



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова»
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)

Россия, Санкт-Петербург, 190005, 1-я Красноармейская ул., д.1. Тел.: (812) 316-2394, факс: (812) 490-0591,
e-mail: bgtu@voenmeh.ru www.voenmeh.ru
ИНН 7809003047

19.12.2023 № 157
На № 15313 - 19/1020 от 16.11.2023

«Утверждаю»
Ректор университета
д.т.н., профессор

К.М. Иванов
« 19 » 12 2023 г.

Отзыв ведущей организации

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

на диссертационную работу **Примакова Антона Вадимовича «Экспериментально-теоретическое исследование влияния геометрии биканальных систем генератора звука Гартмановского типа на их амплитудно-частотные характеристики»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа Примакова А.В. посвящена экспериментальному и численному исследованию нестационарных газодинамических и волновых процессов в биканальных газоструйных излучателях звука на основе генератора Гартмана.

Несмотря на то, что история изучения и применения газоструйных генераторов сильных акустических волн, начиная с первых работ самого Гартмана, насчитывает уже более 100 лет, автору удалось найти свою нишу в этих исследованиях и получить новые результаты, представляющие научную ценность. Основным объектом изучения в диссертации является биканальный генератор сильных акустических волн. Такой генератор был предложен и исследован в

ИТПМ СО РАН применительно к процессу сушки зернистых и пористых материалов. Генераторы мощного акустического излучения применяются и в других приложениях. В настоящее время газодинамические процессы в многоканальных генераторах закрытого типа, сопровождаемые сложным взаимодействием ударных волн, и их взаимосвязь с акустическим излучением исследованы недостаточно. В то же время изучение процессов в многоканальных системах, которые позволяют получить более мощное акустическое излучение по сравнению с классическим генератором Гартмана представляет значительный практический интерес. В этой связи тема диссертации, безусловно, актуальна.

Экспериментальные исследования выполнены автором в ИТПМ СО РАН. Целью здесь являлось систематическое изучение амплитудно-частотных характеристик биканальной установки генерации звука в зависимости от давления в форкамере, расстояния между соплом и основным резонатором и глубины основной резонансной полости. Результаты экспериментов сравнивались с приближенной теорией Гельмгольца. Установлено хорошее совпадение экспериментальных данных с теоретическим значением частоты по Гельмгольцу для первых двух гармоник и удовлетворительная корреляция для гармоник с большей частотой. Численное исследование волновой структуры течения в основном и дополнительном каналах выполнено на основе осредненных по Фавру нестационарных трехмерных уравнений Навье-Стокса. Для замыкания осредненных уравнений использовалась известная *k-omega* SST модель турбулентности. Расчеты выполнены в пакете ANSYS Fluent. Результаты расчетов сравнивались с данными, полученными в экспериментах. Получено хорошее согласие.

В обзорной части диссертации автор продемонстрировал знание как в классических, так и более поздних, в том числе современных работ. Список литературы включает практически все основные работы по рассматриваемой теме.

Во всех главах обращает на себя внимание тщательность, с которой описываются экспериментальные и численные результаты. В экспериментах основное внимание было уделено получению амплитудно-частотных характеристик акустического излучения, а также спектральному его анализу. При численном моделировании газодинамических и акустических процессов исследовано влияние параметров сетки в расчетной области на результаты расчетов и их корреляция с экспериментальными данными, прослежена взаимосвязь газодинамических волновых процессов в каналах с акустическими характеристиками излучения.

Наиболее ценными в научном плане являются следующие результаты:

1. Обнаружен и исследован гистерезис при нарастании/убывании давления в форкамере.
2. Впервые получено распределение интенсивности между первой, второй и третьей гармониками при варьировании глубины основной резонансной полости. Найдена граница относительной глубины основного резонатора, начиная с которой доминирующей становится вторая гармоника.
3. Выделены характерные области изменения отношения давлений в форкамере и в окружающей среде, в которых проявляется эффект Гартмана. Установлены границы областей, в которых преобладает шум струи, нарастание интенсивности акустического излучения, существование высокоинтенсивных колебаний, снижение интенсивности и, наконец, область фонового звучания струи.
4. Получены экспериментальные данные по изменению от времени давления в характерных точках вблизи торца, в центре и в рабочей части биканальной системы. В тех же точках найден спектральный состав акустических возмущений. Эти данные важны как для валидации численных моделей, так и для понимания особенностей волновых процессов в рассматриваемых системах.
5. Численно на основе решения трехмерных уравнений турбулентного течения проанализирована структура нестационарного течения в основном и в дополнительном канале, получены распределения температуры и давления. Результаты сравнивались с экспериментальными данными по частоте и интенсивности акустического излучения при различной величине относительной глубины основного резонатора. Получено хорошее согласие, что подтверждает адекватность численной модели по указанным характеристикам процесса.
6. В результате исследования влияния глубины основного резонатора на колебания с биканальной системе установлена взаимосвязь между развертками по времени давления в трёх характерных точках системы, а также спектральный состав колебаний в тех же точках, что позволило выделить наилучший режим с наиболее чистым акустическим сигналом.
7. Выполненное исследование влияния соотношения диаметров сопла и резонатора на спектральный состав акустического течения позволило

выбрать соотношение, обеспечивающее наибольшую интенсивность акустического излучения при чистом тоне колебаний.

8. Впервые детально на основе численного моделирования исследован прототип многоканальной установки с параллельным и последовательным расположением резонансных пар сопло-резонатор. Дано сопоставление результатов со случаем одной резонансной пары. При параллельной конфигурации достигнута синхронизация генераторов Гартмана и значительное увеличение интенсивности акустического излучения. Показано, что для последовательной конфигурации возможно рассогласование газоструйных потоков в резонансных полостях и, как следствие, снижение интенсивности акустического излучения.

Все перечисленные результаты обоснованы, и их достоверность не вызывает сомнений.

Замечания:

1. В подразделе 2.1. («Физическая и математическая постановка задачи» не даны оценки числа Рейнольдса, не приведена полная система уравнений для описания нестационарного турбулентного течения в биканальной системе, не сформулированы все необходимые граничные условия.

Число Рейнольдса различно в различных областях биканальной системы. Так, оно близко к нулю в областях, примыкающих к торцам каналов. Поэтому сделанный в диссертации выбор модели течения, в которой учитываются турбулентные эффекты, недостаточно аргументирован. Совпадение результатов расчетов с экспериментом по частотам в трёх заданных точках не является убедительным аргументом в пользу использованной модели нестационарного течения. Более того, хорошо известно, что в нестационарных течениях с ударными волнами эффекты вязкости практически не влияют на волновые процессы, которые являются в рассматриваемом случае источником возникновения акустического излучения. Поэтому важно было бы оценить в работе роль вязкости в формировании нестационарной ударно-волновой картины и, как следствие, в генерации акустического излучения. К сожалению, этого в диссертации не было сделано.

Если в журнальных статьях допускается приводить только основные уравнения со ссылкой на оригинальную публикацию, в данном случае на статью Ф. Ментера в AIAA J. (1994), то в диссертации следовало привести все уравнения, соотношения и значения констант в используемой модели турбулентности. При описании соотношений автором допущены неточности, например, тензор σ_{ij} на стр. 59 не является тензором вязких напряжений, так как определяется не актуальными, а осредненными компонентами скорости газа. Что касается граничных условий, то в данном подразделе не сказано, как задавалась кинетическая энергия турбулентности (или интенсивность турбулентности) на входе в сопло. Задания одного лишь давления в форкамере недостаточно для численного решения приведенных уравнений.

2. Приведенная на рис. 2.4 «оптимизированная» расчетная сетка представляется слишком грубой для течений в каналах вдали от сопла. Возможно, именно поэтому ударные волны, распространяющиеся вглубь каждого канала, получились сильно «размытыми», что наиболее выразительно видно из рис. 2.16.
3. Автор формулирует цель диссертационного исследования как «создание научных основ для построения многоканальных генераторов высокоинтенсивных акусто-конвективных колебаний». Фундаментальными научными основами при изучении рассматриваемых явлений являются уравнения Навье-Стокса и грамотная постановка краевых условий на границах расчетной области, а никак не частные, хотя и важные экспериментальные результаты и выбранная численная модель в коммерческом пакете ANSYS Fluent. В данном случае, на наш взгляд, автор переоценивает значимость своей работы. Кстати, в тексте Заключение не упоминается «создание научных основ». Это свидетельствует о том, что цель, как она сформулирована автором, не была достигнута.
4. Автор часто прибегает к терминологии и оборотам речи, которые типичны для журналистики и для популярных статей, но которые не приняты в научных сочинениях, каковым является диссертация. Приведем лишь некоторые примеры:
 - «С ранних этапов развития человечество встречалось с предметами, которые при взаимодействии с воздушными потоками становятся источником звука ...» (стр. 3);

- «Применение звуковых устройств в жизнедеятельности человека имеет потенциал в промышленной и научной сфере ...» (там же);
- «Уникальные газодинамические явления привлекают интерес учёных к сложным системам каналов с начала 20го века ...» (стр. 11-12);
- «Концепт ... устройства ...» (стр. 121);
- «цифровая копия» (стр. 55) и «... цифровая модель» (стр. 145).

Приведенные замечания, конечно, снижают общее положительное впечатление о работе. Несмотря на отмеченные недостатки, надо сказать, что автором выполнено достаточно подробное экспериментальное и численное исследование сложной трёхмерной нестационарной задачи и получены новые научные результаты, которые правильно отражены в Заключение диссертации. Выполненное исследование газодинамических и акустических процессов в трактах многоканальных резонирующих систем продемонстрировало высокую научную квалификацию автора.

Практическое значение работы состоит в возможном улучшении существующих и стимуляции разработки новых многоканальных генераторов мощного акустического излучения для использования в различных технических областях. Автор правильно отмечает такие области приложения, как диспергация жидкостей, интенсификация горения, низкотемпературная сушка пористых материалов.

Результаты диссертации могут служить основой для совершенствования ряда технологий в авиационной, машиностроительной, энергетической, сельскохозяйственной промышленности и других отраслях.

Автор выступил с подробным докладом по диссертации на научном семинаре по механике жидкости, газа и плазмы кафедры «Плазмогазодинамика и теплотехника» в Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕНХ» им. Д.Ф. Устинова, и работа была одобрена.

Заключение

На основе изложенного считаем, что диссертация **Примакова Антона Владимовича «Экспериментально-теоретическое исследование влияния геометрии биканальных систем генератора звука Гартмановского типа на их амплитудно-частотные характеристики»** удовлетворяет требованиям, предъ-

являемым к кандидатским диссертациям согласно пп. 9, 10, 11 и 13 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 N 842, ред. от 26.10.2023 г. №1786 «О порядке присуждения ученых степеней»). Она является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной научной задачи – определение на основе исследования газодинамических процессов амплитудно-частотных характеристик би- и многоканальных генераторов мощного акустического излучения, – имеющей существенное значение для механики жидкости и газа.

Диссертация соответствует паспорту специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы, так как предметом исследования являются нестационарные газодинамические процессы в многоканальных генераторах акустического излучения.

Автор диссертации Примаков Антон Вадимович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв утвержден на заседании кафедры (протокол № 11 от 06.12.2023 г.).

Зав. кафедрой

«Плазмогазодинамика и теплотехника»

кандидат технических наук, доцент



И.В. Тетерина

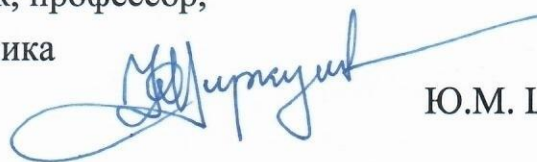
Научный руководитель семинара

по механике жидкости, газа и плазмы

доктор физико-математических наук, профессор,

проф. кафедры «Плазмогазодинамика

и теплотехника»



Ю.М. Циркунов

Тетерина Ирина Владимировна, E-mail: teterina_iv@voenmeh.ru

Циркунов Юрий Михайлович, E-mail: tsirkunov_ium@voenmeh.ru

Сведения о ведущей организации

по диссертационной работе **Примакова Антона Вадимовича** на тему «Экспериментально-теоретическое исследование влияния геометрии биканальных систем генератора звука гартмановского типа на их амплитудно-частотные характеристики», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы

Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова»
Сокращенное наименование организации в соответствии с уставом	БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова
Почтовый индекс, адрес организации	190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1
Веб-сайт	http://www.voenmeh.ru/
Телефон	(812)316-23-41
Адрес электронной почты	komdep@bstu.spb.su
Список основных публикаций работников структурного подразделения, в котором будет готовиться отзыв, по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций)	Кафедра «Плазмогазодинамика и теплотехника» <ol style="list-style-type: none">1. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Цветков А.И., Рассошенко Ю.С., Козелков А.С., Карпенко А.Г. <i>Акустические взаимодействия в газовых потоках</i>. Под ред. В.Н. Емельянова, К.Н. Волкова. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2021. – 592 с.2. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, А. В. Ефремов, А. И. Цветков, “Акустические характеристики автоколебательного процесса, возникающего при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с цилиндрической полостью”, <i>ЖТФ</i>, 90:5 (2020), 733–739.3. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, А. В. Ефремов, А. И. Цветков, “Структура течения и колебания давления при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи газа с трубной полостью”, <i>ЖТФ</i>, 90:8 (2020), 1254–1266.4. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, А. И. Цветков, П. С. Чернышов, “Механизмы генерации и источники шума сверхзвуковых струй и численное моделирование их

	<p>газодинамических и аэроакустических характеристик”, <i>Выч. мет. программирование</i>, 20:4 (2019), 498–515.</p> <p>5. Н. А. Брыков, К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина, “Течения идеального и реального газа в каналах переменного сечения с нестационарным локализованным подводом энергии”, <i>Выч. мет. программирование</i>, 18:1 (2017), 20–40.</p>
--	---



Ректор

«10» октября 2023 г.

К.М. Иванов