

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКТИВНО-КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ГИБРИДНОЙ УСТАНОВКИ, ОСНАЩЕННОЙ ДВИГАТЕЛЕМ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ

Д.И. Денисов

den.denicov.vip@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Актуальность статьи обусловлена возможностью использования двигателей с внешним подводом теплоты для космического энергоснабжения. К преимуществам этих двигателей относятся высокая эффективность термодинамического цикла, хорошие экологические качества, расширение децентрализованного получения энергии, возможность использования широкого спектра энергоносителей — нефтяных и альтернативных топлив, солнечной энергии, других источников теплоты. В результате выполненных исследований создана информационная модель гибридной установки, оснащенной свободнопоршневым двигателем с внешним подводом теплоты, проанализированы конструкция и рабочий цикл этого двигателя, созданы модели и проведен расчет его параметров.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, двигатель с внешним подводом теплоты, двигатель Стирлинга, гибридная установка, электрогенератор

Введение. В современной энергетике и на транспорте наиболее распространенными типами тепловых двигателей являются бензиновые и дизельные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) [1–3]. Это объясняется совершенством конструкций этих двигателей, их высокой топливной экономичностью, возможностью использования в них сравнительно дешевых нефтяных моторных топлив [4–6]. В качестве альтернативы ДВС рассматривают двигатели с внешним подводом теплоты (ДВПТ), или двигатели Стирлинга, в которых используется теплота от внешних источников энергии [7–9]. Преимуществами этих двигателей являются высокая эффективность термодинамического цикла, хорошие экологические качества, расширение децентрализованного получения энергии, возможность использования широкого спектра энергоносителей — нефтяных и альтернативных топлив, солнечной энергии, теплоты от других типов энергетических установок [10–12].

Широкое применение двигателя с внешним подводом теплоты для транспорта сдерживается сравнительно продолжительным временем, необходимым для запуска двигателя, а также невысоким отношением мощности двигателя к массе транспортного средства. Тем не менее работы по совершен-

ствованию конструкции и параметров двигателей с внешним подводом теплоты проводятся крупнейшими фирмами. В частности, Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства NASA (National Aeronautics and Space Administration) создано несколько образцов двигателей с внешним подводом теплоты различного назначения.

Известны различные конструктивные разновидности двигателей с внешним подводом теплоты [13, 14]. В качестве одного из наиболее перспективных рассматривают свободнопоршневой двигатель Стирлинга (СПДС). Однако требуются дальнейшие исследования возможностей совершенствования таких двигателей. Цель работы — формирование информационной модели СПДС для проведения реинжиниринга агрегата, а также создание вакуумного испытательного стенда для проведения виртуальных и физических испытаний.

Конструкция и характеристики СПДС. В качестве объекта исследования выбран СПДС типа SCA-5 мощностью 5 кВт [15]. Разрез этого двигателя представлен на рис. 1. Он используется NASA для проведения научных исследований в области космического энергоснабжения и работает в составе генераторной установки с электрогенератором. Рабочим телом СПДС служит гелий. Максимальное давление цикла составляет 15 МПа, максимальная температура — 830 К, минимальная — 415 К. Резонансная частота — 85 Гц, номинальный ход поршня — 22 мм, при перегрузке до 6 кВт его ход увеличивается до 24 мм, ресурс работы двигателя — 44 000 часов; p - V -диаграмма рабочего цикла двигателя показана на рис. 2.

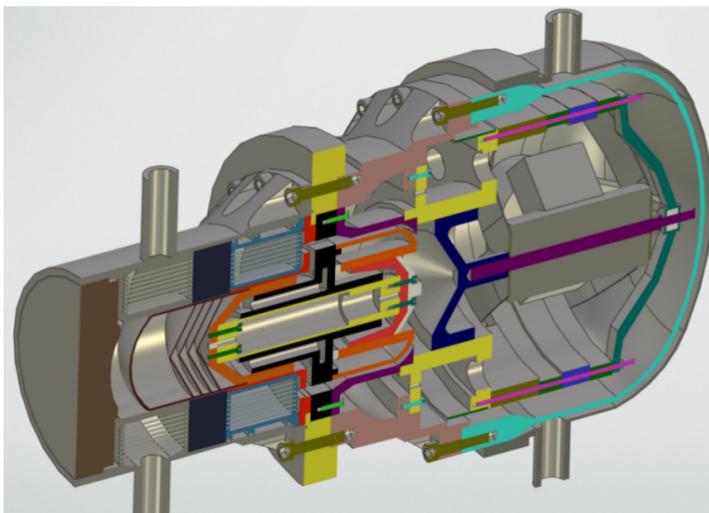


Рис. 1. Разрез СПДС типа SCA-5

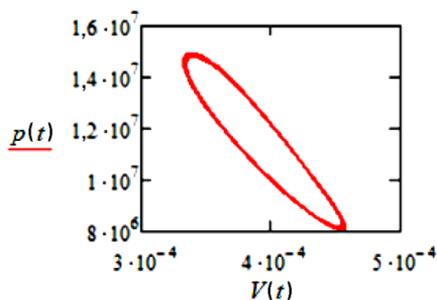


Рис. 2. p - V -диаграмма рабочего цикла СПДС

Реализация цикла этих двигателей имеет значительные преимущества по сравнению с такими циклами, как циклы Ренкина или Брайтона. Двигатели, работающие в оппозитной конфигурации, сбалансированы. Кроме того, они работают с высоким КПД ($> 30\%$) при отношении температур горячего и холодного блока от 2 до 2,5 (вместо 3 и более, как в других системах); это приводит к тому, что радиатор для теплоотвода меньше, чем в циклах Брайтона или Ренкина. Установки с этими двигателями сохраняют свою непрерывную и безотказную работу без обслуживания продолжительное время благодаря нескольким особенностям конструкции и принципа работы. Во-первых, в агрегате используется сжатое рабочее тело — газ высокого давления, который циркулирует между рабочими полостями через теплообменники. При этом нет необходимости сжигать топливо внутри цилиндра, как в традиционных ДВС, что уменьшает возможность поломок и снижает количество деталей, которые могут выйти из строя. Во-вторых, применяются упругие механические элементы, что также уменьшает количество элементов, которые могут выйти из строя и которые нужно обслуживать.

Вакуумный испытательный стенд. Вакуумные испытания являются важным этапом в разработке информационной модели СПДС и позволяют оценить эффективность работы двигателя в условиях, приближенных к космическим. Одна из основных целей вакуумных испытаний — проверка герметичности всех компонентов двигателя и стенда. Герметичность критически важна для обеспечения эффективной работы двигателя, поскольку утечки газа могут привести к снижению производительности и увеличению потерь энергии. При проведении вакуумных испытаний осуществляется оценка производительности двигателя на различных режимах работы. Измерение параметров, таких как мощность, КПД и термодинамические характеристики, дает возможность определить, насколько двигатель соответствует заданным требованиям. В процессе вакуумных испытаний можно проводить исследования

термодинамических процессов, происходящих в двигателе. Это включает в себя анализ изменений температуры и давления в различных точках системы, что позволяет выявить оптимальные условия эксплуатации СПДС. Вакуумные испытания помогают выявить недостатки конструкции двигателя и стенда, которые могут проявиться только в условиях вакуума. Это проблемы с материалами, конструктивными особенностями или недостаточной прочностью элементов. В ходе испытаний выполняют проверку систем управления и мониторинга, которые отвечают за автоматизацию процессов и сбор данных.

Вакуумный испытательный стенд моделирует работу СПДС как генератора в космической системе. При этом проводится имитация работы гибридной энергосистемы. Основное потребление — генерация двигателем. Роль основного потребителя играет первый аккумулятор. При импульсах нагрузки используется второй аккумулятор (при превышении нагрузки заряд расходуется, при занижении — накапливается). Исполняет вышеописанный цикл блок управления (контроллер). Нагрев имитируется электронагревом муфельной печи, теплота передается через тепловую трубу в горячую полость двигателя. Общий вид стенда представлен на рис. 3.

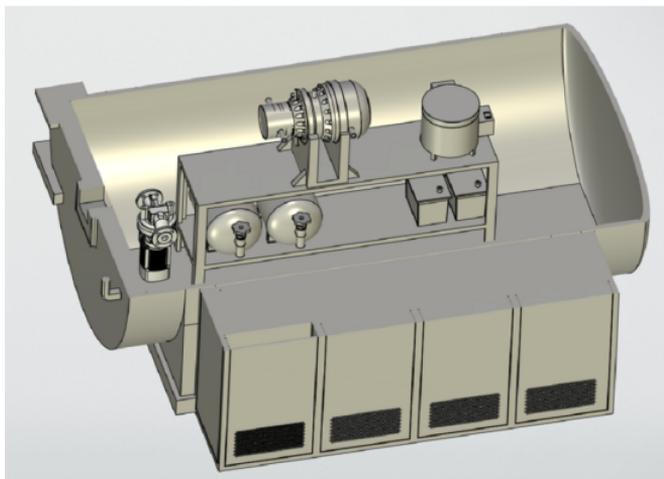


Рис. 3. Вакуумный испытательный стенд

Рассмотрим конструктивные элементы этого стенда от начала генерации энергии до ее передачи потребителю. Имитатором электронагрева служит муфельная печь, обеспечивающая равномерный нагрев горячего конца теп-

ловой трубы до желаемой температуры. В качестве теплопередающего элемента между муфельной печью и горячей полостью СПДС использована тепловая труба. Классическая тепловая труба представляет собой герметичный тонкостенный металлический сосуд, внутренние стенки которого выложены капиллярно-пористым материалом (так называемым фитилем). Он имеет малую толщину и пропитан рабочей жидкостью, а внутренний объем трубы (паровой канал) заполнен паром этой жидкости при пониженном давлении. Если один конец тепловой трубы подключить к источнику с температурой T_1 , а другой — к приемнику с температурой T_2 ($T_2 < T_1$), то между ними будет происходить теплообмен. Пар благодаря капиллярному эффекту переносит тепло к радиатору, где происходит конденсация, после чего жидкость возвращается обратно.

Сконденсировавшаяся жидкость возвращается в зону испарения одним из перечисленных способов: под действием капиллярных сил по фитилю (такие трубы называются фитильными); под действием сил тяжести (гравитационных сил) — такая труба называется термосифоном; под действием центробежных сил — в них возврат конденсата осуществляется с помощью центробежных сил (толщина пленки конденсата в зоне конденсации больше, чем в зоне испарения). Принцип работы тепловой трубы показан на рис. 4. Современные тепловые трубы, которые используются в СПДС космического назначения, имеют следующие характеристики: диапазон рабочих температур — 4...2300 К, передаваемая мощность — до 20 кВт/см², скорость передачи теплоты ограничена звуковым пределом, ресурс — 20 000 ч. Перечень материалов, используемых в тепловых трубах, а также их теплоносителей представлен в таблице.

Материалы, используемые для изготовления тепловых труб

Теплоноситель	Температурный интервал, °С	Материал
Гелий	-271...-269	Алюминий, нержавеющая сталь
Аммиак	-60...100	Алюминий, нержавеющая сталь
Фреон 11	-40...120	Алюминий, медь
Ацетон	0...120	Медь
Вода	30...200	Медь
Ртуть	250...650	Углеродистая и нержавеющая сталь
Натрий	600...1200	Нержавеющая сталь, никель, молибден
Серебро	1800...2300	Вольфрам, молибден

С учетом характеристик СПДС можно заключить, что для исследуемого двигателя подходит температурный диапазон 600...1200 °С, материал — нержавеющая сталь, никель, молибден; теплоноситель — натрий; структура — капиллярно-пористая с фитилем. Энергетическая оценка системы с СПДС представлена на рис. 5.

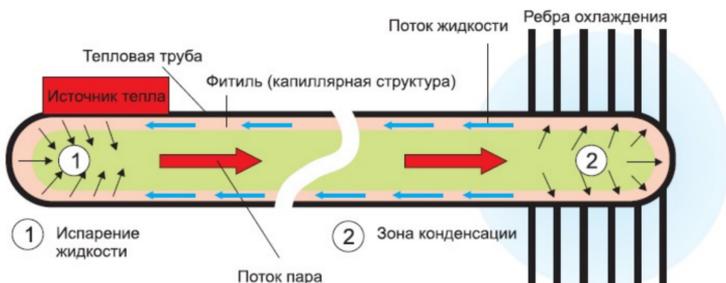


Рис. 4. Иллюстрация принципа работы тепловой трубы

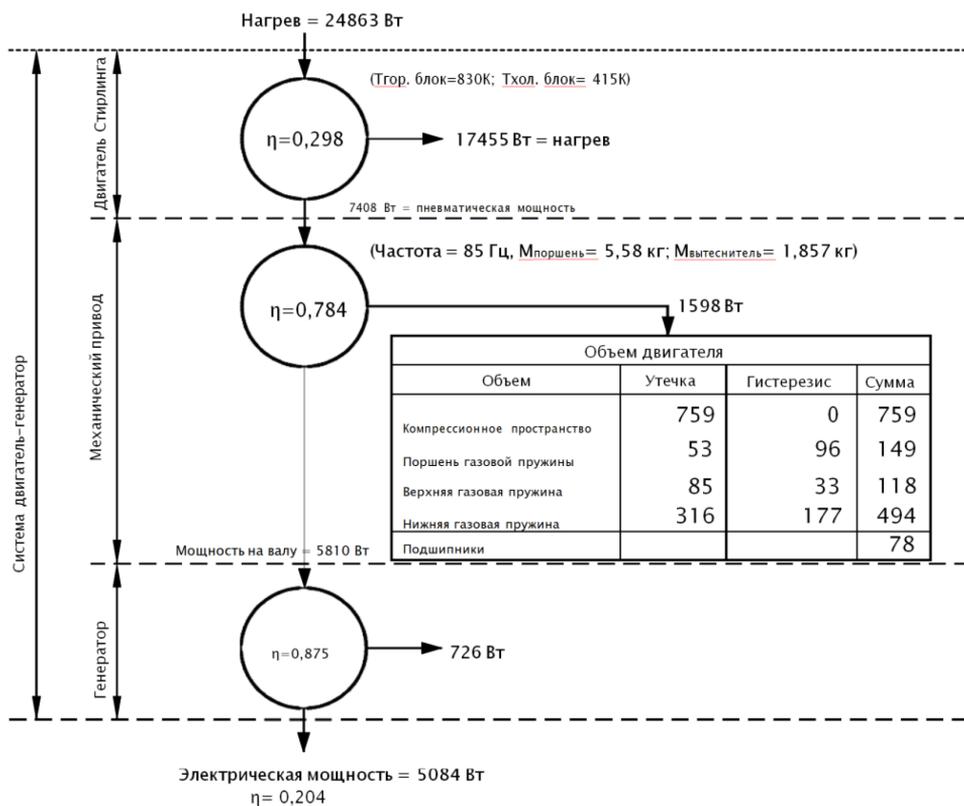


Рис. 5. Энергетическая оценка системы с СПДС

Для обеспечения необходимой мощности необходимо провести расчет системы «муфельная печь — тепловая труба — СПДС». При расчете необходимо определить и установить граничные условия для системы. Для рассматриваемой системы эти граничные условия следующие. Необходимая мощность на горячей головке СПДС — 25 кВт; КПД муфельной печи — 0,85, ее рабочая температура — до 1100 °С, мощность муфельной печи — 50 кВт, температура на горячем конце тепловой трубы — 900 °С, температура на холодном конце тепловой трубы — 660 °С, температура на горячей головке двигателя — 560 °С, КПД тепловой трубы — 0,95, общий КПД системы электронагрева («муфельная печь — тепловая труба — СПДС») — 0,8075. Используя эти граничные условия, можно выполнить расчет тепловой трубы (рис. 6).

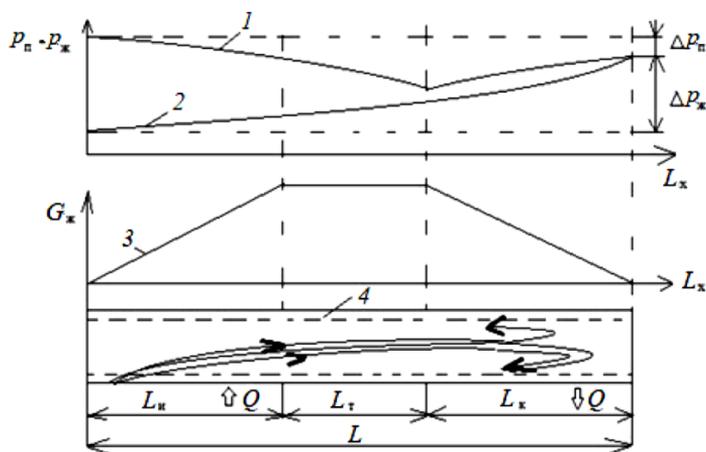


Рис. 6. Схема расчета тепловой трубы:

1 — изменение давление пара по длине трубы p_n ; 2 — изменение давление жидкости $p_ж$; Δp_n — перепад давления пара по длине трубы; $\Delta p_ж$ — перепад давления жидкости по длине трубы; 3 — массовый расход жидкости $G_ж$ через фитиль; 4 — капиллярно-пористый фитиль; L — длина тепловой трубы, м; L_x — длина фитиля тепловой трубы, м; L_t — длина транспортной зоны, м; $L_{и}$ — длина зоны испарения, м; L_k — длина зоны конденсации, м; Q — передаваемый тепловой поток пара, Вт

В любом сечении тепловой трубы разность статических давлений на границе раздела жидкости и паровой фазы (на поверхности фитиля) должна уравниваться разностью давлений в капиллярах. Максимальная раз-

ность давлений возникает в начале зоны испарения, где вся жидкость покидает фитиль. Работа тепловой трубы возможна при условии, когда суммарные потери давления в тракте пара и жидкости оказываются равными или меньшими движущих сил (капиллярных, гравитационно-массовых):

$$\Delta p_{\text{п}} + \Delta p_{\text{ж}} \leq 2\sigma \frac{\cos \Theta}{r_0} + \rho g L \sin \gamma, \quad (1)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения; Θ — краевой угол смачивания жидкостью капилляра; r_0 — радиус поры капилляра; γ — угол наклона оси тепловой трубы к горизонту; ρ — плотность теплоносителя; g — ускорение свободного падения.

При стационарном процессе, постоянном удельном тепловом потоке на стенках активных зон тепловой трубы ($q_w = \text{const}$), ламинарных потоках режима движения жидкости и пара, суммарное сопротивление фитиля ($\Delta p_{\text{ж}}$) и парового канала ($\Delta p_{\text{п}}$) можно представить в виде

$$\Delta p_{\text{п}} + \Delta p_{\text{ж}} = \frac{(L + L_{\text{т}})Q}{r_{\text{ф}}} \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{2\rho_{\text{ж}} K_{\text{к.с}} f_{\text{ф}}} + \frac{16\mu_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} d_{\text{п}}^2 f_{\text{п}}} \right), \quad (2)$$

где $r_{\text{ф}}$ — скрытая теплота фазового перехода, Дж/кг; $f_{\text{ф}}$ — поперечное сечение фитиля, м²; $K_{\text{к.с}}$ — капиллярная проницаемость фитиля; $d_{\text{п}}$ и $f_{\text{п}}$ — диаметр и поперечное сечение парового канала; $\mu_{\text{ж}}$ и $\mu_{\text{п}}$ — коэффициент динамической вязкости жидкости и пара; $\rho_{\text{ж}}$ и $\rho_{\text{п}}$ — плотность жидкости и пара. Совместное решение уравнения (1) и (2) позволяет определить максимальный тепловой поток, передаваемый тепловой трубой и ограниченный ее капиллярными свойствами ($Q_{\text{к}}$):

$$Q_{\text{к}} = \frac{2 \frac{\sigma}{r_0} + g p_{\text{ж}} L \sin \gamma}{\frac{L + L_{\text{т}}}{r_{\text{ф}}} \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{2\rho_{\text{ж}} K_{\text{к.с}} f_{\text{ж}}} + \frac{16\mu_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} d_{\text{п}}^2 f_{\text{п}}} \right)}. \quad (3)$$

Для анализа полученного выражения рассмотрим частный случай ($\gamma = 0$, $\sin \gamma = 0$ — горизонтальная труба), $\Delta p_{\text{ж}} > \Delta p_{\text{п}}$, тогда максимальный тепловой поток

$$Q_{\text{к}} = 2 \left[\frac{f_{\text{ф}} K_{\text{к.с}}}{(L + L_{\text{т}}) r_0} \right] \left[\frac{r_{\text{ф}} \rho_{\text{ж}} \sigma}{\mu_{\text{ж}}} \right] = 2\Phi_{\text{г}} \Phi_{\text{т}}, \quad (4)$$

где $\Phi_{\text{г}}$ отражает геометрические характеристики тепловой трубы; $\Phi_{\text{т}}$ характеризует теплофизические свойства теплоносителя. Тепловой поток, передава-

емый от наружной поверхности к пару за счет теплопроводности, определяется в виде

$$Q = \left(\frac{\lambda_{ст}}{\delta_{ст}} + \frac{\lambda_{ф}}{\delta_{ф}} \right) (t_{и} - t_{п}) F_{и}, \quad (5)$$

где $\delta_{ст}$ — толщина стенки фитиля; $\lambda_{ст}$ — коэффициент теплопроводности стенки и эффективная теплопроводность фитиля (эффективная теплопроводность зависит от пористости, от конструкции и материала фитиля); $t_{и}$ — температура наружной поверхности испарения; $t_{п}$ — температура пара внутри трубы; $F_{и}$ — площадь поверхности зоны испарения.

Аналогично для зоны конденсации

$$Q = \left(\frac{\lambda_{ст}}{\delta_{ст}} + \frac{\lambda_{ф}}{\delta_{ф}} \right) (t_{и} - t_{к}) F_{к}, \quad (6)$$

где $t_{к}$ — температура наружной поверхности конденсата.

Приняв в первом приближении толщину фитиля в области конденсации равной толщине фитиля из (5) и (6) получим, что тепловой поток, передаваемый от наружной поверхности зоны испарения через тепловую трубу наружной поверхности зоны конденсации, может быть рассчитан с использованием выражения

$$Q = \frac{(t_{и} - t_{п})}{R \left(\frac{1}{F_{и}} + \frac{1}{F_{к}} \right)}, \quad (7)$$

где термическое сопротивление $R = \frac{\lambda_{ст}}{\delta_{ст}} + \frac{\lambda_{ф}}{\delta_{ф}}$.

По уравнению (7) можно определить тепловой поток, передаваемый тепловой трубой, зная разность температур поверхности испарителя и конденсатора. После определения плотности теплового потока по формуле (7) нужно найти максимальное значение плотности теплового потока по формулам (3) и (4) и сравнить их между собой. Тепловая труба передает требуемое количество теплоты, если Q , определенное по формуле (7), меньше или равно Q , вычисленного по формуле (3). Тепловая энергия от тепловой трубы поступает на СПДС — в горячую полость двигателя. Результаты теплового расчета горячей головки двигателя представлены на рис. 7 и 8.

Компоновки двигателя могут различаться в зависимости от особенностей его использования. В данной работе исследована модель СПДС типа SCA-5 — его 3D-модель представлена выше на рис. 1. Двигатель преобразует тепловую

энергию в электрическую с использованием линейного генератора, расположенного в задней (холодной) полости двигателя. В исследуемой двигатель-генераторной установке установлен блок управления или контроллер, который служит регулирующим органом в этой установке. В ней использовано два аккумулятора. Первый аккумулятор выполняет функцию основного потребителя системы. Его потребление равно генерации СПДС. Второй аккумулятор реализует гибридную энергосистему, он питает потребителя при превышении нагрузки и накапливает энергию при занижении потребления энергии. Другими элементами рассматриваемой системы являются баки с рабочим газом и охладителем, а также насос. Бак подкачки рабочего газа — гелия — находится на нижней полке стенда, он подключен гибкой трубой к штуцеру подкачки газа в двигателе. Бак с охладителем подведен к штуцерам с циркулирующим охлаждением в двигателе. Рабочее тело и охладитель перекачиваются насосом внутри камеры. Испытательный стенд расположен в вакуумной камере, прототипом которой послужили лабораторные установки ЦАГИ.

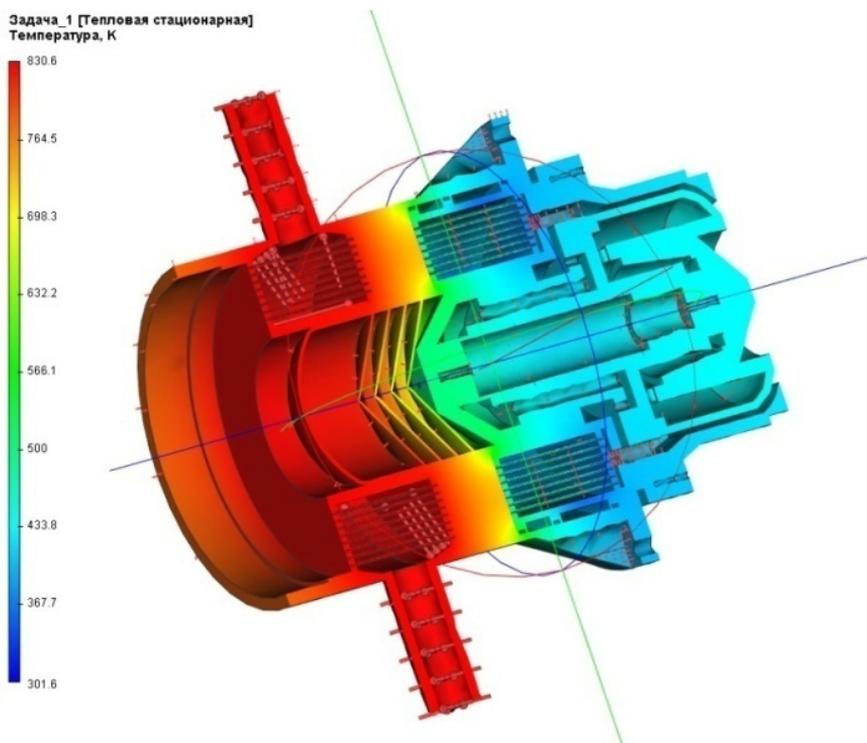


Рис. 7. Результат расчета теплового состояния блока вытеснителя и горячей головки двигателя

Основная задача исследования — смоделировать установку вакуумного испытательного стенда. При этом необходимо подготовить список компонентов установки, среди которых вакуумный насос, токоподводы и датчики режимных параметров. Масляный пластинчато-роторный вакуумный насос типа Busch R5 имеет следующие технические характеристики: предельное остаточное давление — 50...10 000 Па, быстродействие — 16...750 м³/ч, номинальная мощность электродвигателя — 0,6...18,5 кВт. Этот насос подходит для имитации космических условий, он способен создавать вакуум по абсолютному давлению 100 Па. Быстрота действия позволяет за несколько десятков минут достичь данного давления, что означает высокую производительность экспериментальной установки.

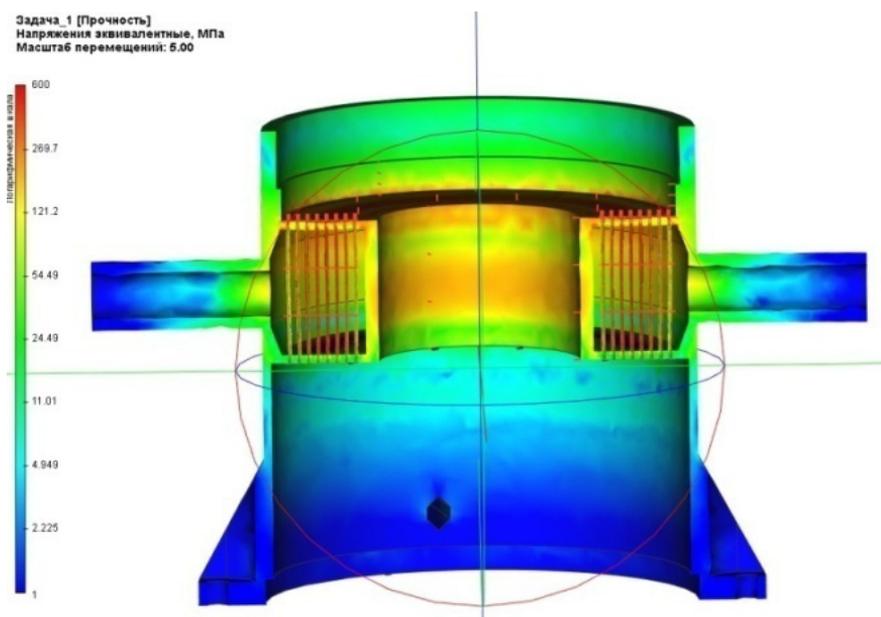


Рис. 8. Результат расчета на термпрочность горячей головки двигателя

Для моделирования вакуумного испытательного стенда применен ряд датчиков, среди которых два датчика давления — модели Honeywell ASDX series для измерения давления в камере, модели Teledyne Hastings HPM series — для вакуума. Необходимы два датчика температуры — один для измерения температуры рабочего тела, другой — для температуры стенда, оба датчика модели Omega Engineering OS136 (термопара типа К). Для измерения потока рабочего тела (газов) использован датчик потока модели Bronkhorst EL-Flow

series. Для измерения перемещения поршня СПДС выбраны два датчика перемещения модели Renishaw RGH22 (линейный энкодер). Необходимы два датчика вибрации (для мониторинга вибрации стенда и двигателя), модель датчиков PCB Piezotronics 352C33. Для оценки акустического воздействия использован датчик уровня шума модели Brüel KjærType 2250. Для обработки сигналов от указанных датчиков использована система сбора данных фирмы National Instruments и блок управления. Сама испытательная установка состоит из муфельной печи, тепловой трубы, СПДС, блока управления, двух аккумуляторов в корпусе, двух баков, двух насосов, труб и проводов. Муфельная печь модели Rohde Paqu TR 80 VARIO цилиндрическая, горизонтальная, обеспечивает температуру до 1150 °С. По заданной геометрии и проведенным расчетам изготовлена специальная тепловая труба. В установке использованы два аккумулятора типа Victronenergy с номинальным напряжением 12,8 В (технология: LiFePO_4) емкостью 100 А · ч. В систему входят два циркулярных насоса типа Purity IN-Line PT 65-240/22, обеспечивающие подачу от 18 до 48 м³/ч.

Представленная разработка может быть использована не только для проведения научных исследований в области космического энергоснабжения. Одной из важнейших проблем является разработка энергосистемы на основе ядерного реактора и СПДС, соединенных между собой тепловыми трубами. Создание рассмотренного испытательного стенда во многом продвинет технологии в области использования свободнопоршневых двигателей Стирлинга.

Заключение. В результате исследований можно сделать следующие основные выводы.

1. Альтернативой поршневым двигателям внутреннего сгорания служат двигатели с внешним подводом теплоты. Работа этих двигателей основана на внешнем подводе теплоты от различных источников энергии.

2. К преимуществам двигателей с внешним подводом теплоты относятся высокая эффективность термодинамического цикла, хорошие экологические качества, возможность расширения децентрализованного получения энергии, возможность использования широкого спектра энергоносителей — нефтяных и альтернативных топлив, солнечной энергии, других источников теплоты.

3. В результате выполненных исследований создана информационная модель гибридной установки, оснащенной свободнопоршневым двигателем с внешним подводом теплоты, проанализированы конструкция и рабочий цикл этого двигателя, созданы модели и проведен расчет параметров установки.

4. Создание информационной модели для опытного образца агрегата преобразования энергии на базе СПДС подготовит базу для развития цифровой базы знаний по этому виду техники.

Литература

- [1] Александрова А.А., Иващенко Н.А., ред. *Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV. Двигатели внутреннего сгорания*. Москва, Машиностроение, 2013, 784 с.
- [2] Поликер Б.Е., Михальский Л.Л., Марков В.А., Васильев В.К., Буханец Д.И. *Дизельные двигатели для электроагрегатов и электростанций*. Москва, Изд-во «Легион-Автодата», 2006, 328 с.
- [3] Рыжов В.А., Ионин В.Е. Перспективные направления по совершенствованию рабочего процесса среднеоборотных дизелей. *Двигателестроение*, 2025, № 1, с. 3–13.
- [4] Чайнов Н.Д., ред. *Конструирование и расчет поршневых двигателей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, 536 с.
- [5] Александрова А.А., Марков В.А., ред. *Нефтяные моторные топлива: экологические аспекты применения*. Москва, ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2014, 691 с.
- [6] Грачев В.В., Фурман В.В., Хамидов О.Р., Кулманов Б.Т. Повышение эксплуатационной топливной экономичности маневрового тепловоза оптимизацией регулировочных параметров дизельного двигателя. *Двигателестроение*, 2024, № 2, с. 18–29.
- [7] Уокер Г. *Двигатели Стирлинга*. Москва, Машиностроение, 1985, 408 с.
- [8] Ридер Г., Хупер Ч. *Двигатели Стирлинга*. Москва, Мир, 1986, 464 с.
- [9] Халифе Х., Смирнов С.В., Меркулов В.И., Борисов Ю.А. Перспективы использования свободнопоршневого двигателя Стирлинга для генерации электроэнергии в космосе. *Двигателестроение*, 2024, № 2, с. 56–68.
- [10] Столяров С.П., Маунг Йе, Столяров А.С. Базовое уравнение математической модели элемента внутреннего контура двигателя Стирлинга с учетом процесса теплообмена. *Двигателестроение*, 2024, № 2, с. 69–74.
- [11] Зенкин В.А., Лисовский Г.Е., Марков В.А., Трифионов В.Л., Гусев П.Г. Система регулирования частоты вращения вала двигателя Стирлинга. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2024, № 2, с. 39–49.
- [12] Петров А.И. К вопросу оптимизации теплообменного контура двигателя Стирлинга. *Двигателестроение*, 2021, № 4, с. 28–30.
- [13] Дворцов В.С., Ткаченко М.М., Куколев М.И. Двигатели Стирлинга: Развитие конструкций и методов исследования. *Двигателестроение*, 2016, № 4, с. 10–14.
- [14] Тихонов Е.А., Базыкин В.И., Муханов Н.С. Кинематическая параметризация механизма двигателя Стирлинга типа «Альфа» свободной компоновки. *Двигателестроение*, 2020, № 4, с. 12–17.
- [15] Chapman P.A., Walter T.J., Brandhorst H.W., Kirby R.L. Design and Fabrication of a 5-kWe Free-Piston Stirling Power Conversion System. *Paper AIAA-2008-*

5658, *6th International Energy Conversion Engineering Conference*, Cleveland, OH, 2008. <https://doi.org/10.2514/6.2008-5658>

Поступила в редакцию 15.05.2025

Денисов Данила Игоревич — магистрант кафедры «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Денисов Д.И. Моделирование вариантов конструктивно-компоновочных решений для гибридной установки, оснащенной двигателем с внешним подводом теплоты. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 06 (101). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/pmc/ejrknx/1074.html>

MODELING DESIGN AND LAYOUT OPTIONS FOR A HYBRID PLANT EQUIPPED WITH AN ENGINE WITH EXTERNAL HEAT SUPPLY

D.I. Denisov

den.denicov.vip@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The relevance of the article is due to the possibility of using engines with external heat supply for space power supply. The advantages of these engines are the high efficiency of the thermodynamic cycle, good environmental qualities, the expansion of decentralized energy production, the possibility of using a wide range of energy sources — petroleum and alternative fuels, solar energy, and other sources of heat. As a result of the research, an information model of a hybrid installation with a free-piston engine with external heat supply was created, the design and operating cycle of this engine were analyzed, models were created and its parameters calculated.

Keywords: internal combustion engine, engine with external heat supply, Stirling engine, hybrid installation, electric generator

Received 15.05.2025

Denisov D.I. — Master's student of Department of Combined Engines and Alternative Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Denisov D.I. Modeling design and layout options for a hybrid plant equipped with an engine with external heat supply. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 06 (101). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/pmc/ejrknx/1074.html>