразмерному виду:

ТН в состоянии разряда

$$\begin{cases} 1 - \Theta_{co} = N_c \cdot (\Theta_{co} - \Theta_{cw}) \\ \bar{w}_c \cdot \tau_c \cdot (\Theta_{co} - \Theta_{cw}) = \Theta_{cw}, \\ \bar{v} + \frac{\rho_s}{\rho_l} \\ \Theta_{cw} = \frac{\rho_l}{\bar{v}} \cdot \bar{w}_c^2 \cdot \tau_c \end{cases},$$

ТН в состоянии разряда

$$\begin{cases} \Theta_{dw} = (\bar{v} \cdot \frac{\rho_l}{\rho_s} + 1) \cdot \bar{w}_d^2 \cdot \tau_d \\ \bar{w}_d \cdot \tau_d \cdot (\Theta_{do} - \Theta_{dw}) = \Theta_{dw} \cdot \\ 1 - \Theta_{do} = N_d \cdot (\Theta_{do} - \Theta_{dw}) \end{cases}.$$

При решении систем уравнений учтены суммарная скорость передвижения границы фазового перехода, «суммарная» плотность и соотношение плотностей ТАМ в жидкой и твердой фазе, соответственно:

$$w_{\Sigma} = \frac{h_{\Sigma}}{t} \cdot \frac{\bar{v} + \frac{\rho_s}{\rho_l}}{\bar{v} + \left(\frac{\rho_s}{\rho_l}\right)^2}, \quad \rho_{\Sigma} = \frac{\rho_s^2}{\rho_l} \cdot \frac{w_d \cdot t}{h_{\Sigma}} \cdot \left(\left(\frac{\rho_l}{\rho_s}\right)^2 \cdot \bar{v} + 1 \right), \quad \rho_i = \frac{\rho_l}{\rho_s}.$$

Получены решения систем в безразмерном виде:

$$\bar{w}_c = \frac{\sqrt{\frac{[(N_c + 1)^2 + 4 \cdot \tau_c] \cdot \rho_i \cdot \bar{v} + (N_c + 1)^2}{\bar{v} \cdot \rho_i + 1}}}{2 \cdot \tau_c} - \frac{N_c + 1}{2 \cdot \tau_c}, \quad \bar{w}_d = \frac{\sqrt{\frac{(N_d + 1)^2 \cdot \rho_i \cdot \bar{v} + 4 \cdot \tau_d + (N_d + 1)^2}{\bar{v} \cdot \rho_i + 1}}}{2 \cdot \tau_d} - \frac{N_d + 1}{2 \cdot \tau_d},$$

$$\Theta_{cw} = \tau_c \cdot \xi_c \cdot \bar{w}_c^2, \quad \Theta_{dw} = \tau_d \cdot \xi_d \cdot \bar{w}_d^2,$$

$$\Theta_{co} = 1 - \xi_c \cdot N_c \cdot \bar{w}_c, \quad \Theta_{do} = 1 - \xi_d \cdot N_d \cdot \bar{w}_d,$$

где $\xi_c = 1 + \frac{1}{\rho_i \cdot \bar{v}}$ и $\xi_d = \rho_i \cdot \bar{v} + 1$.

Температуры стенок ячейки и теплоносителей на выходе из каналов со стороны подвода и отвода энергии в размерном виде :

$$T_{cw} = T_m + (T_{ci} - T_m) \cdot \tau_c \cdot \xi_c \cdot \bar{w}_c^2, \quad T_{dw} = T_m - (T_m - T_{di}) \cdot \tau_d \cdot \xi_d \cdot \bar{w}_d^2,$$

$$T_{co} = T_{ci} - (T_{ci} - T_m) \cdot \xi_c \cdot N_c \cdot \bar{w}_c, \quad T_{do} = T_{di} + (T_m - T_{di}) \cdot \xi_d \cdot N_d \cdot \bar{w}_d.$$

Эффективность ТН оценивалась с помощью эксергетического КПД - отношения эксергии разряда Σ_{do} к эксергии заряда Σ_{ci} . Дополнительно учитывалось влияние накопленной эксергии Σ_n . Таким образом, эксергетический КПД для заряда $\psi = \frac{\Sigma_{do} + \Sigma_n}{\Sigma_{ci}}$, для

$$\text{разряда } \psi = \frac{\Sigma_{do}}{\Sigma_{ci} + \Sigma_n}.$$

В зависимости от состава элементов и режимов работы ЭУ в модели учтены четыре возможных случая:

1) Теплоноситель ДС на входе в канал ТН предварительно подогрет до T_{di} ($T_{di} > T_{ds}$). Греющий теплоноситель, покидая ТН, поступает в последующий накопитель или преобразователь энергии (рисунок 3).

2) Теплоноситель ДС на входе в канал ТН предварительно не подогрет ($T_{di} = T_{ds}$). Греющий теплоноситель, покидая ТН, поступает в последующий накопитель или преобразователь энергии (рисунок 4).

3) Теплоноситель ДС на входе в канал предварительно подогрет до T_{di} ($T_{di} > T_{ds}$). Греющий теплоноситель, покидая ТН, охлаждается до температуры, близкой к температуре окружающей среды T_{ds} ($T_{co} = T_{ds}$) (рисунок 5).

4) Теплоноситель ДС на входе в канал ТН предварительно не подогрет ($T_{di} = T_{ds}$). Греющий теплоноситель, покидая ТН, охлаждается до температуры, близкой к температуре окружающей среды T_{ds} ($T_{co} = T_{ds}$) (рисунок 6).

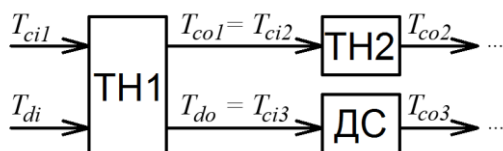


Рисунок 3 - Схема энергоустановки для 1-го случая

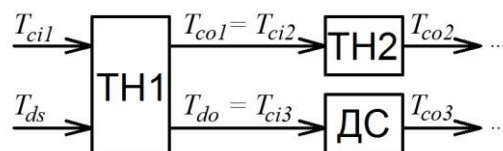


Рисунок 4 - Схема энергоустановки для 2-го случая

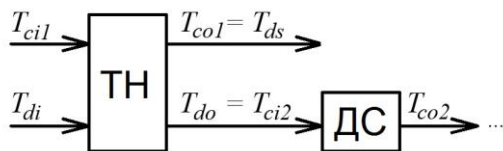


Рисунок 5 - Схема энергоустановки для 3-го случая

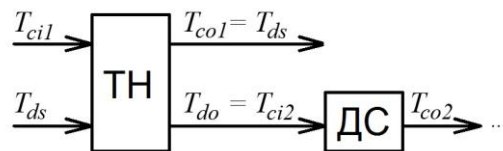


Рисунок 6 - Схема энергоустановки для 4-го случая

Получены следующие зависимости для расчета эксергетического КПД:

ТН в состоянии заряда

$$\psi_I = \dot{m}_i^{-1} \cdot c_{p,i}^{-1} \cdot \frac{B_I \cdot (2 - \bar{T}_m^{-1}) - \ln(1 + \frac{B_I}{\bar{T}_{di}})}{A_I + \ln(1 - \frac{A_I}{\bar{T}_{ci}})};$$

$$\psi_{II} = \dot{m}_i^{-1} \cdot c_{p,i}^{-1} \cdot \frac{B_{II} \cdot (2 - \bar{T}_m^{-1}) - \ln(1 + B_{II})}{A_{II} + \ln(1 - \frac{A_{II}}{\bar{T}_{ci}})};$$

$$\psi_{III} = \dot{m}_i^{-1} \cdot c_{p,i}^{-1} \cdot \frac{B_{III} \cdot (2 - \bar{T}_m^{-1}) - \ln(1 + \frac{B_{III}}{\bar{T}_{di}})}{\bar{T}_{ci} - 1 - \ln(\bar{T}_{ci})};$$

$$\psi_{IV} = \dot{m}_i^{-1} \cdot c_{p,i}^{-1} \cdot \frac{B_{IV} \cdot (2 - \bar{T}_m^{-1}) - \ln(1 + B_{IV})}{\bar{T}_{ci} - 1 - \ln(\bar{T}_{ci})};$$

ТН в состоянии разряда

$$\psi_I = \dot{m}_i^{-1} \cdot c_{p,i}^{-1} \cdot \frac{B_I - \ln(1 + \frac{B_I}{\bar{T}_{di}})}{A_I \cdot (2 - \bar{T}_m^{-1}) + \ln(1 - \frac{A_I}{\bar{T}_{ci}})};$$

$$\psi_{II} = \dot{m}_i^{-1} \cdot c_{p,i}^{-1} \cdot \frac{B_{II} - \ln(1 + B_{II})}{A_{II} \cdot (2 - \bar{T}_m^{-1}) + \ln(1 - \frac{A_{II}}{\bar{T}_{ci}})};$$

$$\psi_{III} = \dot{m}_i^{-1} \cdot c_{p,i}^{-1} \cdot \frac{B_{III} - \ln(1 + \frac{B_{III}}{\bar{T}_{di}})}{(\bar{T}_{ci} - 1) \cdot (2 - \bar{T}_m^{-1}) - \ln(\bar{T}_{ci})};$$

$$\psi_{IV} = \dot{m}_i^{-1} \cdot c_{p,i}^{-1} \cdot \frac{B_{IV} - \ln(1 + B_{IV})}{(\bar{T}_{ci} - 1) \cdot (2 - \bar{T}_m^{-1}) - \ln(\bar{T}_{ci})};$$

где: $A_I = A_{II} = (\bar{T}_{ci} - \bar{T}_m) \cdot \xi_c \cdot N_c \cdot \bar{w}_c$,

$B_I = B_{III} = (\bar{T}_m - \bar{T}_{di}) \cdot \xi_d \cdot N_d \cdot \bar{w}_d$, $B_{II} = B_{IV} = (\bar{T}_m - 1) \cdot \xi_d \cdot N_d \cdot \bar{w}_d$.

После оценки достоверности разработанной модели, путем сравнения ее с двумя независимыми моделями ТН других авторов, принято решение о допустимости применения модели для дальнейших исследований.

В **Главе III** изложены сведения о проведенном вычислительном эксперименте по предлагаемой модели.

Исследовалось влияние коэффициента направленности процесса на:

1. безразмерную скорость передвижения границы фазового перехода;
2. безразмерные температуры стенок ячейки и теплоносителей в каналах на выходе из ТН;
3. эксергетический КПД накопителя.

Ниже приведены некоторые результаты исследования (рисунки 7-9).

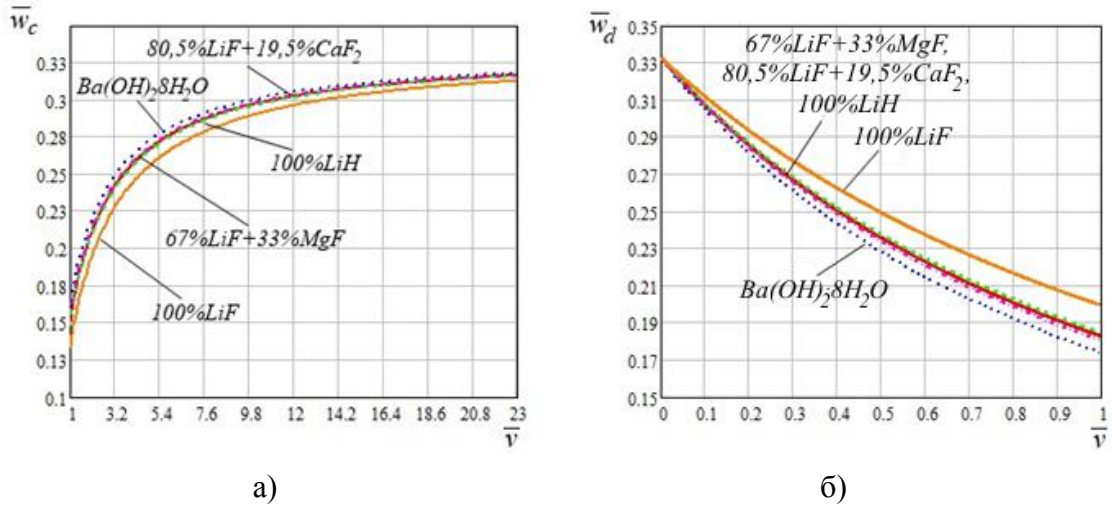


Рисунок 7 - Зависимости безразмерной скорости передвижения границы фазового перехода для заряда \bar{w}_c (а) и разряда \bar{w}_d (б) от коэффициента направленности процесса \bar{v} ($N_{c,d}=2, \tau_{c,d}=0,01$)

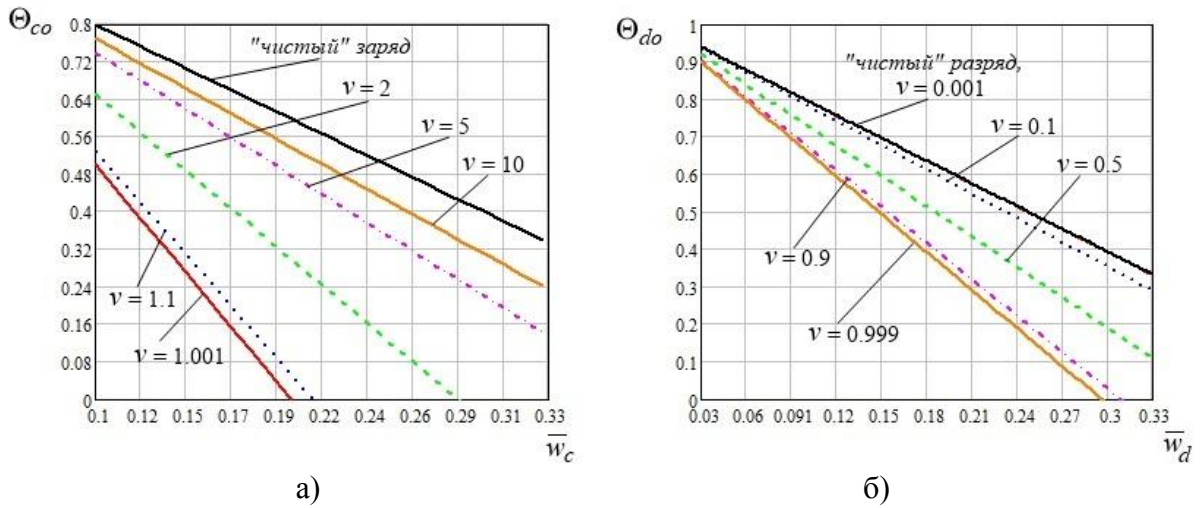


Рисунок 8 - Зависимости безразмерных температур теплоносителей на выходе из каналов ТН со стороны подвода Θ_{co} (а) и отвода Θ_{do} (б) энергии от безразмерной скорости передвижения границы фазового перехода $\bar{w}_{c,d}$ для 100% LiF

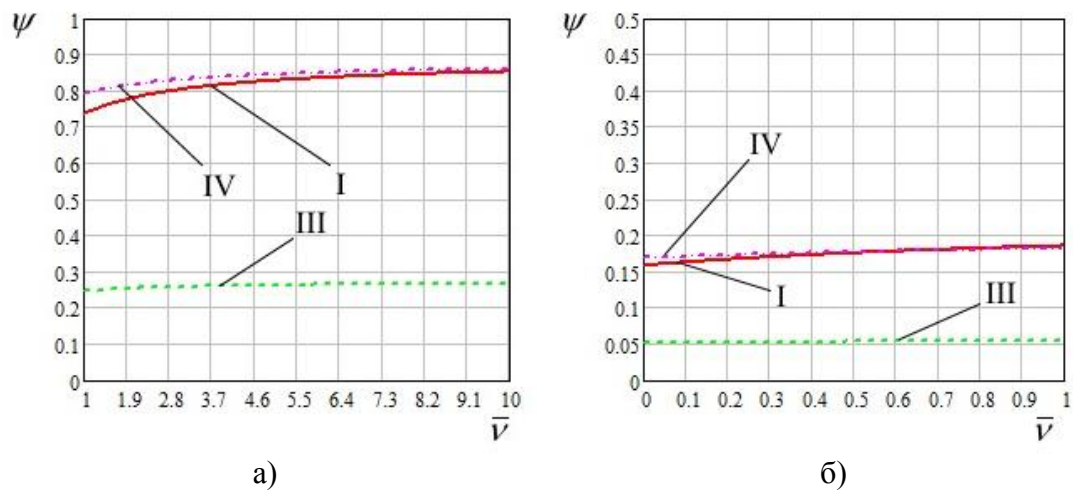


Рисунок 9 - Зависимость эксергетического КПД ψ для теплового накопителя в состоянии заряда (а) и разряда (б) от коэффициента направленности процесса \bar{v} (80,5% LiF + 19,5% CaF_2): I – 1-ый случай; III – 3-ий случай; IV – 4-ый случай

В результате вычислительного эксперимента были получены значения параметров ТН и диапазоны их допустимых значений для нескольких ТАМ при определенном состоянии накопителя.

В **Главе IV** приведен пример возможного применения предлагаемых модели и методики расчета для проектирования ТН конкретного ДС.

Для проведения расчета взята реально существующая установка для утилизации теплоты отработавших газов ДВС Челябинском высшем военном автомобильном командно-инженерном училище (военном институте) имени Главного маршала бронетанковых войск П.А. Ротмистрова.

Схема стенда для утилизации теплоты, включающая в себя ДС ТН, приведена на рисунке 10.

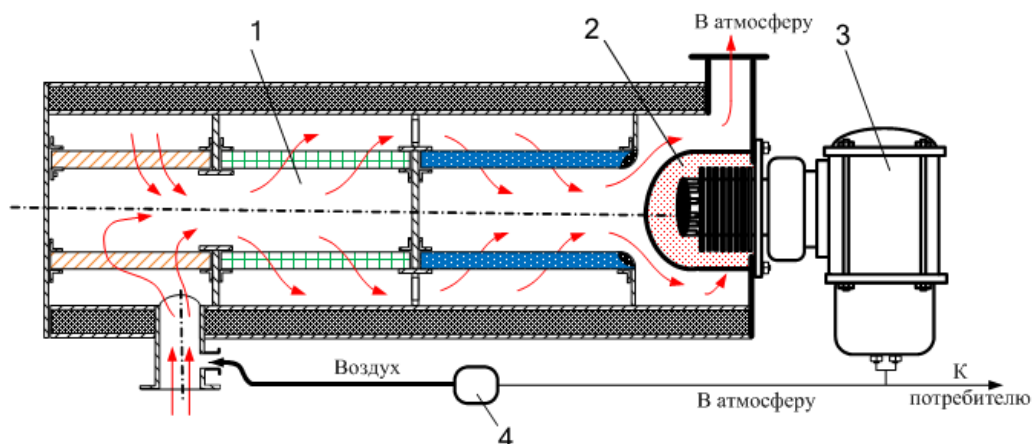


Рисунок 10 - Каталитический нейтрализатор, совмещенный с тепловым накопителем и двигателем Стирлинга: 1 - каталитический нейтрализатор; 2 – ТН; 3 - утилизирующая ЭУ; 4 – нагнетатель воздуха (Кукис В. С., Романов В. А., 2011 г.)

Утилизирующая ЭУ состоит из ДС 5,5/2,1 вытеснительного типа β -модификации с ромбическим приводом и электрическим генератором. Ее основные характеристики: эффективная мощность - 225 Вт; частота вращения коленчатого вала - 1700 мин^{-1} ; рабочее тело ДС – гелий.

Исходные данные для расчета: длительность процесса $t=3600 \text{ с}$; температура теплоносителя на входе в канал ТН со стороны подвода энергии $T_{ci}=900 \text{ K}$; температура теплоносителя на входе в канал со стороны отвода энергии $T_{di}=550 \text{ K}$; секундный массовый расход теплоносителей в каналах ТН одинаков $\dot{m}_{c,d}=0,001 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$; конструктивная схема ячейки ТН – плоская; ТАМ - KNO_3 . Теплоносители: подводящий энергию – отработавшие газы ДВС, отводящий энергию – рабочее тело ДС (Гелий).

В результате проведенного расчета получены следующие результаты: скорость передвижения границы фазового перехода $w_c = 4,77 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}}{\text{с}}$; температуры стенок ячейки и теплоносителей на выходе из каналов со стороны подвода $T_{cw} = 612,1 \text{ K}$, $T_{co} = 613,5 \text{ K}$ и отвода $T_{dw} = 610,9 \text{ K}$, $T_{do} = 557,3 \text{ K}$ энергии; эксергетический КПД $\psi_I = 0,154$ (15,4%).

На основании расчета сделан вывод о целесообразности дальнейшего подбора параметров с целью повышения эффективности проектируемого ТН ДС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы:

- 1) Предложен коэффициент, позволяющий определить состояние теплового накопителя при одновременном подводе и отводе энергии с точки зрения выявления преобладающего процесса. Разработана обобщенная методика оценки режимов работы теплового накопителя, которая может быть рекомендована для предварительных этапов проектирования систем нагрева двигателей Стирлинга.
- 2) Построена модель позволяющая рассчитать тепловой накопитель в состоянии заряда и разряда в случае чистой теплопроводности для плоской ячейки с теплоаккумулирующим материалом при одновременном подводе и отводе энергии.
- 3) Впервые получены аналитические формулы для расчета эксергетического КПД четырех возможных схем включения теплового накопителя двигателя Стирлинга в состав энергетической установки. Они расширяют возможности оценки эффективности проектируемых тепловых накопителей с фазопереходными (плавящимися) теплоаккумулирующими материалами.
- 4) В результате численного исследования модели:
 - а) В графическом виде получены зависимости эксергетического КПД, безразмерной скорости передвижения границы фазового перехода и температур теплоносителя в каналах и стенок плоской ячейки для четырех теплоаккумулирующих материалов: 100% LiF ; 67% LiF + 33% MgF ; 100% LiH ; 80,5% LiF + 19,5% CaF_2 . Оценено влияние коэффициента направленности процесса на данные величины в зависимости от состояния теплового накопителя (заряд или разряд).
 - б) Путем сравнения четырех возможных схем включения двигателя Стирлинга с тепловым накопителем в состав энергетической установки по эффективности, установлено, что для одинаковых условий функционирования и теплоаккумулирующих материалов:
 - наибольшим значением эксергетического КПД обладают в состоянии заряда – схема энергоустановки 4-го случая, в состоянии разряда – схемы для 1-го и 4-го случаев;
 - эксергетический КПД схемы энергоустановки для 1-го случая оказался наиболее чувствителен к свойствам применяемого теплоаккумулирующего материала;
 - целесообразно применение схемы энергоустановки 2-го случая при использовании теплоаккумулирующих материалов с малыми температурами плавления.
- 5) Пример реализации модели для конкретного двигателя Стирлинга подтвердил, что она применима и может быть рекомендована для обеспечения проектных решений при разработке энергетических установок для утилизации энергии отработавших газов ДВС.
- 6) Развитие работы видится в учете потерь в системе с помощью энергетического КПД, учете влияния формы ячеек теплового накопителя, построении модели теплового накопителя с одновременным подводом и отводом теплоты в равновесном

состоянии, учете в модели конвективной и радиационной составляющих процесса теплопереноса.

По теме исследования опубликованы следующие работы:

***в перечне периодических научных изданий,
рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:***

1. Бреусов, В.П. Двигатели с внешним подводом теплоты (Ч. I) / В.П.Бреусов, М.И.Куколев, С.Н.Яковлева, А.Ю.Абакшин // Двигателестроение, 2009. – №3(237). – С. 41-44.
2. Бреусов, В.П. Двигатели с внешним подводом теплоты (Ч. II) / В.П.Бреусов, М.И.Куколев, С.Н.Вильдяева, А.Ю.Абакшин // Двигателестроение, 2009. – №4(238). – С. 41-45.
3. Бреусов, В.П. Двигатели с внешним подводом теплоты (Ч. III) / В.П.Бреусов, М.И.Куколев, С.Н.Вильдяева, А.Ю.Абакшин // Двигателестроение, 2010. – №1(239). – С. 37-40.
4. Куколев, М.И. Обобщенная методика оценки режимов работы теплового накопителя / М.И.Куколев, В.С.Кукис, С.Н.Вильдяева // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: Научный журнал. – Новосибирск: Изд-во ФГПО ВПО НГAVT, 2013. – №2. – С.169-172.
5. Кукис, В.С. Эффективность тепловых накопителей энергии с одновременно протекающими процессами заряда и разряда / В.С.Кукис, М.И.Куколев, С.Н.Вильдяева // Вестник академии военных наук. - 2014. - №4 (49). – С. 155-162.

в трудах конференций:

6. Абакшин, А.Ю. Моделирование элементов ДВПТ в среде Fluent / А.Ю.Абакшин, Г.А.Ноздрин, С.Н.Вильдяева // Материалы XXX отраслевой науч.-тех. конф. молодых специалистов «Морское подводное оружие. Морские подводные роботы – вопросы проектирования, конструирования и технологий. МПО-МС-2011». – СПб.: ОАО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор», 2011. – С. 43-50.
7. Абакшин, А.Ю. Численное моделирование элементов систем ДВПТ / А.Ю.Абакшин, Г.А.Ноздрин, С.Н.Вильдяева // Материалы IX молодежной науч.-тех. конф. «Взгляд в будущее – 2011». – СПб: ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», 2011. – С. 11-17.
8. Ноздрин, Г.А. Разработка расчетной модели ДВПТ / Г.А.Ноздрин, А.Ю.Абакшин, С.Н.Вильдяева // Материалы IX молодежной науч.-тех. конф. «Взгляд в будущее – 2011». – СПб: ОАО «ЦКБ МТ «Рубин», 2011. – С. 377-382.
9. Ноздрин, Г. А. Разработка расчетной модели ДВПТ / Г.А.Ноздрин, С.Н.Вильдяева, А.Ю.Абакшин // Материалы XXX отраслевой науч.-тех. конф. молодых специалистов «Морское подводное оружие. Морские подводные роботы – вопросы проектирования, конструирования и технологий. МПО-МС-2011». – СПб.: ОАО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор», 2011. – С. 171-177.
10. Кукис, В.С. Повышение эффективности поршневых тепловых двигателей за счет использования вихревых труб / В.С.Кукис, В.А.Романов, А.А.Малоземов, М.И.Куколев, В.С.Дворцов, С.Н.Вильдяева // Материалы за 8-а международна научна практична конференция, «Научният потенциал на света», – 2012. Том 17. Технологии. Физическа култура и спорт. София. «Бял ГРАД-БГ» ООД. – С. 24-36.

11. Кукис, В.С. Использование тепловых потерь в различных энергетических установках путем применения двигателей Стирлинга и тепловых накопителей / В.С.Кукис, М.И.Куколев, С.Н.Вильдяева // Applied and Fundamental Studies : Proceedings of the 4th International Academic Conference. Vol. 1. November 29-30, 2013, St. Louis, Missouri, USA. – С. 268-274.

12. Абакшин А.Ю. Моделирование системы нагрева ДВПТ / А.Ю.Абакшин, С.Н.Вильдяева, В.П.Бреусов, С.В.Булович, М.И.Куколев // Материалы междунар. науч.-практ. конференции «XXXVIII Неделя науки СПбГПУ» - Ч.III. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – С. 8-9.

13. Абакшин, А.Ю. Моделирование процессов тепло- и массообмена в тепловой трубе системы нагрева ДВПТ / А.Ю.Абакшин, С.Н.Вильдяева, В.П.Бреусов, С.В.Булович, М.И.Куколев // Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей: Тез. докл. междунар. науч.-тех. конф. / СПбГАУ. СПб., 2010. – С. 153-155.

14. Куколев, М.И. Моделирование работы тепловой трубы в составе нагревателя двигателя Стирлинга / М.И.Куколев, В.П.Бреусов, С.В.Булович, С.Н.Вильдяева, А.Ю.Абакшин // Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах: Материалы XIV Всероссийской конференции – Том 1. – СПб: Изд-во СПбГПУ, 2010. – С. 180-182.

15. Муравьев, П.А. Оценка эффективности теплового накопителя / П.А.Муравьев, С.Н.Вильдяева, Ф.Н.Газизов // Фундаментальные исследования и инновации в национальных исследовательских университетах: Материалы XV Всероссийской конференции. Санкт-Петербург. Т. 2. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 44-46.

16. Вильдяева, С.Н. Расчетная модель теплового накопителя для двигателя с внешним подводом теплоты / С.Н.Вильдяева, М.И.Куколев // Высокие интеллектуальные технологии и инновации в национальных исследовательских университетах: материалы Международной научно-методической конференции. Том 1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 48-49.

17. Вильдяева, С.Н. Расчетная модель тепломеханического накопителя энергии для двигателя летающего автомобиля / С.Н.Вильдяева, М.И.Куколев // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч. III. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 11-12.

18. Ноздрин, Г.А. Усовершенствование расчетной модели двигателя с внешним подводом теплоты / Г.А.Ноздрин, С.Н.Вильдяева, А.Ю.Абакшин // Материалы XXX отраслевой науч.-тех. конф. молодых специалистов «Морское подводное оружие. Морские подводные роботы – вопросы проектирования, конструирования и технологий. МПО-МС-2011»; – СПб.: ОАО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор», 2012 – С.112-113.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Символы

c_p - удельная теплоемкость;

f - функция формы ячейки ТН;

F - площадь поверхности теплообмена;

h - высота ячейки ТН;

K - коэффициент теплопередачи;

L - скрытая удельная теплота фазового перехода;

\dot{m} - секундный массовый расход;

$$N = \frac{K \cdot F}{\dot{m} \cdot c_p} - \text{безразмерное число теплопередачи};$$

T - температура;

$\bar{T} = T/T_{ds}$ - безразмерная температура;

t - длительность процесса;

\bar{w} - безразмерная скорость передвижения

границы фазового перехода;

x - координата границы фазового перехода;

η - энергетический КПД;

l - начальное положение границы фазового перехода;

2 - конечное положение границы фазового перехода;

n - накопленное;

c - заряд;

$conv$ - конвекция;

d - разряд;

ds - окружающая среда;

$$\Theta_c = \frac{T_c - T_m}{T_{ci} - T_m}; \quad \Theta_d = \frac{T_m - T_d}{T_m - T_{di}} - \text{безразмерная}$$

температура;

λ - коэффициент теплопроводности;

\bar{V} - коэффициент направленности процесса;

ρ - плотность;

Σ - эксергия;

$$\tau = \frac{t \cdot K^2 \cdot \Delta T}{\lambda \cdot \rho \cdot L} - \text{безразмерная длительность}$$

процесса;

Φ - коэффициент формы ячейки ТН;

Ψ - эксергетический КПД.

Индексы

i - вход в ТН;

l - жидкое состояние;

m - фазовый переход;

o - выход из ТН;

s - твердое состояние;

w - стенка

Σ - суммарная.

Сокращения

ДВС – двигатель внутреннего сгорания;

ДС - двигатель Стирлинга;

ТАМ - теплоаккумулирующий материал;

ТН - тепловой накопитель;

ЭУ – энергетическая установка.