

## ОТЗЫВ

официального оппонента Некрасовой Светланы Олеговны  
на диссертационную работу Горшкова Ильи Борисовича:  
**«Исследование особенностей термогенерации акустических  
волн в кольцевых системах»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 - Радиофизика

Работа посвящена изучению процессов, происходящих в автоколебательных акустических системах, представляющие собой многоступенчатые термоакустические преобразователи (ТАП) тепловой энергии прямого термодинамического цикла. В термоакустических автоколебательных системах колеблющимся элементом является газ в акустическом резонаторе.

Существующие в настоящее время (в основном, за рубежом) термоакустические двигатели (ТАД) имеют перспективы применения как преобразователи с внешним подводом тепла, использующие различные источники, включая ядерные, радиоизотопные, солнечное излучение, вторичное тепло промышленных установок. Несмотря на то, что в России данное научное направление также развивается, теория ТАД требуют более глубоких проработок, а собственные инженерные методики должны быть апробированы на реальных действующих образцах.

В связи с этим, можно считать, что тема диссертации является актуальной, а цель – *«выявление особенностей генерации и распространения акустических волн в многоступенчатых кольцевых термоакустических автоколебательных системах; оптимизация их волновых и энергетических характеристик, в частности параметров резонатора, количества ступеней, теплового усилителя акустических колебаний, а также оценка влияния данных параметров на мощность преобразователя и его эффективность»* обозначена полно и конкретно.

В результате анализа и констатации достижений автора диссертации считаю необходимым отметить следующее. Горшков И.Б. изучает сложные колебательные явления в термогазодинамических системах, которые можно соотнести с паспортом специальности 1.3.4 - Радиофизика по следующим признакам.

По пункту 1 паспорта специальности в части направлений исследований – это *«разработка физических основ генерации, усиления и преобразования колебаний и волн различной природы (электромагнитных, акустических, плазменных, механических),...»*  
По пункту 2 паспорта – это *«изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах».*

На основании выше отмеченного можно допустить, что изучаемые автором диссертации физические процессы, имеющие волновую природу, и описываемые одинаковыми по форме дифференциальными уравнениями с уравнениями электродинамики и радиофизики, соответствуют предмету исследований по паспорту специальности.

Научная новизна в представлении оппонента (моем представлении) заключается в следующем:

– впервые на уровне отечественных разработок ТАД изучены процессы в кольцевой многоступенчатой автоколебательной термоакустической системе при различном количестве ступеней;

– впервые экспериментально получено и изучено распределение амплитуды колебаний давления акустической волны по длине резонатора автоколебательной термоакустической системы в условиях нескольких ступеней, показавшее совпадение результатов экспериментов и численного моделирования;

– выполнено численное моделирование работы многоконтурных автоколебательных термоакустических систем с оценкой влияния количества ступеней на их характеристики: акустический КПД, акустическую мощность, импеданс в регенераторе;

– методами численного моделирования для четырехступенчатой автоколебательной термоакустической системы получены оптимальные геометрические параметры теплового блока ТАД;

– впервые представлен опыт применения пульсационной турбины в составе ТАД.

В положениях, выносимых на защиту, несмотря на то, что они соотносятся с научной новизной, нет акцентов на отличительные признаки достижений автора. И только третий и четвертый пункты положений, выносимых на защиту, содержат суть физико-математической направленности диссертации.

Достоверность полученных результатов пояснениями автора и анализом текста диссертации (с моей стороны) можно считать обоснованной.

Личный вклад автора не вызывает сомнений. Автором лично выполнены все модельные и вычислительные исследования. Автором лично разработан экспериментальный прототип четырехступенчатого кольцевого термоакустического преобразователя. Лично автором проведены экспериментальные исследования и проведены сопоставления полученных экспериментальных и численных результатов. Автором лично написана компьютерная программа, защищенная свидетельством РФ на программу ЭВМ.

В качестве внедрения результатов диссертации можно считать выполнение исследований в рамках гранта РФФИ (проект № 19-32-90127\19 – Исследование характеристик термоакустического кольцевого многоступенчатого двигателя с бегущей волной)

Публикации в достаточной мере отражают освещение результатов работы в научной печати.

*В первой главе* автор диссертации - Горшков И.Б. определяет предмет и объект исследования, указывая на то, что любой элемент термоакустического устройства с точки зрения радиофизики можно представить в виде электрической схемы. Аналогом инерционного свойства газа является индуктивность в электрической схеме, аналогом сжимаемости газа является электрическая емкость, 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 по электроакустической аналогии может быть как усилителем колебаний так и поглотителем колебаний (стр.10).

Большое внимание (возможно излишне подробно) автор диссертации уделяет анализу конструкций и рабочим процессом тепловых двигателей с внешним подводом тепла, в основном двигателям Стирлинга. Далее приводятся различные схемы термоакустических систем и анализ математических моделей рабочих процессов ТАД. Отмечается, что для инженерной практики в проектных разработках целесообразно применять матмодель, основанную на уравнениях линейной термоакустики и использовать импедансный метод, в основе которого лежит допущение о применимости к волновым процессам в акустических системах законов распространения колебаний в электрических цепях.

*Во второй главе* описана методика расчёта многоступенчатых кольцевых термоакустических двигателей в программе Delta EC .

Следует отметить, что известный программный продукт Delta EC выбран автором оправдано. Новизной можно считать то, что автор впервые (в отечественной практике) применяет и подстраивает этот алгоритм в многоконтурный ТАД. При этом для каждой из

восьми исследуемых моделей была проведена оптимизация величины акустической нагрузки, для достижения максимума КПД двигателя.

В ходе математического моделирования было показано, что можно настроить ТАД, как на максимум акустической мощности, так и на максимум эффективности, причём эти два максимума достигаются при значительно отличающихся друг от друга настройках.

Для того чтобы добиться учета обоих параметров автором был введен новый параметр – коэффициент качества, что привносит некоторую универсальность в методику оптимизации ТАД.

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

Выполненное автором численное моделирование ожидаемых в эксперименте результатов показало, что амплитуда колебаний давления со стороны горячего теплообменника меньше, чем со стороны холодного и к тому же присутствует провал амплитуды в центре. Показано, что распределение давления объясняется тем, что разность фаз между колебаниями скорости и давления в резонаторе не равно нулю градусов как в бегущей волне, а формируется с учетом фазы стоячей волны. Стоячая компонента возникает при отражении волны от поверхностей теплообменников и торцевых поверхностей ступеней. Бегущая волна присутствует только внутри ступеней двигателя.

В данном разделе также приведены результаты экспериментального исследования двунаправленной турбины, предназначенной для преобразования акустической энергии в механическую.

В целом результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические предпосылки и прогнозные характеристики. В частности, выполненные автором эксперименты показали, что четырёхступенчатый кольцевой ТАД имеет стартовую разность температур 63 К, что намного ниже, чем при использовании конструкции резонатора Бакхауса-Свифта, где стартовая разность температур составляет величину более 120 К. Доказаны преимущества кольцевого многоступенчатого двигателя в части массогабаритных характеристик в сравнении с другими известными ТАД.

Экспериментально оценены характеристики двунаправленной пульсационной турбины предназначенной для преобразования акустической энергии в электрическую. Методами численного моделирования с учетом опыта экспериментальных исследований для четырехступенчатого ТАД были получены оптимальные геометрические размеры теплообменников, регенератора и акустического резонатора.

Таким образом, следует отметить, что диссертация Горшкова Ильи Борисовича по сути и содержанию соответствует специальности 1.3.4 – Радиофизика.

В работе создан экспериментальный образец термоакустического двигателя и разработана методика моделирования рабочего процесса многоступенчатых ТАД. Последнее соответствует принятому в Паспорте специальности предмету исследований *«физических основ генерации, усиления и преобразования колебаний и волн различной природы»* в части физико-математических наук.

По работе имеются следующие замечания и предложения.

1. Нечетко сформулированы научная новизна и положения, выносимые на защиту.
2. Не явно представлены аналогии ТАД электродинамическим контурам, оговоренные автором.
3. С учетом требований Паспорта специальности и положений статуса кандидата физико-математических наук в диссертации не сделаны акценты на саму математическую модель многоступенчатого ТАД (она закрыта в программном приложении). Поэтому при защите

диссертации соискателю необходимо уже в докладе и презентации четко обозначить физико-математическую сущность исследования, например, в виде логистической схемы методики и блок-схемы алгоритма расчета.

4. Отсутствие самой математической модели, которая, очевидно, имеет место быть в зарегистрированном программном продукте, снижает ценность диссертации, а это самим автором должно быть признано и по возможности оговорено на защите.
5. Следует также более четко сформулировать общие выводы.

Несмотря на указанные замечания можно заключить следующее.

Соискателем выполнен большой объем теоретических и экспериментальных исследований, касающихся новой области техники – термоакустики.

Диссертационная работа Горшкова Ильи Борисовича является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, а также предложены новые научно обоснованные технические решения в рассматриваемой области преобразования энергии – термоакустическом эффекте.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Горшкова Ильи Борисовича «Исследование особенностей термогенерации акустических волн в кольцевых системах», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика соответствует требованиям пунктов 9-11 13, 14 положения «О порядке присуждения ученых степеней» (вместе с «Положением о присуждении ученых степеней») Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 26.09.2022),

а её автор — Горшков Илья Борисович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. «Радиофизика».

Официальный оппонент

Доцент Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», кандидат технических наук по специальности 05.07.05 Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки.

Некрасова Светлана Олеговна.

16.01.2023 г.

Адрес: 443086, Российская Федерация,

Самара, ул. Московское шоссе, д.34.

E-mail: [nekrasova.so@ssau.ru](mailto:nekrasova.so@ssau.ru)

Подпись С.О. Некрасовой заверяю:

Ученый секретарь ФГАОУ ВО

«Самарский национальный  
исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева».



Кузьмичев В.С.