

УТВЕРЖДАЮ:

Проектор по научной работе и цифровому развитию
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»
доктор физико-математических наук, профессор
Алексей Александрович Короновский

«16» _____ 2021 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»)

по диссертации Горшкова Илья Борисовича «Исследование особенностей термогенерации акустических волн в кольцевых системах» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика», выполненной на кафедре компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского филиала ФГБУН Институт радиотехники и электроники В.А. Котельникова РАН (СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН), институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора СГУ от 26 декабря 2017 года № 242 – Д.

Соискатель Горшков Илья Борисович окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» в 2017 году по направлению подготовки 03.04.02 Физика с присвоением квалификации «Магистр».

В период подготовки диссертации соискатель обучался в аспирантуре ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия», направленность «Радиофизика». Справка об обучении № 59-2021 выдана 18 июня 2021 года федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Научный руководитель – **Петров Владимир Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», утверждённый приказом ректора от 26 декабря 2017 года № 242-Д.

Научную экспертизу диссертация проходила на расширенном заседании кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений СГУ. На заседании присутствовали:

1. *Аникин Валерий Михайлович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, заведующий кафедрой компьютерной физики и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
2. *Петров Владимир Владимирович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;

3. *Романова Елена Анатольевна*, доктор физико-математических наук (01.04.21), профессор кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
4. *Шаповалов Александр Степанович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
5. *Бабков Лев Михайлович*, доктор физико-математических наук (01.04.02), профессор, профессор кафедры теоретической физики, институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
6. *Давидович Михаил Владимирович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры радиотехники и электродинамики, институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
7. *Дербов Владимир Леонардович*, доктор физико-математических наук (01.04.02), с.н.с., профессор кафедры теоретической физики, институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
8. *Сучков Сергей Германович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), с.н.с., руководитель НТЦ «Микро - и наноэлектроника» ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
9. *Четвериков Александр Петрович*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры радиофизики и нелинейной динамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
10. *Игнатьев Александр Анатольевич*, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры общей физики, институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
11. *Клещевская Светлана Викторовна*, кандидат физико-математических наук (01.04.02), доцент кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
12. *Конюхов Андрей Иванович*, кандидат физико-математических наук (01.04.21), доцент, доцент кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
13. *Кузюкина Юлия Сергеевна*, кандидат физико-математических наук (01.04.21), инженер кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
14. *Маврин Петр Анатольевич*, аспирант кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»;
15. *Щуркин Евгений Валентинович*, аспирант кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, институт физики, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского».

Рецензенты диссертации:

Сучков Сергей Германович, доктор физико-математических наук (01.04.03), с.н.с., руководитель НТЦ «Микро-инанозлектроника» ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»,

Давидович Михаил Владимирович, доктор физико-математических наук (01.04.03), профессор, профессор кафедры радиотехники и электродинамики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»,

представили положительные отзывы.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение:

Заключение

по диссертации **Горшкова Ильи Борисовича** «Исследование особенностей термогенерации акустических волн в кольцевых системах» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика»

Актуальность темы. Работа 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 (от 1 до более чем 10), что невозможно с другими типами резонаторов. По этой и многим другим причинам кольцевые резонаторы последнее время все больше привлекают внимание исследователей. При этом на данный момент остаётся практически не изученным вопрос влияния количества ступеней кольцевого преобразователя на характеристики акустической волны и всего преобразователя в целом. Более подробное исследование этого вопроса важно для определения оптимального числа ступеней преобразователя, а также для изучения акустических автоколебательных контуров с тепловым возбуждением колебаний и большим числом усилителей в резонаторе.

Термоакустические системы обладают свойством широкой применимости, при этом термоакустические генераторы являются альтернативой другим генераторам малой мощности, таким как солнечные и ветровые установки, генераторы на основе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) 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 районах Земли, на солнечных и геотермальных электростанциях; области применения термоакустических холодильников – сжижение газов, охлаждение частей приборов до криогенных температур, кондиционирование помещений.

Цель работы: 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.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Сопоставительный анализ особенностей существующих термоакустических преобразователей энергии и методик их расчёта.
2. Построение математической модели и разработка алгоритма для численного моделирования процесса преобразования тепловой энергии в энергию акустических волн.
3. Разработка экспериментального образца четырехступенчатого термоакустического преобразователя.
4. Экспериментальное исследование акустических и тепловых характеристик разработанного термоакустического преобразователя.
5. Сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными в ходе работы, а также с данными других авторов.

Научная новизна:

1. Впервые определена особенность изменения сдвига фазы между колебательной скоростью потока газа и колебательным давлением в кольцевой многоступенчатой автоколебательной термоакустической системе при увеличении количества ступеней.

2. Экспериментально получено распределение амплитуды колебаний давления акустической волны по длине резонатора автоколебательной термоакустической системы, показавшее удовлетворительное совпадение результатов экспериментов и численного моделирования.

3. В ходе численного моделирования работы автоколебательных термоакустических систем показано влияние количества ступеней в таких системах на их характеристики: акустический КПД, акустическую мощность, импеданс в регенераторе.

4. Методами численного моделирования для четырехступенчатой автоколебательной термоакустической системы получены оптимальные геометрические параметры теплового усилителя колебаний (теплообменников, регенератора).

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

Научная и практическая значимость. В результате проведенного исследования кольцевых многоступенчатых термоакустических систем установлен характер изменения разности фаз между колебаниями давления и скорости потока в зоне регенератора, а также мощности и КПД термоакустических систем с изменением числа их ступеней, что дополняет и расширяет современные представления теории термоакустики.

Результаты диссертационной работы открывают перспективу разработки серийно выпускаемых эффективных термоакустических преобразователей.

Результаты численного моделирования позволяют осуществлять проведение расчётов термоакустических преобразователей с заданными входными и выходными параметрами.

Разработанный экспериментальный прототип термоакустического преобразователя обладает рабочими характеристиками, которые позволяют рассматривать его как основу создания промышленно выпускаемых автоколебательных термоакустических систем, предназначенных для получения электрической энергии из различных тепловых источников, что имеет особое значение для районов, удалённых от магистральных ЛЭП.

Положения, выносимые на защиту:

- В многоступенчатой кольцевой автоколебательной термоакустической системе (термоакустическом преобразователе) максимум КПД и акустической мощности ступени наблюдается при количестве ступеней от 4 до 7, а при дальнейшем увеличении количества ступеней, разность фаз между колебательной скоростью и колебательным давлением в акустической волне в полости резонатора значительно сдвигается от нуля (бегущая волна) к 90 градусам (стоячая волна), что приводит к уменьшению КПД и является ограничением максимального количества ступеней.

- При увеличении количества ступеней кольцевой автоколебательной термоакустической системы для обеспечения максимальной выходной мощности и эффективности (КПД), необходимо увеличивать акустический импеданс в ступени.

- Результаты экспериментальных исследований профиля распределения амплитуды колебаний и мощности акустической волны по длине резонатора в кольцевой четырехступенчатой автоколебательной термоакустической системе.

- Алгоритм и результаты численного моделирования характеристик акустической волны (распределения амплитуды колебаний давления и скорости потока по длине резонатора,

мощности, импеданса, разности фаз между колебаниями давления и скорости потока) в кольцевых многоступенчатых автоколебательных термоакустических системах.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается: а) применением обоснованных методов теоретического и численного анализа радиофизических и термоакустических процессов; б) использованием специальных программных комплексов, разработанных и протестированных на широком классе задач термоакустики; в) оценкой погрешности измерений.

Личный вклад. 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.

Апробация результатов исследования

Результаты работы докладывались на конференциях:

1. «SFM - Saratov Fall Meeting 2019» (Саратов, 2019 г);
2. XIII Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2020 г);
3. Международная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики" (Воронеж, 2020 г);
4. «Оптические технологии, материалы и системы (Оптотех-2019)» (Москва, 2019 г).

Гранты. Результаты диссертации получены в рамках выполнения гранта РФФИ (проект № 19-32-90127\19 – Исследование характеристик термоакустического кольцевого многоступенчатого двигателя с бегущей волной)

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Горшков И. Б., Петров В. В. Численное моделирование кольцевого четырехступенчатого термоакустического двигателя с бегущей волной // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 4. С. 285–296. DOI: <https://doi.org/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: <https://doi.org/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: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-3-242-248>

Прочие публикации

1. Горшков И.Б. Численное моделирование зависимости оптимальной величины нагрузки кольцевого четырехступенчатого термоакустического двигателя от температуры горячего теплообменника // XIII Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы машиностроения». 2020. С. 301-302.
2. Кочетков М.Е., Осинцев О.Н., Горшков И.Б. Построение экспериментального кольцевого четырёхступенчатого термоакустического преобразователя с бегущей волной // «ОПТОТЕХ-2019» 2019. С. 252-256.
3. Горшков И.Б. Численное моделирование зависимости характеристик кольцевого четырёхступенчатого термоакустического двигателя Стирлинга от геометрических параметров теплообменных аппаратов // Международная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики" 2020. С. 829-836.

4. Программа для управления термоакустическим двигателем / Горшков И.Б. // № RU 2020612938, 2019 г.

Итоговое заключение.

Диссертация И. Б. Горшкова «Исследование особенностей термогенерации акустических волн в кольцевых системах» содержит решение актуальной задачи радиофизики в области термогенерации акустических волн. Ее содержание отвечает специальности 01.04.03 - Радиофизика.

Диссертация рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика как удовлетворяющая критериям, установленным пп. 9-11, 13, 14 действующего «Положения о присуждении учёных степеней» (утверждено постановлением правительства Российской Федерации от сентября 2013 г., № 842) для кандидатских диссертаций.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского». Присутствовало на заседании 10 докторов наук и 3 кандидата наук по профилю диссертации (физико-математические науки).

Результаты открытого голосования: «за» – 13 чел., «против» – нет, «воздержались» – нет (протокол заседания кафедры компьютерной физики и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» № 2 от 16.09.2021.

Председательствующий
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой компьютерной физики
и метаматериалов на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова
института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского»

Аникин Валерий Михайлович

Адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83,
Институт физики,
Телефон: +7 (8452) 52 27 05
E-mail: AnikinVM@sgu.ru

