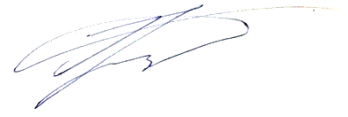


На правах рукописи



Примаков Антон Вадимович

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ГЕОМЕТРИИ БИКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ГЕНЕРАТОРА ЗВУКА  
ГАРТМАНОВСКОГО ТИПА НА ИХ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (Новосибирск).

Научный руководитель:

**Жилин Александр Анатольевич**, доцент, кандидат физико-математических наук, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН, старший научный сотрудник лаборатории № 12 «Волновые процессы в ультрадисперсных средах».

Официальные оппоненты:

**Фадеев Сергей Алексеевич**, кандидат физико-математических наук, Института механики и машиностроения - обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, научный сотрудник лаборатории механики сплошной среды.

**Терехов Владимир Викторович**, профессор РАН, доктор физико-математических наук, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН, заведующий лабораторией № 2.2 «Термогазодинамика».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

Защита состоится «26» января 2024 г. в 9<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета 24.1.125.01 (Д003.035.02) в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1.

[http://www.itam.nsc.ru/website/inst/upload/infoblock/file/x6tql-Primakov\\_textdiss.pdf](http://www.itam.nsc.ru/website/inst/upload/infoblock/file/x6tql-Primakov_textdiss.pdf)

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «    »                      2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук



С.А. Гапонов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы** обусловлена необходимостью исследования волновых взаимодействий, происходящих в тракте многоканальных систем. Особенность исследуемой в представленной работе многоканальной системы в ограниченности канала, в котором формируется газодинамический поток. Ограниченность тракта системы выгодно отличает систему от классического излучателя Гартмана.

Механизм возникновения высокоинтенсивных колебаний в ограниченном тракте многоканальных систем является важной фундаментальной задачей в области аэрофизики. Уникальные газодинамические явления привлекают интерес учёных к сложным системам каналов с начала 20го века, а многие эффекты до настоящего момента описаны недостаточно подробно или вовсе не поддаются теоретическому описанию. Исследования процессов генерации колебаний в таких системах способствует лучшему пониманию принципов работы генераторов Гартмановского типа и резонансных явлений в ограниченных каналах. Взаимодействие трансзвуковых волн возмущений представляют большой интерес, как для исследования генератора Гартмана и многоканальных систем, так и в области ракето-самолётостроения.

Большая часть научных знаний, накопленная на сегодняшний день, получена в результате экспериментальных исследований. Такой подход позволяет получать информацию о процессе, как о квазистационарном течении, фазовая синхронизация при этом затруднительна. Кроме того, исследование наиболее интересных областей труднодоступно из-за особенностей конструкции. Применение методов численного моделирования способствует изучению потоков в труднодоступных в эксперименте областях. Применение вычислительных технологий в исследовании позволит изучить особенности газовых потоков и предсказать возможности новых конфигураций многоканальных систем. Такой приём делает возможным получение новых данных в проблеме описания потоков в многоканальных системах, генерирующих акустические колебания.

Создание новых конфигураций многоканальных систем – важная прикладная задача, решаемая авторами. Большой интерес к концептуально новым системам возникает из необходимости повышения уровня звукового давления в акусто-конвективном потоке. Увеличение интенсивности колебаний позволит усовершенствовать устройство акусто-конвективного сушильного устройства, увеличив сечение его рабочей части и, как следствие, объём осушаемого материала, что крайне важно в промышленности.

### **Цель диссертационной работы:**

создание научных основ для построения многоканальных генераторов высокоинтенсивных акусто-конвективных колебаний.

### **Задачами** настоящей работы являются:

- экспериментально получить зависимости интенсивности и частоты рабочего потока в тракте биканальных системах от давления в форкамере и геометрических параметров системы;

- применить физико-математическую модель с привлечением трёхмерных уравнений Навье-Стокса, осреднённых по Фавру, для расчётов газодинамических потоков в тракте биканальной системы, генерирующей высокоинтенсивные акустические колебания;

- верифицировать полученные численные результаты на экспериментальных данных, а также известных теоретических моделях;

- с помощью численного моделирования провести оценку амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) резонирующих систем в широком диапазоне геометрий и входных параметров в биканальных системах;

- провести модификацию разработанной численной методологии для описания течения в многоканальной системе, провести ее тестирование, необходимое для дальнейшего исследования в задачах, связанных с акусто-конвективными потоками в трактах би- и многоканальных систем;

- с помощью реализованной вычислительной методологии исследовать взаимодействия волновых структур, генерируемых резонансными полостями многоканальной системы и особенностями её геометрии.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- Впервые для биканальных газодинамических систем выявлен эффект гистерезиса формирующегося акусто-конвективного потока, характеризующийся повышенным значением уровня звукового давления при меньших давлениях газа в форкамере.

- Показан процесс перехода к режиму доминирования второй гармоники в амплитудно-частотном спектре, характерному для биканальных систем с глубокими резонаторами.

- Предложена концептуально новая многоканальная резонирующая система в двух конфигурациях (последовательная и параллельная), включающая несколько взаимодействующих между собой пар сопло-резонатор и описаны особенности течения в её тракте. Установлен факт рассогласования резонансных пар в последовательной конфигурации, в результате чего формируется акустический поток с большим количеством низкоинтенсивных тонов в спектре. В параллельной конфигурации удалось достичь резонанса генераторов Гартмана, что привело к значительному увеличению интенсивности колебаний в потоке.

**Практическая ценность работы** заключается в возможности использования полученных в работе амплитудно-частотных характеристик в научных исследованиях и при проектировании и реализации аналогичных устройств; в адаптации разработанной методологии расчётов трёхмерных нестационарных течений в тракте би- и многоканальной системы, генерирующей высокоинтенсивные колебания, для подобных процессов; в реализации методологии оценки влияния геометрии системы на формирование акусто-конвективного потока; в усовершенствовании акусто-конвективной установки и создании концептуально новых многоканальных технических устройств.

**Достоверность** экспериментально полученных данных обеспечена применением зарекомендовавших себя стандартных методов проведения экспериментального исследования, проведённой тарировкой измерительных инструментов и повторяемостью результатов.

Достоверность результатов численного моделирования подтверждается: - результатами тестирования расчётной модели;

— согласованием полученных данных с результатами эксперимента и теоретической модели;

— соответствием известным результатам других авторов, в том числе представленных в зарубежной литературе;

— повторяемостью численного эксперимента в различных условиях и различных системах каналов.

#### **Апробация работы:**

Основные результаты докладывались на семинарах под руководством академика РАН Фомина В.М., профессора Федорова А.В. (ИТПМ СО РАН), а также на XVI и XVII Всероссийском семинаре "Динамика Многофазных Сред" (Новосибирск, 2019 и 2021гг.), XIV и XVII Всероссийских конференциях молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск - Шерегеш, 2019 и 2022гг.), XV Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» (Новосибирск, НГАСУ, 2022г.)

#### **На защиту выносятся:**

1. Результаты экспериментальных исследований по влиянию глубины резонансной полости и зазора между срезом сопла и кромкой резонатора в биканальных системах на газодинамические параметры акусто-конвективного потока с высокоинтенсивными колебаниями.
2. Верификация результатов расчёта на основе созданной численной модели газоструйного течения биканальной системы генератора высокоинтенсивных колебаний с экспериментально полученными данными.
3. Результаты численных исследований газодинамических потоков в многоканальных резонансных системах в последовательной и параллельной конфигурациях с двумя и более парами сопло-резонатор.

**Личный вклад автора.** При выполнении работ по теме диссертации автор принимал активное участие в постановке задач численного и экспериментального исследования, обсуждения результатов, подготовке научных трудов и докладов на конференциях. Автором реализована цифровая копия биканальной резонансной системы и предложены концептуально новые конфигурации многоканальных акусто-конвективных систем.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 114 наименований. Материал изложен на 157 страницах, включает 5 таблиц, 75 рисунков и схем.

Исследования проведены при частичной поддержке гранта РФФИ № 20-31-90117 А «Исследование влияния газодинамического течения в многоканальной системе на формирование высокоинтенсивных акустических волн» (2020 – 2023 гг.)

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведён исторический обзор возникновения газодинамических свистков и генераторов Гартмана. История открытия данного устройства и области его применения. Введено понятие биканальной акустической системы. Обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, кратко изложены полученные результаты.

**Первая глава** посвящена экспериментальным исследованиям биканальной системы, генерирующей высокоинтенсивные колебания. Приведён обзор литературы, освещающий проблему формирования потока с помощью свистков Гартмана. В обзоре литературы дана информация о пионерских исследованиях в области изучения различных устройств на основе генератора Гартмана. Проведено сравнение собственных частот резонатора, полученных в эксперименте, с теоретическими значениями, вычисленными по формуле Гельмгольца, показавшее хорошее совпадение (отклонение экспериментально полученной от собственной частоты не превышает 2,5%).

В П. 1.1. представлена технология проведения физического эксперимента. Описана применяемая аппаратура и дано физическое описание биканальной системы. Биканальная система включает два пересекающихся под прямым углом канала (рис. 1). Первый канал состоит из соосно расположенных форкамеры (1) с дозвуковым сужающимся соплом (2) и резонатора (3) цилиндрической формы. Диаметр резонансной полости составляет  $d = 20$  мм, а диаметр сопла  $0,5d$ . Первый канал является свистком Гартмана, который генерирует акустические колебания. Второй канал квадратного сечения состоит из дополнительного резонатора (4) с закрытой торцевой частью (с постоянной глубиной  $35d$ ) и рабочей части (5) со свободным выходом. Внутри форкамеры установлены датчики, фиксирующие динамическое и статическое давление перед соплом. В качестве датчика применяется пневмометрический насадок – трубка Пито-Прандтля малого сечения. Полученные значения поступают на стрелочные манометры и используются для определения влияния входного давления на АЧХ системы.

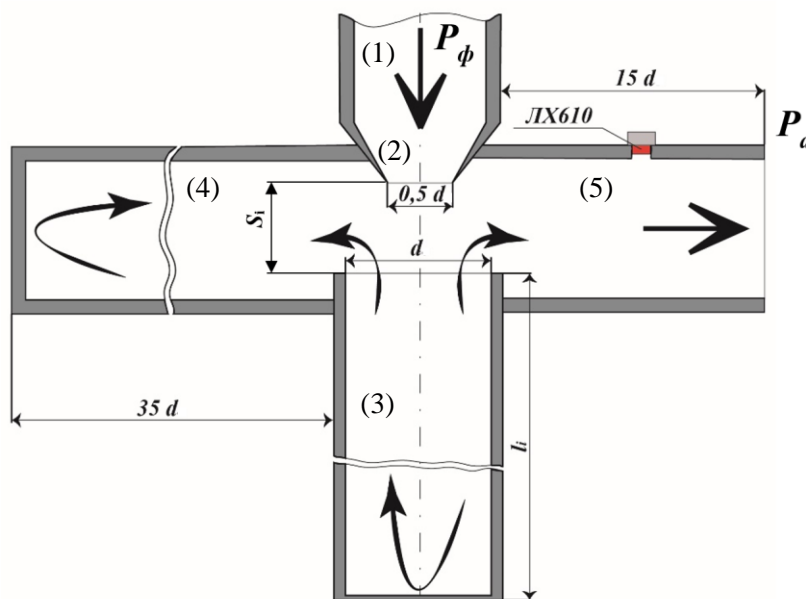


Рис.1. Схематичное изображение экспериментального стенда биканальной системы.

В П. 1.2. представлен результат экспериментальных исследований влияния глубины резонансной полости и давления в форкамере на амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) биканальной системы. Описано исследование систем с глубокими резонаторами (более 20 калибров). Установлено, что в спектрах систем с глубокими резонаторами преобладает тон, соответствующий второй гармонике. Первая гармоника (122 Гц) при этом имеет в разы меньшую амплитуду и сравнима с гармониками третьего и больших порядков.

Изменение интенсивности гармоник ( $f_1 - f_4$ ) в зависимости от давления в форкамере носит немонотонный характер, что естественно для процессов колебания. На рис. 2 штрихами выделены характерные спектры для каждого из режимов работы генератора. В интервале между режимами I и III значение основной гармоники остается практически постоянным, а динамика второй, третьей и четвертой гармоник носит немонотонный характер с максимумом. Таким образом, область II соответствует режиму колебаний собственной частоты резонатора при наибольшей интенсивности осцилляций, что позволяет назвать её областью высокоинтенсивного режима колебаний Гартмана.

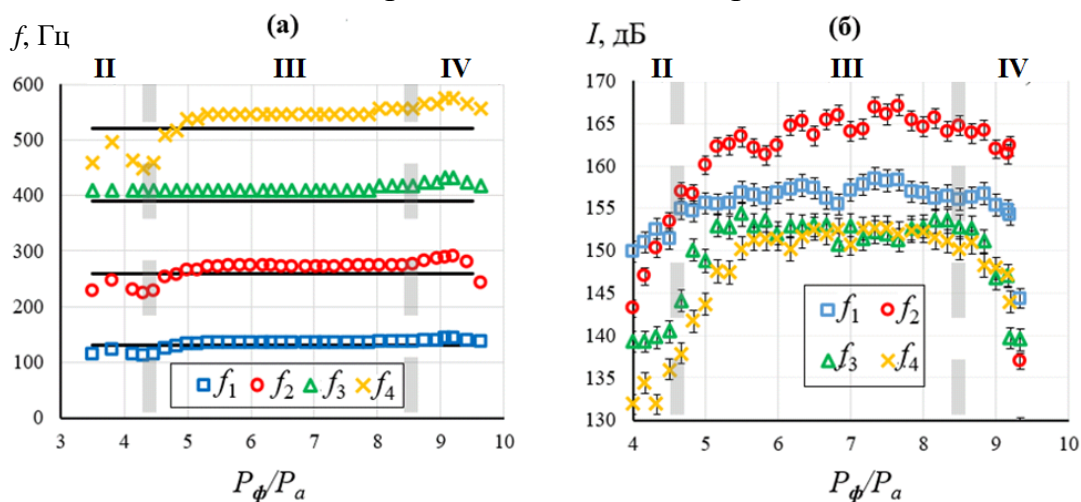


Рис.2. Сравнение характерных (а) частот и (б) интенсивностей акустических гармоник при изменении давления в форкамере при  $l/d = 30$  (черные линии – расчетные значения частот соответствующих гармоник; штриховые линии – характерные области эффекта Гартмана).

Установлено влияние глубины резонатора на область эффекта Гартмана: с увеличением глубины растёт и область существования (рис. 3а). При этом заметно падение частоты основного тона с ростом глубины резонатора, что согласуется с теорией. Отмечено, что глубина резонатора влияет на интенсивность генерируемого звука. Большие глубины соответствуют большей интенсивности: при уменьшении относительной глубины резонатора с 31,5 до 23,5 интенсивность увеличивается на 10 дБ (рис. 3б). Звук высокой интенсивности наблюдается при значениях статического давления в форкамере в диапазоне 4 – 10 атм., который будем называть оптимальным.

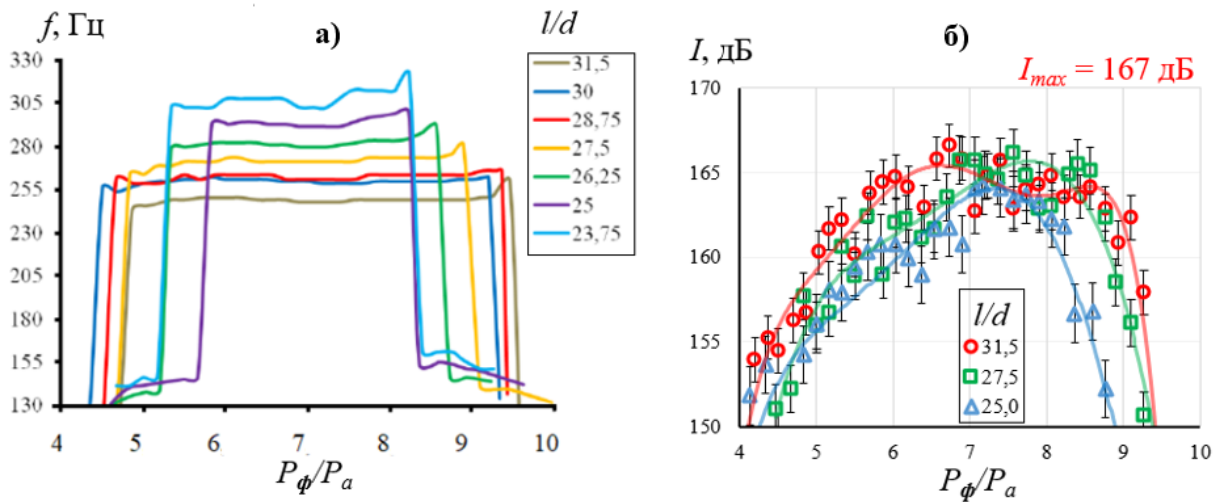


Рис.3. Сравнение а) частоты и б) интенсивности ( $l/d = 30$ ) гармоник акустического сигнала для различных значений глубины резонатора  $l$ .

В П. 1.3. описано экспериментальное исследование биканальных систем с изменяемым зазором между соплом и резонатором. Показана область эффекта Гартмана для такой конфигурации в зависимости от давления в форкамере (рис. 4): от 3 до 6 атм. и продемонстрирована возможность исследования областей нарастающей и падающей интенсивности, то есть области выхода на режим высокоинтенсивного звучания.

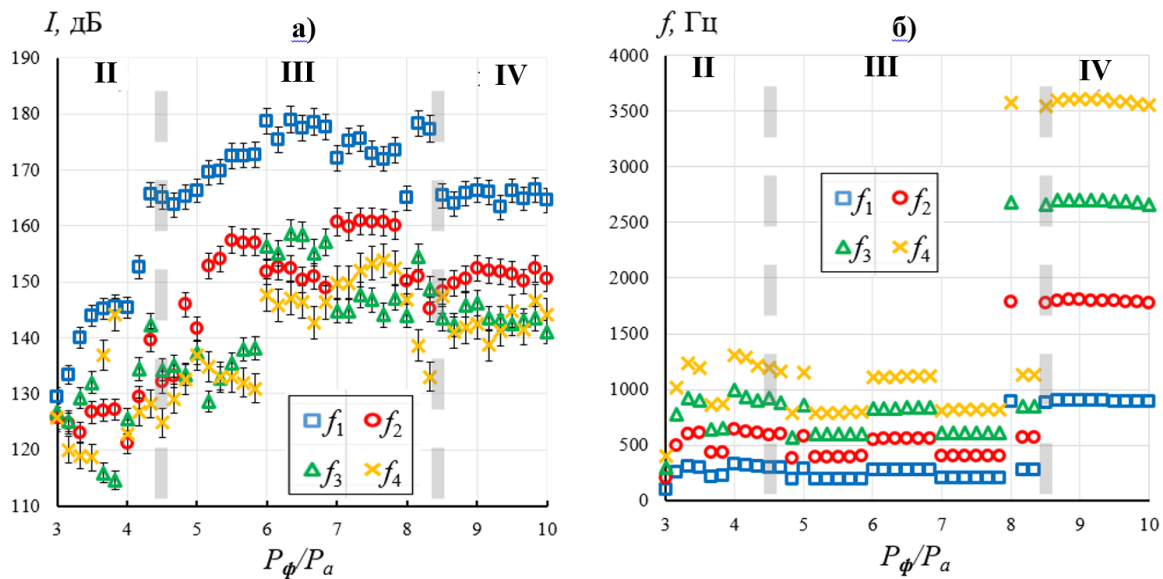


Рис.4 Характерное распределение а) амплитуд и б) частот гармоник биканальной системы с неглубоким резонатором ( $S/d = 1,75$ ;  $l/d = 15$ ).

Выделено несколько характерных областей существования эффекта Гартмана с отличными картинами течения: I. режим фонового звучания струи, II. нарастание интенсивности колебаний, III. режим высокоинтенсивных колебаний, IV. снижение интенсивности колебаний до фонового уровня, V. шум струи. Установлено существование явления гистерезиса в акусто-конвективном потоке при последовательном увеличении и уменьшении давления в форкамере системы (рис. 5). Сравнение с полуэмпирической формулой Гельмгольца собственной



частоты резонатора (штриховая линия на рис. 5) показало удовлетворительное совпадение экспериментальных с теорией (погрешность не более 3%).

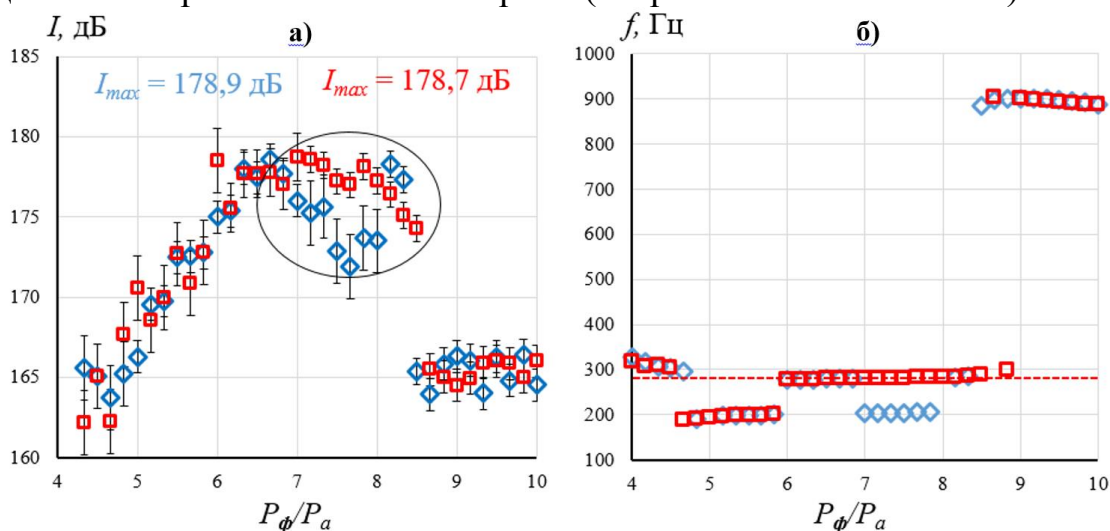


Рис.5. Характерное влияние давления в форкамере на а) амплитуду и б) частоту системы  
 $\diamond$  – прямой ход (нарастание давления);  $\square$  – обратный ход (убывание давления).  
 $S/d = 1,75$ ;  $l/d = 15$ .

Проведено сравнение экспериментально полученных данных с теоретическим значением собственной частоты Гельмгольца для резонаторов соответствующей формы. Частоты, определяемые по формуле Гельмгольца, хорошо согласуются с экспериментальными данными, в особенности для первых двух гармоник (расхождение с собственной частотой резонатора не более 2,5%). Частоты субгармоник сравниваются с собственной частотой соответствующей гармоники, помноженной на волновое число (рис. б). Видно, что как экспериментальные данные, так и расчетные значения монотонно возрастают с уменьшением глубины резонатора.

Сравнение АЧХ полученных колебаний с собственным значением частоты резонансной полости также проведено при оптимальном расстоянии  $S/d = 1,75$  вычисленной по формуле Гельмгольца. Рис. 7. показывает хорошее совпадение значений (278 Гц в эксперименте и 285 Гц по формуле Гельмгольца, погрешность 2,46%).

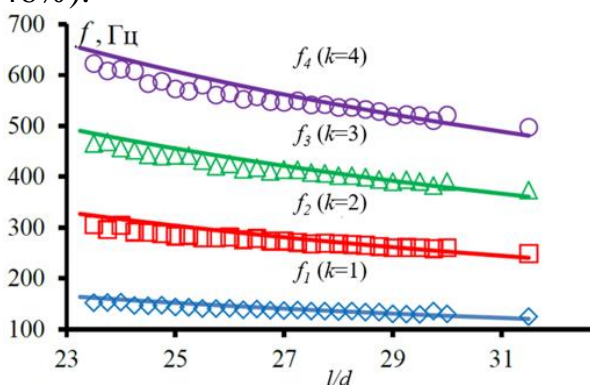


Рис.6. Сравнение частот сигнала с теоретическим значением собственной частоты Гельмгольца по гармоникам 1-4.  
 $(S/d = 1,75)$

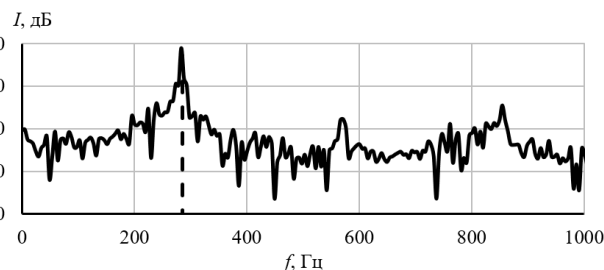


Рис.7. Сравнение характерного АЧХ в эксперименте при  $S/d = 1,75$ ;  $l/d = 15$  (сплошная линия) со значением, полученным по формуле Гельмгольца (штриховая линия).

Во **второй главе** приводится обзор литературы, посвящённой численному моделированию газодинамических систем, основанных на генераторах Гартмана. Описан процесс разработки цифровой копии акустической системы ИТПМ СО РАН от первых приближений с применением собственного кода до реализованной в настоящей работе модели. В данной главе проводится определение оптимальных геометрических параметров биканальной системы.

В П. 2.1. описана физико-математическая модель, применяемая в дальнейших расчётах би и многоканальных систем. Устанавливается порядок действий при проведении численного эксперимента. Для регистрации параметров формирующегося газодинамического потока в тракте биканальной системы установлено три точки-монитора: М-I – вблизи торца цилиндрического резонатора, М-II – между кромкой резонатора и срезом сопла (расстояние между срезом сопла и монитором М-II равно  $0,80d$ ), М-III – в рабочей части. Характеристики потока анализируются в установившемся режиме колебаний.

П. 2.2. посвящён тестированию, валидации и верификации численной модели по результатам экспериментов. Устанавливаются правила подбора параметров цифровой модели, среди которых структура расчётной сетки и временной шаг расчёта в зависимости от характерной частоты колебаний в системе. Валидация численной модели газодинамического потока проведена по газодинамическим параметрам формирующейся струи с экспериментальными данными независимых авторов. Сравнение проведено, как качественное по форме “бочки” струи, так и количественное при определении области существования эффекта Гартмана  $S/\Delta$  ( $\Delta$  – длина бочки). В формируемой с помощью численного моделирования картине течения показаны характерные области существования эффекта и установлено удовлетворительное совпадение данных (рис. 8).

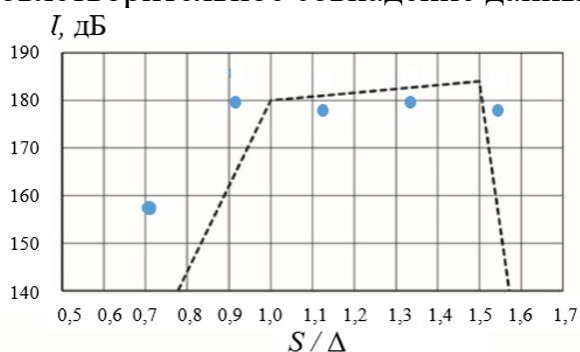


Рис.8. Сравнение области существования эффекта Гартмана в ● расчёте с --- экспериментальными данными<sup>1</sup>.

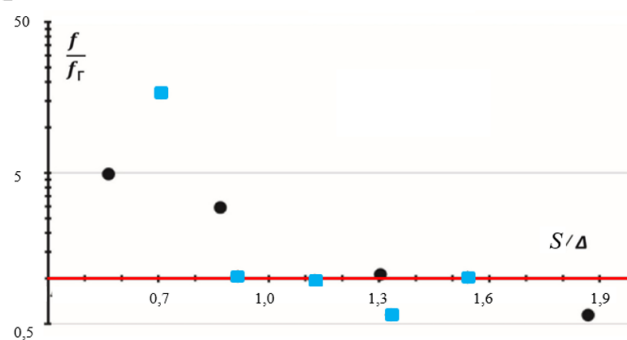


Рис.9. Сравнение частоты колебаний  $f$ , отнёсённой к собственной частоте резонатора  $f_r$  в ● эксперименте<sup>2</sup> и ■ расчёте.

<sup>1</sup>Глазнев В.Н., Коробейников Ю.Г. Эффект Гартмана. Область существования и частоты колебаний // Прикл. механика и техн. физика. 2001. Т. 42, № 4. С. 62 – 67.

<sup>2</sup>Murugappan S, Gutmark E. Parametric study of the Hartmann-Sprenger tube // Exp Fluids. 2005. Vol. 38, No. 6. P. 813 – 823.

Приведено сравнение полученной в расчете относительной частоты колебаний с экспериментальными данными, которое показывает удовлетворительное совпадение (рис. 9). Резонансные системы, в которых значения частоты генерируемого сигнала стремятся к  $f/f_T = 1$  ( $S_i / \Delta = 0,9 - 1,6$ ), работают в режиме собственной частоты колебаний резонатора ( $\Delta$  – длина первой бочки сформированной струи).

Результат численного моделирования биканальных систем с разными глубинами резонаторов сравнивается с данными эксперимента, проведённого на идентичной установке (рис. 10). Получено качественное и количественное согласование данных и эффектов, реализуемых в акустической системе. Хорошее согласование численного моделирования и экспериментальных данных позволяет говорить о реализации цифровой модели резонансной установки ИТПМ СО РАН.

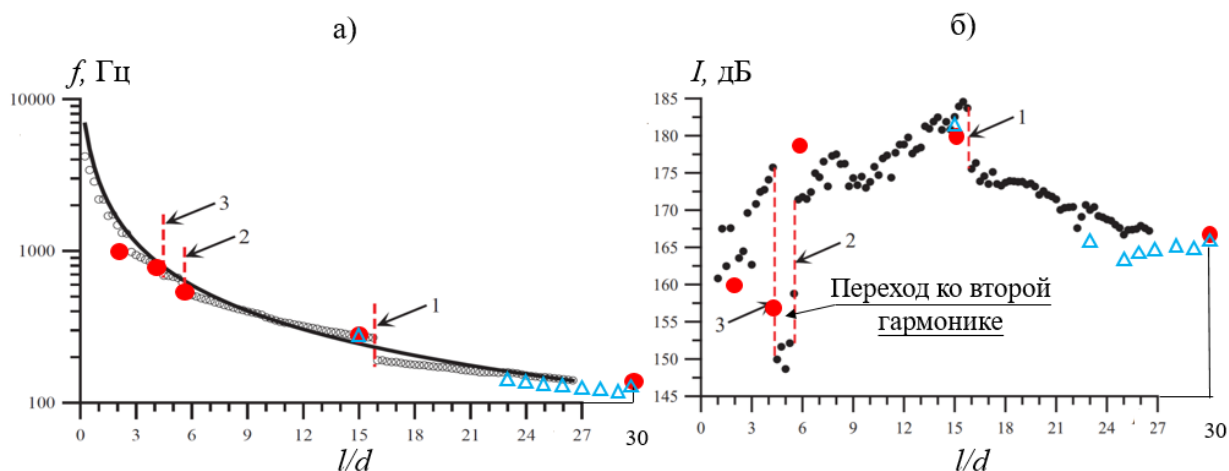


Рис.10. Изменение а) частоты (сплошная линия – частота собственных колебаний по Гельмгольцу) и б) интенсивности сигнала в рабочей части биканальной системы при изменении глубины резонансной полости  $l$ .  $\circ$ ;  $\bullet$  – частота; интенсивность в эксперименте<sup>3</sup>;  $\Delta$  – экспериментальные данные<sup>4</sup>;  $\bullet$  – результаты численного моделирования.

В П. 2.3. представлен результат численного моделирования биканальных систем с разными отношениями диаметров сопла и резонатора  $K = d/d_c$ , где  $d_c$  – диаметр сопла. Показан процесс заполнения полости струёй в системах с разным соотношением  $K$  (рис. 11). Установлено, что в случае небольшого диаметра резонатора ( $K = 1$ ) возникает обтекание полости, что приводит к потере интенсивности результирующего акусто-конвективного потока. В случаях  $K = 1,5$  и 2 зафиксированы спектры колебаний с малым количеством шумов и высокой интенсивностью колебаний.

В результате проведённого анализа картины течения в системах с разными соотношениями  $K$ , обнаружено дополнительное нарастание давления в области рабочей части, что является характерной особенностью биканальных систем.

В П. 2.4. исследуются конфигурации биканальных систем при изменении расстояния между соплом и резонатором  $S$  (Область I на рис. 12). Варьирование

<sup>3</sup> Zhilin A.A., Golubev E.A. Experimental study of the amplitude-frequency characteristics in a two-channel system // AIP Conf. Proc. 2018. Vol. 1939. 020016 (6 p).

<sup>4</sup> Primakov A.V., Zhilin A.A. Studying of the resonator depth influence on amplitude-frequency characteristics operating flow in the two-channel system // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol.1404, No. 1. 012096 (6 p).

расстояния сопло-резонатор в численном моделировании привело к лучшему пониманию процесса формирования струи в центральной части биканальной системы при помещении резонатора в струю. При наименьшем зазоре ( $S = 0,85$ ) наблюдается высокочастотное колебание. Перемещение резонатора дальше по потоку ( $S = 1,10$ ) приводит к более равномерному заполнению полости (Область II на рис. 12) и формированию «бочки» струи. Оптимальные колебания в чистом спектре с максимальной интенсивностью реализуются при помещении резонатора в начало второй бочки (рис. 12) и формированию «бочки» струи. Последующее увеличение расстояния между соплом и резонатором приводит к возникновению субгармоник и дополнительных кратных гармоник.

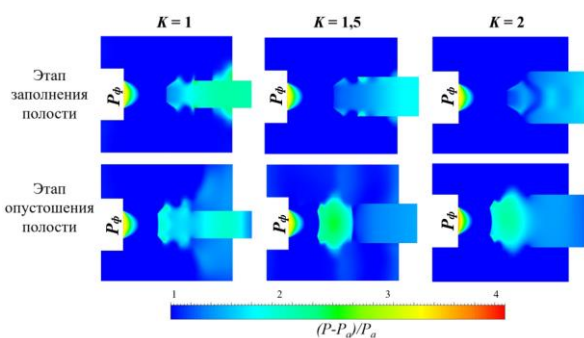


Рис.11. Распределение давления в центральной части системы на этапах заполнения и опустошения резонансной полости при разных соотношениях диаметров сопла и резонатора  $K$ .

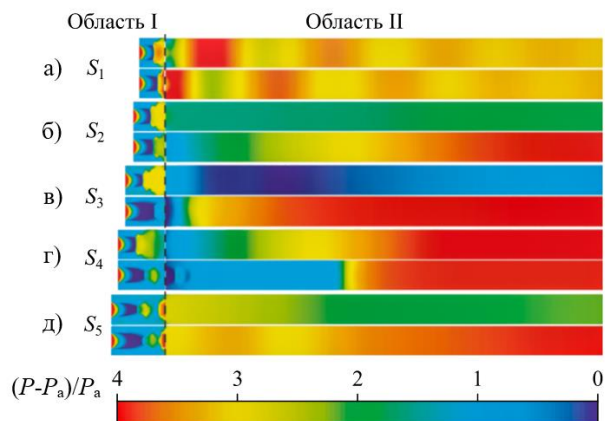


Рис. 12. Картина течения в центральной части системы.

Область I – расстояние между соплом и резонатором; Область II – резонансная полость постоянной глубины.

П. 2.5. посвящён исследованию влияния глубины  $l$  резонатора на АЧХ биканальной системы. Получены картины течения в тракте биканальных систем с разной глубиной резонатора. Анализ спектрального состава акустического сигнала позволил выявить эффект резонанса между основным и дополнительным резонаторами биканальной системы – дополнительное усиление сигнала в рабочей части при  $l/d = 15$  (рис. 13). Показано явление перехода ко второй гармонике, возникающее в конфигурациях с глубокими резонаторами ( $l/d > 20$ ), что связано с наличием дополнительного резонатора. Исходя из прикладных задач выбрана система с оптимальной глубиной резонатора  $l/d = 15$  с наименьшей зашумлённостью сигнала и наибольшей интенсивностью в рабочей части.

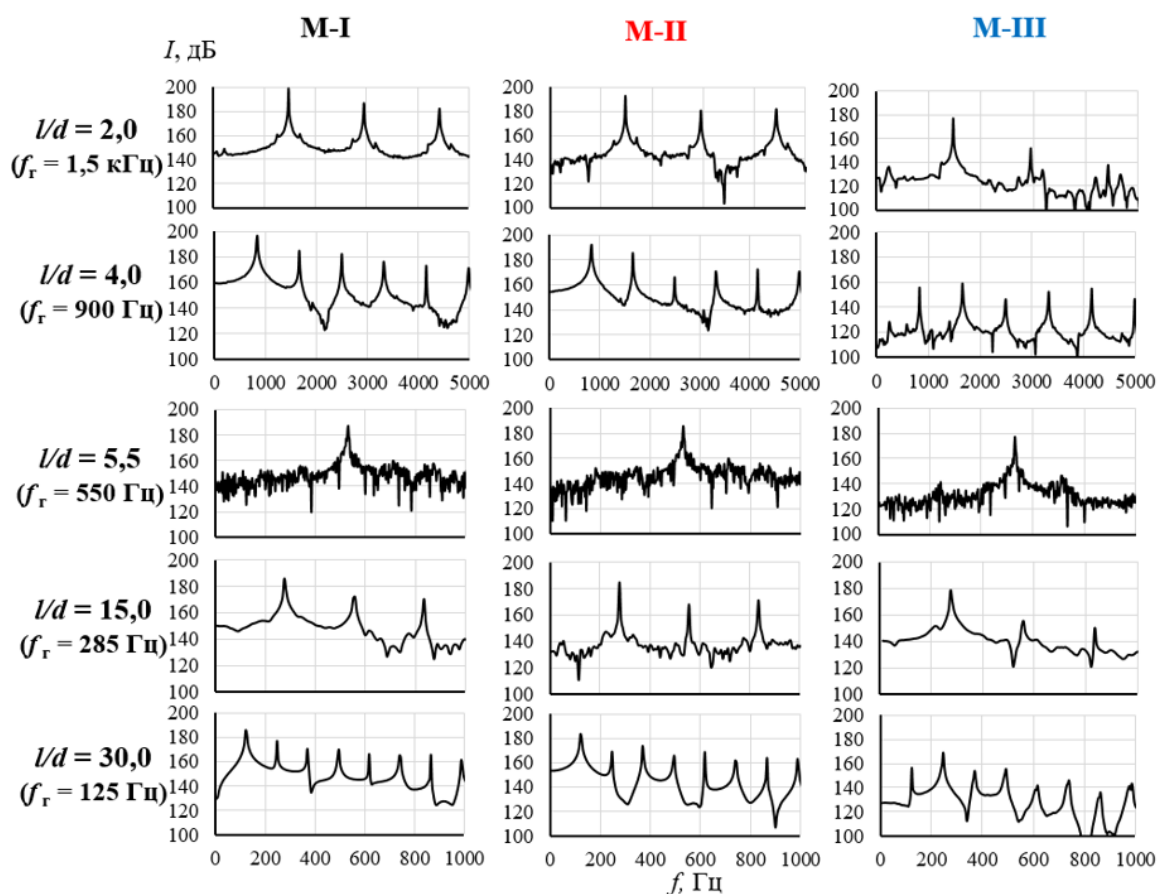


Рис.13. Спектральный состав колебаний акусто-конвективного потока в системах с резонаторами разной глубины в характерных мониторах (**М-I**) вблизи торца, (**М-II**) в центре, (**М-III**) в рабочей части.

В П. 2.6. проводится подробное описание цикла заполнения-опустошения резонансной полости большой глубины ( $l/d = 30$ ). В соответствии с характерными этапами циклического явления рассмотрен газодинамический процесс заполнения-опустошения резонансной полости (рис. 14). Устанавливается связь между тепловыми эффектами в глубоких резонаторах с волновыми взаимодействиями в тракте каналов системы. Зафиксировано взаимодействие ответного потока из резонатора с изначальной струёй, в результате чего возникают локализованные области повышенного давления. Установлено наличие высокотемпературной ( $200^{\circ}\text{C}$ ) застойной зоны вблизи торцевой стенки резонатора.

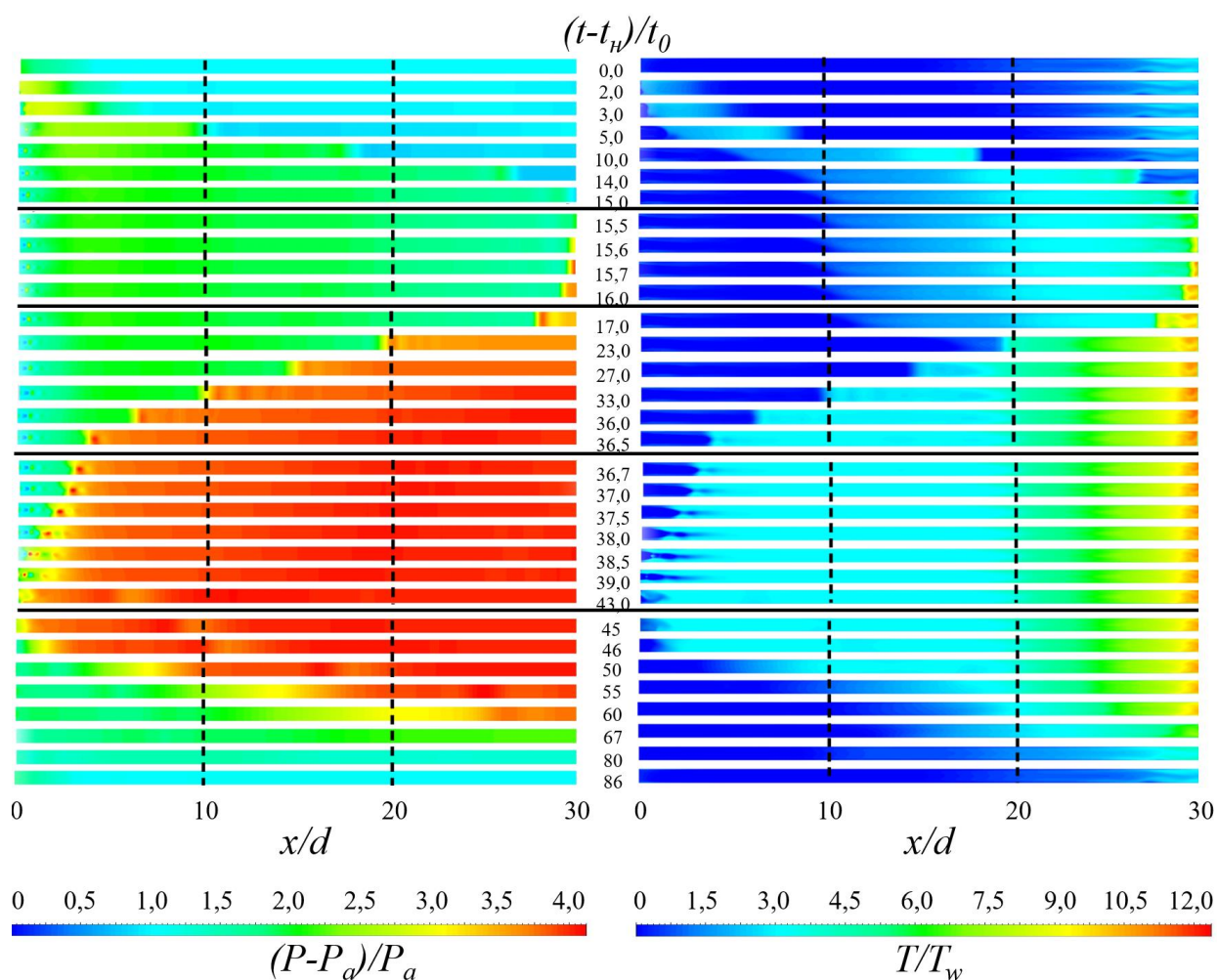


Рис.14. Распределение давления и температур в резонаторе на этапе: а) затекания струи в резонатор; б) отражения волны сжатия от торца; в) распространения отраженной волны сжатия по резонатору; г) взаимодействия волны сжатия со струей; д) разгрузки резонатора.

В П. 2.7. уделено внимание газодинамическим процессам в тракте дополнительного канала биканальной системы. Получено температурное распределение вдоль тракта. Отмечено, что температура в рабочей части системы не превышает  $30^{\circ}\text{C}$  (рис. 15). Установлено, что возмущения, возникшие в результате взаимодействия ответного потока из основного резонатора со струей, вызывают колебания диска Маха и формируют пакет волн, наблюдаемых в дополнительном канале. Проведено исследование волн, распространяющихся в тракте дополнительного канала и обнаружен эффект взаимного усиления волн сжатия в дополнительном канале и рабочей части биканальной системы.

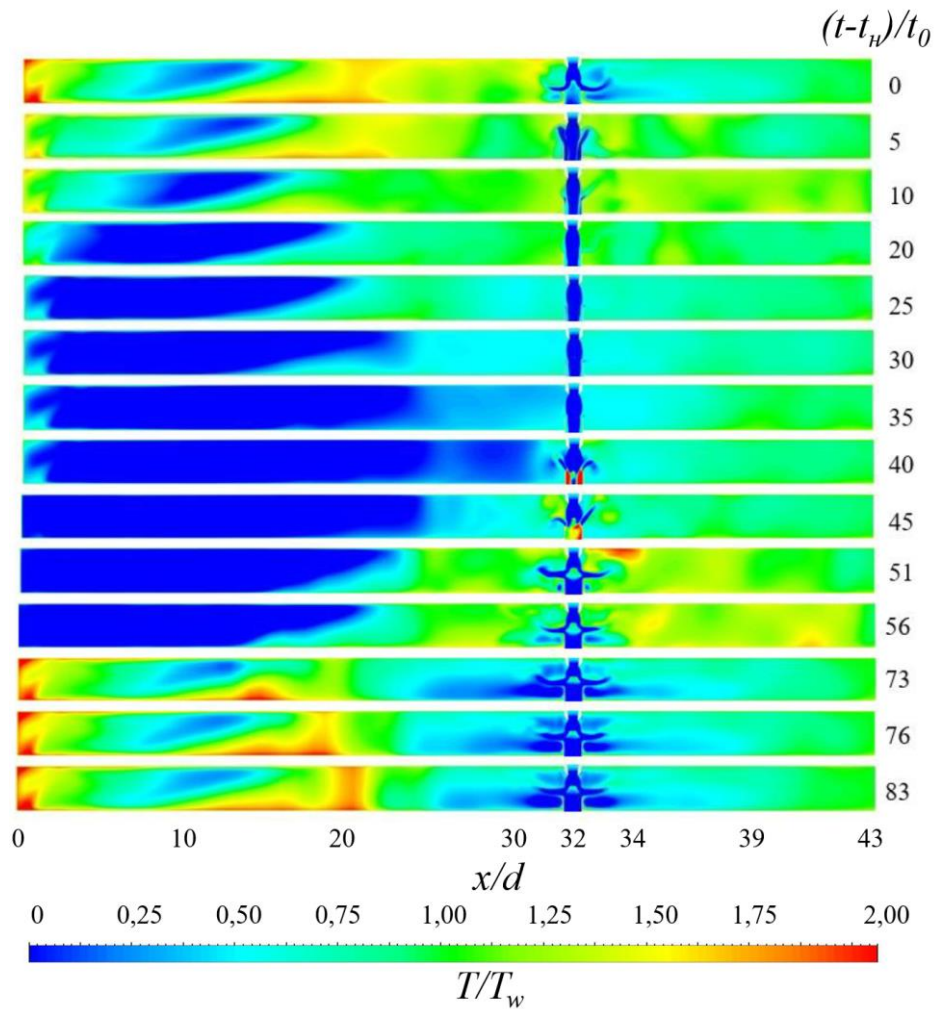


Рис.15. Развитие течения в тракте акусто-конвективной установки в биканальной системе.

**Третья глава** посвящена численному моделированию концептуально новых многоканальных систем, основанных на физических принципах генератора Гартмана. Представлен обзор литературы, посвящённой взаимодействию сопряжённых струй и устройств, работающих на принципе их взаимодействия. Исследованы многоканальные системы в последовательной и параллельной конфигурациях, определяющими параметрами которых являются количество расположенных друг напротив друга пар сопло-резонатор и их положение в системе каналов.

В П. 3.1. проведено численное исследование системы с двумя последовательно расположенными парами сопло-резонатор (рис. 16).

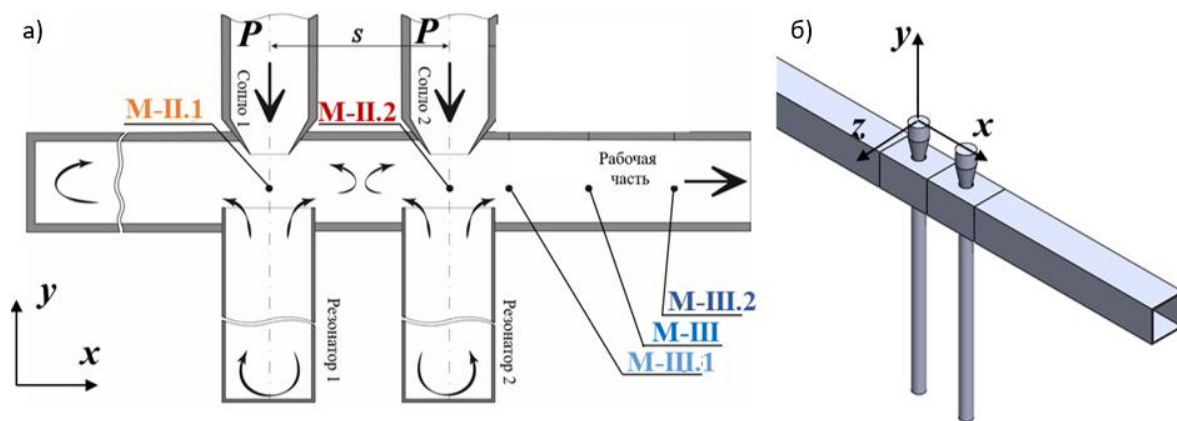


Рис.16. а) Схематичное изображение и б) изометрический вид последовательной конфигурации многоканальной системы.

Обнаружен эффект рассогласования потоков в резонансных парах, проявляющийся при взаимодействии соседних струй в ограниченном тракте. При рассогласовании возникают дополнительные тона в акустическом спектре, что негативно влияет на интенсивность потока (рис. 17). Для рассогласованных систем характерно наличие двух основных частот колебаний в амплитудно-частотном спектре. При этом одна частота близка к основной частоте колебаний резонатора, а вторая ниже.

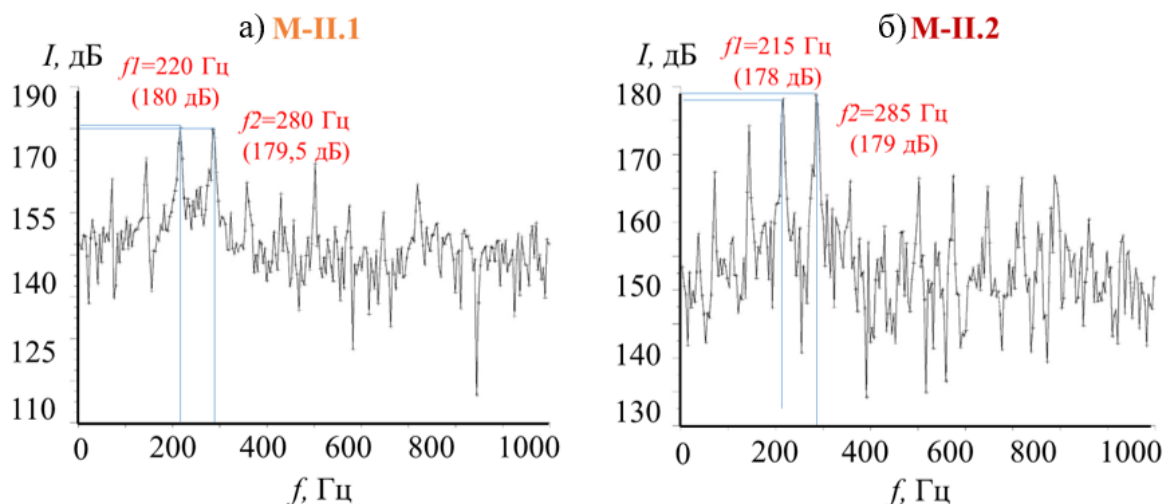


Рис.17. Спектральный состав акустического потока в мониторах между соплом и резонатором в а) первой (М-II.1) и б) второй (М-II.2) резонансных парах.

Таким образом, получен спектр с большим количеством тонов, но меньшей, чем в биканальном случае интенсивностью. Явление рассогласования выражено в изменении сценария заполнения-опустошения резонаторов. Первое заполнение резонаторов, когда среда в тракте системы не возмущена, проходит по классическому сценарию Гартмана – синхронно до момента истечения и взаимодействия ответных потоков из полостей со струей. В результате происходит рассогласование потоков, а последующее заполнение резонаторов будет происходить с различными частотами.



В П. 3.2. представлено исследование параллельного расположении пар сопло-резонатор (рис. 18).

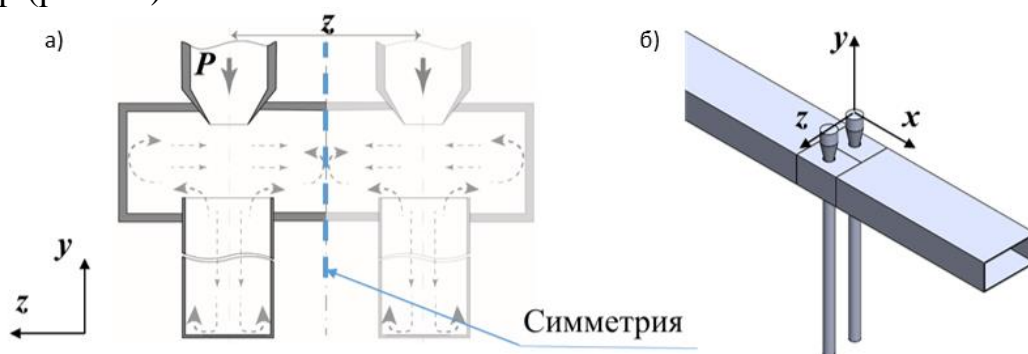


Рис.18. а) Схематичное изображение и б) изометрический вид параллельной конфигурации многоканальной системы.

В результате модификации системы с помощью дополнительной резонансной пары удалось добиться синхронизации генераторов Гартмана, что позволило увеличить площадь рабочей части без потерь интенсивности рабочего потока и без смещения частоты генерируемого потока (рис. 19). Установлено негативное влияние жёстких стенок, ограничивающих пары сопло-резонатор, на зашумлённость сигнала, и, как следствие его интенсивность.

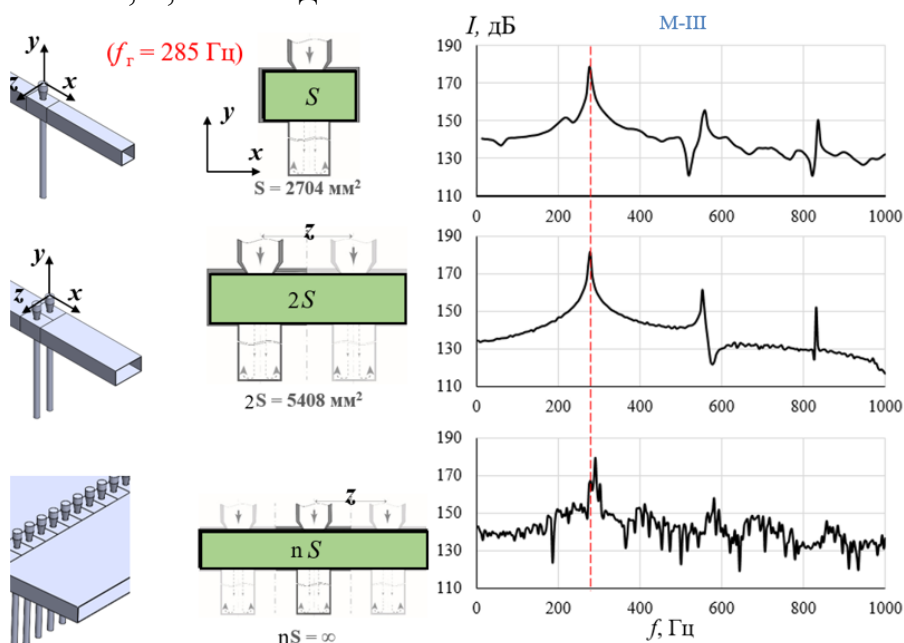


Рис.19. Сравнение спектрального состава сигнала в рабочей части (М-III) биканальной и многоканальных систем в параллельной конфигурации с двумя и бесконечным рядом пар сопло-резонатор.  $S$  – площадь сечения рабочей части.

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы.

На акустической установке ИТПМ СО РАН проведена серия экспериментальных исследований влияния геометрических параметров системы (глубина резонатора  $l$  и расстояния сопло-резонатор  $S$ ) на газодинамические характеристики потока. Определена область существования эффекта Гартмана в зависимости от давления в форкамере и расстояний  $l$  и  $S$ .

На основе пакета Ansys Fluent создана цифровая модель действующей экспериментальной акустической системы ИТПМ СО РАН. Проведена валидация и верификация численных результатов по экспериментальным данным (расхождение не более 3%). Методами численного моделирования нестационарных трехмерных турбулентных течений получены картины газодинамических потоков в тракте биканальной системы. Показан процесс прогрева резонирующей полости под воздействием волн сжатия. Установлено наличие высокотемпературной (200°C) застойной области вблизи торца резонатора большой глубины (более 20 калибров). Проведён параметрический анализ с варьированием геометрических параметров, позволивший выявить оптимальные конфигурации биканальных акустических систем.

Методами численного моделирования установлены следующие особенности многоканальных систем с дополнительными парами сопло-резонатор:

- для последовательной конфигурации установлен факт рассогласования газоструйных потоков в резонансных полостях, приводящий к снижению интенсивности акусто-конвективного потока.
- для параллельной конфигурации достигнута синхронизация генераторов Гартмана, приводящая к увеличению интенсивности акусто-конвективного потока.

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в рецензируемых журналах (ВАК, Scopus, WoS):*

1. **Жилин А.А., Примаков А.В.** Численное исследование тепловых эффектов в акусто-конвективном потоке биканальной системы // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 1. С. 79-89.
2. **Примаков А.В., Жилин А.А.** Численное исследование влияния геометрии биканальной системы на область существования эффекта Гартманна // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 3. С. 427–440.

*Список публикаций, рекомендованных ВАК*

*Тезисы конференций (РИНЦ), Статьи в сборниках конференций (Scopus, WoS):*

3. **Primakov A.V., Zhilin A.A.** Studying of the resonator depth influence on amplitude-frequency characteristics operating flow in the two-channel system // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1404, № 012096 (6 p.).
4. **Primakov A.V., Zhilin A.A.** Gas-dynamic studying of the two-channel system flow using numerical simulation methods // AIP Conf. Proc. 2020. Vol. 2288. 030060 (6 p.).
5. **Primakov A.V., Zhilin A.A.** Effect of resonant cavity edge thickness on flow acoustic-convective characteristics in the multi-channel tract // AIP Conf. Proc. Vol. 2023. 2504 030101 (6 p.).
6. **Примаков А.В., Жилин А.А.** Численное моделирование газодинамического течения в резонирующих системах // Известия вузов. Строительство. 2022. № 3. С. 103-111.
7. **Примаков А.В., Жилин А.А.** Экспериментальное исследование зависимости амплитудно-частотных характеристик рабочего потока от геометрии биканальной системы генератора звука Гартмановского типа. // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XIII Всероссийской конференции молодых ученых (Новосибирск- Шерегеш, 15 - 22 марта 2019 г.). – Новосибирск: 2019. –С. 144.
8. **Примаков А.В.** Исследование влияния расстояния сопло - резонатор на акусто-конвективные характеристики потока в тракте биканальной системы // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: 16 Всерос. шк.- конф. молодых ученых (Новосибирск, 14-17 марта 2022 г.) : тез. докл. –Новосибирск: Параллель, 2022. –С. 109-110.
9. **Примаков А.В., Жилин А.А.** Изучение влияния глубины резонатора на амплитудно-частотные характеристики рабочего потока в биканальной системе // Динамика многофазных сред: XVI Всерос. семинар с междунар. участием (Новосибирск, 30 сент. – 5 окт. 2019 г.): тез. докл. –Новосибирск: Б. и., 2019. – С. 145-147.
10. **Примаков А.В., Жилин А.А.** Исследование влияния толщины кромок резонансной полости на акусто-конвективные характеристики потока в тракте многоканальной системы // Динамика многофазных сред: XVII Всерос. семинар с междунар. участием (Новосибирск, 27 авг. – 4 сент. 2021 г.): тез. докл. – Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 2021. –С. 62.

Ответственный за выпуск А. В. Примаков

Подписано в печать 20.10.2023 г.

Формат 60×84/16. Уч.-изд. л. 1,0. Усл. печ. л. 1,1.

Тираж 100 экз. Заказ №259

Издательско-полиграфический центр НГУ

630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2.