

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, старшего научного сотрудника Куколева Максима Игоревича на диссертацию Халифе Хассана «Совершенствование системы охлаждения свободнопоршневого двигателя Стирлинга», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.7 – Турбомашины и поршневые двигатели

**1. Актуальность темы диссертационного исследования** обусловлена тем, что в разных областях техники остаётся значительным интерес к применению двигателей с внешним подводом теплоты и, в частности, двигателей Стирлинга. Улучшение характеристик создаваемых конструкций связано с решением целого комплекса задач теплопереноса внутри нагревателя, регенератора и охладителя. Поэтому работа, посвящённая разработке метода совершенствования системы охлаждения свободнопоршневого двигателя Стирлинга (СПДС) путем реорганизации течения рабочего тела в охладителе с целью улучшения его технико-экономических показателей, актуальна.

**2. Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Обоснованность основных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы базируется на использовании теоретических и экспериментальных методов исследования с применением современных программных средств и соответствующего оборудования.

Экспериментальные данные были получены автором путем проведения исследований на созданном стенде.

**3. Научная новизна положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации,** заключается в:

– разработке метода совершенствования системы охлаждения СПДС путем реорганизации течения рабочего тела в охладителе с целью улучшения технико-экономических показателей СПДС;

– создании расчетно-экспериментальной методики исследования влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС на эффективность теплоотвода и технико-экономических показателей СПДС;

– разработке методики определения геометрических параметров исследуемых теплообменников, имеющих в качестве основного элемента конструкции сложенные медные ребра;

– разработке расчетных моделей с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent для исследования влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС на эффективность теплоотвода;

– результатах расчетно-экспериментальных исследований влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС на эффективность теплоотвода и технико-экономических показателей СПДС.

**4. Практическая ценность диссертации** заключается в том, что полученные автором результаты могут быть задействованы в процессе проектирования и конструирования новых энергетических установок с различными источниками теплоты для наземного и аэрокосмического применения.

#### **5. Содержание диссертационной работы.**

Рассматриваемая работа содержит 189 с. текста, в т.ч. список литературы (114 источников). Материал диссертации изложен в четырёх главах и заключении.

Во **введении** обоснована актуальность диссертации; показана степень разработанности темы исследования; сформулированы цель и задачи работы; обозначены научная новизна, теоретическая и практическая значимость представляемых материалов; обозначены методы исследования; определены объект и предмет исследования; сформулированы положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена состоянию вопроса и задачам исследования. Здесь рассмотрены особенности конструкции и принцип работы СПДС; математическое моделирование его рабочего цикла; приведены факторы, влияющие на технико-экономические показатели двигателя. Отдельно изложен материал по особенностям системы охлаждения СПДС и методам ее совершенствования.

В результате предложено реорганизовать течение рабочего тела между объемами с максимальной и минимальной температурой в охладителе СПДС для увеличения теплоотвода за счет возрастания температуры стенок охладителя и, следовательно, увеличения перепада температур между стенкой и охлаждающей жидкостью. Это усовершенствование охладителя ДС улучшит, по мнению автора, технико-экономические показатели (ТЭП) двигателя.

Сформулированы цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена методу совершенствования системы охлаждения СПДС, включающему расчетно-экспериментальную методику исследования влияния реорганизации течения рабочего тела в охладителе на теплоотвод и ТЭП СПДС с последующими исследованиями и проектированием.

При математическом моделировании рабочего цикла СПДС проведена начальная оценка технико-экономических показателей СПДС; учтено влияние тепловых и гидравлических потерь в теплообменниках на характеристики двигателя; определены рабочие параметры охладителя СПДС.

Далее автор произвёл моделирование процессов теплообмена при течении

рабочего тела в охладителе с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent. Анализировались процессы теплообмена при течении рабочего тела на двухтрубной модели охладителя и на трехмерной модели охладителя.

**Третья глава** посвящена вопросам экспериментального исследования реорганизации течения рабочего тела в охладителе СПДС. Разработан испытательный стенд, проведена калибровка оборудования. Сформирован тепловой расчёт двухтрубного теплообменника, определены рабочие параметры испытательного стенда. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния реорганизации течения на эффективность теплоотвода, оценена погрешность эксперимента.

**В четвертой главе** рассмотрены аспекты расчетного исследования реорганизации течения рабочего тела в охладителе и оценка улучшения теплоотвода на ТЭП СПДС. Здесь исследовано влияние реорганизации течения рабочего тела в двухтрубной модели охладителя на эффективность теплоотвода; проведено численное моделирование процессов теплообмена и гидродинамики в охладителе для тестовой задачи, исследуемой на испытательном стенде; проведена валидация расчетной модели тестовой задачи на базе экспериментальных исследований. Исследован охладитель за пределами рабочего диапазона испытательного стенда.

Оценено влияние реорганизации течения рабочего тела в трехмерной модели охладителя СПДС как на эффективность теплоотвода, так и на технико-экономические показатели СПДС.

Осуществлено проектирование конструкции системы охлаждения СПДС с реорганизованным течением рабочего тела.

**В заключении** кратко подведены итоги выполнения работы.

**6. Общая оценка диссертации**, в целом, положительная. Поставленная цель исследования достигнута. Обозначенные задачи решены. Научные и практические результаты исследования представляют несомненный интерес для научных, проектных и конструкторских организаций, специализирующихся в области двигателестроения.

Работа апробирована в достаточной степени. Результаты исследования докладывались на семи международных и всероссийских научно-технических конференциях и семинарах. Опубликовано двенадцать работ, из них шесть статей в зарубежных изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, получены два патента.

## **7. Замечания:**

1. На стр. 5 дисс. автор постулирует: «..Свободнопоршневой двигатель Стирлинга (СПДС) в настоящее время считается наиболее перспективной и надежной конфигурацией...». Вывод 1 на стр. 53 диссертации: «СПДС является наиболее перспективной конфигурацией среди различных типов

ДС, обладает высоким тепловым КПД, надежностью и проверенным практическим применением в различных областях..». Трудно согласиться с автором, так как СПДС существует пока в незначительном количестве экземпляров сравнительно малой мощности. То есть, говорить в настоящее время о наиболее перспективной конструкции без привязки к решаемой задаче, о высокой надёжности и проверенным практическим применением представляется крайне преждевременным;

2. Классификация (Стр. 12 дисс., Рисунок 1.1), разделяющая ДС на кинематические и динамические, неудачна терминологически. Как известно, *кинематика* является разделом механики, изучающим математическое описание движения идеализированных тел. *Динамика* – раздел механики, в котором изучаются причины изменения механического движения тел. Таким образом, любой ДС попадает под оба предложенных автором класса;
3. Автор на стр. 19 дисс. излишне категорически утверждает, что «..реализация прерывистого движения поршня, описанного в идеальном цикле, на практике неосуществима..». Скорее – пока не осуществлена;
4. На стр. 20 и 21 применено некорректное понятие «Частота оборотов двигателя». Кроме того, в уравнении 1.1 это  $f$ , а в 1.3 уже  $n$ ;
5. Рисунок 3.3 на стр. 106 по непонятной причине назван «Теплообмен внутри двухтрубного теплообменника и охладителя СПДС», хотя изображён некий элемент теплообменника;
6. Рисунки 3.14 - 3.17 (Стр. 112 и 113 дисс.) никакой смысловой нагрузки не несут;
7. На стр. 125 в Таблице 3.2 указана ошибочная плотность ПВХ;
8. В диссертации присутствуют одновременно 2 раздела 3.4.

**Указанные замечания не снижают ценности проведенного исследования.**

Автореферат соответствует диссертации и в достаточной степени дает представление об основных положениях работы.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертационное исследование Халифе Хассана «Совершенствование системы охлаждения свободно-поршневого двигателя Стирлинга» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи, имеющей важное значение для двигателестроения. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на

соискание учёной степени кандидата технических наук, согласно п. 2.2 раздела II Положения о присуждении учёных степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», утверждённого Учёным советом РУДН (протокол № УС-12 от 03.07.2023 г.), а её автор, Халифе Хассан, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.7 – Турбомашины и поршневые двигатели.

### ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ

Доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
профессор Высшей школы гидротехнического  
и энергетического строительства

Куколев Максим Игоревич



Инженерно-строительный институт  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29  
Тел.:(812) 552-64-01;  
e-mail: maksim.kukolev@spbstu.ru

