

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.392.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»,  
МИНОБРНАУКИ РОССИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 17.02.2023 № 30

О присуждении **Горшкову Илье Борисовичу**, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование особенностей термогенерации акустических волн в кольцевых системах» по специальности 1.3.4. «Радиофизика» принята к защите 28 сентября 2022 года (протокол заседания № 21) диссертационным советом 24.2.392.01, созданным на базе ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»), Минобрнауки РФ, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83; приказ Минобрнауки России о создании диссертационного совета от 15.02.2013 №75/нк; приказы об изменении состава совета от 15.12.2015 № 1598/нк-9, от 28.09.2016 № 1180/нк-52, от 15.02.2017 № 116/нк-38, от 26.01.2018 № 92/нк-50, от 17.04.2018 № 431/нк-26, от 23.11.2018 № 301/нк-66, от 24.09.2019 №873/нк-26; приказ об установлении полномочий совета от 03.06.2021 № 561-нк (Приложение 1/597); приказ об изменении состава совета от 15.10.2021 № 1046/нк-33.

Соискатель Горшков Илья Борисович, 1994 года рождения, в 2017 году окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского» (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского») с присвоением квалификации магистра по направлению 03.04.02 «Физика». В период подготовки диссертации с 2017

по 2021 год соискатель обучался в очной аспирантуре ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность «Радиофизика».

Диссертация выполнена на кафедре компьютерной физики и метаматериалов ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», Минобрнауки РФ.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Петров Владимир Владимирович**, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского», институт физики, кафедра общей, теоретической и компьютерной физики.

Официальные оппоненты:

1 **Верещагина Татьяна Николаевна**, доктор технических наук (специальность 01.04.14), Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», отделение ядерной энергетики (г. Обнинск), главный научный сотрудник;

2 **Некрасова Светлана Олеговна**, кандидат технических наук (05.07.05), «Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева», (г. Самара), кафедра теплотехники и тепловых двигателей, доцент.

Дали *положительные* отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ Петра Великого, г. Санкт-Петербург) в своём *положительном* отзыве, подписанном Ивановым Николаем Георгиевичем, кандидатом физико-математических наук (01.02.05), доцентом, директором Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики физико-механического факультета СПбПУ Петра Великого, и Буловичем Сергеем Валерьевичем, кандидатом физико-математических наук (01.02.05), доцентом, указала, что содержание диссертации И. Б. Горшкова составляет «нахождение закономерностей генерации и распространения акустических волн в многоступенчатых термоакустических автоколебательных системах», определение на базе «описания распространения акустических волн оптимальных энергетических характеристик – параметров резонатора, параметров теплового усилителя акустических колеба-

ний». Отмечается, что широкий круг возможного применения термоакустического эффекта делает чрезвычайно актуальными вопросы его исследования для вновь создаваемых перспективных конструкциях, какими представляются изученные в работе многоступенчатые термоакустические автоколебательные системы.

В отзыве ведущей организации констатируется, что диссертационная работа «Исследование особенностей термогенерации акустических волн в кольцевых системах» представляет завершённую научно-квалификационную работу, соответствующую требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а её автор Горшков Илья Борисович заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика».

Соискатель имеет 7 опубликованных работ по теме диссертации из них 3 в периодических изданиях, включенных в список ВАК при Минобрнауки РФ, 3 статьи в прочих научных изданиях и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Основные публикации по теме диссертационной работы:

1. Горшков И. Б., Петров В. В. Численное моделирование кольцевого четырехступенчатого термоакустического двигателя с бегущей волной // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 4. С. 285–296. DOI: 10.18500/1817-3020-2018-18-4-285-296

2. Горшков И. Б., Петров В. В. Численный расчёт влияния количества ступеней кольцевого термоакустического двигателя Стирлинга на его характеристики // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21, вып. 2. С. 133–144. DOI: 10.18500/1817-3020-2021-21-2-133-144

3. Горшков И. Б., Петров В. В. Экспериментальное исследование двунаправленной импульсной турбины в постоянном потоке газа // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21, вып. 3. С. 242–248. DOI: 10.18500/1817-3020-2021-21-3-242-248

На автореферат диссертации поступили 4 **положительных** отзыва: 1) из Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники от д.ф.-м.н. (01.04.03), профессора кафедры электронных при-

боров **Шандарова С. М.**; из Саратовского государственного технического университета им Гагарина от д.т.н. (05.02.07), профессора кафедры «Техническая механика и мехатроника» **Бекренева Н.В.**; из Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН, г. Москва, от к.т.н. (01.04.03), старшего научного сотрудника **Титова С. А.**; из Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова от к.ф.-м.н. (01.04.03), доцента кафедры физики колебаний физического факультета **Поликарповой Н. В.**

В отзывах на автореферат сделаны замечания: а) о желательности приведения в автореферате для термоакустического многоступенчатого генератора как многозвенной автоколебательной системы соответствующей эквивалентной схемы; пояснения рассмотрения в главе 3 именно двунаправленной турбины; б) об отсутствии пояснений относительно несущественной зависимости отношения площадей поперечных сечений теплообменного аппарата и резонатора с увеличением количества ступеней от 5 до 7 (рис. 6), практически неизменности коэффициента качества при увеличении количества ступеней от 8 до 10 (рис. 7), характера поведения соответствующих графиков; в) об отсутствии пояснения критерия выбора геометрических параметров рассчитываемых термоакустических двигателей (общей длины, диаметра акустических резонаторов и др.) и указания параметров, по которым была проведена оптимизация акустической нагрузки для достижения максимального КПД двигателя. Сделаны также замечания редакционного характера.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается соответствием проводимых ими научных исследований теме диссертации и научной специальности, что необходимо для корректной оценки научной и практической значимости диссертационной работы, а именно официальные оппоненты и сотрудники ведущей организации обладают большим опытом и высокой квалификацией в области исследования термоакустических автоколебательных систем. Выбор официальных оппонентов также объясняется отсутствием совместных печатных работ с соискателем. Выбор ведущей организации обосновывается также отсутствием договорных отношений с соискателем. Выбор официальных оппонентов и ведущей организации

удовлетворяет критериям, сформулированным в пп. 22 и 24 действующего «Положения о присуждении учёных степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**изучены (теоретически, численно и экспериментально)** особенности автоколебаний газовой среды в акустической системе в виде кольцевого многоступенчатого термоакустического преобразователя тепловой энергии с бегущей акустической волной прямого термодинамического цикла с изменением числа ступеней;

**проведено** сопоставление процессов в термоакустическом преобразователе с процессами колебаний в радиофизическом контуре, содержащем источник переменного тока, индуктивности, емкости и резисторы;

**выявлены закономерности** влияния разности фаз между колебательной скоростью и колебательным давлением в акустической волне в кольцевом многоступенчатом термоакустическом двигателе на эффективность преобразования тепловой энергии в энергию акустических волн (коэффициент полезного действия (КПД) и значение акустической мощности), а также на импеданс в регенераторе с изменением количества ступеней;

**выполнен анализ** зависимости основных характеристик акустической волны (распределения амплитуды колебаний давления и скорости потока по длине резонатора, акустической мощности, импеданса, разности фаз между колебаниями давления и скорости потока) в кольцевых многоступенчатых автоколебательных термоакустических системах в зависимости от числа ступеней, а именно:

**доказано**, что максимум КПД и акустической мощности ступени достигается при определенном количестве ступеней – от 4 до 7, а дальнейшее увеличение числа ступеней, приводящее к увеличению разности фаз между колебательной скоростью и колебательным давлением в акустической волне в полости резонатора от нуля (бегущая волна) до 90 градусов (стоячая волна), приводит к уменьшению КПД;

**продемонстрирована** возможность настройки термоакустического преобразователя как на максимум акустической мощности, так и на максимум КПД, а также на достижение введенного интегрального коэффициента

качества; определена взаимосвязь геометрических параметров структурных элементов термоакустического двигателя при настройке на максимум КПД;

**представлен** опыт применения пульсационной турбины в составе термоакустического двигателя для преобразования акустической энергии в электрическую при различных значениях подаваемой гидравлической мощности и частоте вращения ротора.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

на основе моделирования термоакустических преобразователей с изменяющимся числом ступеней и акустических нагрузок выявлены условия эффективного функционирования акустических автоколебательных систем в виде кольцевых термоакустических многоступенчатых преобразователей.

Практическая значимость результатов состоит в следующем:

Разработан экспериментальный прототип термоакустического преобразователя, который может служить основой для промышленного производства автоколебательных систем, предназначенных для получения электрической энергии от различных тепловых источников.

Определены условия для увеличения эффективности и удельной мощности на единицу массы для кольцевых термоакустических преобразователей.

**Результаты исследований** использовались при выполнении НИР, поддержанного грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 19-32-90127.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Соответствие результатов работы теоретическим основам радиофизики и термоакустики; согласованность значений параметров термоакустического преобразователя, полученных в ходе экспериментов, и результатов численного расчета уравнений линейной термоакустики.

Использование протестированных программных продуктов для моделирования термоакустических эффектов.

Качественное совпадение полученного в эксперименте распределения амплитуды колебаний давления по длине резонатора четырехступенчатого термоакустического преобразователя с экспериментальными данными, имеющимися в литературе.

**Личный вклад соискателя** состоит в выполнении аналитических исследований, проведении численного моделирования, разработке и изготовлении лабораторного прототипа термоакустического преобразователя, выполнении экспериментального исследования рабочих характеристик лабораторного прототипа, а также сопоставлении результатов экспериментального исследования с результатами численного моделирования. К защите представлены результаты, полученные лично соискателем.

**Результаты диссертационной работы рекомендуются** к использованию в научно-исследовательских, научно-производственных и образовательных организациях, проводящих исследования в области экспериментального и численного моделирования термоакустических процессов (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва; Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург; ФГУП "Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова" (г. Санкт-Петербург), Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского).

В ходе защиты диссертации были заданы следующие вопросы и высказаны критические замечания: 1) о соотношении уравнений термоакустики и волнового акустического уравнения, отсутствии в уравнениях термоакустики нет дифференцирования по времени; 2) об определении колебательной скорости; 3) о терминах «гидравлическое давление» и «гидравлический радиус» для газовой среды; 4) не приведет ли увеличение импеданса к увеличению доли стоячей волны; 5) о принципе работы регенератора; 6) о практическом назначении у термоакустического преобразователя; 7) о нагрузке в рассматриваемой системе; 8) о программе Delta EC; 8) как определяется КПД преобразователя; 10) используется ли теория возбуждения при моделировании; 11) какие новые факторы включены в модель; 12) о характере волны в преобразователе (бегущая или стоячая); 13) с чем связано ухудшение характеристик преобразователя при большом числе ступеней; 14) позволяют ли рассчитывать фазу колебаний уравнения термоакустики; 15) о скорости вращения двунаправленной турбины; 16) о скорости потока была на входе в

турбину; 17) при каких амплитудах колебаний линейная теория может давать адекватные результаты.

Соискатель И. Б. Горшков ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и дал необходимые пояснения: 1) по времени предполагается строго гармоническая зависимость, вычисляется только пространственная зависимость волны по длине резонатора; система из двух уравнений включает производные первого порядка по координате; 2) имеется в виду скорость колебаний элементарной порции (объема) газа; 3) в гидродинамике часто газ называют жидкостью, для которой применимо уравнение Навье-Стокса; 4) имелось в виду, что при увеличении количества ступеней максимум коэффициента качества, то есть максимума одновременно мощности и КПД, достигим при более высоком импедансе именно в ступени, в теплообменном аппарате; его можно повышать посредством уменьшения диаметра резонатора относительно диаметра теплообменного аппарата; 5) в регенераторе реализуется термодинамический цикл: когда газ движется в горячую сторону, он расширяется, а когда – в холодную часть, сжимается, благодаря чему тепловая мощность переходит в акустическую; 6) практические применения термопреобразователя возможны в режиме холодильника (без электричества) и в режиме электрогенератора (преобразование тепловой энергии в электрическую); 7) нагрузка моделируется пористым телом; 8) программа Delta ES предназначена для решения дифференциальных уравнений термоакустики, разработана в Лос-Аламосской национальной лаборатории; 9) общий КПД определен как отношение акустической мощности на нагрузке к тепловой мощности горячих теплообменников, а акустический КПД – это отношение акустической мощности, которую даёт регенератор, к подводимой мощности к горячим теплообменникам; 10) теория возбуждений не используется; 11) основная новизна заключается в том, что моделируется больше трех и четырех ступеней; 12) характер волнового процесса и разность фаз меняется по длине резонатора; 13) с ростом числа ступеней волна в теплообменном аппарате начинает приближаться к состоянию стоячей, и эффективность термодинамического цикла при этом уменьшается; 14) в уравнениях используются комплексные функции для давления и объёмного расхода: реальная часть показывает распределение параметров в нулевой момент времени, а мнимая часть – распределение параметров при сдвиге временной части фазы на  $\pi/2$ ;

15) скорость вращения двунаправленной турбины – 6500 об/мин.; 16) скорость потока на входе в турбину – примерно 25 м/с; 17) нелинейные уравнения термоакустики пока не сформулированы; эксперименты показывают, что отклонения теоретических данных от экспериментальных – не более 10 %.

В диссертационной работе Горшкова И.Б. решена актуальная радиофизическая задача исследования волновых процессов, заключающаяся в выявлении особенностей генерации и распространения акустических волн в многоступенчатых кольцевых термоакустических автоколебательных системах, оптимизации их волновых и энергетических характеристик, в частности параметров резонатора, количества ступеней, теплового усилителя акустических колебаний, а также оценки влияния данных параметров на мощность преобразователя и его эффективность (пункты 1 и 2 паспорта научной специальности 1.3.4. – Радиофизика). Содержание диссертации удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней» (утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842), предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

На заседании 17 февраля 2023 года диссертационный совет принял решение присудить Горшкову И. Б. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 8 докторов по специальности 1.3.4. – Радиофизика, участвовавших в заседании, из 30 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 21, против – 1, воздержавшихся – нет.

Председатель  
диссертационного совета

Ученый секретарь  
диссертационного совета

  
  
Аникин Валерий Михайлович

  
Сысоев Илья Вячеславович

17 февраля 2023 г.