

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДУЛЬНОЙ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ С ГОРЕЛКОЙ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

П.Г. Гусев

gusev.soul1000@gmail.com

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

Рассмотрена возможность использования двигателей с внешним подводом теплоты для энергоснабжения потребителей. Выполнено расчетное исследование процессов теплообмена в таком двигателе с инфракрасной каталитической горелкой, работающей на метане. Проведен анализ потерь теплоты и эффективных способов теплоотведения. Рассмотрены различные механизмы теплообменных процессов, включая передачу тепла радиацией, теплопроводность и конвекцию в компонентах системы. Исследование теплообмена в работе включает в себя детальный расчет теплообменных коэффициентов, анализ тепловых потерь и оптимизацию системы охлаждения. Результаты работы подтверждают техническую осуществимость и потенциал предлагаемой гибридной системы. Для дальнейшего повышения ее эффективности рекомендуется оптимизировать геометрию теплообменников, применять более совершенные материалы и развивать технологии.

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

**Введение.** Двигатели с внешним подводом теплоты (ДВПТ) — двигатели Стирлинга — представляют собой тепловые машины, работающие на основе принципа разности температур между горячими и холодными источниками [1–3]. Эти двигатели привлекают внимание разработчиков благодаря своей высокой эффективности, экологичности и способности работать на топливе различных типов, включая возобновляемые источники энергии [4–6]. Известны различные конструктивные разновидности ДВПТ [7–9]. В качестве одного из наиболее перспективных рассматривается свободнопоршневой двигатель Стирлинга (СПДС) [10–12]. Однако требуются дальнейшие исследования по определению возможностей совершенствования таких двигателей.

Одной из проблем, ограничивающих эффективность работы ДВПТ, служит процесс теплообмена между рабочими компонентами двигателя и окружающей средой [13–15]. Поэтому оптимизация теплообменных процессов в таких двигателях представляет собой актуальную задачу, требующую внимательного исследования и применения современных инженерных решений. Целью статьи является расчетное исследование процессов теплообмена

в СПДС с инфракрасной каталитической горелкой (ИИГ), работающей на метане, анализ потерь теплоты и эффективных способов теплоотведения. Также рассмотрены различные механизмы теплообменных процессов, включая передачу теплоты радиацией, теплопроводность и конвекцию в компонентах системы, таких как нагреватель, регенератор и охладитель. Исследование теплообмена в статье включает в себя детальный расчет теплообменных коэффициентов, анализ тепловых потерь и оптимизацию системы охлаждения. Особое внимание уделено расчету потерь теплоты в окружающую среду и улучшению эффективности теплообменников.

**Исследуемая установка гибридной системы на базе двигателя с внешним подводом теплоты с горелкой инфракрасного излучения.** За основу гибридной энергоустановки выбран СПДС типа РСК-80 космического назначения (рис. 1). Его рабочие параметры представлены ниже:

Мощность, кВт .....	3
Частота, Гц .....	60
Температура нагрева, °С .....	400...600
Температура охлаждения, °С .....	50
Рабочее давление, МПа .....	3,4
Диаметр/ ход рабочего поршня, мм .....	106/20
Диаметр / ход вытеснительного поршня, мм .....	139/22
Ресурс, тыс. ч .....	70

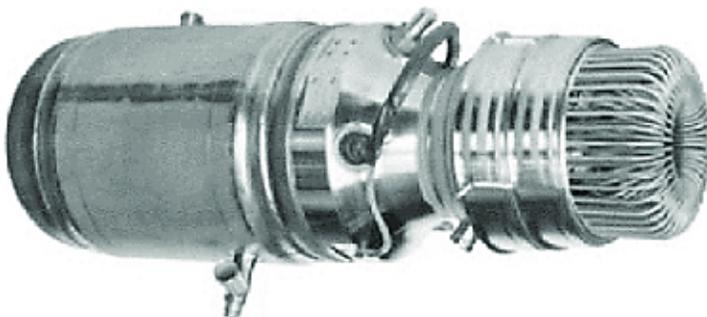
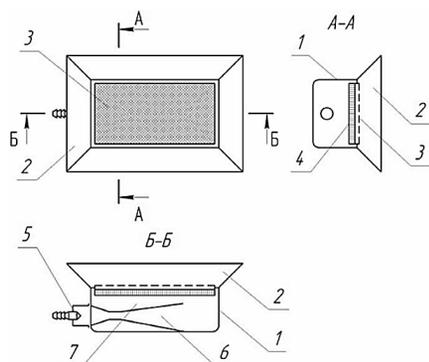


Рис. 1. Общий вид СПДС типа РСК-80

В качестве системы нагрева этого двигателя использована горелка инфракрасного излучения (ГИИ), работающая на газообразном топливе. Двигатель работает на линейный электрогенератор. Для поддержания дежурной мощности применяется солнечная электростанция (СЭС) мощностью до 2 кВт. Предусмотрена система утилизации энергии отработавших газов (ОГ) со сво-

бодным турбокомпрессором. Для накопления энергии использована аккумуляторная батарея (АКБ). Установка имеет следующие параметры: генерируемая электрическая мощность СПДС — 3 кВт; рабочий газ — гелий, генерируемая электрическая мощность соосным с турбокомпрессором электрогенератором — 0,1 кВт; генерируемая мощность СЭС — 0,2 кВт (усредненная), автономность на срок до 1 месяца; отсутствие шума и вибраций; практически полное отсутствие теплового следа благодаря системе утилизации теплоты; основной источник энергии — газообразное топливо; период безобслуживаемой эксплуатации — до 1 года при наличии емкостей для газа заданного объема.

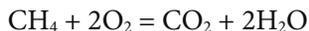
**Рабочие параметры СПДС типа РСК-8.** В качестве топлива для ГИИ установки используется природный газ, смешиваемый с кислородом в качестве окислителя. Внешний вид ИКГ представлен на рис. 2. Основная задача установки — осуществить максимально эффективное сгорание газа. Это достигается с помощью матрицы с увеличенной эффективной площадью. Перед матрицей газ оказывается в области с повышенным давлением, что приводит к пропусканию его через узкие каналы матрицы под давлением. Проходя через них, он нагревается, и начинается горение. Конструкция имеет дополнительные элементы — отражатели, сетка, рефлекторы. Они увеличивают поверхность сгорания газа. Сетка помогает догоранию газа после срывания с матрицы. Отражатель снижает потери тепла во внешнюю среду. Рефлектор помогает сосредоточить и направить излучаемое тепло. Основным элементом ГИИ, отвечающий за качество процессов теплообмена, а также за полноту сгорания топлива, — матрица. Сконструирована керамическая матрица с шестигугольными сотами. В качестве топлива можно использовать газообразное топливо. Многотопливность позволяет раскрыть потенциал установки в различных условиях, а также в зависимости от класса экологичности и норм токсичности в заданной местности использовать определенный тип топлива.



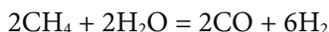
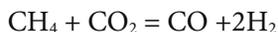
**Рис. 2.** Схема устройства горелки инфракрасного излучения:

- 1 — корпус; 2 — рефлектор; 3 — сетка; 4 — керамический элемент (насадка); 5 — сопло; 6 — смеситель;
- 7 — распределительная камера

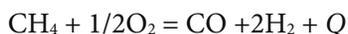
К потенциальным топливам относятся метан, природный газ, водородное топливо, пропан-бутановые смеси, биогаз. Возможность применения биогаза открывает возможность эксплуатации установки на объектах мусоропереработки. Рассмотрена возможность использования в качестве топлива метана. Полное окисление метана кислородом проходит по реакции



Взаимодействие метана с продуктами — по реакциям



Суммарное уравнение реакции имеет вид



Именно последнее уравнение служит исходной точкой теплового расчета. Теперь, зная массовый расход природного газа (метана) и окислителя, можно рассчитать количество высвобождаемой энергии. Теплота сгорания метана составляет около 802 кДж/моль (при стандартных условиях). В ГИИ сгорание протекает без пламени благодаря каталитической матрице, выполненной из специальной керамики. Матрица покрыта слоем катализатора, который инициирует окисление метана даже при умеренной температуре. Это обеспечивает стабильный и равномерный тепловой поток. Тепловая энергия, выделяемая при сгорании, передается стенкам U-образных трубок нагревателя. Этот процесс происходит радиационным способом — излучением тепловой энергии от раскаленной каталитической матрицы. Процесс радиационной передачи теплоты описывается законом Стефана — Больцмана.

Система утилизации теплоты ОГ включает электрогенератор на приводе от турбины, приводимой в движение потоком ОГ, — Motorgeneratorunit — Heat (MGU-H). Решение о принятии данной системы обусловлено наличием при сгорании ОГ, имеющих высокую остаточную температуру и давление. Принципиальное устройство данной системы заключается в соосной установке электрогенератора на турбокомпрессоре (рис. 3).

Турбокомпрессор (рис. 4) состоит из горячей части, приводимой в движение потоком ОГ, и холодной, приводимой в движение турбиной горячей части. Компрессор создает требуемое давление во впускном трубопроводе и отдает часть мощности на соосно закрепленный электродвигатель. Проведено моделирование данной системы. Электрогенератор обеспечивает питание присоединяемой АКБ при нормальной работе установки (режим 1 — питание от генератора СПДС). В аварийном режиме (при поломке СПДС)

возможна работа подключенных потребителей от АКБ, с небольшой подпиткой от данного электрогенератора (режим 2).

В установке предусмотрена система рекуперации теплоты ОГ. Установка позволяет охладить ОГ, нагреть и подготовить газоздушную смесь для впуска, а также с помощью электромагнитного клапана отрегулировать коэффициент избытка воздуха и парциальный состав смеси с добавлением ОГ. Теплообменник этой системы представляет собой трубчатую систему для отвода остаточной теплоты ОГ. Оно перераспределяется на пропускаемую по внешнему контуру подаваемую газовую смесь, а также по радиатору в жидкостный теплообменник — для нагрева проточной воды. Для регулирования состава газовой смеси применяется электромагнитный регулирующий клапан, общий вид которого дан на рис. 5.

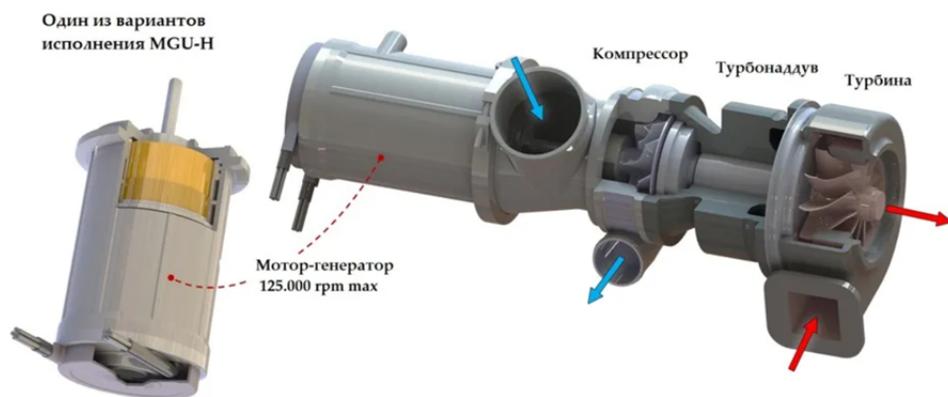


Рис. 3. Принципиальное устройство системы утилизации энергии ОГ

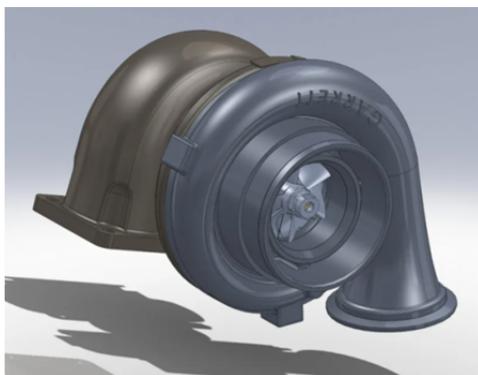


Рис. 4. Общий вид турбокомпрессора

Особенность исследуемого СПДС является наличие жидкостного охлаждения. В основном применяется проточная система. Предлагаемое решение включает в себя три теплообменных процесса в контуре. Проточная вода поступает при температуре 20 °С в рубашку охлаждения СПДС. При прохождении сквозь нее она отбирает излишки остаточной теплоты в рабочей части двигателя и выходит нагретая до температуры порядка 25 °С. Второй процесс теплообмена по течению воды происходит в рубашке охлаждения ГИИ. Здесь она нагревается от 25 до 40 °С. Проходя через теплообменный радиатор в системе рекуперации, вода забирает остаточную теплоту от ОГ, нагреваясь с 40 до 70 °С.



Рис. 5. Общий вид электромагнитного регулирующего клапана рециркуляции

Для корректировки работы системы, контроля параметров установки, а также преобразования различного вида и частоты тока применяется инвертор. Для данной установки необходимо выбрать устройство, которая будет поддерживать функцию отслеживания уровня заряда аккумуляторной батареи (АКБ), а также тонкую настройку системы регулирования и перераспределения мощностей. Подбор конфигурации АКБ осуществляется исходя из требуемых заказчиком условий по автономности и надежности.

**Моделирование гибридной системы на базе двигателя с внешним подводом теплоты с горелкой инфракрасного излучения и элементов системы.** При моделировании установки рассмотрены следующие модули: СПДС, ГИИ, система рекуперации теплоты ОГ, система водонагрева, система MGU-H, система очистки ОГ, система газоподачи. Моделирование СПДС с проведено

помощью программной среды T-Flex. Конструктивная схема СПДС показана на рис. 6. Результаты моделирования приведены на рис. 7.

При моделировании ГИИ создана кольцевая система подачи газа в камеру повышения давления. В модели корпусной части ГИИ реализованы две системы. Первая из них — кольцевая система топливоподачи — выполнена в виде кольцевой трубки по внутренней стороне камеры с тангенциально направленными выпускными клапанами-форсунками. Вторая — система экранирования — служит для снижения теплопотерь.

Для снижения конвективных потерь в ГИИ требуется надежная термоизоляция корпуса. С учетом рассчитанной площади теплообмена и требуемых массогабаритных показателей смоделирована керамическая матрица ГИИ (рис. 8). При моделировании рекуператора теплоты ОГ исследованы процессы теплообмена между ОГ и свежим газом, теплообмена между ОГ и водой, смешивания ОГ и свежего газа регулирующим клапаном.

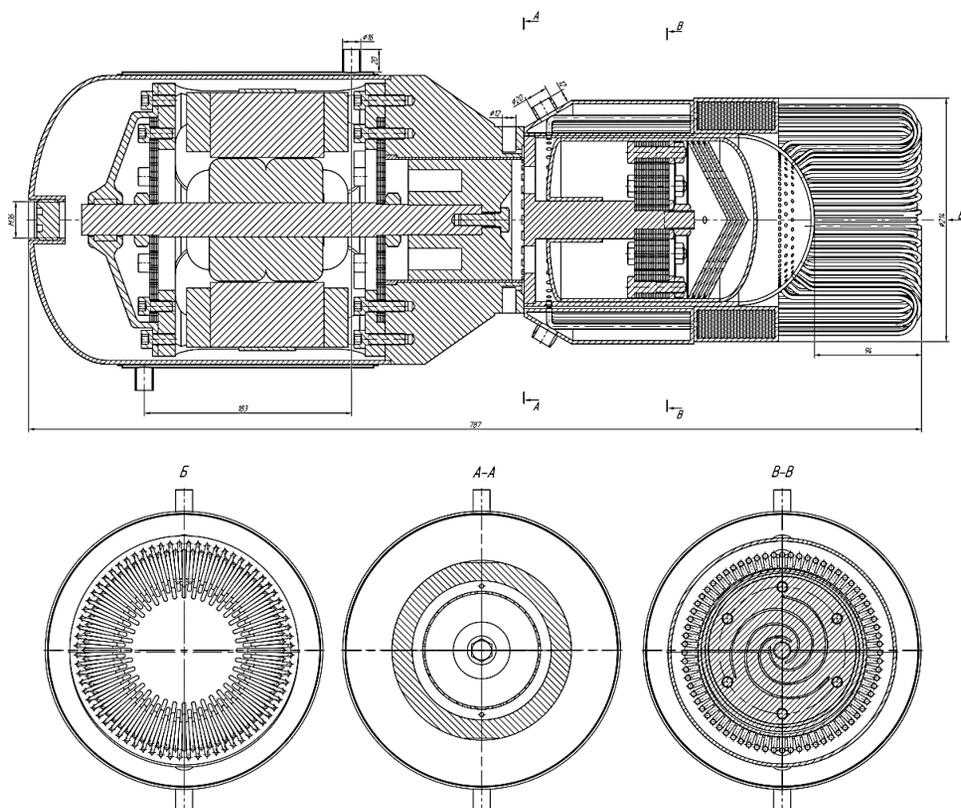


Рис. 6. Конструктивная схема СПДС

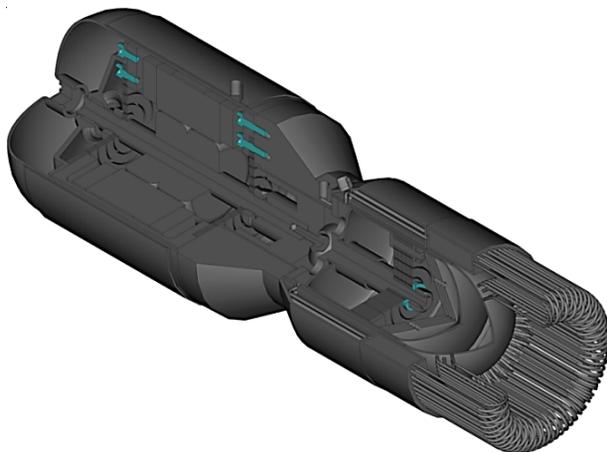


Рис. 7. Результаты моделирования СПДС

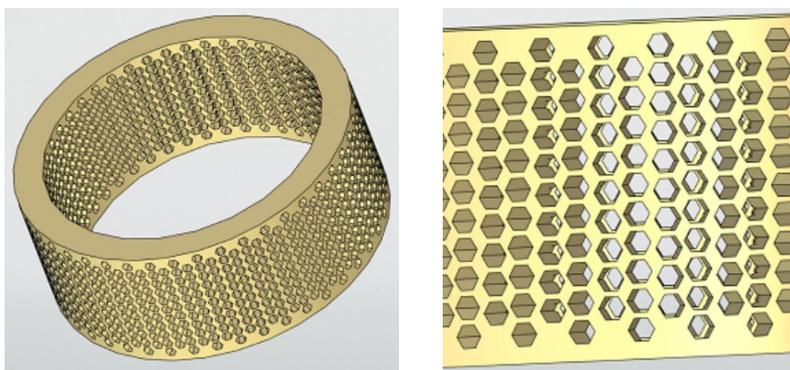


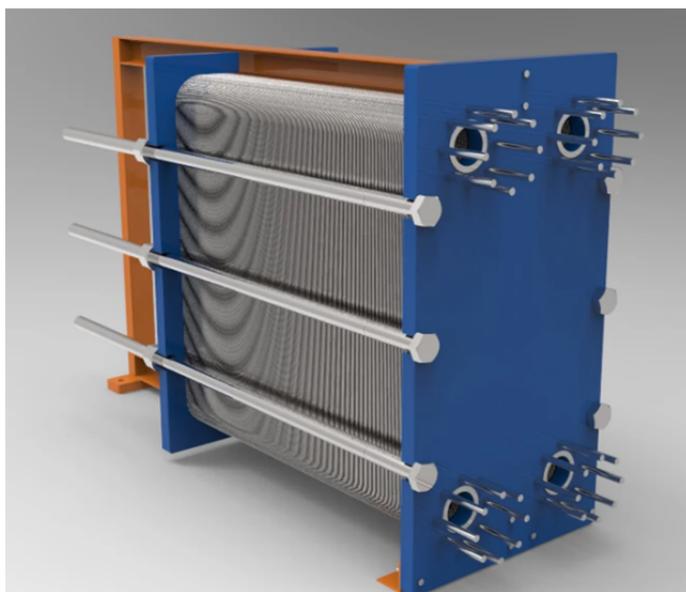
Рис. 8. Керамическая матрица

Особенность работы СПДС — наличие жидкостного охлаждения. В основном применяется проточная система. Проточная вода при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  поступает в рубашку охлаждения СПДС. При прохождении сквозь нее она отбирает излишки остаточной теплоты в рабочей части двигателя и выходит нагретая до температуры примерно  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Конструктивно зона охладителя представляет собой полость в рубашке двигателя, в которой проходят тонкостенные трубки с рабочим телом. Как отмечено выше, в системе использовано три теплообменника. Второй процесс теплообмена по течению воды происходит в рубашке охлаждения ГИИ. Здесь она нагревается от  $25$  до  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Эта система выполнена в виде спиральных трубок, размещенных

по торцевым поверхностям и внешней цилиндрической поверхности (рис. 9). Проходя этот участок, жидкость равномерно нагревается, унося с собой теплоту, которая считается потерями без наличия данной системы. Проходя через теплообменный радиатор в системе рекуперации, вода отбирает теплоту от ОГ, нагреваясь от 40 до 70 °С. Конструктивно предлагается выполнить данный контур в виде радиатора с проходящими через него трубками с проточной водой (рис. 10).



**Рис. 9.** Модель теплообменного контура рубашки охлаждения ГИИ



**Рис. 10.** Устройство радиатора

При моделировании гибридной системы получена ее компоновка. Исполнение установки — контейнерное. Предложено ее исполнение в герметичном влагозащищенном корпусе. Предусмотрены выводы электроэнергии, а также подключение и отвод воды, газа. Предусмотрена система удаления излишков теплоты при отсутствии протока воды. Клапан срабатывает и открывает водосброс. Емкости с газом располагаются на безопасном расстоянии. К преимуществам установки относятся отсутствие вибраций, низкий уровень шума, высокий КПД благодаря утилизации теплоты, автономность работы, модульная схема, дублирование питающих компонентов, АКБ подобраны с учетом характера нагрузок.

Для создания гибридной системы необходимо иметь несколько источников энергии по типу. Выгоднее всего использовать солнечные панели или малые гидроэлектростанции. Дизель-генераторная установка имеет повышенный уровень шума и менее экологичный состав ОГ, характеризуется низкой автономностью и требует повышенного внимания и технического обслуживания. Ветрогенератор при заданных мощностях сильно удорожает конструкцию и монтажные работы. Для поддержания дежурной мощности можно применить СЭС мощностью до 2 кВт. Установка предполагается на каркасе и металлопрофиля. Подключение выполняется к инвертору.

Для работы установки по тепловой мощности 10 кВт использована смесь «метан — кислород». Мощность ИИГ определяется на основе энергетического баланса

$$Q = m_{\text{газа}} \cdot c_{\text{газа}} \cdot \Delta T,$$

где  $Q = 10$  кВт;  $m_{\text{газа}}$  — массовый расход газа (кг/с);  $c_{\text{газа}}$  — удельная теплоемкость газа, принято  $c_{\text{газа}} = 2,0$  Дж/(кг · К) для смеси метана с кислородом;  $\Delta T$  — разность температур газа, принято  $\Delta T = 300$  К. Тогда расход газа составит

$$m_{\text{газа}} = 10,000/2,0 \cdot 300 = 16,67 \text{ кг/ч} = 0,00463 \text{ кг/с}.$$

Молекулярная масса метана ( $\text{CH}_4$ ) составляет 16 г/моль, а кислорода ( $\text{O}_2$ ) — 32 г/моль. Соотношение метана и кислорода в реакции сгорания составляет 1 : 2, т. е. на 1 моль метана нужно 2 молекулы кислорода. Далее определен объемный расход метана и кислорода:

$$m_{\text{метан}} = 0,00463 \text{ кг/с} \cdot 16/(16 + 32) = 0,0031 \text{ кг/с};$$

$$m_{\text{кислород}} = 0,00463 \text{ кг/с} \cdot 32/(16 + 32) = 0,0062 \text{ кг/с}.$$

При расчете габаритов горелки учитывались размеры активной зоны, где происходит химическая реакция. Площадь активной зоны горелки будет зависеть от скорости подачи газа, его расхода и температуры горения. Площадь

А активной зоны горелки может быть рассчитана по формуле для теплообмена через цилиндрическую поверхность:

$$A = \frac{Q}{\alpha \cdot \Delta T},$$

где  $Q$  — тепловая мощность (10 000 Вт);  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи (для метана на каталитической поверхности принимаем около 50...100 Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $\Delta T$  — разница температур между газом и поверхностью матрицы (например, 300 К). Если принять среднее значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha = 75$  Вт/(м<sup>2</sup> · К), то площадь активной зоны горелки составит  $A = 10\,000 / 75 \times 300 = 0,444$  м<sup>2</sup>. Это значение будет зависеть от конкретных размеров и формы горелки.

Для расчета теплопередачи от ИИГ к трубкам нагревателя СПДС использован закон Стефана — Больцмана для радиационного обмена теплотой между двумя телами в виде

$$Q_{\text{радиация}} = \varepsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4),$$

где  $Q_{\text{радиация}}$  — передаваемое количество теплоты, Вт;  $\varepsilon$  — эмиссивность;  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $A$  — площадь поверхности, через которую происходит передача тепла (м<sup>2</sup>);  $T_1$  и  $T_2$  — температуры излучающего тела (горелки) и принимающего тела (трубки), соответственно. После подстановки получаем:

$$Q_{\text{радиация}} = 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,444 (1173^4 - 1073^4) \approx 7145 \text{ Вт.}$$

Таким образом, при мощности горелки 10 кВт и температуре матрицы горелки 900 °С количество теплоты, передаваемое через радиационное излучение от матрицы горелки на трубки нагревателя, составляет около 7,1 кВт. Это значение соответствует теплоотдаче, которая происходит на наружные стенки трубок нагревателя через радиацию.

При расчете теплопередачи рабочему телу и КПД принято, что трубки изготовлены из нержавеющей стали, с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 50$  Вт/(м · К). Геометрия трубок: внешний диаметр трубки  $D_{\text{внешн.}} = 4$  мм, внутренний диаметр трубки  $D_{\text{внутр}} = 3$  мм, длина трубки в выпрямленном состоянии  $L_{\text{трубки}} = 200$  мм. Трубки имеют U-образную форму, при этом нагрев происходит в части изгиба трубки. Температура стенки трубки  $T_{\text{стенки}} = 1073$  К, температура газа, поступающего в трубки  $T_{\text{газ}} = 873$  К. В системе предусмотрены три кольца трубок: первое кольцо содержит 72 трубки, второе — 36 трубок, третье — 28 трубок. Площадь теплообменной поверхности трубки рассчитывается по формуле для боковой поверхности цилиндра:

$$A_{\text{трубки}} = 2\pi R_{\text{трубки}} L_{\text{трубки}},$$

где радиус трубки  $R_{\text{трубки}} = D_{\text{внешн}}/2 = 0,002$  м. После подстановки получим:

$$A_{\text{трубки}} = 2\pi \cdot 0,002 \text{ м} \cdot 0,2 \text{ м} = 2,199 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Эффективной является лишь U-образный изгиб, занимающий до 15 % площади:  $A_{\text{эф}} = 2,29 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ . Теплопередача происходит через теплопроводность в стенке трубки. Количество передаваемой теплоты:  $Q = \lambda A_{\text{эф}} (T_{\text{внешн}} - T_{\text{внутр}})/L$ . С учетом рассчитанных ранее параметров:  $\lambda = 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $A_{\text{эф}} = 2,29 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ;  $T_{\text{внешн}} = 1073 \text{ К}$ ;  $T_{\text{внутр}} = 873 \text{ К}$ ;  $L_{\text{стенки}} = 0,0005 \text{ м}$ , получим:  $Q = 50 \cdot 3,2 \cdot 10^{-6} \times (1073 - 873)/0,0005 = 45,8 \text{ Вт}$ . Тогда общая теплопередача для всех трубок

$$Q_{\text{общ}} = Q \cdot 136 = 45,8 \cdot 136 \approx 6228 \text{ Вт}.$$

Учитывая приходящую на внешнюю поверхность трубок тепловую мощность 7,145 кВт, можно рассчитать эффективность теплообменной системы:  $6228/7145 = 0,87$ . Принимая во внимание установленную мощность 3 кВт и передаваемую тепловую мощность в 7,145 кВт, КПД установки  $\eta = 3/7,145 = 0,42$ .

Регенератор имеет внешнюю поверхность, контактирующую с окружающей средой, поэтому происходит теплотеря через излучение, которая зависит от температуры внешней поверхности регенератора и его площади. При этом внешний диаметр регенератора  $D_{\text{внешн}} = 0,214$  м; высота кольца  $h = 0,05$  м; температура внешней поверхности регенератора  $T_{\text{внешн}} = 600 \text{ К}$ ; температура окружающей среды  $T_{\text{окруж}} = 300 \text{ К}$ ; коэффициент излучения  $\epsilon = 0,7$  (для нержавеющей стали); постоянная Стефана — Больцмана  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ . При этом внешняя поверхность кольца определяется по формуле

$$A_{\text{внешн}} = \pi D_{\text{внешн}} h,$$

где  $h$  — высота кольца. После подстановки получим:

$$A_{\text{внешн}} = \pi \cdot 0,214 \cdot 0,05 \approx 0,0336 \text{ м}^2.$$

Формула теплового излучения имеет вид

$$Q_{\text{потери регенератора}} = \epsilon \sigma S (T_{\text{стенки}}^4 - T_{\text{окр}}^4),$$

где  $\epsilon = 0,8 A_{\text{внешн}}$ . После подстановки

$$Q_{\text{потери регенератора}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,8 \cdot 0,0336 \cdot 1,823 \cdot 10^8 \approx 278,3 \text{ Вт}.$$

Эти тепловые потери снижаются при применении современных способов термоизоляции. Необходимо создание термозащитного кожуха, что позволит повысить эффективность установки на  $278/10000 \cdot 100 \% = 0,0278 \cdot 100 \% = 3 \%$ .

**Заключение.** По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. Процесс сгорания метана в каталитической горелке был рассмотрен как основной источник тепла. При этом было установлено, что значительная часть тепла теряется в виде потерь через отработанные газы, что ограничивает общий КПД системы. Однако, несмотря на эти потери, катализатор горелки эффективно передает теплоту на нагревательные трубки, что позволяет достигать требуемых температур в рабочем цикле двигателя.

2. Отмечено, что теплота передается через конвекцию и кондукцию (теплопроводность) с определенными потерями, однако в целом система теплообмена работает эффективно, если учесть оптимизацию параметров элементов. В статье была оценена эффективность теплообмена в охладителе, где рабочее тело — гелий — отдает свою теплоту воде, что способствует охлаждению системы. Вычисления показали, что процесс охлаждения происходит с учетом заданных температурных градиентов и потерь энергии, что влияет на стабильность работы двигателя.

3. Проведенные исследования подтвердили важность оптимизации всех элементов системы теплообмена для повышения эффективности работы СПДС. В дальнейшем для улучшения общей производительности системы рекомендуется продолжить работу над улучшением геометрии теплообменников, а также разработкой более эффективных материалов и технологий, направленных на минимизацию потерь тепла и улучшение энергоэффективности.

## Литература

- [1] Ридер Г., Хупер Ч. *Двигатели Стирлинга*. Москва, Мир, 1986, 464 с.
- [2] Александров А.А., Архаров А.М., Архаров И.А. и др. *Теплотехника*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020, 876 с.
- [3] Кириллов Н.Г. Производство двигателя Стирлинга — новая отрасль в машиностроении XXI века. *Турбины и дизели*, 2010, № 2, с. 2–5.
- [4] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. и др. *Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV. Двигатели внутреннего сгорания*. Москва, Машиностроение, 2013, 784 с.
- [5] Кукис В.С., Куколев М.И., Костин А.И., Дворцов В.С., Ноздрин Г.А., Абакшин А.Ю. Перспективы улучшения характеристик двигателя Стирлинга. *Двигателестроение*, 2012, № 3, с. 3–6.
- [6] Zenkin V.A., Lisovskiy G.E., Markov V.A., Trifonov V.L., Gusev P.G. Система регулирования частоты вращения вала двигателя Стирлинга. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2024, № 2, с. 39–49.

- [7] Четвертаков В.А. Модульный двигатель Стирлинга. *Двигателестроение*, 2007, № 3, с. 16–19.
- [8] Кукис В.С., Куколев М.И., Костин А.И., Дворцов В.С., Ноздрин Г.А., Абакшин А.Ю. Перспективы улучшения характеристик двигателя Стирлинга. *Двигателестроение*, 2012, № 3, с. 3–6.
- [9] Тихонов Е.А., Базыкин В.И., Муханов Н.С. Кинематическая параметризация механизма двигателя Стирлинга типа «Альфа» свободной компоновки. *Двигателестроение*, 2020, № 4, с. 12–17.
- [10] Дворцов В.С., Ткаченко М.М., Куколев М.И. Двигатели Стирлинга: развитие конструкций и методов исследования. *Двигателестроение*, 2016, № 4, с. 10–14.
- [11] Климов В., Демьянов А., Царьков И., Климова С. Автономные системы электропитания на основе синхронных генераторов возвратно-поступательного движения. *Силовая электроника*, 2016, № 4, с. 49–54.
- [12] [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.
- [13] Уокер Г. *Двигатели Стирлинга*. Москва, Машиностроение, 1985, 408 с.
- [14] Петров А.И. К вопросу оптимизации теплообменного контура двигателя Стирлинга. *Двигателестроение*, 2021, № 4, с. 28–30.
- [15] 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.

**Поступила в редакцию 09.06.2025**

**Гусев Павел Глебович** — магистрант кафедры «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Гусев П.Г. Моделирование модульной гибридной системы на базе двигателя с внешним подводом теплоты с горелкой инфракрасного излучения. *Политехнический молодежный журнал*, 2026, № 01 (102). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/pmc/ejrknx/1086.html>

---

## **SIMULATION OF A MODULAR HYBRID SYSTEM BASED ON AN EXTERNAL HEAT SUPPLY ENGINE WITH AN INFRARED BURNER**

**P.G. Gusev**

gusev.soul1000@gmail.com

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*

The possibility of using engines with external heat supply for power supply is considered. A computational study of heat exchange processes in such an engine with an infrared catalytic burner powered by methane has been performed. The analysis of heat losses and effective methods of heat dissipation is carried out. Various mechanisms of heat exchange processes are considered, including heat transfer by radiation, thermal conductivity and convection in the system components. The study of heat transfer in the work includes a detailed calculation of heat exchange coefficients, analysis of heat losses and optimization of the cooling system.

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

---

*Received 09.06.2025*

**Gusev P.G.** — 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:**

Gusev P.G. Simulation of a modular hybrid system based on an external heat supply engine with an infrared burner. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal*, 2026, no. 01 (102). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/pmc/ejrknx/1086.html>