

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Гасанова Байрамали Мехрали оглы на диссертацию **Салих Саджат Абдулазим** «*Экспериментальное и численное исследование двигателя гамма-стирлинга с использованием сложного рабочего тела*», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.

Актуальность темы диссертации

В настоящее время, из-за роста загрязнения окружающей среды и истощения ископаемых ресурсов, проводятся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы с целью создания эффективных, доступных и экологически чистых систем производства энергии. Одним из решений этой проблемы может быть производство электроэнергии и тепла на основе двигателя Стирлинга. В последние десятилетия проведены много исследований направленных на разработку энергетических устройств на основе двигателя Стирлинга. Было исследовано влияние горячего источника и холодного радиатора, давления наддува, степени сжатия, рабочего и мертвого объема, скорости двигателя, фазового угла, эффективность теплообменника на производительность двигателя Стирлинга. В качестве источника тепла рассмотрены биотопливо, ископаемое топливо, отработанные газы, рекуперация тепла, геотермальная и солнечная энергия.

Важную роль при разработке двигателя Стирлинга играет выбор рабочего тела, который оказывает влияние на его производительность. Поэтому актуальным направлением исследований является разработка двигателя Стирлинга с комплексным рабочим телом состоящего из газовой среды с включением низкокипящих жидкостей. Использование в двигателях Стирлинга сложных рабочих тел позволяет повысить термодинамическую эффективность, давление и мощность двигателя, снизить расход топлива и эмиссию продуктов сгорания. Таким образом, диссертационная работа Салих С. А. нацеленная на экспериментальное и численное исследование термодинамической и энергетической эффективности двигателя Стирлинга гамма-типа с использованием сложного рабочего тела из газовой среды с включением различных низкокипящих жидкостей представляется крайне **актуальной**.

Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выводы и рекомендации диссертации обоснованы качественным анализом полученных экспериментальных и теоретических результатов, достоверны и объективны. Методология исследования включает как экспериментальное исследование термодинамической и энергетической эффективности двигателя Стирлинга гамма-типа с использованием сложного рабочего тела, так и численное моделирование с применением программы

MATLAB и программных кодов ASPEN HYSYS.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированные в диссертации, теоретически обоснованы, логически структурированы, что подтверждается полученными результатами:

- Использование комплексного рабочего тела состоящего из газа с добавками низкокипящей жидкости (ацетона, этанола и воды) повышает выходную мощность двигателя Стирлинга.
- Разработанная модель термодинамической и энергетической эффективности двигателя Стирлинга открывает перспективы предварительного анализа многокомпонентных рабочих тел.
- Проведена проверка механической и электрической мощности гамма-двигателя Стирлинга в сочетании с электрическим генератором.

Достоверность положений, выводов и рекомендаций сформулированных в диссертации

Достоверность сформулированных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается применением надежных методов диагностики (температура, давление, скорость вращения и т.д.). Численное моделирование выполнено с использованием сертифицированных программ.

Достоверность сформулированных в диссертации научных положений, выводов и рекомендаций также подтверждается публикациями по теме диссертации 10 научных работ, из них 8 статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, включая 7 статей, индексированных в международной базе данных Scopus. Проведена апробация результатов работы на международных и всероссийских конференциях.

Характеристика структуры и содержания диссертации

Диссертационная работа Салих С.А. содержит введение, пять глав, заключение, библиографический список из 231 наименований, список сокращений и приложений. Диссертация изложена на 200 страницах машинописного текста, содержит 96 рисунков и 15 таблиц.

Во **введении** дана общая характеристика работы: обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследований, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, сформулированы защищаемые положения, отмечен личный вклад автора, приведены сведения о публикациях, апробации работы, ее структуре и объеме.

В первой главе приводится подробный обзор двигателя Стирлинга, начиная

с истории его создания, этапов развития его конструкции, теплообменников, классификации, параметров производительности и компонентов двигателя Стирлинга.

Во **второй главе** представлен анализ подходов к повышению производительности двигателя Стирлинга. Приведен литературный обзор, в котором анализируются методы улучшения и совершенствования производительности двигателя Стирлинга. В конце главы приводятся результаты анализа обзора литературы, выделяются достижения, нерешенные задачи и направления для дальнейших исследований. Обзор является достаточно полным и дающим представление о состоянии дел в заявленной области.

В **третьей главе** приводятся модели для прогнозирования термодинамического цикла двигателя Стирлинга. Подробно рассмотрены модели от первого до четвертого цикла. Для оценки термодинамической и энергетической эффективности двигателя Стирлинга особое внимание уделено моделям первого и второго порядка. В заключительной части главы автором описаны различные порядки моделей применяемых при анализе двигателей Стирлинга от простых концептуальных моделей до более подробных и сложных представлений.

В **четвертой главе** дано описание экспериментальной установки для определения объемного расширения газа и жидкости при изменении температуры. Далее приводится описание приборов и измерительных устройств задействованных в представляемой работе, для количественной оценки и анализа параметров работы и производительности гамма-двигателя Стирлинга. Приводится схема, геометрические и эксплуатационные параметры гамма-двигателя Стирлинга. В заключительной части главы продемонстрирован запуск гамма-двигателя Стирлинга и методика определения температуры горячего участка и скорости вращения маховика.

В **пятой главе** приведены результаты экспериментального исследования. Показано изменение объема смеси воздуха с исследованными жидкостями при их нагреве. Далее приводятся экспериментальные результаты при добавлении к воздуху ацетона, спирта и воды (1, 5, 10 и 20 об.%), что приводит к увеличению мощности двигателя Стирлинга до 10 Вт, по сравнению с воздухом – 8 Вт. Далее представлены результаты численного моделирования. В завершении главы продемонстрировано методика измерения электрической мощности, вырабатываемой гамма-двигателем Стирлинга.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы и обозначены перспективы дальнейшей разработки темы.

Научная новизна исследования

На основании проведенных экспериментальных и численных исследований

соискателем получен ряд новых результатов:

1. Рассмотрена возможность применения в гамма-двигателе Стирлинга рабочего тела, состоящего из воздуха с добавлением низкокипящей жидкости (до 20 об.%)
2. Экспериментально установлено, что добавки летучей жидкости из-за увеличения объема рабочего тела при нагреве и более высокого давления в цилиндре способствуют увеличению мощности двигателя.
3. Разработана математическая модель термодинамической и энергетической эффективности двигателя Стирлинга с комплексным рабочим телом.

Замечания по диссертации

1. Известен ряд модификаций и разновидностей двигателя Стирлинга (альфа, бета, гамма). Почему автором выбран для исследований двигатель типа гамма-стирлинг.
2. Чем можно объяснить увеличение мощности двигателя Стирлинга при добавлении в рабочее тело воды?
3. В работе проведены исследования с различными жидкостными добавками, однако только с одним основным рабочим газом (воздухом). В тоже время применение рабочего газа водорода или гелия дает существенно лучшую эффективность?
4. Каким образом осуществлялась верификация математической модели? Какова точность результатов, получаемых с помощью математического моделирования?
5. В экспериментальных разделах работы не полностью описаны технические характеристики измерительных приборов и их погрешности.
6. В тексте диссертационной работы встречаются опечатки и грамматические ошибки.

Заключение

Диссертация Салих Саджат Абдулазим на тему «Экспериментальное и численное исследование двигателя гамма-стирлинга с использованием сложного рабочего тела», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой.

Автореферат диссертации Салих С.А. соответствует тексту диссертации,

отражает ее основное содержание.

Содержание диссертации соответствует научной специальности 2.4.5 Энергетические системы и комплексы.

По результатам диссертационного исследования автором опубликовано достаточное количество научных работ. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Салих Саджат Абдулазим, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
ФГБУН Институт теплофизики
Уральского отделения Российской
академии наук, г. Екатеринбург,
заведующий лабораторией криогеники и энергетики
Гасанов Байрамали Мехрали оглы

Контактная информация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук,
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 107А
Тел: (343)267-89-99
Адрес электронной почты: gbm@itpuran.ru
Официальный оппонент:

«9» октября 2024 г.

Подпись Гасанова Б.М. заверяю
Ученый секретарь ФГБУН ИТФ
УрО РАН,
кандидат физико-математических
наук



Андбаева В.Н.