

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу **Горшкова Ильи Борисовича** «**Исследование особенностей термогенерации акустических волн в кольцевых системах**», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Работа Горшкова Ильи Борисовича посвящена изучению радиофизических процессов, происходящих в автоколебательных системах в виде многоступенчатых термоакустических преобразователей тепловой энергии в акустическую с кольцевым резонатором. В термоакустических автоколебательных системах колеблющимся элементом является газ в акустическом резонаторе. Источником энергии является тепловая энергия, непрерывно подводимая к одному или нескольким теплообменникам. Нелинейным регулятором (усилителем колебаний), преобразующим постоянное тепловое воздействие на систему в переменное акустическое воздействие, является осуществляемый в теплообменном аппарате термодинамический цикл. Кольцевой тип резонатора позволяет изменять число теплообменных аппаратов (число ступеней) в резонаторе в широком диапазоне, что невозможно с другими типами резонаторов. Кольцевые резонаторы все больше привлекают внимание исследователей. При этом в настоящее время остаётся практически не изученным вопрос о влиянии количества ступеней кольцевого преобразователя на характеристики акустической волны и всего преобразователя в целом. Исследование этого вопроса важно для определения оптимального числа ступеней преобразователя, а также для изучения и оптимизации акустических автоколебательных контуров с тепловым возбуждением колебаний и большим числом усилителей в резонаторе.

Термоакустические системы в настоящее время находят широкое применение. Например, термоакустические генераторы являются альтернативой генераторам малой мощности, таким как солнечные и ветровые установки, генераторы на основе двигателей внутреннего сгорания и двигателей Стирлинга, газотурбинные установки с замкнутым циклом Брайтона и паротурбинный цикл Ренкина. Применение термоакустических генераторов актуально в качестве силовых установок на подводных лодках, космических аппаратах и базах, на микро ТЭЦ в труднодоступных регионах, на солнечных и геотермальных электростанциях. Термоакустические холодильники применяются для сжижения газов, охлаждения частей приборов до криогенных температур, кондиционирования помещений. Таким образом, тема диссертационной работы И.Б. Горшкова является, безусловно, актуальной.

Работа содержит введение, 3 главы, заключение и список литературы (70 источников). Диссертация изложена на 145 страницах, включает 76 рисунков, 5 таблиц и приложение.

**Во введении** приведена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, а также пути их достижения. Обоснована достоверность результатов, научная новизна, практическая значимость работы и приведены результаты, выносимые автором на защиту. Представлена информация по апробации и публикации результатов.

**В первой главе** кратко изложена теория линейной термоакустики и дается краткая история развития термоакустики. Описаны ключевые идеи, необходимые для вывода основных уравнений термоакустики – уравнений Ротта. Объяснена аналогия между термоакустическими процессами и процессами, происходящими в электрических схемах.

Описаны идеальный и реальный термодинамические циклы Стирлинга, а также дана краткая история развития устройств работающих по циклу Стирлинга. Дано объяснение принципа работы термоакустических двигателей с бегущей и со стоячей волной. Выполнен обзор современных практических достижений в области термоакустических двигателей с бегущей волной. Приведено сравнение конструкций и принципа работы термоакустических двигателей и поршневых двигателей Стирлинга.

На основе электроакустической аналогии построены электрические схемы – аналоги исследуемых термоакустических устройств. В электрической схеме аналогом инерционных свойств газа является индуктивность, аналогом сжимаемости газа – электрическая ёмкость, вязкостные и термические потери при колебаниях моделируются при помощи резисторов, а аналогом термоакустического эффекта является источник переменного тока. Термоакустическое устройство является комбинацией таких элементарных электрических схем.

Таким образом, с точки зрения радиофизики термоакустический преобразователь является автоколебательным контуром. Источник переменного тока в электроакустической аналогии может быть как усилителем, так и поглотителем колебаний.

**Во второй главе** описана методика расчёта многоступенчатых кольцевых термоакустических двигателей в программе Delta ES. Приведено обоснование и описание расчетной модели автора.

Приведены результаты численных расчётов восьми моделей кольцевых многоступенчатых термоакустических двигателей с различным числом ступеней. Конструктивно ступени во всех моделях одинаковы. В ходе расчётов количество ступеней изменялось от 3-х до 10-ти при сохранении неизменной суммарной длины корпуса. Для каждой из восьми исследуемых моделей была проведена оптимизация величины акустической нагрузки, для достижения максимума КПД двигателя.

Показано что термодинамический цикл при увеличении числа ступней отклоняется от реального цикла Стирлинга и его эффективность уменьшается. Это является одним из основных ограничений при увеличении числа ступеней. Вторым ограничением является снижение частоты колебаний при увеличении числа ступеней, что приводит к уменьшению акустической мощности.

В этой же главе проведено численное исследование оптимальной формы акустического резонатора кольцевого термоакустического двигателя для различного числа ступеней. Установлено, что при увеличении числа ступеней оптимальная площадь поперечного сечения теплообменного аппарата увеличивается относительно площади поперечного сечения резонатора.

В ходе расчетов было показано, что можно настроить преобразователь, как на максимум акустической мощности, так и на максимум эффективности, причём эти два максимума достигаются при значительно отличающихся друг от друга настройках. Для учета обоих параметров был введен новый параметр – коэффициент качества, отражающий одновременно как мощность устройства, так и его эффективность.

В работе приведены результаты оптимизации моделей с различным числом ступеней для достижения максимального коэффициента качества и результаты исследований зависимости характеристик двигателя от геометрических параметров теплообменников и регенератора.

В результате численного моделирования показано, что при оптимизации параметров термоакустического двигателя на максимум КПД, оптимальный гидравлический радиус пор регенератора зависит от его длины и не зависит от геометрических характеристик теплообменников. Также показано, что при увеличении расстояния между пластинами теплообменников в 10 раз мощность уменьшается в 2 раза, а эффективность на 26 %. Это позволяет сделать теплообменники более технологичными в производстве, увеличив расстояние между пластинами более 0,2 мм.

В **третьей** главе представлены результаты экспериментальных исследований прототипа 4-х ступенчатого термоакустического двигателя и двунаправленной импульсной турбины. Описана конструкция прототипа двигателя, позволявшая

обеспечить возможность быстрой замены и изменения размеров теплообменного аппарата, а также изменение его положения внутри ступени.

В результате экспериментальных исследований получена линейная зависимость акустической мощности от разности температур между теплообменниками.

Показано, что при атмосферном давлении четырехступенчатый кольцевой термоакустический двигатель с воздухом в качестве рабочего тела имеет стартовую разность температур намного ниже, чем известная конструкция резонатора Бекхауса-Свифта. Исследована также зависимость акустической мощности от расстояния между теплообменниками.

В третьей главе также приведены результаты экспериментального исследования двунаправленной турбины в постоянном потоке газа, предназначенной для преобразования акустической энергии в механическую.

Экспериментально исследована зависимость перепада давления на входном и выходном сопловом аппарате от частоты вращения ротора. Показано, что при данной конструкции турбины и при постоянном потоке газа выходной сопловой аппарат снижает эффективность турбины только на 15 %.

В результате экспериментальных исследований показано, что двунаправленная импульсная турбина не является активной и имеет низкую эффективность по сравнению с обычной турбиной. Приведено объяснение такого поведения.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

Наиболее важными результатами диссертационной работы, на мой взгляд, являются следующие:

- Впервые определена закономерность изменения сдвига фазы между колебательной скоростью и колебательным давлением в кольцевом многоступенчатом ТАД при увеличении количества ступеней;
- В результате численного моделирования показано влияние количества ступеней на характеристики термоакустического двигателя: акустический КПД, акустическую мощность, импеданс в регенераторе;
- Методами численного моделирования для четырехступенчатого ТАД получены оптимальные геометрические размеры теплообменников, регенератора и акустического резонатора;
- Установлены преимущества кольцевого многоступенчатого двигателя в части массогабаритных характеристик в сравнении с другими известными ТАД;

- Экспериментально получено распределение амплитуды колебаний давления акустической волны по длине резонатора ТАД, удовлетворительно совпадающее с результатами численного моделирования;

- Экспериментально исследованы характеристики двунаправленной турбины (гидравлическая мощность прокачиваемого воздуха, перепады давления на роторе и на сопловых аппаратах), предназначенной для преобразования акустической энергии в электрическую, при различной подаваемой гидравлической мощности и при разной частоте вращения ротора, что позволило оценить зависимость перепада давления на турбине от скорости потока на её входе.

Основные научные результаты являются новыми, оригинальными, что подтверждается публикацией их в ведущих отечественных высокорейтинговых научных журналах. Достоверность результатов и выводов работы не вызывает сомнений.

По диссертации имеется ряд замечаний:

1. Поскольку исследования двунаправленной импульсной турбины не связаны с исследованиями термоакустического двигателя, то эти результаты более логично было бы вынести в отдельную, четвертую главу, и сформулировать выводы по каждой главе более подробно.
2. Последовательность изложения Заключения диссертации не вполне логична. Следовало бы сначала привести все выводы по результатам исследований одного устройства - термоакустического двигателя, а затем другого - двунаправленной турбины. Выводы по результатам расчетных исследований также не стоит перемешивать с выводами по экспериментальным результатам.
3. Несмотря на качественное оформление работы, в целом, в тексте много опечаток и грамматических ошибок. К сожалению, эта печальная тенденция наблюдается в очень многих работах последних десятилетий.
4. Большое количество сокращений и недостаточно полный список обозначений затрудняют восприятие работы.

Указанные замечания не снижают общей ценности диссертационной работы и не влияют на главные теоретические и экспериментальные результаты, приведенные в диссертационной работе.

Результаты диссертации опубликованы в 7 статьях, из них 3 в периодических изданиях, включённых в список ВАК при Минобрнауки РФ, 3 статьи в прочих научных изданиях и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В целом диссертация соответствует п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а её автор Горшков Илья Борисович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Официальный оппонент

главный научный сотрудник, лаборатория 22 Инженерно-технический департамент, Отделение ядерной энергетики, Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», Госкорпорация «Росатом», доктор технических наук (01.04.14)

Верещагина Татьяна Николаевна

10 января 2023 г.

Почтовый адрес: 249033, пл. Бондаренко, 1, Обнинск, Калужская область

телефон: 8 (484) 399 83 60

e-mail: vtn@ippe.ru

Подпись Т.Н. Верещагиной удостоверяю:



Подпись Верещагина Т.Н. Удостоверяю М.П.  
заместитель начальника ОДО АО "ГНЦ РФ-ФЭИ"  
Л.С. Баруткина 10.01.2023г.