

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КАЗАНСКИЙ НАУЧНЫЙ
ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

На правах рукописи



АБДРАШИТОВ АЛЕКСЕЙ АЛЛАНОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ
В СТРУЙНОМ ОСЦИЛЛЯТОРЕ ГЕЛЬМГОЛЬЦА**

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Е.А. Марфин

Казань – 2025

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	
ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ.....	10
1.1. Интенсификация нефтедобычи акустическим воздействием на продуктивный пласт.....	10
1.2. Гидродинамическое звукообразование и механизм обратной связи.....	14
1.3. Генерация колебаний давления и резонанс в осцилляторах.....	25
1.4. Выводы по главе.....	29
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	31
2.1. Экспериментальный стенд	31
2.2. Модели струйного осциллятора Гельмгольца	35
2.3. Методика проведения экспериментальных исследований.....	41
2.3.1. Выполнение измерений и запись сигналов.....	42
2.3.2. Обработка сигналов, поступающих от датчиков.....	47
2.3.3. Методика построения характеристических линий.....	48
2.4. Верификация результатов экспериментальных исследований.....	49
2.6. Выводы по главе.....	50
ГЛАВА 3. ГЕНЕРАЦИЯ ВИХРЕВОГО ЗВУКА И АКУСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС.....	52
3.1. Генерация вихревого звука свободной струей и струей, натекающей на препятствие.....	52
3.2. Возбуждение акустических мод гармониками тона отверстия в струйном осцилляторе Гельмгольца.....	59
3.3. Формирование вихревых структур в слое смешения в струйном осцилляторе Гельмгольца.....	66
3.4. Выводы по главе.....	73

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ СОГ НА АМПЛИТУДУ ГЕНЕРАЦИИ.....	75
4.1. Влияние диаметра камеры резонатора.....	75
4.2. Влияние геометрии сопла.....	78
4.3. Рациональное проектирование СОГ на основе полученных экспериментальных данных.....	91
4.4. Способы и устройства генерации волн давления на основе СОГ.....	93
4.5. Выводы по главе.....	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	98
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	100
ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ТЕРМИНЫ.....	101
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	103
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	125
Приложение А – Материалы экспериментов.....	125
Приложение Б – Акт внедрения.....	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В связи с возрастанием доли трудноизвлекаемых запасов нефти, по мере выработки нефтяных месторождений, рентабельность их эксплуатации снижается. Промысловый опыт показывает перспективность интенсификации добычи нефти на старых месторождениях путем воздействия упругими колебаниями на продуктивный пласт. Эффективность волновой обработки продуктивных пластов определяется, главным образом, амплитудой наложенных колебаний давления, и обусловлена снижением вязкости нефти и увеличением проницаемости пористой среды. Воздействие ультразвуковыми колебаниями на нефтесодержащие образцы показывает высокую эффективность в лабораторных условиях, однако, на промысле воздействие волнами высокой частоты ограничено призабойной зоной скважины из-за сильного поглощения волн высокой частоты пористой средой пласта. Таким образом, перспективным является воздействия на пласт упругими колебаниями в звуковом диапазоне частот. Для развития технологии акустического воздействия на продуктивные пласты необходима разработка скважинных излучателей.

В настоящей работе представлены новые научно-обоснованные технические решения скважинного излучателя, построенного на основе струйного осциллятора Гельмгольца (СОГ). Такое устройство преобразует часть динамического напора прокачиваемой жидкости в энергию колебаний потока. Механизм возникновения интенсивных колебаний в ограниченном тракте проточных систем является важной фундаментальной задачей в области гидро-газодинамики. Некоторые явления процесса генерации колебаний до настоящего момента исследованы недостаточно подробно или вовсе не поддаются теоретическому описанию.

Степень разработанности темы. Основополагающий вклад в обоснование и разработку методов волнового воздействия на пласт для увеличения нефтеотдачи внесли: Абрамов В.О., Вахитов Г.Г., Ганиев Р.Ф., Дыбленко В.П., Иванов Б.Н., Кравцов Я.И., Кузнецов О.Л., Муллакаев М.С., Николаевский В.Н., Симкин Э.М., Сургучев М.Л. и др. Значительный вклад в исследование струйной генерации

колебаний давлений, в том числе в СОГ внесли: Блохинцев Д.И., Власов Е.В., Гиневский А.С., Горин С.В., Комкин А.И., Кондратьев В.И., Константинов Б.П., Куклин М.В., Anderson A.B.C., Champagne F.H., Chan Y.Y., Chanaud R.C., Crow S.C., Ingard U., König W., Kruger F., Powell A., Rayleigh, Richardson E.G., Rossiter J.E., Rockwell D., Sondhaus C., Strouhal V. и др. Несмотря на имеющийся значительный опыт и задел в существующей области знаний, отсутствует описание акустических составляющих механизма струйной генерации. Показано, что большинство исследований посвящено гидродинамике струйного течения, в то время как акустика струи остается малоизученной.

Предмет исследования – струйный осциллятор Гельмгольца.

Объект исследования – генерация колебаний давления в потоке, протекающем через струйный осциллятор Гельмгольца.

Цель исследования состоит в увеличении амплитуды колебаний давления в струйном осцилляторе Гельмгольца за счет оптимизации конструктивных и режимных параметров.

Для достижения поставленной цели **решались задачи:**

- 1) Разработать и создать лабораторный стенд и методику экспериментального исследования генерации колебаний давления воздушной струей в модели СОГ.
- 2) Исследовать характеристики тона свободной затопленной струи и тона отверстия при натекании струи на препятствие, а также мод акустического резонанса в проточной камере-резонаторе.
- 3) Провести комплексные экспериментальные исследования характеристик генерируемых колебаний давления в СОГ с различными геометрическими параметрами и условиями: диаметр сопла – $d_1=12$ мм, длина сопла – $\ell_1/d_1=0,25\dots2,5$, диаметр резонансной камеры – $D/d_1=3\dots6$, длина резонансной камеры – $L/d_1=0,25\dots4$, диаметр выходного отверстия – $d_2/d_1=0,8\dots2,5$, скорость течения струи – $W=0\dots100$ м/с
- 4) Разработать скважинный излучатель на базе СОГ и провести его испытания. Выполнить анализ и сопоставление результатов лабораторных, стендовых и промысловых испытаний излучателя.

Научная новизна выполненной работы заключается в том, что в процессе экспериментального исследования генерации вихревого звука были установлены некоторые особенности его возникновения, не описанные в литературе:

1. Тон свободной струи возникает при относительной длине выпускного цилиндрического отверстия $\ell_1 = (0,5 \dots 1)d_1$ в интервале значений числа Рейнольдса $Re_d = (6 \dots 30) \cdot 10^3$ и характеризуется числом Струхала $Sh_\ell = 0,6 \dots 0,65$.

2. Число Струхала тона отверстия соответствует числу Струхала тона свободной струи, втекающей в это отверстие. Установлено, что амплитуда тона отверстия при этом выше амплитуды тона струи, и механизм обратной связи лишь усиливает колебания давления, не изменяя их частоту.

3. Спектральный анализ тона отверстия при изменении скорости струи вблизи резонанса показал, что акустические моды возбуждаются последовательно и дискретно гармониками тона отверстия в полосе усиления на частоте собственных колебаний резонатора при $Re_d < 10^5$. Выявлено отсутствие обратного влияния резонанса на частоту тона отверстия.

4. Систематизация и анализ экспериментальных данных позволили установить, что наиболее эффективными моделями СОГ, обеспечивающими максимальную амплитуду генерации, являются: цилиндрическое сопло $\ell_1 \sim 0,55d_1$ в комбинации с камерой длиной $L/d_1 = 0,25$ и диаметром выходного отверстия $d_2/d_1 = 1,3$; профилированное сопло в комбинации с камерой длиной $L/d_1 = 1,5$; цилиндрическое сопло с фаской 90° по потоку, с длиной цилиндрического участка $\ell^* = (0,3-0,4)d_1$, $\ell^*/\ell_1 = (0,4-0,5)$.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что в ней исследованы общие закономерности генерации вихревого звука струйными системами, а именно: генерации тона свободной струи без влияния механизма обратной связи и генерации тона отверстия с участием механизма обратной связи. Исследовано возбуждение мод акустического резонанса гармониками тона отверстия в акустическом резонаторе, а также влияние акустического резонанса на характеристики струйной системы с обратной связью. Исследования процессов генерации колебаний давления в струйных системах способствует лучшему

пониманию принципов работы излучателей и уточняет их проектирование. Выявленные оптимальные соотношения основных конструктивных параметров канала СОГ позволяют проектировать более совершенные скважинные излучатели для интенсификации добычи нефти. Разработанные и запатентованные способы и устройства для воздействия на продуктивные пласты позволяют повысить эффективность разработки нефтяных месторождений.

Методология и методы исследований. Экспериментальные исследования преобразования перепада давления на СОГ в энергию периодических колебаний давления в потоке протекающей жидкости проводились стандартными методами аэроакустики на специальном стенде, оборудованном измерительными приборами, прошедшими своевременную поверку и испытания. Перепад давления на сопле определялся преобразователем давления ПД 150-ДИВ1250 Овен. Колебания давления внутри камеры измерялись микрофоном RFT MV 201 Robotron чувствительностью 54 мВ/Па с микрофонным усилителем 00 011 Robotron. Регистрируемые сигналы оцифровывались модулем E14-140 14-ти разрядного программно-аппаратного аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 10 кГц и передавались на персональный компьютер. Для регистрации и обработки сигналов использовалась отечественная программа Power Graph. Для тарировки микрофона применялись пистонфоны: Robotron RFT 05 001, генерирующий сигнал 124 дБ на 250 Гц; и BSWA Technology Co., генерирующий сигналы 94/114 дБ на частоте 1 кГц. Обработка полученных экспериментальных данных проводилась методом быстрого преобразования Фурье. Погрешность измерения частоты составляла 0,4%, амплитуды колебаний давления – 0,07%. Относительная погрешность вычисления скорости струи – 2,1%; числа Рейнольдса – 3,5%; числа Струхала – 2,3%.

Положения, выносимые на защиту.

- 1) Определено влияние длины цилиндрического сопла на генерацию вихревого звука и на числа Струхала по его диаметру и длине для свободной затопленной струи, а также струи, натекающей на препятствие.
- 2) Установлен механизм возбуждения резонанса в камере-резонаторе, при котором

акустические моды возбуждаются последовательно гармониками тона отверстия в полосе усиления резонатора.

- 3) Оптимальные соотношения между основными конструктивными размерами канала СОГ с высокой степенью преобразования динамического напора в колебания давления потока.
- 4) Способы и устройства для генерации колебаний давления в потоке на основе СОГ, защищённые патентами на изобретения.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается использованием аттестованной измерительной аппаратуры, обеспечивающей высокую точность определяемых величин; сходимостью полученных экспериментальных данных с результатами исследований других авторов, а также многократным повторением экспериментов и хорошей воспроизводимостью результатов.

Личный вклад автора заключается в разработке лабораторного стенда и методики экспериментально исследования модели СОГ; изготовлении физических моделей устройства и проведении их испытаний; обработке и анализе экспериментальных данных. Диссертантом разработаны несколько конструкций излучателей, защищенных патентами на изобретение.

Соответствие диссертации научной специальности. По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы» по следующим пунктам: п. 13 – Струйные течения и кавитация; п. 15 – Линейные и нелинейные волны в жидкостях и газах; п. 18 – Экспериментальные методы исследования динамических процессов в жидкостях и газах.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: ежегодных итоговых научных конференциях ФИЦ КазНЦ РАН (Казань, 2010-2023); XX, XXI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (Новосибирск 2020, 2022); 9, 12-й Всероссийской научной конференции «Механика композиционных материалов и конструкций,

сложных и гетерогенных сред» (Москва, 2019, 2022); XI, XII, XIII Международных конференциях по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (Алушта, 2016, 2018, 2020); XIX, XX, XXIII Международных конференциях по вычислительной механике и современным прикладным системам (Алушта, 2015, 2017, 2023); XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (Алушта, 2016); XI Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Казань, 2015).

Тематика и содержание работы соответствуют планам научных исследований Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук», реализованы в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (г/к П1005 и П511), грантов РФФИ №№15-48-02212-р_а, 16-29-15118-офи_м, 18-08-01047-а, 18-48-160001-р_а и РНФ №22-29-01174.

Публикации. По результатам исследований опубликованы 58 работ, в том числе: 10 статей в журналах перечня ВАК; 10 публикаций в изданиях, индексируемых в международной базе Scopus; 20 патентов на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (150 наименований) и приложения. Общий объем работы составляет 140 страниц машинописного текста. В ней содержится 47 рисунков и 15 таблиц.

Автор выражает глубокую благодарность за помощь в подготовке диссертации на всех этапах работы научному руководителю – кандидату технических наук Марфину Евгению Александровичу. Автор искренне благодарит кандидатов технических наук Караеву Юлию Викторовну и Тимофееву Светлану Сергеевну за всестороннюю помощь и ценные замечания.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

1.1. Интенсификация нефтедобычи акустическим воздействием на продуктивные пласты

*“Жить и работать в Татарстане и оставаться
равнодушным к проблемам нефтяников - невозможно”.*

академик РАН Алемасов В.Е., КНИТУ-КАИ

Современное состояние нефтегазовой отрасли России характеризуется сокращением добычи традиционной «легкой» нефти, возрастанием доли высоковязких и трудноизвлекаемых запасов нефти, ухудшением фильтрационно-емкостных свойств пласта и призабойной зоны скважины [25, 43]. Призабойная зона пласта является важной частью гидродинамической системы пласта, которая простирается всего на несколько метров от скважины и характеризуется нарушением линейного закона фильтрации [59]. Несмотря на свои малые размеры, призабойная зона существенно влияет на разработку всего нефтяного месторождения.

В целях увеличения добычи нефти из нефтеносных пластов применяются различные методы физического воздействия на продуктивные пласты [13, 33, 150]. Среди таких методов воздействия можно выделить сейсмическое, химическое, термическое, электровоздействие, термохимическое, термогазохимическое и волновое [10, 50, 54, 55]. Основная цель всех этих методов заключается в повышении подвижности флюидов в пласте.

Метод волнового воздействия основан на создании упругих волн и передаче колебаний давления в продуктивный нефтяной пласт [26, 67]. Это приводит к улучшению подвижности содержащихся в пласте, облегчает замещение нефти водой [34, 39]. Множество экспериментов и исследований было проведено для подтверждения эффективности использования волнового воздействия на

продуктивные пласты нефтяных месторождений [112, 8А, 20А]. Эти исследования доказывают, что упругие волны, проникающие в нефтяные пласты, способствуют увеличению притока нефти к скважине и снижению содержания в ней воды. Повышение объема извлечения нефти при использовании волнового воздействия объясняется несколькими факторами, включая ускорение процессов тепломассопереноса в пористых средах, изменение реологических и физических характеристик нефтяных флюидов и пластов, расширение зоны охвата и вовлечение неподвижной нефти в фильтрационный процесс.

Воздействие акустического поля на жидкости можно описать двумя явлениями [18, 19, 39]:

- высвобождение газовой фазы в виде маленьких пузырьков. Эксперименты показывают, что в зависимости от интенсивности воздействия, образование пузырьков газа происходит при давлениях, превышающих давление насыщения, которое существовало до воздействия. Увеличение объема газированной нефтяной фазы в ограниченном поровом пространстве должно привести к вытеснению водной фазы и, следовательно, уменьшению среднего уровня водонасыщенности породы. При высоких гидростатических давлениях количество растворенного газа в нефти может быть в 10-100 раз больше, чем в воде;

- при схлопывании пузырьки газа вызывают кавитацию. В ходе экспериментов в акустическом поле высокой интенсивности наблюдается изменение сдвиговой вязкости нефти в широком диапазоне частот [44]. Более высоким значениям интенсивности акустического поля соответствует более выраженный эффект. Однако необратимые изменения вязкости замечены лишь после продолжительного воздействия (несколько часов). Наибольшее изменение вязкости наблюдается в нефти, содержащей асфальто-смолистые соединения и парафины.

Упругие волны на два-три порядка ускоряют релаксацию механических напряжений [19, 39]. В промежутке между зоной бурения и проницаемым пластом в призабойной зоне это способствует снижению негативных последствий, связанных с бурением и вызванных напряжениями в породах около скважин и перфорационных каналов. Волновое воздействие способствует восстановлению

термодинамического равновесия между призабойной зоной и коллектором [1, 46].

В процессе разработки месторождений в призабойной зоне пласта из-за нарушения термодинамического равновесия происходит выпадение твердых асфальто-смолистых веществ и парафина, которое приводит к уменьшению проходного сечения пор. Акустические волны и проявление кавитации в призабойной зоне пласта способствуют разрушению поверхностного слоя и очистке закупоренных поровых каналов продуктивного пласта [24].

Опыт промышленной добычи нефти показал, что для достижения большей эффективности помимо проведения теоретических, лабораторных и промысловых исследований необходимо создание специального оборудования – излучателей упругих волн. Первыми источниками колебаний были вибросейсмические платформы, размещаемые на поверхности земли [54]. Данные устройства функционируют на низких (инфразвуковых) частотах. Несмотря на незначительное затухание таких колебаний в горных породах, лишь небольшая доля их энергии достигает продуктивных пластов.

С развитием технологий добычи нефти стали применяться специальные устройства, которые доставляют упругие волны непосредственно в призабойную зону скважины [19, 112, 2А, 7А]. Спускаемые в скважину излучатели упругих волн имеют значительно меньшую мощность по сравнению с устройствами на поверхности. Однако, их преимущество заключается в том, что они находятся непосредственно в скважине на уровне продуктивных пластов. Акустическая обработка может осуществляться как при нагнетании рабочих жидкостей, так и во время простоя. В скважинах газлифтного и фонтанного типа воздействие может быть выполнено без прекращения добычи и подъема насосно-компрессорной трубы.

Необходимая для работы излучателей энергия поступает по электрическим проводам или вместе с потоком жидкости. В данной работе не рассматриваются скважинные излучатели, которые преобразуют электрическую энергию в колебания давления окружающей среды. Скважинные излучатели, преобразующие энергию скоростного напора потока жидкости в колебания давления,

подразделяются на гидромеханические (виброволновые) с подвижными элементами (поршень, клапан, лопасти) и гидродинамические без подвижных элементов [47, 2А].

В настоящее время распространены различные гидромеханические пульсаторы, которые создают периодическое изменение потока жидкости, а также гидродинамические генераторы, которые преобразуют давление подачи технической жидкости в колебания давления в нагнетающей скважине. Гидромеханические пульсаторы, обеспечивающие синусоидальное изменение давления низкой частоты, неустойчивы из-за износа подвижных деталей и имеют ограниченный срок службы. Поэтому при эксплуатации на забое предпочтение отдается гидродинамическим устройствам, которые не имеют подвижных деталей.

Скважинные гидродинамические генераторы легко интегрируются с уже имеющимся оборудованием, а волновые методы считаются более экологически безопасными [7А]. Скважинные излучатели имеют цилиндрическую форму, которая наилучшим образом соответствует диаметру обсадной трубы скважины. Они крепятся к нижней части насосно-компрессорной трубы, через которую техническая жидкость поступает в пласт, и размещаются в непосредственной близости от целевого объекта [47].

Габариты скважины определяют конструктивные размеры излучателей и частоту излучения. При высоком давлении нагнетания используется частота излучения 5...10 кГц, но при такой высокой частоте глубина проникновения упругой волны в пласт составляет несколько десятков сантиметров [46].

Для генерации колебаний меньшей частоты необходимо, чтобы конструкция излучателя включала резонатор, используемый для усиления генерируемых колебаний. Одним из наиболее эффективных является акустический резонатор – резонатор Гельмгольца. Размер такого резонатора значительно меньше длина волны его собственных колебаний, что позволяет использовать в ограниченных размерах скважины [41]. На основе этого резонатора разработан струйный осциллятора Гельмгольца (СОГ) [123]. В лабораторных условиях СОГ производил колебания давления с амплитудой 1500 Па внутри резонансной камеры [111].

Таким образом, скважинные акустические методы и технологии воздействия имеют ряд преимуществ перед другими подходами, применяемыми для увеличения добычи нефти:

- малый размер и высокая мобильность оборудования;
- возможность передачи акустической энергии в призабойную зону пласта в радиальном направлении;
- возможность выборочной обработки призабойной зоны пласта;
- экологическая безопасность;
- экономическая эффективность.

1.2. Гидродинамическое звукообразование и механизм обратной связи

“Звук – это то, что описывается уравнениями акустики, остальное – псевдозвук. Псевдозвуком, например, являются периодические пространственные возмущения давления, «вмороженные» в поток воздуха. Как правило, эти возмущения вызваны периодической цепочкой вихрей. Если воздух движется относительно человека, он слышит эти возмущения давления. Около препятствия, в воздушном потоке, псевдозвук генерирует звук”.

Сухинин С.В., Институт гидродинамики СО РАН.

Sondhaus в 1853 г. ввел нас в мир звуков, возбуждаемых струей, свободно вытекающей из сосуда с небольшим избыточным давлением через отверстие в стенке [127]. Он назвал эти звуки “Reibungstöne” – звук вязкости. С тех пор исследовались различные конфигурации струйно-акустической системы “сопло – струя – препятствие”: поток, обтекающий проволоку в канале – Strouhal, 1878 [128], Lenihan, 1940 [101] и др.; струя из щели, натекающая на клин, – Richardson, 1931 [120], Brown, 1937 [70], Nyborg, 1952 [117], Powell, 1961 [119], Кондратьев, 1981 [31], Fujisawa, 2004 [82], Vaik, 2014 [139] и др.; струя, втекающая в отверстие в

пластине, – Релей, 1887 [51], Powell, 1962 [119], Matsuura, 2012 [106] и др.; поток, втекающий в трубу, – Anderson, 1955 [64], Elder, 1978 [80], Karthik, 2008 [93] и др.; поток, обтекающий каверну в канале, – Rossiter, 1966 [122], Rockwell, 1978 [121], Tuerke, 2017 [133], Ziada, 2017 [143], Goltsman, 2019 [87] и др.. Исследователи изначально понимали, что гидродинамическая неустойчивость вязкой струи приводит к искривлению струек тока и последующему периодическому образованию в потоке повторяющихся вихрей [49, 96, 98], которые производят возмущения давления в окружающей среде. Вследствие низкого уровня технического развития, формирование вихревой картины наблюдали визуально, рассматривая движение струек подкрашенной воды.

В дальнейшем, практическая необходимость формирования мощного поля упругих волн привела к усложнению струйно-акустической системы за счет добавления к ней акустического резонатора и созданию системы “сопло – струя – отверстие – резонатор”. Исследованию возбуждения потоком колебаний давления значительной амплитуды в камере акустического резонатора посвящены работы Блохинцева, 1945 [9], Кубанского, 1959 [38], Khosropour, 1990 [94], Ma, 2009 [104], Ghanadi, 2014 [85], Dai, 2015 [78], Bennett, 2017 [66] и др. Авторы работы [117] представлял обычный свисток как комбинацию генерирующей системы “сопло – струя – кромка” с усилителем - акустическим резонатором.

Несмотря на то, что резонирующие камеры с горлом были известны с древнейших времен, аналитическая связь частоты, на которой происходило усиление звука, с линейными размерами камеры была установлена в конце 19 в. в работах [51, 73, 91, 96, 125]. Гельмгольц [20] обратил внимание, что камера с длинным и тонким горлом усиливает звуковые волны, имеющие существенно большую длину, чем размеры собственно камеры. Эта особенность обеспечила резонатору Гельмгольца широкое применение в различных областях. В дальнейшем, с развитием горной промышленности, внимание исследователей привлек струйный осциллятор Гельмгольца (СОГ) [123, 136-138, 141-142], обладающий такой же особенностью, как и его классический прототип – длина излучаемой волны существенно превышает геометрические размеры

осциллятора.

В 1919 году Krüger [98] разработал теорию, объясняющую возникновение тонального звука в плоской струйно-акустической системе “щель – струя – отверстие”. Согласно его теории, механизм генерации звука объединяет как явление гидродинамической природы – формирование вихрей в слое смещения, перемещение их вместе со струей и деформация на острой выходной кромке, так и акустической природы – распространение упругой волны в обратном направлении. Причем механизм усиления – распространение волны давления в обратном направлении – имеет исключительно акустическую природу. Он считал, что деформация вихря на острой кромке выходного отверстия формирует возмущение давления, которое, распространяясь обратно, вверх по струе, в виде акустической волны и сообщает дополнительный импульс энергии следующему зарождающемуся вихрю на выходе из щели. Положительная обратная связь между кромкой и щелью формирует автоколебательный механизм и накачивает энергией зарождающиеся вихри, формируя кромочный тон. Но Klug [95] установил экраны на небольшом удалении от кромок щели для того, чтобы отсечь отрывающиеся вихри. Звук, тем не менее, не исчез.

Константинов [32] провел эксперименты со струей подкрашенной воды, которая вытекала из щели в ванночку, также заполненную водой. Струя воды была заключена в чехол из мягкой резины длиной 20 см. Автор считал, что при этом нельзя ожидать отрыва пограничного слоя от краев щели и внутри чехла до его края. Автор считал, что исключил таким образом образование вихрей по краям щели. При этом, струя внутри чехла совершала змеевидные движения, причем, по длине чехла укладывалось до нескольких длин волн. Richardson [120] и Curle [77] придерживались чисто вихревой теории, объясняющей происхождение тона, и не рассматривали участие звуковой волны в механизме обратной связи. Brown в своей работе [70] дает подробный обзор работ в области изучения механизма генерации струйного тона, выполненных до 1937 года. Статья Brown во многом подводит итог, и в последующие годы заметного успеха в исследовании механизма генерации струйного тона, как физического явления, не наблюдалось.

Первоначально считалось, что звук в свободной затопленной струе, вытекающей в затопленное пространство, производит цепочка вихрей Кельвина-Гельмгольца, формирующихся в тонком слое смещения непосредственно за кромкой отверстия [20, 51, 77, 120, 124]. Mollo-Christensen, 1964 [110] и Michalke, 1965 [109] высказали гипотезу и обосновали ее, а Власов, 1968 [15], Fuchs, 1970 [83], Crow, 1971 [76], экспериментально установили методами термоанемометрии и визуализации потока, что неустойчивость в теле струи развивается в виде крупномасштабных периодических структур, формирующих шумопроизводящую область струи при числе Струхала $Sh_d \sim 0,3$. Согласно результатам исследований Chan [71] развития возмущенных волн давления в осесимметричной турбулентной свободной струе наиболее усиленная мода в слое сдвига (слое смещения) соответствовала числу Струхала $\sim 0,5$ и на осевой линии $\sim 0,35$. Chan [72] и Lee [99] установили, а Vogeу [68] подтвердил, что на величину числа Струхала влияет профиль скорости на срезе сопла, и его значение увеличивается с повышением уровня турбулентности течения.

Представление о гидродинамическом происхождении звука определялось развитием методов и средств измерений характеристик потока и окружающей акустики в ближнем и дальнем поле. Первые исследователи: Sondhauss, 1854 [127], König, 1891 [96], Krüger, 1919 [98], наблюдали визуально движение водяных подкрашенных струек в баке с водой, и в лучшем случае имели возможность делать фотоснимки водяных подкрашенных вихрей, Anderson, 1954 [64] вводил в водяной поток цветные нити, Strouhal, 1878 [128] и Гельмгольц, 1881 [20] на слух опреляли частоту тона воздушного потока. Jones, 1942 [92] определял частоту тона, сравнивая на слух его частоту с камертоном, а Соор, 1937 [75] уже сравнивал на слух частоту тона со звучанием электрического генератора. Richardson, 1931 [120] использовала первый термоанемометр с горячей нитью в воздушном потоке, Tyler, 1926 [135] применял кинокамеру и стробоскопическое просвечивание водяного, а Brown, 1935 [70] воздушного потока.

В 60-е годы XX века с доступностью и широким распространением микрофонов различного типа исследование струйной генерации звука получило

новый импульс. Первоначально аналоговый сигнал принимали на экран шлейфового осциллографа, который позволял измерять его частоту, фазу и амплитуду. С возникновением анализаторов спектра появилась возможность не только устанавливать частоту излучения упругих волн струйной системой в окружающее пространство во временной области, но и исследовать частотный спектр волн. Представление сигнала в частотной области как суммы гармонических составляющих с различными частотами, амплитудами и начальными фазами существенно расширило возможности исследователей. Использование различных датчиков - преобразователей неэлектрических величин в электрические - позволило распространить радиотехнический спектральный анализ на области механики и акустики [48, 116].

В основе получения амплитудно-частотного спектра принимаемого сигнала лежит преобразование Фурье, позволяющее установить распределение амплитуды сигнала во всем интервале изменения его частоты [37, 40, 48, 53, 100]. Первая программная реализация алгоритма БПФ была опубликована в 1965 г. Cooley [74].

Исследование производства вихревого звука струей с помощью различных способов, а именно: оптическим, термоанемометрическим, акустическим, дает также различные результаты. При измерении характеристик звука (упругой волны или волны в упругой сплошной среде) в ближнем поле с помощью микрофона и обработки сигнала анализатором спектра, наблюдается четкая картина распределения амплитуды сигнала по частоте. При этом, Исатаев [28] установил, что число Струхаля имеет строго определенную величину, определяемую частотой основной (первой) гармоники. И эта величина Sh изменяется пропорционально корню из Re , в то время, как величина Sh по второй гармонике сохраняется $\sim 0,4-0,6$. Различные авторы получают различную величину числа Струхаля. Обычно, при вычислении числа Струхаля, применительно к истечению осесимметричной струи из круглого отверстия, используют диаметр отверстия в качестве характерного размера. В результате численного моделирования в работе [14] получены значения $Sh=0,2$ и $0,32$ при $Re=5 \times 10^3$ и $2,5 \times 10^4$, соответственно, а в экспериментальной работе с воздушными микроструями [6] при $Re \sim 85$ число

Струхалю вычислялось как 8×10^{-2} . Crow [76] с помощью шлирен-фотографии наблюдал эволюцию вихревой структуры свободной струи с цилиндрическим профилем скорости, вытекающей из сопла в затопленное пространство, и отмечал при $Re \sim 10^4$ возникновение поверхностной “ряби” [29] в оболочке струи на срезе сопла и цепочку “облачков” в колонне струи, характеризующихся числом Струхалю $Sh \sim 0.3$. Перестроение профиля скорости к течению Пуазейля сопровождается тем, что возникновение поверхностной ряби отодвигается от среза сопла на значительное расстояние.

Гиневский [22] отмечает уменьшение числа Струхалю по мере удаления точки наблюдения от сопла, вследствие спаривания крупномасштабных вихрей в теле струи. Неудобство, при анализе работ Гиневского, состоит в том, что ламинарный погранслой на начальном участке струи ($x/d < 1$), в области образования мелкомасштабной вихревой “ряби”, он характеризует числом Струхалю, для вычисления которого использует в качестве характерного размера толщину потери импульса δ^* - $Sh_\delta = f \cdot \delta^* / u_0$, а область взаимодействия крупномасштабных когерентных структур ($x/d = 1-6$), там, где преобладают низкочастотные пульсации, он характеризует числом Струхалю, для вычисления которого использует в качестве характерного размера диаметр сопла d - $Sh_d = f \cdot d / u_0$.

Первой работой, в которой колебания давления в дальнем поле привязали к турбулентности в струе, встроенной в спокойный воздух, была статья Lighthill, 1952, в которой турбулентность характеризуется статистическими параметрами. Mollo-Christensen, 1964 [110] провел акустические измерения с помощью микрофонов в ближнем поле турбулентной струи, в надежде различить некоторые простые особенности источника колебаний давления, и он также оперирует статистическими параметрами, это: среднеквадратичное колебание, временная корреляция, спектральная плотность. Но, считается, что Mollo-Christensen первым высказал предположение о том, что в действительности турбулентность более регулярна, чем принято считать. Michalke в 1965 г. [109] с помощью невязкой линеаризованной теории устойчивости пространственно растущих возмущений нашел, что турбулентный слой смещения сворачивается сложным образом, если

толщина ядра струи велика, по сравнению с толщиной слоя смешения.

Неустойчивость слоя смешения ламинарной струи отмечал Релей [51], но он не мог сделать определенного вывода: становится колонна всей струи извилистой или пульсирующей. Впервые ответить на этот вопрос со всей убедительностью смог Crow, 1971 [76], применив термоанемометрический метод и шлирен-фотографию как водяной струи с красителем и профилем типа Пуазейля на выходе из трубки, так и воздушной струи с CO_2 и цилиндрическим профилем на выходе из профилированного сопла, при умеренных числах Рейнольдса. Авторы наблюдали эволюцию вихреобразования при увеличении скорости струи $10^2 < \text{Re} < 10^3$ от синусоиды к спирали и, наконец, к цепочке осесимметричных волн. Обзор наиболее значимых работ, связанных с исследованием возникновения когерентных структур в турбулентной струе, представлен в работе [90].

В нашей стране вопросом снижения шума реактивными двигателями занималась группа исследователей в ЦАГИ под руководством Власова Е.В. Начиная с 1964 г. в отечественных журналах появляются первые материалы, из которых следует, что спектры шума высокотурбулентной струи имеют ярко выраженный максимум, частота которого уменьшается при удалении точки наблюдения от сопла. Их интересует практическая сторона вопроса, и в 1967 г. они начинают воздействовать акустическими волнами на пограничный слой турбулентных струйных течений для изменения начальной неравномерности или начальной турбулентности потока. Они обнаружили сильное влияние акустических возмущений на пульсационные характеристики течения и границы ламинарно-турбулентного перехода, и практически не обнаружено влияния акустических возмущений на осредненные параметры течения. Гиневским А.С. получены сильные экспериментальные доказательства [21, 22] наличия регулярной, периодической структуры в дозвуковых турбулентных струях и слоях смешения. В начальном участке струи отслеживаются периодические движения с определенными предпочтительными частотами, определяющие динамику развития струйного турбулентного движения. Усилиями Пимштейна В.Г. ЦАГИ выпустили атлас фотоснимков с изображениями развития когерентных структур в

турбулентных струях.

Исследованиями производства шума реактивными двигателями также занималась в ЦИАМ группа экспериментаторов под руководством Крашенинникова С.Ю. и группа расчетчиков под руководством Секундова А.Н. Определение положения шумопроизводящей области в турбулентной струе, вытекающей из сопла авиадвигателя [35], с помощью антенны из шести микрофонов, установленных с различным удалением от струи, по результатам корреляционных измерений фазы акустических сигналов методом фазового анализа, позволило установить, что результаты измерений группируются вокруг значения $Sh = f \cdot b / u_0 = 0,42$, где b – толщина слоя смешения, $u_0 = 0,6u$ – скорость в середине слоя смешения. Отмечается существенное расхождение полученных данных с результатами других авторов, которое объясняется, в том числе, методикой выполнения акустических измерений. Результаты измерений, выполненные в ближнем поле, плохо коррелируются с результатами измерений, выполненными в дальнем поле. В то же время, экспериментальные данные показывают, что источники звука расположены вне зоны струйного течения и частота их ниже частоты чередования когерентных структур в слое смешения.

Генерация колебаний давления в струйно-акустической системе “сопло – струя – кромка” представляет собой более сложное явление, по сравнению с генерацией тона свободной струей, вытекающей в затопленное пространство. Конструктивно, система усложняется наличием препятствия в виде плоской глухой пластины, клина или диафрагмы – пластины с отверстием, в которое струя ударяется. Соответственно, вся система когерентных структур в слое смешения взаимодействует с острой кромкой препятствия, а в характеристику струи добавляется параметр длины. Натекание вихря на острую кромку препятствия сопровождается его резкой деформацией, и это событие производит локальное возмущение давления, которое распространяется в виде всплеска давления в окружающем пространстве [121]. Перемещение цепочки вихревых структур производит последовательность периодических возмущений давления в локальной области возле острой кромки препятствия, которые распространяются в виде

периодической волны в окружающей упругой среде, оказывая такое же периодическое воздействие на слой смешения на всей длине струи. Импульсы давления, переносимые колебаниями частиц сплошной среды, вместе с фронтом волны достигают область среза сопла и сообщают дополнительную энергию зарождающимся вихрям в слое смешения. Обращение некоторого количества движения, запасенного в оторвавшихся вихрях к новым вихрям в слое смешения, называют *обратной связью*. Если вся последовательность событий: возникновение вихрей, деформация, обратное движение фронта волны согласованы по фазе – процесс становится автомодельным, и амплитуда колебаний давления увеличивается значительно. Ключевым условием автомодельности процесса в целом является синфазность его составляющих [121].

Натекание струи на плоскую глухую пластину исследовали в разное время Митрофанова [42], Волков [14], Сухинин [56], Marsh [105], Tanda [130], Travnicek [132], Krishna [97], Dhamanekar [79] и др. Натекание струи на клин изучается уже длительное время, и результаты исследований представлены в большом количестве работ: Вовк [17], König [96], Krüger [98], Brown [70], Richardson [120], Jones [92], Brackenridge [69] и др. Втекание круглой струи в круглое отверстие с острыми кромками в плоской пластине некоторой толщины изучалось Бардахановым [6], Anderson [64], Elder [80], Segoufin [126], Karthik [93], Matsuura [106], Bogey [68] и др. Круглое сопло располагается соосно круглому отверстию в пластине, а интервал между плоским срезом сопла и пластиной определяет длину струи. Sondhauss первым сообщил нам о тоне отверстия и нашел, что частота тона увеличивается с увеличением скорости струи и уменьшением расстояния между отверстиями. Релей предположил наличие обратной связи в течении между кромкой выходного отверстия и срезом сопла. Он предложил выражение для вычисления частоты тона в системе с препятствием, причем это выражение применимо как для системы с препятствия в виде клина, так и системы с препятствием в виде отверстия. Частотный спектр тона отверстия или клина, в отличие от частотного спектра тона свободной струи, состоит из семейства гармоник (основной и высших), что отмечено в работах [69, 73, 91]. Обзор работ,

посвященных генерации струйного тона представлен в [17].

Все экспериментаторы отмечают прерывистую генерацию тона системами с препятствием: клина или отверстия. Тон развивается плавно в пределах определенного интервала скорости струи, при изменении скорости свыше этого интервала частота тона изменяется скачком [65, 92, 114, 115, 120]. Таких “стадий” по [70] при изменении скорости струи может наблюдаться несколько, причем номер стадии соответствует количеству вихрей, размещающихся в интервале между пластинами [73, 119, 121]. Научное сообщество аэроакустиков едино во мнении, что прерывистость стадий обусловлена рассогласованием частоты формирования вихрей в слое смещения непосредственно за кромкой сопла с частотой обратной связи в струйной системе. До работ Власова и Слов считалось, что частота тона системы “сопло – струя – кромка” определяется частотой обратной связи, которая дирижирует в автоколебательном механизме генерации тона кромки. Обнаружение в 60-х годах когерентных структур в струйном течении внесло разлад в научное сообщество аэроакустиков. Возникло предположение о том, что струя обладает частотой собственных колебаний, наподобие акустического резонатора, которая характеризует свободную струю и в отсутствии препятствия. Отсутствие инструментальной возможности наблюдать распространение фронта акустической волны обратной связи в настоящее время, лишает возможности ответить на этот вопрос однозначно [49].

Возникновение и значительное развитие оптических методов визуализации течения, основанных на регистрации в потоке частиц-маркеров [PIV-методы] обеспечило значительный прогресс в понимании возникновения вихревого звука – его гидродинамической природы – образования вихрей [81, 108, 125]. Наблюдать механизм обратной связи в струйно-акустической системе “сопло – струя – кромка” оптическими методами в настоящее время невозможно. Увидеть распространение фронта волны в обратном направлении невозможно по техническим причинам. В настоящее время считается, что частота обратной связи соответствует частоте наиболее мощной гармоники (обычно основной, или первой) в амплитудно-частотном спектре вихревого звука [57]. Частота распространяющейся упругой

волны в дальнем поле соответствует частоте доминирующей гармоники в спектре и, соответственно, частоте обратной связи [115, 131].

Возникновение тона при обтекании потоком каверны представляет собой явление, родственное натеканию струи на препятствие с острой кромкой [8]. Разнообразие условий течения, которые сопровождаются возникновением тона, побудила авторов работы [121] разработать их классификацию и объединить таким образом в три группы по основным признакам: неустойчивость слоя смещения, колебания границы потока и наличие резонанса в каверне. Причем стоячая волна в каверне может располагаться как по направлению потока в мелкой каверне, так и поперек направления потока в глубокой каверне [113, 124]. Механизм гидродинамического усиления колебаний давления возникает при очень маленьком соотношении длины каверны к длине генерируемой волны. Этот механизм, в чистом виде, соответствует натеканию струи на острую кромку. Механизм гидрорезонансного усиления колебаний давления возникает на высокой скорости потока при длине волны генерируемых колебаний давления того же порядка, что и длина каверны. Механизм с упругой стенкой не входит в область данной работы. На периодическом колебании границы струи над острой задней (trailing) кромкой каверны базируется механизм генерации звука милицейского свистка. Детали механизма генерации тона каверны подробно рассмотрены и изложены в цикле лекций проф. Х. Gloerfelt.

Возбуждение тона при протекании потока между двумя плоскими кавернами [62, 87, 107, 124, 134] отличается от предыдущего механизма наличием устойчивого резонанса и стоячей волны в поперечном направлении к движению жидкости вдоль каверн. При некотором соотношении геометрических и режимных параметров канал с двумя оппозитными кавернами с обеих сторон, в обеих стенках канала, возбуждается на частоте Гельмгольца при малой скорости потока [145], а при увеличении скорости включается механизм полуволнового резонанса.

1.3. Генерация колебаний давления и резонанс в осцилляторах

Генерация колебаний давления в струйно-акустической системе “сопло – струя – отверстие”, совмещенной конструктивно и функционально с акустическим резонатором, представляет собой еще более сложное явление. Сложность заключается в необходимости выполнения условия соответствия частоты тона отверстия частоте собственных колебаний (ЧСК) резонатора для возбуждения резонанса. Акустический резонатор представляет собой камеру с отверстием, и ЧСК резонатора определяется лишь геометрическими размерами камеры и отверстия [73, 94, 119].

Возбуждение акустического резонатора струей напоминает производство вихревого звука струей на острой кромке глубокой по [122] каверны [63]. В случае возбуждения акустического резонанса струя натекает на острую кромку отверстия в резонаторе и производит вихревой звук. При соответствии частоты возбуждения – частоты вихревого звука – с ЧСК резонатора происходит возбуждение резонатора на дискретных частотах, и амплитуда колебаний давления в камере резонатора многократно возрастает. Мощные колебания давления распространяются из отверстия наружу в виде упругой волны. Частота собственных колебаний резонатора f_N определяется экспериментально, путем озвучивания его “белым шумом” через отверстие или рассчитывается по формуле Релея с поправкой длины отверстия:

$$f_N \approx \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V\ell + \Delta\ell}} \quad (1.1)$$

где c – скорость звука, $\pi=3.14$, S – площадь сечения отверстия, V – объем камеры, ℓ – длина отверстия, $\Delta\ell$ – поправка длины отверстия $=0,96\sqrt{S}$.

Если геометрические размеры резонатора неизменны, то и его ЧСК неизменна тоже. В таком случае для возбуждения резонатора (согласования частот) следует настраивать частоту возбуждения путем изменения скорости струи.

Возбуждение резонатора потоком воздуха при различной толщине погранслоя исследовали: Блохинцев [9], Кубанский [38], Rockwell [121], Howe [88], Tuerke [133] и др. Если применительно к струйно-акустической системе “сопло – струя – кромка” условием автомодельности является соответствие по частоте и фазе образования вихрей в слое смешения за срезом сопла соответствующим характеристикам обратной связи, то применительно к системе “сопло – струя – кромка – резонатор” добавляется условие соответствие частоты функционирования всей струйной системы частоте собственных колебаний резонатора.

Исследователи отмечают возникновение мод при возбуждении резонанса, разделенных интервалами тишины и чувствительных к скорости струи [66, 91, 117, 119]. Моды соответствуют возбужденному состоянию резонатора и характеризуются определенным набором геометрических и режимных параметров, описываемых числом Струхала. При этом, в литературе опускается тот факт, что число Струхала не имеет физически никакого отношения к резонатору и резонансу, и характеризует струйную систему, возбуждающую собственно резонатор. Картина возникновения и затухания акустических мод в системе с резонатором очень напоминает ступенчатую картину струйного тона в системе “сопло – струя – препятствие”. Резонатор Гельмгольца, установленный заподлицо в стенке канала и сообщающийся с каналом через отверстие (горло), работает как акустический глушитель колебаний давления в канале [11, 23, 30, 58].

Значительный вклад в исследование возбуждения акустического резонатора – сферической камеры с длинным и узким горлом – внес Герман фон Гельмгольц, в честь которого это устройство получило свое название (рис. 1.1). Гельмгольц [20] обратил внимание, что камера с длинным и тонким горлом усиливает звуковые волны, имеющие существенно большую длину, чем размеры собственно камеры. Эта особенность обеспечила резонатору Гельмгольца (РГ) широкое применение в различных областях. Установленный заподлицо в стенке канала и сообщающийся с каналом через отверстие (горло), РГ работает как акустический глушитель колебаний давления в канале [11, 23, 30, 58].



Рисунок 1.1 – Классический
резонатор (осциллятор)
Гельмгольца



Рисунок 1.2 – Струйный осциллятор Гельмгольца

Технический прогресс привел к усложнению классической конструкции и появлению его проточного варианта – “струйного осциллятора Гельмгольца” (СОГ) (рис. 1.2) [122, 137-138, 141-142], обладающего такой же особенностью, как и его классический прототип, – длина излучаемой волны существенно превышает геометрические размеры осциллятора. Morel впервые ввел название СОГ (jet-driven Helmholtz oscillator) в своей работе [111]. Sami [123] изучал возможность применения проточного осциллятора с двумя горлами для нужд горнодобывающей промышленности, и называл его также СОГ, объясняя появление низкочастотной волны на выходе из этого резонатора самомодуляцией струи. Это устройство позволяет генерировать колебания давления в потоке жидкости, протекающей через камеру осциллятора, распространяющиеся из выходного отверстия в виде упругих волн во все стороны. Самовозбуждение колебаний давления в потоке, натекающем на острую кромку выходного отверстия резонатора, включает явления как гидродинамической, так и акустической природы, что затрудняет исследование механизма формирования вихревых структур в поле упругих колебаний.

Проточная камера с двумя сквозными отверстиями (СОГ), установленная непосредственно в канале, работает как акустический резонатор в полосе усиления, и как акустический глушитель для частот вне полосы его усиления. Струйный

осциллятор Гельмгольца (СОГ) объединяет с классическим резонатором Гельмгольца (РГ) способность усиливать колебания давления с длиной волны, значительно превышающей геометрические размеры камеры. Конструктивно СОГ представляет собой перевернутую двойную расходомерную шайбу: цилиндрическая камера с двумя центральными круглыми отверстиями в крышках – первое по потоку меньшего, и второе по потоку большего диаметра (36, 79, 93). Наиболее полезна при проектировании СОГ работа Morel [111], в которой приводятся рекомендации по выбору основных параметров.

В последнее время выполнено большое количество работ [16, 49, 125, 143] и др. по управлению струйной генерацией путем акустического воздействия на струю в области среза сопла за счет установки динамиков по сторонам сопла в плоскости среза. Авторы заявляют что воздействуют на амплитуду генерации за счет управления обратной связью путем изменения фазы управляющего сигнала. В режиме автоколебаний (при котором тон генерируется) все этапы генерации синфазны, и частота обратной связи соответствует на частоте собственных колебаний струи. Воздействует ли управляющий сигнал на акустику струи – механизм обратной связи, или на гидродинамику – формирование когерентных структур, или на оба механизма сразу, однозначный ответ пока не получен.

В настоящее время выработаны две гипотезы о пути движения импульса от острой кромки выходного отверстия обратно, к срезу сопла, где образуется слой смещения, и формируются поверхностная “рябь” (по [29]) и когерентные структуры в теле струи. Некоторые авторы считают, что импульс передается непосредственно по колонне струи [115], в то время, как другие авторы считают, что импульс передается по сплошной среде, окружающей струю [51, 123]. В настоящее время отсутствуют технические возможности инструментальным образом зафиксировать процесс деформации вихрей на острой выходной кромке, формирование и движение фронта волны в обратном направлении.

Способность СОГ производить сильные колебания давления в протекающем потоке жидкости стала использоваться в горной промышленности при разработке полезных ископаемых [123]. В настоящее время, наибольшее количество работ,

посвященных использованию устройств на базе СОГ в горнодобывающей промышленности, публикуется китайскими авторами. Традиционно, они широко используют воду в качестве рабочей среды [78, 84, 102, 104, 118, 131, 138, 142], называют СОГ – “соплом Гельмгольца”, а механизм генерации колебаний давления в протекающей струе воды сводят к формированию “кавитационных облачков” [81, 103-104, 137, 140-142]. Их целью является повышение эрозионных возможностей струи [89], которые они объясняют не столько колебаниями давления вытекающей струи, сколько пульсирующим расходом прокачиваемой жидкости.

1.4. Выводы по главе

Из анализа имеющихся литературных источников по проблеме генерации струйного тона можно сделать заключение о том, что в настоящее время происходит накопление фактического экспериментального и теоретического материала. Различные авторы рассматривают отдельные аспекты этой проблемы, как правило, не принимая во внимание наличие и влияние смежных факторов [117]. Установлена причинно-следственная связь между колебаниями давления в ближнем и дальнем поле струи с формированием когерентных вихревых структур на начальном участке турбулентной струи. Но пока не определена причина неизменности числа Струхала в дальнем поле стационарной струи при изменении числа Струхала по длине слоя смещения в широком пределе. Вследствие каких механизмов амплитудный пик по частоте сигнала в дальнем поле достаточно узкий, в то время как линейные интервалы между вихрями в турбулентной струе не отличаются постоянством.

Представлены некоторые исследования производства свободной струей периодических колебаний давления в затопленном объеме, которые по своей физической сущности являются в большей степени детерминированным явлением, по сравнению с турбулентными пульсациями, детерминированная природа которых еще только начала приоткрываться [7]. Также представлены результаты поиска оптимальной геометрии струйного осциллятора Гельмгольца для

производства мощных периодических колебаний давления в протекающем потоке рабочей жидкости. В исследовании гидродинамической природы свободной струи и струи, натекающей на преграду, достигнуты большие успехи, чем в исследовании акустических явлений, сопровождающих формирование вихревых структур на периферии и в теле струи.

Несмотря на простоту конструкции СОГ, на процесс генерации колебаний давления в камере осциллятора одновременно влияет много факторов, не позволяющих добиться качественного математического моделирования этого устройства за счет изучения влияния какого-то одного из них [83]. Автоколебания в струе в СОГ являются результатом замкнутого цикла, включающего три основных механизма: неустойчивость сдвигового слоя, резонанс Гельмгольца и механизм обратной связи. Первые два существуют в контуре как усилители, а третий как обратная связь. Следует отметить, что влияние основных конструктивных параметров канала СОГ на результирующие колебания систематически не изучалось. Отсутствует объяснение происхождения мод акустического резонанса в камере СОГ и их связи с гармониками тона струи.

В результате анализа имеющихся литературных источников сформулированы научные задачи исследования.

1) Определить влияние длины цилиндрического сопла на число Струхала, характеризующее тон струи при её натекании на препятствие.

2) Исследовать происхождение мод акустического резонанса в камере осциллятора и их связь с гармониками тона струи.

3) Установить влияние геометрии элементов канала, их компоновки и условий формирования воздушной струи на характеристики тона струи и акустических мод в камере СОГ.

4) Выявить оптимальные соотношения геометрических размеров и режимов работы СОГ для последующего практического применения.

2.1. Экспериментальный стенд

Блок-схема экспериментального стенда для испытаний моделей СОГ 1 представлена на рис. 2.1. В качестве вакуум-насоса 2 использовался промышленный пылесос Panda, а в качестве вакууммируемой безэховой камеры 3 – пластмассовая бочка объемом 0,230 м³, обклеенная внутри шумопоглощающим материалом. Пылесос соединялся с бочкой дюритовым шлангом. При озвучивании бочки со шлангом без модели белым шумом - динамиком через отверстие в крышке, в которое должна вставляться модель СОГ - частота собственных колебаний (ЧСК) акустической системы составляла 24 Гц [1А, 3А, 14А].

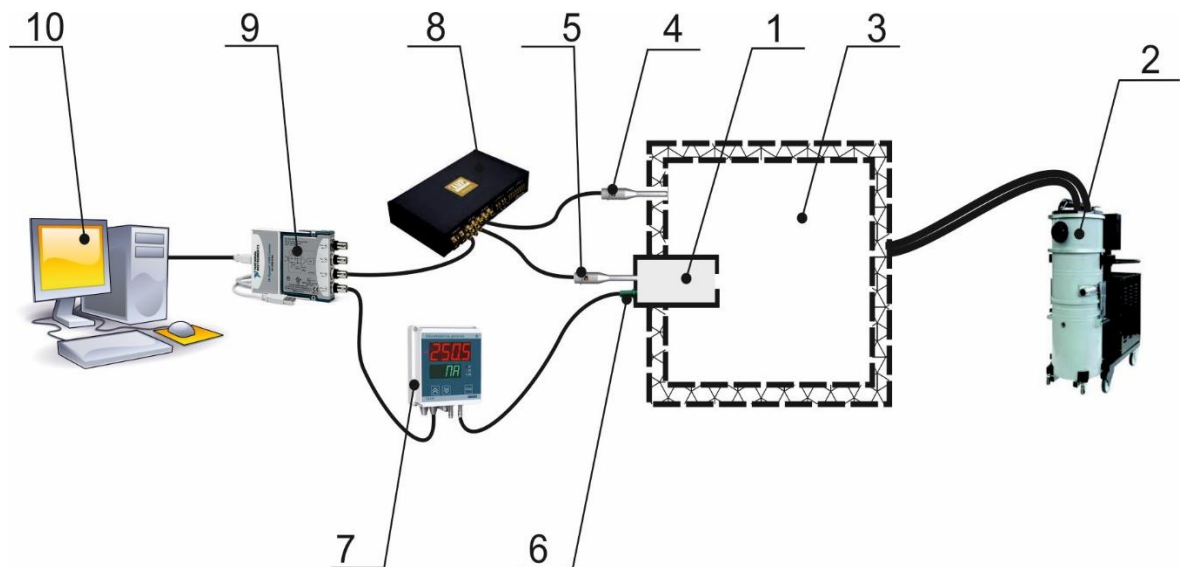


Рисунок 2.1 – Схема лабораторного стенда для испытаний СОГ:

1 – модель СОГ, 2 – вакуумный насос, 3 – вакуумная безэховая камера, 4, 5 – микрофоны, 6 – штуцер, 7 - преобразователь давления, 8 – микрофонный усилитель, 9 – аналого-цифровой преобразователь, 10 – ПК

Частота собственных колебаний (ЧСК) собранной бочки с моделью на 2 Гц ниже, что обусловлено влиянием заглушенного отверстия в крышке. Пылесос генерировал шумы на частотах 200...300 Гц, но они, а также турбулентный шум

воздушного потока в шланге, теряли интенсивность в звукопоглощающем покрытии бочки. Проникновение в камеру резонатора посторонних шумов низкой частоты из бочки сильно затруднялось импедансом выходного отверстия СОГ, диаметром порядка 16 мм, которое практически не пропускало периодические колебания с частотой ниже ~ 100 Гц, а амплитуду колебаний давления с частотой 200...300 Гц значительно уменьшала [45].

Модель монтировалась в крышку бочки таким образом, чтобы входное отверстие (сопло) оставалось снаружи, а выходная часть модели с выходным отверстием располагалась внутри бочки. Объем бочки был на три порядка больше объема камеры резонатора. При таком расположении камера СОГ акустически не была связана с другими объемами. Можно было принимать с достаточной степенью точности, что на входе в сопло объем бесконечно большой при атмосферном давлении, а на выходе из выпускного отверстия объем также бесконечно большой, но при пониженном давлении. Аналогичное обстоятельство отмечено в работе [123]. Предварительное экспериментальное исследование показало, что ЧСК установленной в бочку модели не отличалась от ЧСК извлеченной модели.

Числа Струхала ($Sh_L = f \cdot L / W$) и Рейнольдса ($Re_L = L \cdot W / \nu$), где кинематическая вязкость воздуха $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с) в настоящей работе рассчитывались по формуле идеальной скорости струи:

$$W^2 = \varphi \times 2 \Delta P / \rho, \quad (2.1)$$

где $\varphi = 0,97$ – коэффициент скорости, $\Delta P = P_1 - P_2$ – перепад давления на сопле, ρ – плотность воздуха [61 (стр. 24), 27 (стр. 26)].

Перепад давления на сопле замерялся вакуумметрическими преобразователями давления с относительной погрешностью 1,5 % в трех диапазонах для повышения точности измерения. Перепад давления в диапазоне 0...250 Па измерялся ПД 150-ДВ250 Овен, в диапазоне 0...1250 Па измерялся ПД 150-ДВ1250 Овен и в диапазоне 0...6000 Па измерялся ПД 150-ДВ6К Овен. ПД 150-

ДВ6К Овен был запитан всегда, измерительные шланги остальных ПД перекрывались по достижении предельной величины разрежения.

Колебания давления внутри камеры измерялись микрофоном RFT MV 201 Robotron (капсюль МК 221 чувствительностью 54 мВ/Па) с микрофонным усилителем 00 011 Robotron. Микрофон имеет строго линейную зависимость амплитудно-частотной характеристики до 1000 Гц и слабоспадающую от 1000 Гц до 2000 Гц. Регистрируемые сигналы оцифровывались внешним модулем Е14-440 14-ти разрядного программно-аппаратного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с частотой дискретизации 10 кГц/канал и передавались на персональный компьютер. Динамический диапазон АЦП – ± 10 В.

Для регистрации и обработки сигналов использовалась программа Power Graph. При анализе амплитудно-частотных спектров размер спектрального окна составлял 4096 точек. Весовая функция – Rectangle. Перекрытие окон – 0%. Размер области осциллограммы при спектральном анализе выделялся чуть большего размера по количеству точек по сравнению с размером спектрального окна. При этом шаг спектра составлял 2,44 Гц. Постоянная составляющая сигнала a_0 удалялась программным образом. Общая погрешность акустической измерительной системы при регистрации частоты тарированного сигнала составляла 0,4 %. Для тарировки амплитуды измеряемых колебаний давления применялись пистонфоны: Robotron RFT 05 001, генерирующий сигнал 124 дБ (31,7 Па) на 250 Гц; и BSWA Technology Co., генерирующий сигналы 94/114 дБ на частоте 1 кГц. Располагаемая измерительная аппаратура позволяет регистрировать тон отверстия при скорости струи менее 2 м/с и амплитуде сигнала чуть больше 0,01 Па (54 дБ).

Измерения в процессе выполнения работы сводились к измерениям частоты f и давления p в камере-резонаторе. Показания частоты не имели регулировки, а погрешность ее величины принималась равной одному значению шкалы прибора, равной 1 Гц при частоте тарированного сигнала 250 Гц. Погрешность измерения частоты составляла $(\frac{1}{250} \times 100 = 0,4\%)$. С увеличением измеряемой частоты относительная погрешность уменьшалась.

Измерения давления в камере-резонаторе включали измерения статической составляющей - медленноменяющейся составляющей p , определяющей перепад давления на сопле Δp , который использовался при вычислении средней скорости струи ($W = \sqrt{2\Delta p/\rho}$) и быстроменяющейся составляющей $\tilde{p}$, которая представляла собой амплитуду синусоидальных колебаний давления в камере – отклонение мгновенного значения давления от значения медленноменяющейся составляющей. Вакуумметрические преобразователи давления имели класс точности 1,5 ($\delta_{\Delta p} = 1,5\%$). Соответственно, в интервале окна выборки изменение скорости не должно было превышать 1,5% (скорость не должна увеличиваться более, чем на 1,5%).

Относительная погрешность измерения быстроменяющейся составляющей давления определялась разрядностью АЦП ($2^{14}=16384$), чувствительностью микрофона (54 мВ/Па) и интервалом по напряжению входного сигнала (10 В) и составляла на уровне тарированного сигнала пистонфона (31,7 Па) - 0,07%.

Относительная погрешность вычисления скорости струи $W = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$ равна

$$\delta_W = \sqrt{\delta_{\Delta p}^2 + \delta_{\rho}^2} = \sqrt{1,5^2 + 1,5^2} = 2,1\% \quad (2.2)$$

Относительная погрешность вычисления числа Рейнольдса - $Re = \frac{W \cdot d}{\nu}$ равна

$$\delta_{Re} = \sqrt{\delta_W^2 + \delta_d^2 + \delta_{\nu}^2} = \sqrt{2,1^2 + 0,83^2 + 2,7^2} = 3,5\%, \quad (2.3)$$

где инструментальная относительная погрешность при измерении диаметра отверстия (12 мм) δ_d принималась равной одному значению шкалы штангенциркуля, равной 0,1 мм.

$$\delta_d = \frac{0,1}{12} \cdot 100 = 0,83\% \quad (2.4)$$

Относительная погрешность вычисления числа Струхала $Sh = \frac{f \cdot d}{W}$ равна

$$\delta_{Re} = \sqrt{\delta_f^2 + \delta_d^2 + \delta_W^2} = \sqrt{0,4^2 + 0,83^2 + 2,1^2} = 2,3\% \quad (2.5)$$

2.2. Модели струйного осциллятора Гельмгольца

Экспериментальные модели СОГ изготавливались из отрезков пластиковой трубы различной длины с внутренним диаметром $D=77$ мм. Конструктивно модель СОГ (рис. 2.2.) представляет собой осесимметричную камеру-резонатор, сформированную цилиндрической обечайкой 1 и закрытую с двух сторон крышками 2 и 4. В передней по потоку крышке 2 выполнено сопло 3, а в задней крышке 4 – выходное отверстие 5. Модель СОГ не имеет подвижных деталей и функционально скомбинирована из двух относительно самостоятельных устройств: струйного генератора, состоящего из сопла, струи воздуха и выходного отверстия, и объемного резонатора. Струя воздуха протекает через всю камеру-резонатор между соплом и выходным отверстием [1А, 18А-19А].

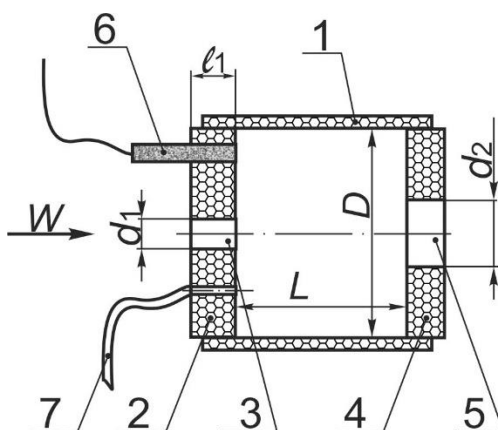


Рисунок 2.2 – Модель СОГ.

1 – обечайка, 2 – крышка передняя, 3 – сопло, 4 – крышка задняя, 5 – отверстие выходное, 6 – микрофон, 7 – штуцер

Торцы трубы закрывались плексиглассовыми крышками 2 и 4. Передняя

крышка имела осевое отверстие – сопло для разгона воздуха перед подачей его внутрь камеры резонатора. В задней крышке имелось выходное отверстие 5 цилиндрической формы для удаления отработавшего воздуха из резонатора. В передней крышке монтировался измерительный микрофон 6 и штуцер 7 для замера статического давления внутри камеры.

При сборке модели не допускалось “утапливание” крышек внутрь пластиковой трубы, поскольку было замечено уменьшение ЧСК модели вследствие формирования четвертьволнового резонатора в трубе перед крышкой. В таком случае формировалась акустическая система из нескольких резонаторов, соединенных горлами, связанная акустически в одно целое. Как правило, торцы крышек немного выступали из пластиковой трубы наружу.

В теории акустики считается, что в акустическом резонаторе форма камеры не играет роли пока наибольший геометрический размер камеры меньше $1/16$ длины волны [9, 17]. Это в том случае, когда параметры в камере изменяются по закону бегущей волны (синуса или косинуса) и фронт волны плоский. Резонаторы, работающие по волновому механизму, рассматриваются как система с распределенными параметрами, величины которых в той или иной точке объема камеры резонатора определяются уравнением волны – $A=A_0\cos(\omega t+kx+\varphi_0)$ и зависят от координаты x .

Резонаторы, работающие по объемному механизму на частоте Гельмгольца, рассматриваются как система с сосредоточенными параметрами, величины которых в объеме не зависят от координаты x и изменяются одновременно во всем объеме. Релей [51], используя уравнения механики твердого тела для вычисления ЧСК резонатора Гельмгольца, опирался на эти предпосылки.

ЧСК объемного резонатора f_0 вычислялась по формуле Релея

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{V} \left(\frac{S_1}{\ell_1 + \Delta\ell_1} + \frac{S_2}{\ell_2 + \Delta\ell_2} \right)} \quad (2.2)$$

где c – скорость звука, м/с, V – объем камеры, м³, S_1 и S_2 – площадь сечения сопла

и выходного отверстия в задней крышке, м², ℓ_1 – длина сопла, м, ℓ_2 – длина выходного отверстия, м, $\Delta\ell=0,96\sqrt{S}$ – концевая поправка, м [30].

Цилиндрическое сопло (рис. 2.3) представляло собой сквозное отверстие круглого сечения диаметром $d_1=12$ мм, выполненное в центре передней плоской крышки осциллятора (ГОСТ 15528-86) (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 – Фотография цилиндрического сопла в передней крышке

В ходе экспериментов диаметр сопла оставался неизменным, с его величиной соотносились остальные размеры СОГ. Длина сопла ℓ_1 определялась толщиной крышки (рис. 2.4а), кромки отверстия были острыми и выполнялись заподлицо с крышкой. Выходное отверстие представляло собой сквозное отверстие круглого сечения в центре задней плоской крышки осциллятора диаметром d_2 от 12 до 36 мм и длиной $\ell_2 \sim 9$ мм. Сопла длиной свыше 20 мм представляли собой круглую трубку, имеющую внутренний диаметр $d_1=12$ мм и соответствующую длину. Трубка зажималась между двумя крышками (рис. 2.4б) толщиной 6 мм так, чтобы оба ее торца были заподлицо с соответствующими поверхностями крышек [1А, 11А, 16А].

Предварительные эксперименты обозначили необходимость тщательного выполнения кромок цилиндрических отверстий. На рис. 2.5 представлена фотография кромки, сделанная с увеличением в 30 раз, при помощи микроскопа Микромед.

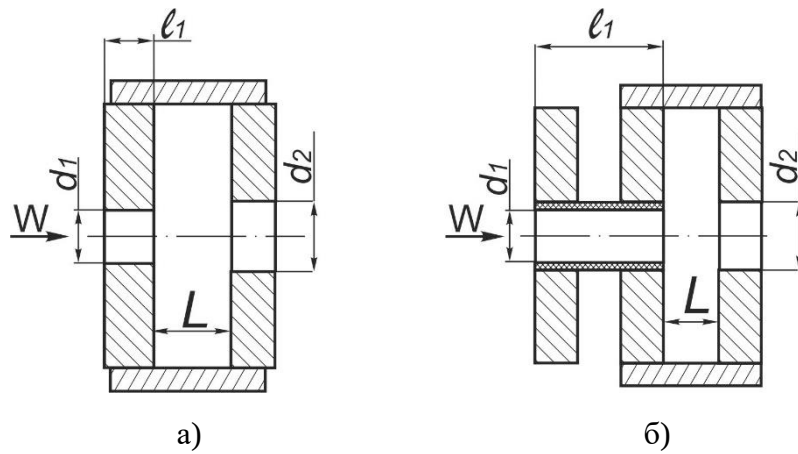


Рисунок 2.4 – Схемы СОГ с цилиндрическими соплами:

а) сопло - отверстие в крышке, б) сопло – трубка.

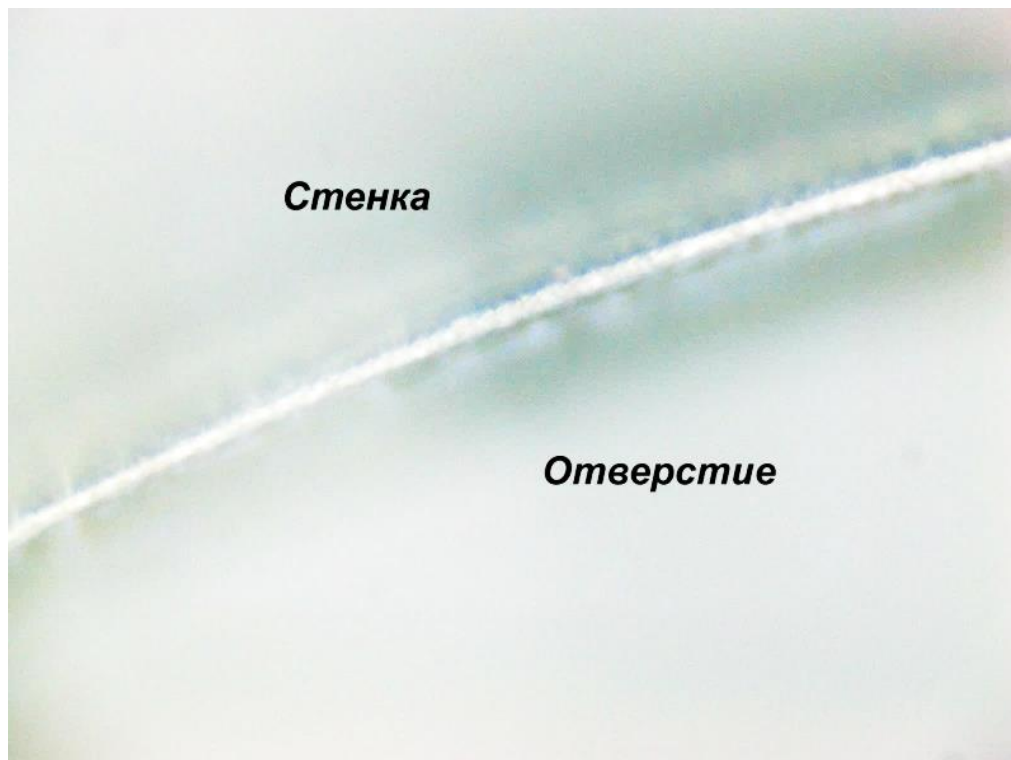


Рисунок 2.5 – Фотография кромки цилиндрического сопла

Видно высокое качество кромки между плоскостью крышки и отверстием. Небольшое замятие плексигласовой кромки твердым предметом приводило к заметному нарушению работы системы “сопло – струя – отверстие”. Отверстие в крышке сверлилось диаметром 11,3 мм и далее разворачивалось разверткой 12,0 поля допуска Н7.

Цилиндрическое сопло с фаской. Фаска в цилиндрическом канале диаметром d_1 и длиной ℓ_1 представляла собой раструб с углом раскрытия φ (рис. 2.6). Фаска врезалась в канал на некоторую глубину. Часть канала длиной ℓ^* сохраняла цилиндрическую форму. Сопла с фаской могли выполняться с полным углом раскрытия $\varphi=60; 90$ и 120 градусов.

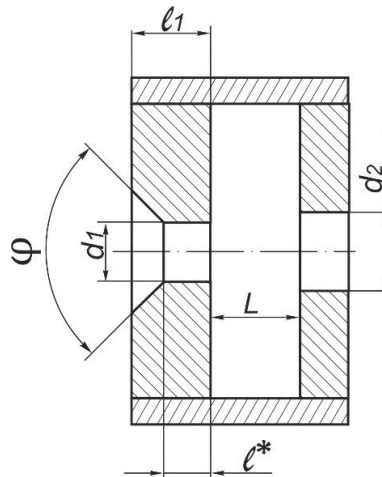


Рисунок 2.6– Схема СОГ с цилиндрическим соплом с фаской

Цилиндрическое сопло с козырьком. Исследовалось влияние козырька на амплитуду генерации в СОГ с цилиндрическим соплом (рис. 2.7). В этом случае толщина передней крышки составляла 10 мм. В крышку вставлялась трубка длиной 16 мм и внутренним диаметром 12 мм. Трубка вставлялась в крышку заподлицо с наружной плоскостью крышки в одном случае, либо заподлицо с внутренней плоскостью крышки в другом случае. Трубка выступала на 6 мм из крышки либо навстречу потоку, либо внутрь камеры во втором случае. Сравнение проводилось с результатами экспериментов с цилиндрическим соплом длиной 16 мм, представляющим собой отверстие в крышке толщиной 16 мм.

Все соотношения размеров модели СОГ соответствовали рекомендациям, представленным в исследовании [111]. Диаметр камеры $D=77,7$ мм ($D/d_1 \approx 6,4$). Программа проведения экспериментальных исследований представлена в Таблице 2.1. В диссертационной работе рассмотрено четыре формы сопла: цилиндрическое, цилиндрическое с фаской, цилиндрическое с козырьком и профилированное.

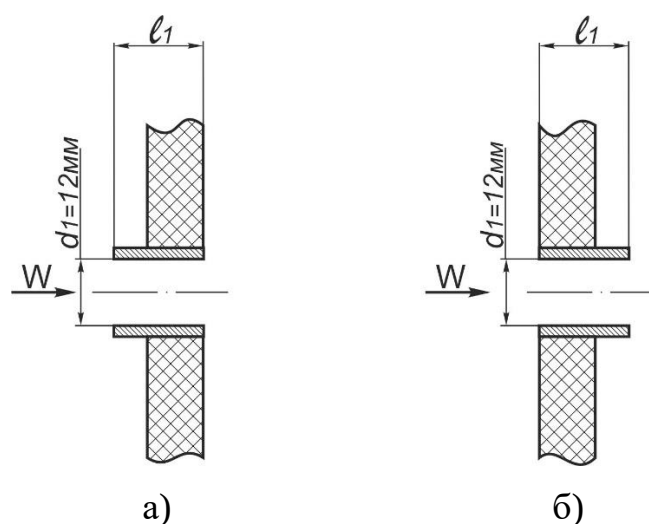


Рисунок 2.7 – Схема СОГ с цилиндрическим соплом с козырьками:

а) – навстречу потоку, б) – по потоку

Профилированное сопло (рис. 2.8) представляло собой канал диаметром $d_1=12$ мм и длиной $\ell_1=var$, выполненное непосредственно в передней крышке камеры резонатора, у которого входная кромка имела скругление радиусом R . Выходное отверстие выполнялось цилиндрической формы диаметром от 10 до 38 мм и неизменной длиной ~ 10 мм. Длина камеры резонатора изменялась в интервале между 12 и 40 мм.

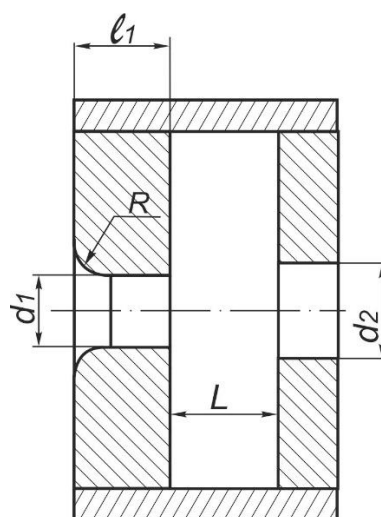


Рисунок 2.8 – Схема СОГ с профилированным соплом

Собранная модель устанавливалась в отверстие пенопластового кондуктора на крышке бочки. В переднюю крышку модели вставлялся измерительный микрофон

для измерения колебаний давления (быстроменяющейся составляющей давления) в камере резонатора, а штуцер в передней крышке соединялся гибкой трубкой с входным штуцером преобразователя давления для измерения статического давления (медленноменяющейся составляющей давления) внутри камеры резонатора.

Таблица 2.1 – Программа экспериментов.

Эксперимент №	Форма сопла	d_1 , мм	L/d_1	ℓ_1/d_1	ℓ^*/ℓ_1	φ , °
1	Цилиндрическое	12	0,25-2	0,06-4	-	-
2	Цилиндрическое с фаской	12	1,5	0,33-2	1-3	60, 90, 120
3	Цилиндрическое с козырьком	12	0,5-3	1,33	-	-
4	Профилированное	$R = d_1 = 12$	1-5	1,33	0,375	-

Озвучивание СОГ динамиком снаружи выполнялось с использованием двух микрофонов и удалением из сигнала от микрофона в камере падающего сигнала от микрофона вблизи динамика снаружи.

2.3. Методика проведения экспериментальных исследований

Рабочее тело – воздух принимается в качестве несжимаемой жидкости. Такая идеализация позволяет существенно упростить расчеты ценой сознательного введения в расчеты некоторой погрешности, не изменяющей существа самого расчета. Это упрощение широко используется в гидродинамике при расчете газовых потоков при небольшой скорости потока, когда сила вязкости преобладает над силой инерции. Такой режим течения характеризуется небольшим числом Рейнольдса. Шлихтинг в работе [61, стр. 24] предлагает считать скорость 100 м/с предельной, при которой воздух еще можно рассматривать как несжимаемую

жидкость с удовлетворительной для инженерных расчетов точностью в 5%. Т.е. действительная скорость будет на 5% меньше расчетной. Идельчик предлагает не вводить поправку на сжимаемость воздуха до скорости потока 150 м/с [27, стр. 26]. При этом действительная скорости потока будет на 6% ниже вычисленной по уравнению Бернулли $G = \alpha \rho W F$, где плотность принимается неизменной $\rho = 1,24$ кг/м³.

2.3.1. Выполнение измерений и запись сигналов

Измерение скорости струи на выходе из сопла осуществлялось ПД косвенным способом, по перепаду статического давления ΔP (далее – перепаду давления) на сопле. Это *медленноменяющаяся составляющая давления*. Схема ПД включает тензорезистивный сенсор, который регистрирует разницу между барометрическим давлением (на входе в сопло) и измеряемым давлением (внутри камеры) с погрешностью в 1%. Тензорезистивный сенсор преобразует перепад давления в электрический аналоговый токовый сигнал 4-20 мА и выводит показания на дисплей с размерностью - Паскали. Кроме этого, токовый сигнал подается на выход ПД. В сигнальный провод, соединяющий выход ПД с аналоговым входом 14-разрядного АЦП было впаяно сопротивление 500 Ом, поскольку АЦП работает с сигналами 0...10 В. Аналоговый сигнал оцифровывался АЦП и поступал в ПК.

Данные записывались в файл по трем каналам: в третий канал записывался сигнал с ПД 150-250, в пятый канал записывался сигнал с ПД 150-1250, и в седьмой канал записывался сигнал с ПД 150-3000. При превышении величины предельно допустимого давления на ПД 150-250 измерительная трубка к нему пережималась. Это действие отображено скачком на кривой (6). ПД 150-1250 по паспорту выдерживает кратковременное двукратное превышение давления безболезненно.

Измерение амплитуды колебаний давления. Измерение амплитуды *быстроменяющейся составляющей давления* осуществлялось прямым способом, микрофоном с погрешностью ± 1 дБ, в интервале 2 Гц...20 кГц. Аналоговый сигнал с микрофонов подавался на микрофонный усилитель, далее оцифровывался тем же

АЦП и поступал в ПК.

Значения коэффициентов умножения и смещения определялись при анализе тарированного сигнала от пистонфона. Амплитуда тарированного сигнала должна была составлять $31,7 \text{ Па} \pm 0,3 \text{ дБ}$, частота – 250 Гц. Корректировка калибровочных коэффициентов выполнялась перед каждой серией экспериментов, и запись тарировочного сигнала при данных коэффициентах сохранялась вместе с файлами данных этой серии.

На графиках, как правило, представлена амплитуда сигнала из окна спектроанализатора. Но на некоторых графиках представлена амплитуда из окна осциллограммы. В Таблицах, в Приложении, приводится амплитуда сигнала из окна спектроанализатора. В тексте, под рисунками, указывается амплитуда, представленная на графике. Амплитуда из осциллограммы выше, поскольку суммируется по всему охватываемому интервалу частоты, а амплитуда из окна спектроанализатора суммируется лишь в интервале полосы усиления резонатора.

Измерения частоты колебаний давления. Частота дискретизации (частота опроса, сэмплирование) устанавливалась при настройке программы и составляла 10 кГц. Чрезмерное увеличение частоты дискретизации ведет к неоправданному “утяжелению” файлов данных, а недостаточная частота дискретизации приводит к появлению на изображении записанного сигнала на экране монитора характерных “сколов” у пиков амплитуды.

В настоящее время измерительная аппаратура работает с цифровыми сигналами, и частота сигнала вычисляется, а не сравнивается с частотой сигнала эталонного генератора. В основе цифровой обработки сигнала лежит дискретное преобразование Фурье (ДПФ, DFT). Вычисления производятся для определенного количества значений регистрируемых данных N , в данной работе количество обрабатываемых значений $N=4096$ точек. Величина спектра равна половине этого количества – $N/2=2048$ точек. Частота регистрации данных F_s выбиралась 10000 измерений в секунду. Частотное разрешение dF , в таком случае, составляет результат деления частоты регистрации F_s на количество обрабатываемых значений $dF = F_s/N = 10000/4096 = 2,44$ Гц. Частота тарированного сигнала от

пистонфона в 250 Гц принималась в качестве эталона.

В начале эксперимента выполнялась тарировка измерительной линии микрофона по частоте и амплитуде с помощью пистонфона. Затем кратковременно записывались сигналы с преобразователей давления (ПД) при нулевой скорости потока для настройки нулей, и после этого плавно увеличивалось напряжение питания на вакуум-насос [1А]. Скорость протяжки у самописца программы PG была постоянной, и напряжение питания вакуум-насоса увеличивалось плавно. После удаления из записи сигналов постоянной составляющей с помощью программы PG установлено, что различить на фоне аппаратного шума в окне программы в интересующей нас полосе частоты 0...2000 Гц можно сигнал с амплитудой $>0,01$ Па. Чувствительность микрофона позволяет улавливать сигнал существенно меньшей амплитуды, но он теряется в приборном шуме, амплитуда которого порядка 0,01 Па.

Изображение записанного сигнала представлено на рис. 2.9. Скорость потока плавно увеличивалась слева направо. Величина скорости изображается нижними кривыми 6, 7, 8. Заметно, как в пределах каждой моды 1, 2, 3, 4, 5 амплитуда плавно увеличивается и более резко уменьшается. Моды разделены интервалами относительной тишины.

При плавном увеличении скорости струи до величины ~ 2 м/с возникал струйный тон отверстия (1) на частоте f нескольких десятков герц. При этой скорости струи частота тона отверстия значительно меньше ЧСК камеры и резонанс не возникал.

Увеличение скорости вращения вентилятора в вакуум-насосе увеличивало разрежение в бочке и в камере резонатора модели, при этом увеличивался перепада давления на сопле и, соответственно, скорость струи, втекающей в камеру резонатора, до тех пор, пока частота тона отверстия не увеличивалась до величины, соответствующей ЧСК камеры-резонатора. Колебания давления маленькой амплитуды, но соответствующие по частоте ЧСК, вызывали отклик резонатора. Амплитуда колебаний давления существенно усиливалась. Это начало первой (2) моды – устойчивого возбужденного состояния резонатора, характеризующегося

комплексом геометрических и режимных параметров. И в этом случае амплитуда излучения из выходного отверстия резонатора была невелика вследствие невысокой скорости струи, даже при наличии резонанса.

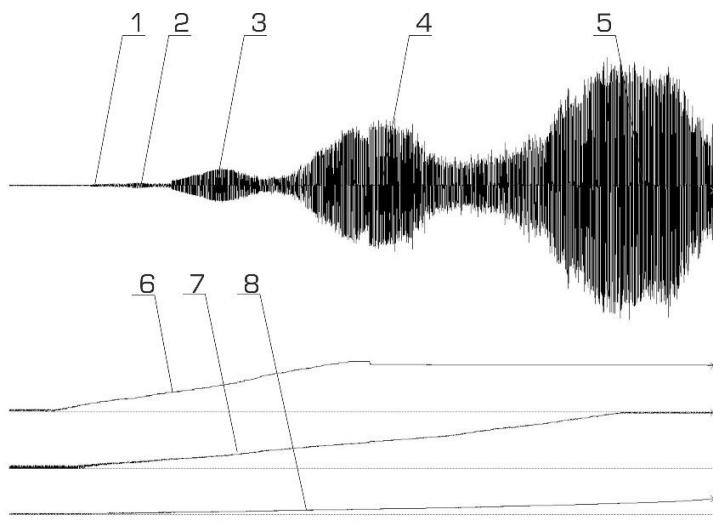


Рисунок 2.9 – Изображение записи сигналов. 1 – струйный тон отверстия, 2 – первая мода, 3 – вторая мода, 4 – третья мода, 5 – четвертая мода объемного резонанса, 6 – сигнал от ПД 150-250 Па, 7 – сигнал от ПД 150-1250 Па, 8 – сигнал от ПД 150-3000 Па

При дальнейшем увеличении скорости потока частота тона отверстия выходила за полосу усиления резонатора и первая мода плавно затухала. Но почти сразу появлялась вторая мода (рис. 2.9): скорость струи выше, соответственно, значение амплитуды в пределах моды существенно выше. Эта мода также существовала в пределах полосы усиления резонатора – появлялась при согласовании частоты генерации первичных колебаний с ЧСК резонатора и затухала при рассогласовании частот. Аналогично, третья (4) и четвертая (5) моды.

Первые моды характеризуются тем, что форма кривой, описывающей процесс колебания давления в камере при $3 \cdot 10^4 > Re > 300$, близка к синусоиде, это чистый тон (рис. 2.10а), тон отверстия. У завершающей четвертой моды колебания давления заметно отличаются от синусоиды (рис. 2.10б), пока не перейдут в высокочастотный турбулентный шум при $Re > 10^5$. Процесс генерации теряет устойчивость при высоком Re , “срывается”. Можно предположить, что при высоком значении числа Re хаотические движения внутри струи нарушают

стройную картину периодической генерации первичных колебаний давления на острой кромке выходного отверстия.



а)

б)

Рисунок 2.10 – Увеличенная осциллограмма сигналов:

а) второй моды и б) четвертой моды

При этом все колебания в камере с частотами, не попадающими в полосу усиления, исчезали. Каждая последующая мода, как правило, интенсивнее предыдущей моды. Генерация исчезает при достижении некоторого значения числа Re , уникального для каждой определенной конфигурации устройства.

Затем выполнялся спектральный анализ сигнала в интервале всей осциллограммы с целью установления скорости возникновения, затухания мод, а также области с наибольшей амплитудой сигнала в интервале каждой моды. Быстрое преобразование Фурье (БПФ) выполнялось в интервале выделенного окна (черная полоска на рисунке 2.11), которая перемещалась вдоль осциллограммы. Результаты спектрального анализа сводились в таблицы.

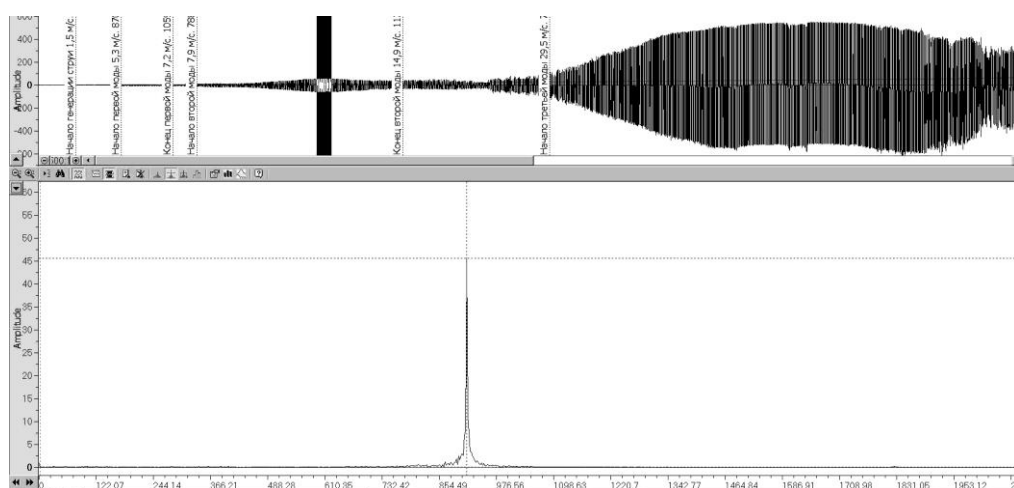


Рисунок 2.11 – Спектральный анализ выделенной области (спектрального окна)

2.3.2. Обработка сигналов, поступающих от датчиков

Входящие сигналы обрабатывались в ПК с помощью программы Power Graph 3.3.8. (PG) и представлялись на экране монитора в виде нескольких непрерывных кривых, в осях с соответствующими размерностями. Сигнал, соответствующий перепаду давления на сопле (медленноменяющаяся составляющая давления), можно было представлять на экране программы без обработки в программе, с размерностью в милливольтках (mV). Следует отметить, что программа позволяет пересчитывать величину сигнала в милливольтках в значения в паскалях (Па), а далее в значения в м/с.

Для пересчета показаний величины сигнала из милливольтов в паскали выполнялась калибровка программы. При этом устанавливалось соотношение между величиной сигнала в паскалях, выводимой на дисплей ПД, и величиной сигнала в милливольтках на входе в АЦП. Следующим этапом, пересчитывалась величина в паскалях в величину в метрах в секунду (м/с) по формуле 2.1.

Величина скорости варьировалась от 2 до 40 м/с, но в некоторых случаях значения достигали до 72 м/с.

После записи и сохранения файла данных, по завершению эксперимента, из записи удалялась постоянная составляющая сигнала (смещение кривой от оси абсцисс), появляющаяся вследствие несовершенства заземления и различных наводок. На изображении амплитудного спектра эта составляющая проявляется в виде узкого пика на частоте 0 Гц. Очищенный от наводок сигнал сохранялся во втором канале. Если исследовался только резонанс на частоте Гельмгольца, то из записи первого канала могли удаляться заведомо слишком низкие и слишком высокие частоты. Эти данные записывались в отдельные каналы и (при необходимости) представлялись в окне спектроанализатора в виде самостоятельных спектральных кривых.

Быстроменяющаяся составляющая давления (аналоговый сигнал с микрофона) подавался с микрофона на вход АЦП через усилитель. Тарировка микрофона не осуществлялась, а осуществлялась калибровка всего канала

измерения с использованием пистонфона и настройки калибровочных значений в программе.

2.3.3. Методика построения характеристических линий

Для изучения механизма производства тона отверстия в системе “сопло – струя – отверстие – резонатор” была разработана методика построения характеристических линий, базирующаяся на известной методике Блохинцева [9] и Кондратьева [31] на рис. 2.12. Она позволяет исследовать механизм возбуждения резонанса в СОГ. Последовательность действий заключалась в скрупулезном нанесении значений частоты пиков из окна спектроанализатора в поле графика в системе координат: скорость струи W – частота f . При построении АЧХ записанного сигнала (рис. 2.10) последовательно выбирались значащие интервалы, соответствующие размеру окна БПФ. Частота и амплитуда пиков соответствовала частоте гармоник. Частота пика с преимущественной амплитудой представляла собой частоту обратной связи в струе.

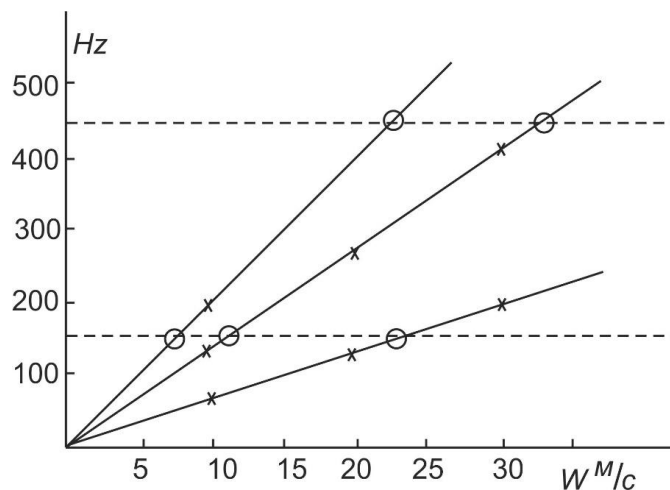


Рисунок 2.12 – Изображение характеристических линий из работы [12].

Перемещение исследуемого выделенного участка сигнала по оси времени в окне самописца соответствовало увеличению скорости струи. Рядовые амплитудные пики могли возникать как на меньшей частоте, так и на большей, по

отношению к пику с преимущественной амплитудой. По мере увеличения скорости струи все семейство гармоник смещалось по частоте вправо, в сторону увеличения частоты, а пик с преимущественной амплитудой мог совершить скачок обратно, влево, в сторону уменьшения своей частоты.

По мере заполнения поля графика значениями из окна спектроанализатора было замечено, что эти значения хорошо описываются семейством характеристических линий, расходящихся из начала системы координат. Некоторые участки характеристик могут иметь незаполненные интервалы. Пересечение характеристической линией нижней прерывистой горизонтальной линии, соответствующей ЧСК по механизму Гельмгольца, соответствует резонансу на частоте Гельмгольца, а пересечение верхней горизонтальной линии – полуволновому резонансу.

2.4. Верификация результатов экспериментальных исследований

Для оценки достоверности результатов экспериментальных исследований с новыми моделями СОГ, была проведена верификация системы измерений. Было выполнено сравнение результатов испытаний двух моделей, из которых одна описана в работе [111], а вторая представляла собой ее реальную физическую копию в масштабе 1:2. Верификация экспериментального метода выполнена путем сравнения результатов исследования двух СОГ с камерами пропорциональных размеров, первый из которых содержал профилированное сопло (рис. 2.13а), а второй содержал сопло со скругленной входной кромкой (рис. 2.13б).

На рисунке 2.14 представлено сравнение соотношений давления (среднего к максимальному) в зависимости от числа Струхала по длине камеры СОГ. Сравнение показало хорошее соответствие по амплитуде и частоте с опубликованными литературными данными. На рисунке 2.14 видно хорошее совпадение по числу Струхала периодов тишины, «опирающихся» на ось абсцисс. Положение мод на оси абсцисс также хорошо совпадает, а некоторое различие формы мод (более крутой выход системы из возбужденного состояния) можно

объяснить лучшей динамикой камеры меньшего объема. Следует отметить, что значение амплитуды резонанса в камере пропорционально меньшего объема не снизилась.



Рисунок 2.13 – Схема СОГ:

а) с профилированным соплом [126]; б) СОГ с соплом “четверть круга” (автор)

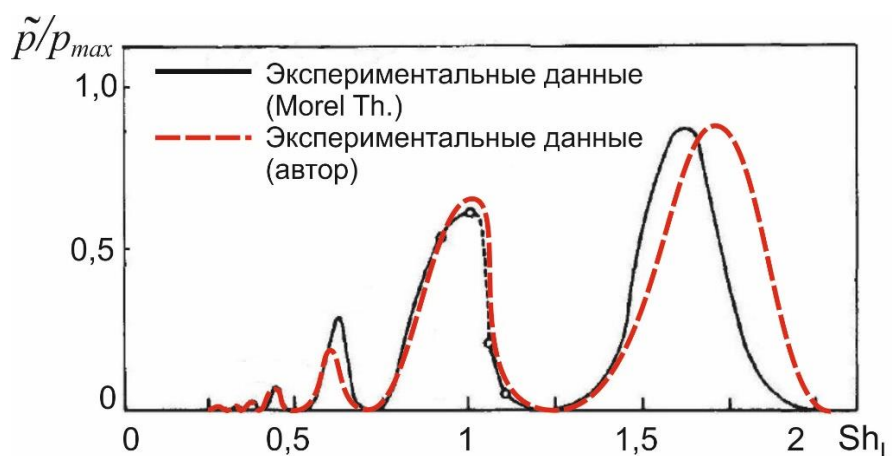


Рисунок 2.14 – Сравнение экспериментальных данных с соплом “четверть круга” (автор) и с профилированным соплом [111]

2.5. Выводы по главе

Разработана и изготовлена разборная модель скважинного акустического излучателя, представляющая собой конструктивно струйный осциллятор Гельмгольца. Компановка канала модели из отдельных элементов позволяла собирать канал различной геометрии и изучать влияние на работу устройства формы сопла, камеры и выходного отверстия по-отдельности. Выработана и успешно применена технология изготовления цилиндрических сопел с острой кромкой.

Создан экспериментальный стенд для испытаний моделей струйного осциллятора Гельмгольца при изменении скорости потока в интервале $0 \dots 70$ м/с. Стенд оснащен аппаратурой для непрямого измерения скорости струи на срезе сопла, прямого измерения частоты и амплитуды генерации в камере осциллятора.

Разработана новая методика, позволяющая изучать: характеристики генерации тона отверстия в отсутствии влияния акустического резонанса при малой скорости струи, влияние акустического резонанса на генерацию тона отверстия и связь этих двух, относительно самостоятельных, явлений в камере резонатора.

Проведена верификация методики проведения экспериментальных исследований путем сравнения результатов физического эксперимента одного из вариантов конструкции СОГ с литературными данными.

3.1. Генерация вихревого звука свободной струей и струей, натекающей на препятствие

Перед началом экспериментов с СОГ были проведены экспериментальные исследования генерации вихревого звука свободной (нестесненной) струи, вытекающей через цилиндрическое отверстие в плоской крышке (сопла) из атмосферы в большую безэховую камеру, на наличие в нем гармонической составляющей – тона (нем. *tone* – звук). Диаметр сопла d_1 постоянен для всех экспериментальных исследований и равен 12 мм, длина сопла ℓ_1 изменялась от 4 до 14 мм. Кромки сопла острые. Экспериментальные исследования со свободной струей проводились в интервале скорости до 50 м/с, что соответствует числу Рейнольдса $Re_d=4 \cdot 10^5$.

Свободная струя, вытекающая из цилиндрического отверстия.

На рис. 3.1 наблюдается семейство пиков в интервале скорости, которое называется *интервалом вихревого звука*. Семейство пиков на рисунке представляет собой *динамический спектр вихревого звука* свободной струи, который показывает зависимость амплитуды сигнала от параметра скорости. Уровень аппаратного шума равен 0,01 Па (54 дБ). Частота пиков увеличивается прерывисто в интервале 1000...2500 Гц. Гармоническая составляющая в вихревом звуке отсутствует при скорости меньше 8 м/с и более чем 35 м/с. Динамический спектр вихревого звука представляет собой последовательность *мод* – узких пиков амплитуды, частота которых заметно возрастает при увеличении скорости струи. Возбужденное состояние исследуемой системы (в данном случае “сопло – струя”), характеризующееся совокупностью геометрических и режимных параметров, называется *модой*. Моды в интервале вихревого звука возникают на дискретной частоте, прерывисто, и перемежаются интервалами тишины. В интервале между модами гармоническая составляющая в вихревом звуке не наблюдается.

Числа Струхала по диаметру сопла определено:

$$Sh_d = \frac{f \cdot d_1}{W}, \quad (3.1)$$

где f – частота, Гц; d_1 – диаметр сопла, м; W – средняя скорость струи, м/с.

Числа Струхаля по диаметру сопла:

$$Sh_\ell = \frac{f \cdot \ell_1}{W}, \quad (3.2)$$

Числа Sh_d и Sh_ℓ незначительно увеличиваются с ростом скорости свободной струи.

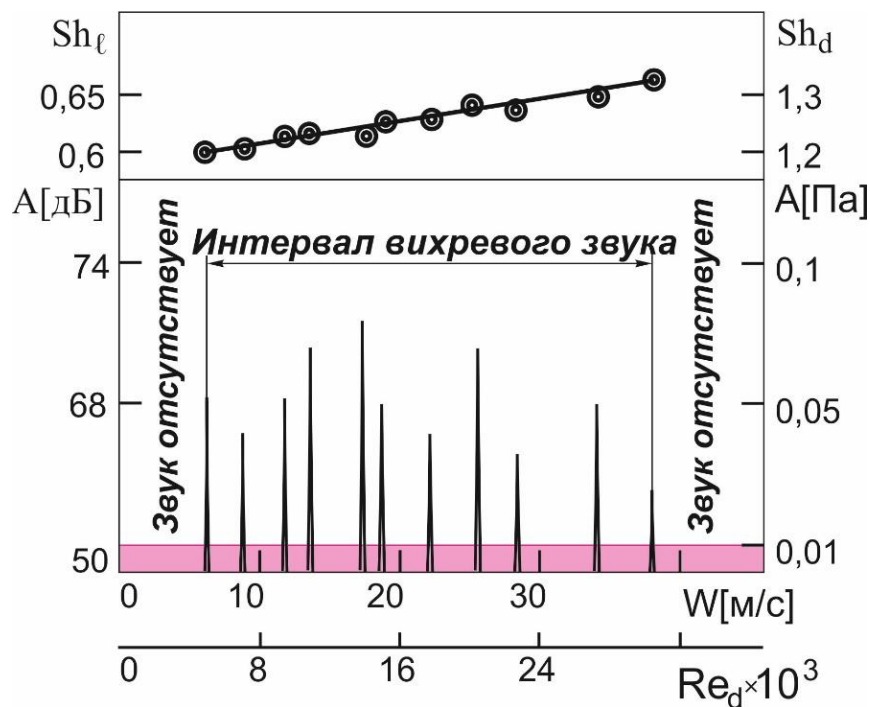


Рисунок 3.1 – Динамический спектр вихревого звука свободной струи ($\ell_1/d_1=0,67$)

Розовое – уровень аппаратного шума. Пики – моды тона струи

При спектральном анализе шума, производимого свободной струей, вытекающей из сопла длиной $\ell_1=4$ мм ($\ell_1/d_1=0,33$), гармоническая составляющая – *тон* – в шуме не наблюдалась при любой скорости струи. Отсутствие тона при вытекании струи через отверстие в тонкой стенке также отмечается в [64].

При увеличении длины сопла до 6 мм ($\ell_1/d_1=0,5$) в амплитудно-частотном спектре появляется гармоническая составляющая в виде резкого пика амплитуды – моды – величиной $\sim 0,025$ Па (рис. 3.1). Первый пик возникает при скорости струи $W \sim 10$ м/с. Последующие пики смещаются вправо в окне спектроанализатора при увеличении скорости струи и существуют прерывисто, по одному, до скорости струи $W \sim 35$ м/с. Число Sh_d , характеризующее моды вихревого звука свободной струи, при $\ell_1/d_1=0,5$ изменяется в интервале от 1,22 до 1,32 дискретно, от пика к пику.

При длине сопла 8 мм ($\ell_1/d_1=0,67$) моды возникают в интервале скорости струи 6,4...20 м/с, соответствующей диапазону частоты 480...1670 Гц (рис. 3.2). Значение числа Sh_d изменяется при этом в интервале от 0,9 до 1,0. Наибольшая зафиксированная амплитуда вихревого звука свободной струи составляла $\sim 0,066$ Па. Увеличение длины сопла до 10 мм ($\ell_1/d_1=0,83$) приводит к дальнейшему снижению скорости, при которой возникает первая мода, в интервале скорости струи 5,6...16 м/с, соответствующей диапазону частоты 344...1127 Гц. Значение числа Sh_d изменяется в интервале от 0,74 до 0,84. При $\ell_1/d_1=1$ мода возникает в интервале скорости струи $W \sim 3,7...7,2$ м/с, соответствующей диапазону частоты 178...388 Гц. Значение числа Sh_d изменяется в интервале 0,6...0,64. При $\ell_1/d_1=1,17$ полезный сигнал не наблюдается.

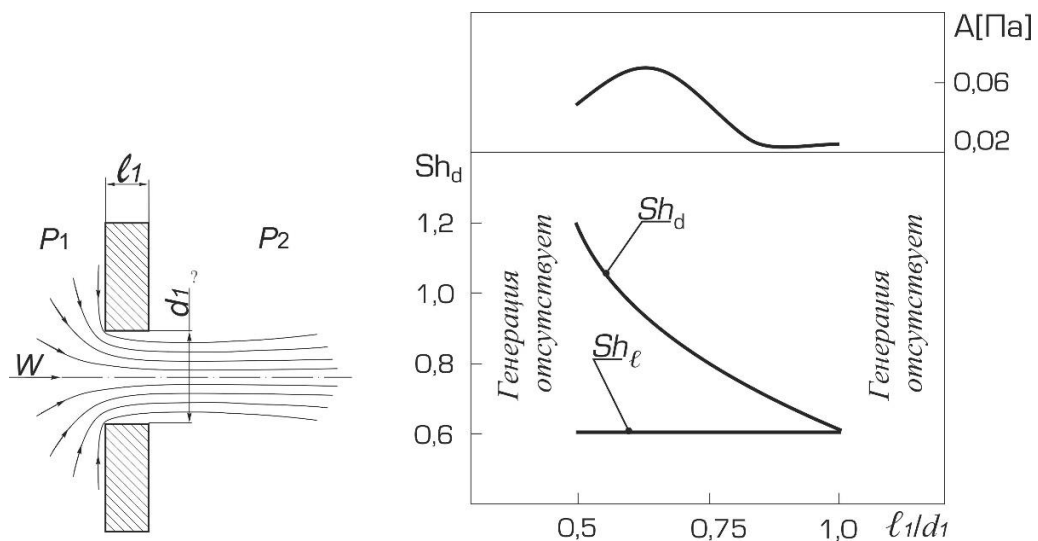


Рисунок 3.2 – Числа Струхала свободной струи, вытекающей из сопла в затопленное пространство

В интервале вихревого звука число Sh_ℓ немного увеличивается от 0,6 до 0,65, от моды к моде при плавном увеличении скорости струи, и этот интервал (0,6...0,65) сохраняется при изменении длины сопла. При увеличении длины сопла положение мод изменяется, интервал вихревого звука смещается в область меньшей скорости струи и частоты генерации: первая мода возникает все раньше, и последняя мода затухает также раньше.

В результате экспериментов по исследованию акустики свободной затопленной струи выявлено наличие внутреннего механизма усиления в струе, вытекающей из сопла с острыми кромками в затопленный объем при отсутствии какого-либо препятствия перед ней. Каждая мода свободной струи существует в очень узком интервале скорости, и моды всегда разделены по скорости небольшим интервалом. Также установлено, что генерация звука свободной струей наблюдается при $0,5 \leq \ell_1/d_1 \leq 1$. Наибольшая амплитуда сигнала 0,066 Па зафиксирована при длине сопла 8 мм ($\ell_1/d_1=0,67$).

Свободная струя, натекающая на пластину. Рассмотрим более сложную конструкцию, добавив пластину. Внутри безэховой камеры, напротив круглого сопла, устанавливается глухая пластина толщиной 4,4 мм на расстоянии $L=10$ мм. Таким образом, создана струйно-акустическая система “сопло – струя – пластина” (рис. 3.3.).

При длине сопла $\ell_1=4$ мм моды вихревого звука не наблюдались. При ℓ_1 , равном 6 мм, моды (подобно изображенному на рис. 3.1) появляются, но они слабее, чем в свободной струе. Семейство выраженных пиков наблюдается при скоростях от 8,1 м/с (815 Гц) до 12,2 м/с (1350 Гц). Значения Sh_d находятся в диапазоне 1,21...1,33. При $\ell_1/d_1=0,67$ в области вихревого звука наблюдалась единственная мода на скорости струи 6,5 м/с (503 Гц, $A_{MAX}=0,025$ Па, $Sh_d=0,93$). При $\ell_1=10$ мм в области вихревого звука наблюдалось семейство выраженных пиков от 5,4 м/с – 342 Гц до 11,7 – 840 Гц. Максимальное значение амплитуды равно 0,053 Па, а значение Sh_d находится в диапазоне 0,76...0,86. При $\ell_1=12$ мм единственный пик моды возникает на скорости 6 м/с, соответствующей частоте 330 Гц, при $Sh_d=0,66$. При соотношении $\ell_1/d_1=1,17$ полезный сигнал не наблюдается.

Таким образом, наличие препятствия при вытекании свободной струи из сопла в затопленное пространство не оказывает влияния на значения Sh_ℓ .

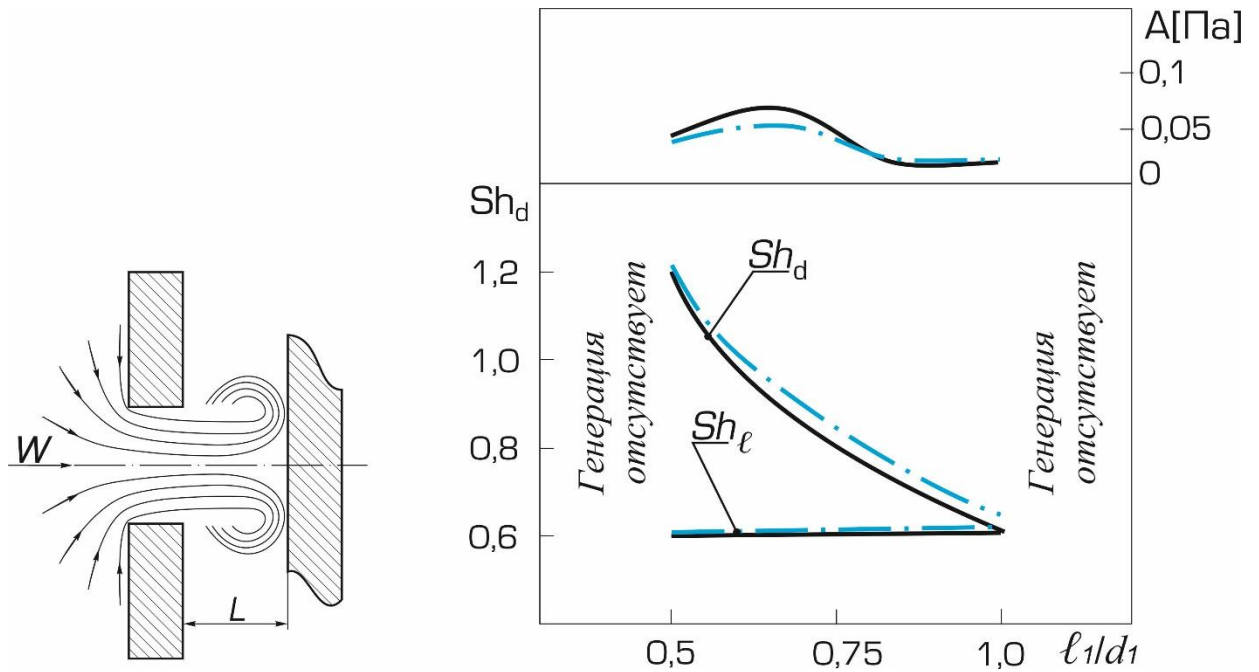


Рисунок 3.3 – Числа Струхала свободной струи, натекающей на пластину

— — свободная струя, — . — струя – пластина

Установка препятствия для свободной струи в виде глухой пластины немного уменьшает амплитуду вихревого звука. Наибольшая амплитуда, достигаемая при длине сопла $\ell_1/d_1=0,67$, равна 0,053 Па. Эта величина меньше, чем наибольшая амплитуда вихревого звука свободной струи (0,066 Па).

Свободная струя, втекающая в отверстие в пластине.

Рассмотрен более сложный вариант конструкции, добавлена пластина напротив сопла той же толщины и на том же расстоянии $L=10$ мм, но с отверстием, диаметр которого равен 12 мм, с острыми кромками. Отверстие расположено соосно соплу (рис. 3.4). Таким образом, создана струйно-акустическая система “сопло – струя – отверстие”.

При длине сопла ℓ_1 , равном 4 мм и 14 мм, моды вихревого звука не наблюдались. При ℓ_1 , равной 6 мм, в области вихревого звука наблюдалось семейство выраженных пиков (подобно изображенному на рис. 3.1) от 9 м/с – 888 Гц до 13,2 м/с – 1262 Гц. ($Sh_d = 1,14...1,18$). При ℓ_1 , равной 8 мм, амплитуда

существенно сильнее, чем в случае с соплом $\ell_1=6$ мм, – от 4,6 м/с – 330 Гц до 16,5 – 1303 Гц ($Sh_d=0,86\dots0,95$). При ℓ_1 , равной 10 мм, наблюдается вихревой звук в интервале от 4,7 м/с – 293 Гц до 6,1 – 385 Гц ($Sh_d=0,74\dots0,76$) и в интервале от 6,8 м/с – 431 Гц до 16,6 – 1154 Гц ($Sh_d=0,76\dots0,83$). Наибольшая зафиксированная амплитуда вихревого звука равна 0,15 Па, она наблюдается при длине сопла 8 мм.

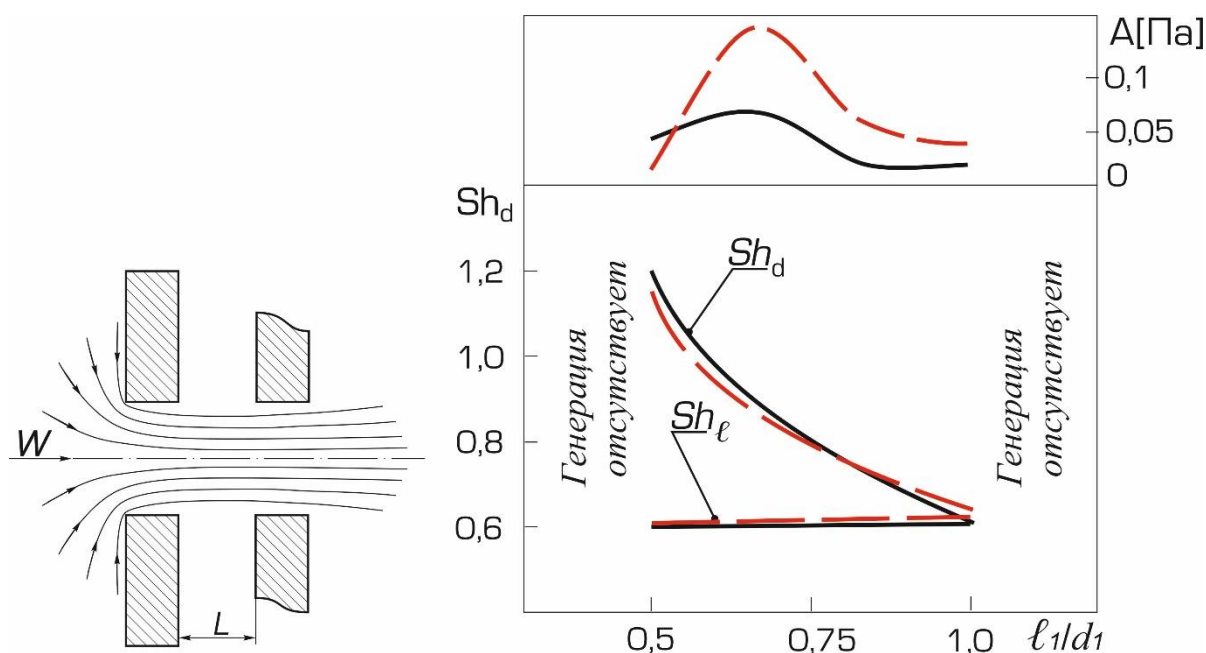


Рисунок 3.4 – Числа Струхали свободной струи, втекающей в отверстие в пластине

— — свободная струя, — — струя – отверстие

При $\ell_1/d_1=1$ наблюдаются отдельные пики мод вихревой звука:

- 1) на 3,5 м/с – 175 Гц. ($Sh_d=0,6$);
- 2) на 6,3 м/с – 351 Гц. ($Sh_d=0,67$);
- 3) на 7,8 м/с – 461 Гц ($Sh_d=0,71$);
- 4) на 12,6 м/с – 778 Гц ($Sh_d=0,74$).

Вихревой звук в системе “сопло – струя – отверстие” всегда возникает на скорости чуть меньшей, по сравнению со свободной струей. Соответственно, и частота генерации в момент возникновения вихревого звука чуть меньше. При этом размещение пластины с отверстием перед свободной струей увеличивает амплитуду вихревого звука в 2,3 раза. На рост амплитуды генерации оказывает влияние механизм обратной связи струи.

Свободная струя, втекающая в отверстие в пластине при наличии обечайки.

Рассмотрим самый сложный вариант конструкции, вставив всю систему в обечайку, плотно надетую на переднюю крышку с соплом. Между пластиной и обечайкой имеется большая щель по диаметру. Создана струйно-акустическая система “сопло – струя – отверстие - обечайка” (рис. 3.5). Такая конструкция позволяет понять, будет ли обечайка выполнять функцию акустического резонатора в негерметичной камере.

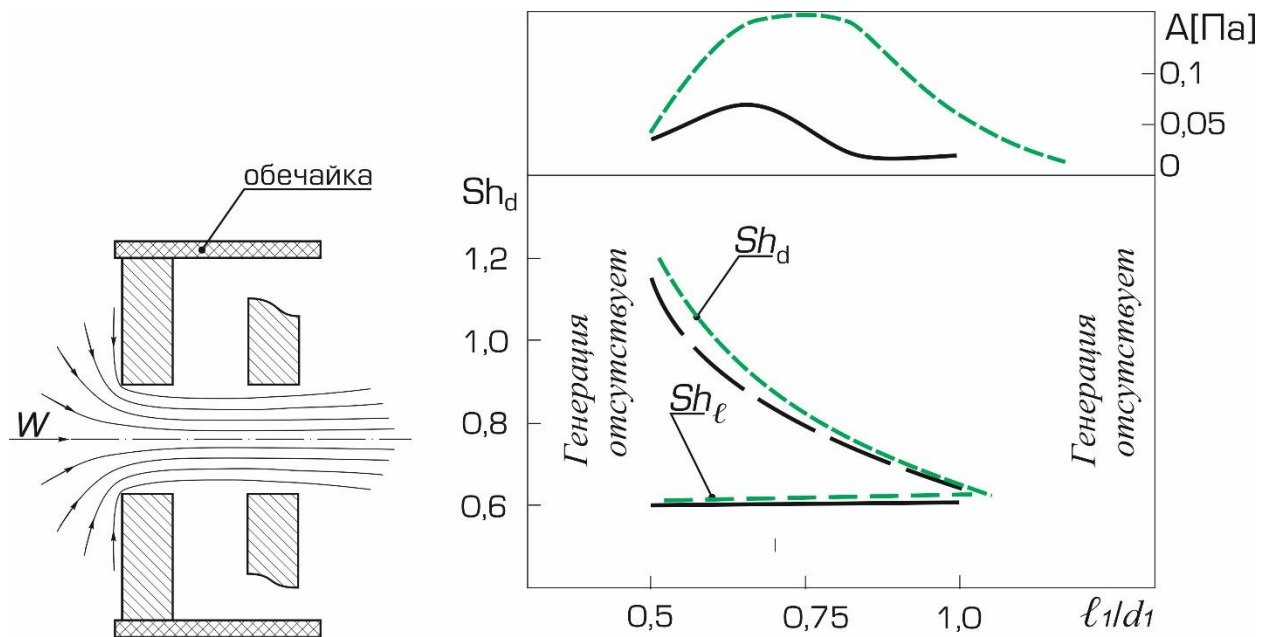


Рисунок 3.5 – Числа Струхала свободной струи, вытекающей в отверстие в пластине при наличии обечайки

— — свободная струя, — — — — струя в обечайке

При длине сопла ℓ_1 , равном 4 мм, моды вихревого звука не наблюдались в системе “сопло – струя – препятствие”. Когда $\ell_1/d_1=0,5$, вихревой звук наблюдается в интервале от 7,8 м/с – 730 Гц до 10,9 м/с – 1045 Гц. ($Sh_d=1,12$) и локально на 18,7 м/с – 1934 Гц ($Sh_d=1,24$). Если ℓ_1 равно 8 мм, то вихревой звук наблюдается в интервале от 4 м/с – 290 Гц ($Sh_d=0,87$) до 16 – 1276 Гц. ($Sh_d=0,95$). Установлено, что значение Sh_d уменьшается с ростом значения ℓ_1/d_1 . Число Sh_ℓ при этом остается практически неизменным.

Максимальное значение амплитуды составило 0,158 Па при $\ell_1/d_1=0,67$. Установка обечайки вокруг пластины с отверстием практически не изменяет амплитуду тона отверстия, но расширяет интервал значений длины сопла, обеспечивающей высокую амплитуду тона отверстия.

Сопла с длиной 4 мм (и менее), а также 14 мм (и более) не генерируют акустические возмущения во всех рассмотренных системах. Свободная струя при натекании на препятствие производит тон струи в интервале длины струи $0,3d_1 > L > d_1$, в интервале $Re_d \sim 6 \cdot 10^3 \dots 30 \cdot 10^3$, числа Sh_d от 0,6 до 1,6, при этом $Sh_\ell \sim 0,6$.

3.2. Возбуждение акустических мод гармониками тона отверстия в струйном осцилляторе Гельмгольца

Характерные особенности возникновения струйного тона отверстия и последующего возбуждения акустического резонанса в СОГ (цилиндрической камере с двумя отверстиями) представлены на рис. 3.6. Продувка воздухом осуществлена на примере осциллятора диаметром 78 мм и длиной 12 мм с соплом $d_1=12 \times 16$ мм и выходным отверстием $d_2=12 \times 10$ мм. Частота собственных колебаний (ЧСК) при возбуждении динамиком составила 712 Гц [1А].

При плавном увеличении скорости струи до величины $W \sim 1,8$ м/с ($Re=14400$) в камере возникали периодические колебания давления на частоте нескольких десятков герц – тон отверстия (рис. 3.6а) в виде его основной гармоники f_0 . Частота тона была значительно меньше ЧСК камеры и резонанс не возникал. Появление в амплитудно-частотном спектре первого выраженного пика означает начало функционирования механизма усиления в струе на частоте обратной связи [11А, 14А]. Единственная гармоника f_0 в спектре имеет синусоидальную форму исследуемого сигнала и означает согласование обратной связи по частоте и фазе с периодичностью формирования вихрей за кромкой сопла. Амплитуда тона (0,05 Па) в первый момент незначительно превышала аппаратный шум ($\sim 0,015$ Па).

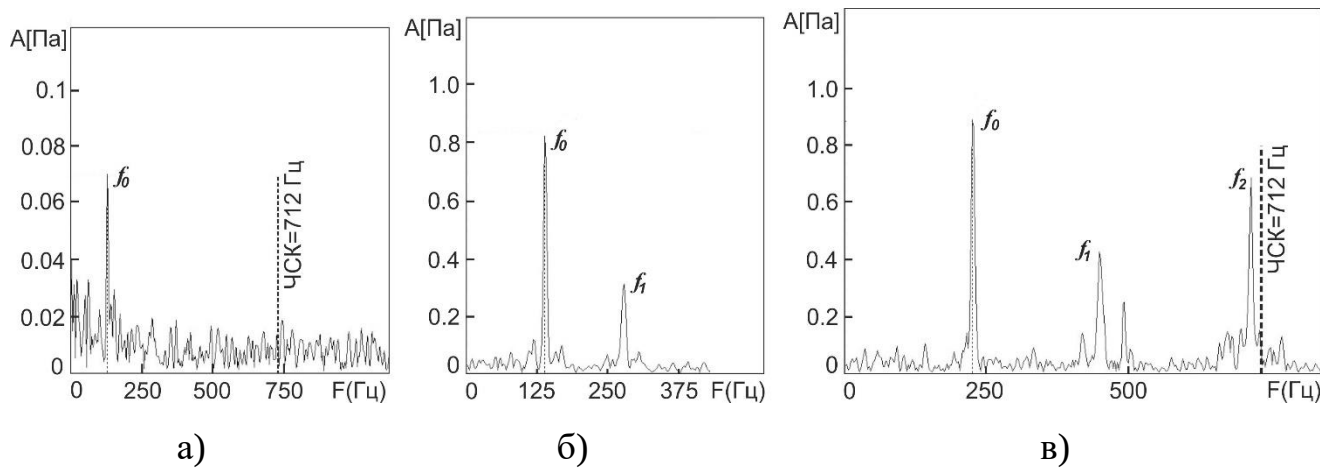


Рисунок 3.6 – Возникновение и развитие гармоник струйного тона отверстия до возбуждения резонанса: а) $W=1,8$ м/с, б) $W=3,4$ м/с, в) $W=5,2$ м/с

При увеличении скорости струи амплитуда первого пика стремительно возрастала, и пик смещался по частоте (на оси абсцисс) вправо – в сторону увеличения частоты. При скорости струи до 3,4 м/с возникала дополнительно первая гармоника f_1 на удвоенной частоте основной гармоники f_0 (рис. 3.6б). При дальнейшем увеличении скорости струи до 5,2 м/с возникала дополнительно вторая гармоника f_2 на частоте, кратной частоте основной гармоники (рис. 3.6в). Появление в сигнале высших гармоник означает искажение формы сигнала от первоначальной синусоиды при нарушении синфазности возбуждения тона отверстия. Преимущественная амплитуда при изменении скорости струи могла перескочить на одну из высших гармоник, частота и фаза которой лучше соответствовала параметрам обратной связи в струе. Основная гармоника f_0 при этом не исчезала, как и остальные гармоники, просто они были существенно меньшей амплитуды, так как они не получали усиление по механизму обратной связи. При плавном увеличении скорости струи все семейство гармоник тона смещалось в сторону увеличения частоты по оси абсцисс, а преимущественная амплитуда могла «перескакивать» с одной гармоники на другую.

При достижении гармоникой f_2 по частоте нижнего края полосы усиления резонатора, на скорости 5,7 м/с, становилось заметным увеличение ее амплитуды (рис. 3.7а), начинался акустический резонанс – амплитуда этой гармоники тона увеличивалась многократно. Остальные частоты в первый момент просто

приглушались, а в середине полосы усиления исчезали из наблюдения. При дальнейшем увеличении скорости струи до 8 м/с частота гармоники f_2 выходила за верхний край полосы усиления Δf , и она затухала. Но возникала вторая мода на первой гармонике f_1 (рис. 3.7б).

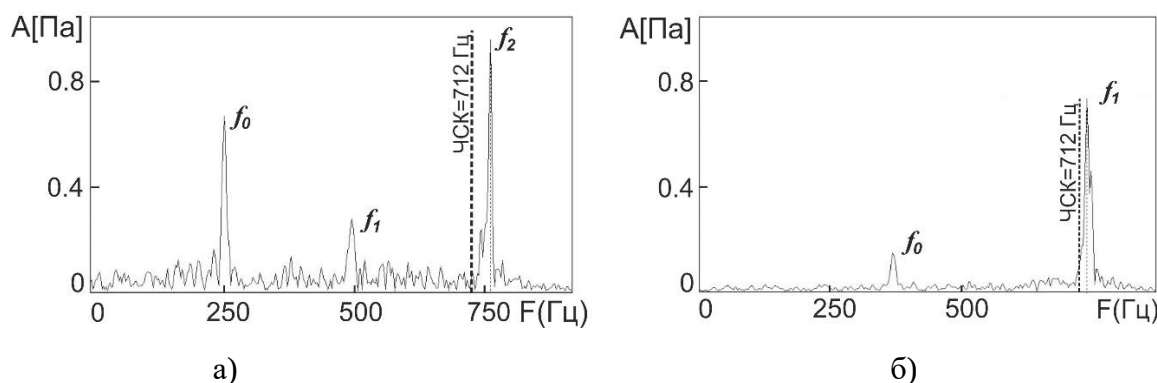


Рисунок 3.7 – Возникновение и развитие первой и второй акустических мод:

а) $W=5,7$ м/с, б) $W=8$ м/с

Резонанс определяет амплитуду той гармоники, которая попадает в полосу усиления, но усилить другие гармоники он не может (хотя, может подавить). Амплитуду остальных гармоник определяет близость их частоты и фазы параметрам обратной связи в струе.

На рис. 3.7а все гармоники тона отверстия хорошо видны, поскольку резонанс еще только наметился и не подавил все остальные элементы спектра, частоты которых не попали в полосу усиления резонатора. В момент возникновения первой акустической моды, как правило, наблюдалось все семейство гармоник тона, начиная с основной гармоники f_0 и заканчивая той высшей гармоникой, на которой собиралась развиваться первая акустическая мода. Сколько бы гармоник тона не существовало в спектре, первая акустическая мода всегда возникает на высшей из гармоник, как самой крайней к полосе усиления резонатора Δf . Таким образом, становилось очевидным количество мод, которые можно было ожидать, и которые должны были развиваться впоследствии последовательно при плавном увеличении скорости струи. Судя по рис. 3.7а можно ожидать последовательное возникновение трех мод на гармониках f_2 , f_1 и f_0 .

Нумерация мод обратная по отношению к нумерации гармоник. Гармоники возникают последовательно при плавном увеличении скорости струи – f_0 , f_1 , f_2 . Наивысшая гармоника первой достигает по частоте нижнюю границу полосы усиления резонатора и производит первую моду. В работе [111] акустические моды нумеруются по номеру гармоники, возбуждившей эту моду.

При дальнейшем увеличении скорости струи до 14,3 м/с вторая мода получала полное развитие на первой гармонике f_1 (рис. 3.8а), а основная гармоника f_0 вплотную приближалась к нижней границе полосы усиления резонатора. При увеличении скорости струи до 14,5 м/с вторая мода затухала рис. 3.8б, поскольку частота первой гармоники f_1 выходила за верхний край полосы усиления резонатора, то возникала третья мода на основной гармонике f_0 тона отверстия.

Амплитуда акустических мод последовательно увеличивалась с увеличением номера моды, поскольку каждая следующая мода возникала на большей скорости струи. Наибольшая амплитуда генерации на резонансе наблюдалась у последней, третьей моды, возникшей на основной гармонике тона отверстия. После того, как частота основной гармоники выходила из полосы усиления резонатора при плавном увеличении скорости струи до 28 м/с, дальнейшее возникновение мод акустического резонанса становилось невозможным (рис. 3.8в).

Следует отметить, что Rossiter [122] исключал гармоники периодических сигналов из рассмотрения, полагая, что они характеризуют лишь искажение формы синусоидального сигнала, но не частоту физического явления.

Экспериментально установлено, что гармоники имеют существенное значение, возбуждая моды акустического резонанса. Гармоники, с частотой, попадающей в полосу усиления резонатора, производят моды на частоте собственных колебаний резонатора.

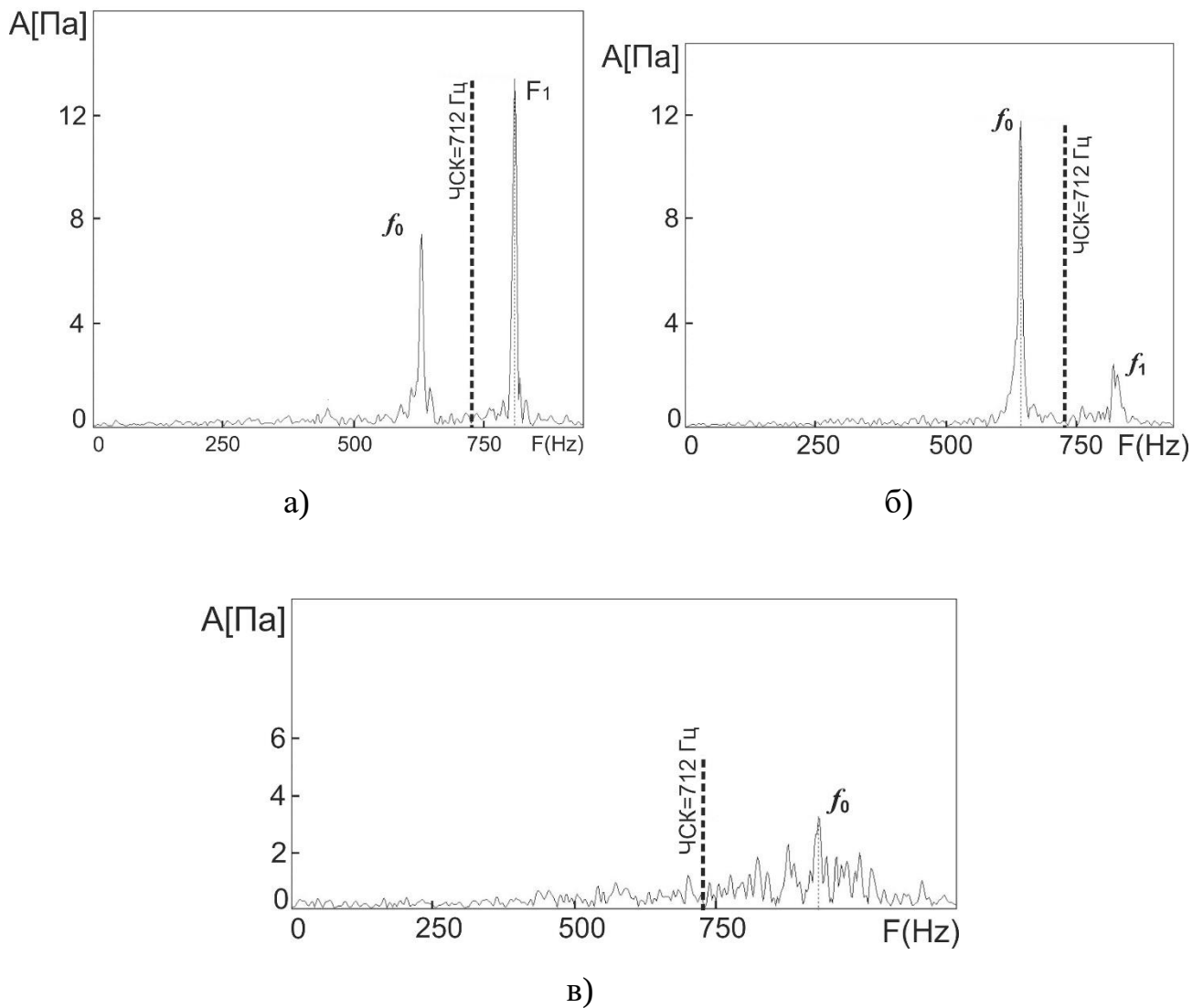


Рисунок 3.8 – Развитие третьей и четвертой акустических мод:

а) $W=14,3 \text{ м/с}$, б) $W=14,5 \text{ м/с}$, в) $W=28 \text{ м/с}$

На рисунке 3.9. представлена последовательность возбуждения акустических мод в СОГ при плавном увеличении скорости струи.

По мере увеличения скорости, сначала возникает тон отверстия, затем первая акустическая мода и ярко выраженные вторая и третья моды. (Следует отметить, что на рисунке 3.9 показаны значения амплитуды сигнала из осциллограммы.) При этом основную роль в амплитуде сигнала имеет амплитуда гармоники, попадающей в полосу усиления резонатора. Именно она возбуждает акустический резонанс и определяет амплитуду сигнала. Вклад остальных гармоник невелик.

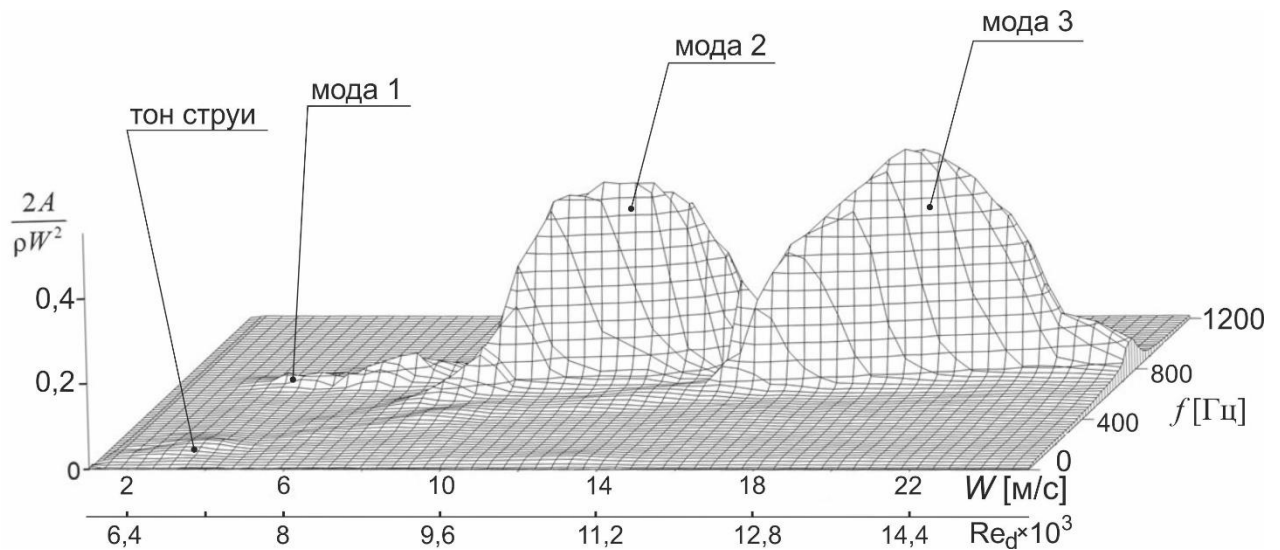


Рисунок 3.9 – Трехмерное изображение мод в СОГ

На рисунке 3.10 представлено возникновение основной гармоники f_0 тона отверстия на характеристической линии $Sh_\ell=0,3$ (красные кружочки). Зелеными треугольниками изображено возникновение первой гармоники f_1 , существующей одновременно с основной гармоникой на другой характеристической линии $Sh_\ell=0,6$. Вторая гармоника, возникшая чуть позже на характеристической линии $Sh_\ell=0,9$, и характеризующаяся большей частотой, первой достигает нижнего края полосы усиления резонатора при плавном увеличении скорости струи и возбуждает первую акустическую моду. Обычно, при возникновении первой и второй акустических мод, можно одновременно с их пиком амплитуды наблюдать пик, соответствующий основной гармонике тона отверстия. Это изображено на рисунке 3.10 красными крестиками на характеристической линии $Sh_\ell=0,3$. Здесь основная гармоника наблюдается одновременно со второй акустической модой, изображенной жирной черной линией на характеристической линии $Sh_\ell=0,6$. При дальнейшем увеличении скорости струи частота основной гармоники достигает нижнего края полосы усиления резонатора и возбуждает третью моду на $Sh_\ell=0,3$.

Основная гармоника наблюдалась периодически на протяжении всего интервала скорости и числа Re . Высшие гармоники наблюдались лишь кратковременно, поэтому было не сложно установить - на какой гармонике развилась мода.

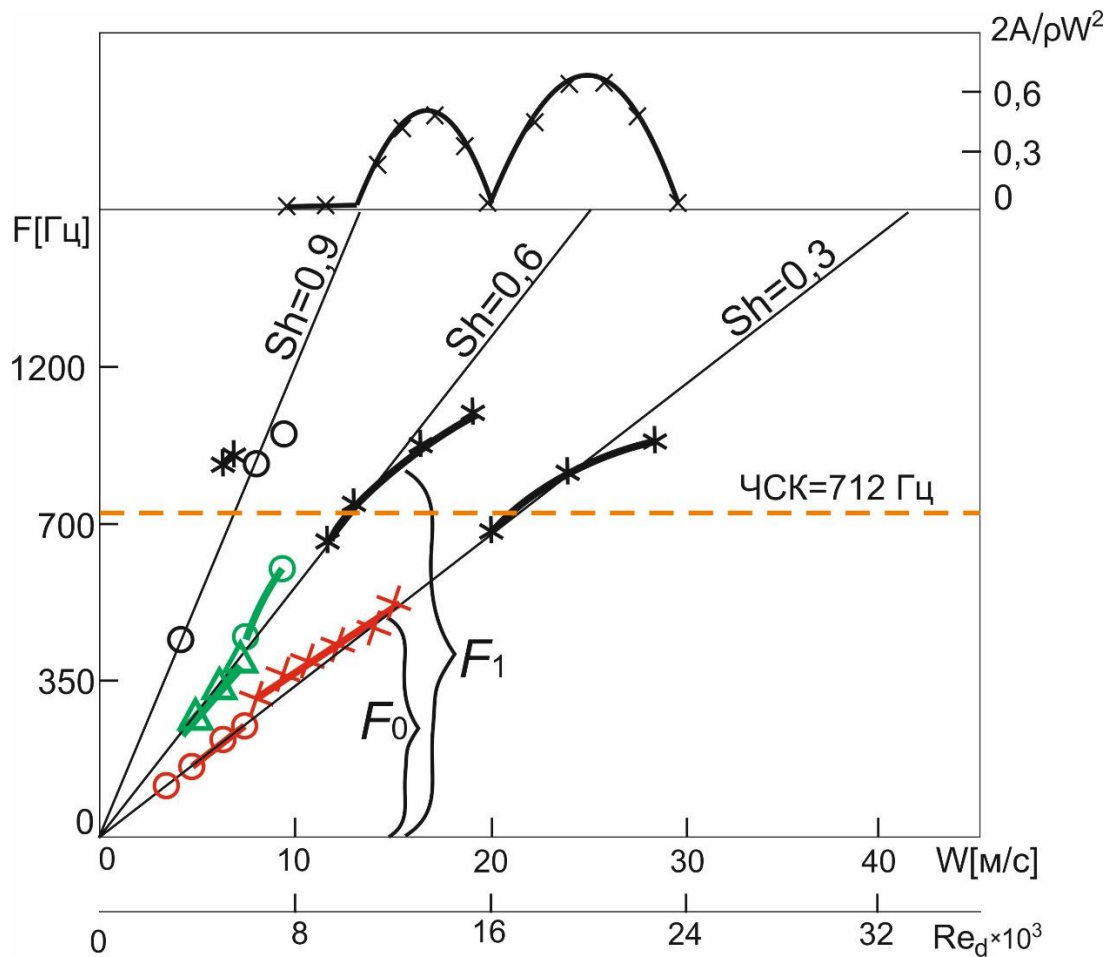


Рисунок 3.10 – Возникновение гармоник струйного тона отверстия, их развитие и возбуждение акустических мод на характеристических линиях $Sh_c = \text{const}$:

о – высшие гармоники тона, х – гармоника с преимущественной частотой,

* - акустические моды

Частота высших гармоник f_1 и f_2 струйного тона отверстия кратна частоте основной гармоники f_0 (рис. 3.10). В начале первой моды на рис. 3.7а частоты гармоник также кратны. В конце моды на рис. 3.7б кратность нарушается. Увеличение частоты первой гармоники f_1 происходит одновременно с основной гармоникой f_0 , а увеличение частоты второй гармоники f_2 , возбуждающей резонанс в камере, отстает от первых двух – первая гармоника f_1 догоняет вторую f_2 , образуя моду. Частота гармоники, формирующей моду, увеличивается медленнее, по сравнению с частотами остальных гармоник, удаленных от частоты резонанса.

3.3. Формирование вихревых структур в слое смешения в струйном осцилляторе Гельмгольца

Исходя из теоретической модели генерации Крюгера (см. раздел 1.1) цепочка периодических вихрей в интервале между крышками формируется непосредственно за кромкой сопла, и импульсы акустической обратной связи воздействуют на эту область (рис. 3.11).

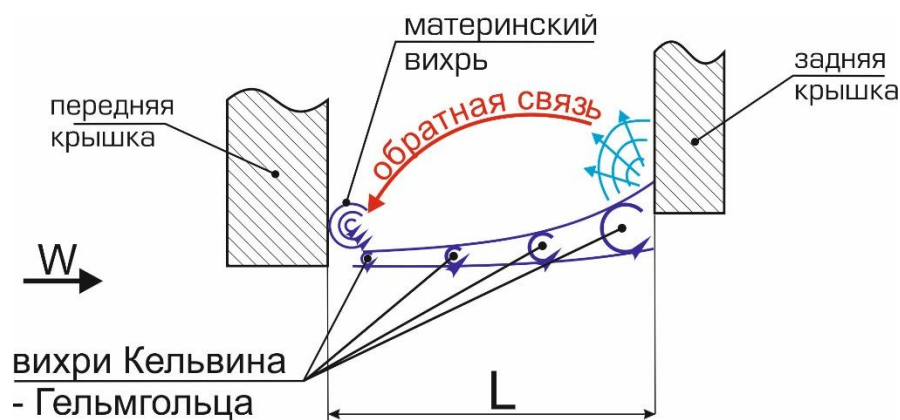


Рисунок 3.11 – Формирования цепочки вихревых структур в слое смешения по теории Крюгера

В действительности, в соответствии с законами гидродинамики, между поверхностью струи и стенкой цилиндрического сопла образуется кольцевой интервал, давление в котором соответствует давлению в наименьшем сечении струи (рис. 3.12). При достаточной длине сопла возвратное течение препятствует формированию торообразного вихря за кромкой сопла, но поддерживает формирование цепочки вихрей Кельвина-Гельмгольца в слое смешения по длине струи.

Оценить значение частоты импульсов обратной связи в струе можно по формуле Крюгера в соответствии с его теоретической моделью на рис. 3.11

$$\frac{1}{f_{\text{имп}}} = \frac{L}{W_{\kappa}} + \frac{L}{c - W} \quad (3.3)$$

где $f_{имп}$ – частота импульсов обратной связи в струе, Гц, $W_k \sim W/2$ – конвективная скорость, м/с, W – средняя скорость струи, м/с, L – интервал между крышками, м. Поскольку возникновение тона струи означает возникновение механизма струйного усиления и соответствие частоты обратной связи частоте генерации струи.

Результат вычисления при L , равной интервалу между крышками (рис. 3.11), дает удовлетворительное соответствие частоты тона струи экспериментальным значениям. При использовании вместо L величины L^* (рис. 3.12) расчет дает значительно меньшую частоту тона струи в сравнении с экспериментальными значениями. Из этого следует, что механизм обратной связи не оказывает заметного влияния на течение внутри сопла. Таким образом, подтверждается, что обратная связь имеет акустическую природу.

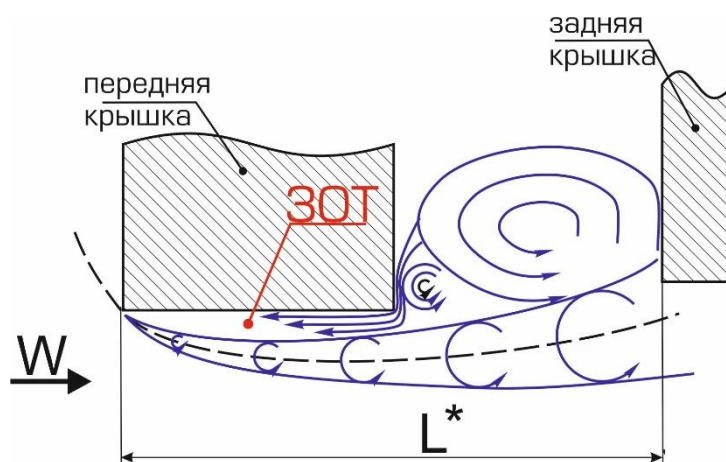


Рисунок 3.12 – Зона обратных токов (ЗОТ) в сопле и цепочка вихревых структур в слое смешения

На рис. 3.13 схематически изображено развитие струи в канале сопла. Полное давление P^* определяется по формуле Бернулли:

$$P^* = P + \frac{\rho W^2}{2} \quad (3.4)$$

где P – статическое давление, Па.

Поскольку статическое давление P (в дальнейшем - давление) в камере меньше атмосферного давления B перед соплом, воздух из атмосферы засасывается в сопло. В соответствии с законом Бернулли P^* в воздушном потоке при разгоне не изменяется. Давление P в потоке постепенно уменьшается по длине сопла, а скорость увеличивается. Давление в потоке начинает уменьшаться по мере формирования струи, еще до того, как воздух входит внутрь канала сопла, поэтому давление в плоскости входа ниже атмосферного, как с внешней стороны острой кромки, так и с внутренней.

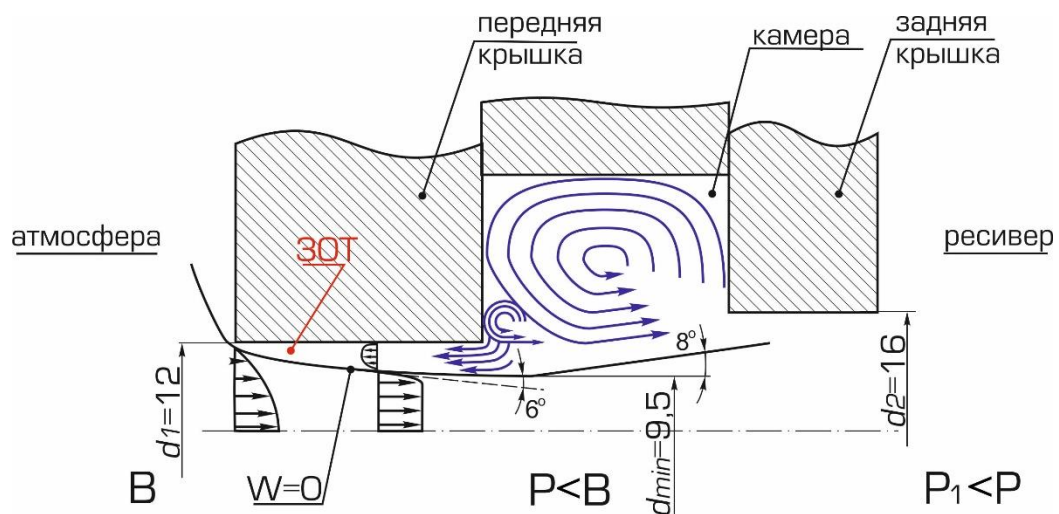


Рисунок 3.13 – Схема развития струи и формирования ЗОТ в канале сопла

В плоскости входа поток огибает острую входную кромку и вектор скорости на периферии струи направлен не по направлению канала, а в направлении к его оси. Поэтому струя внутри канала сопла продолжает сужаться по инерции на некотором протяжении до наименьшего сечения d_{min} , положение которого дается различными авторами в интервале $(0,5 \dots 1,5 d_1)$ [5, 52]. После наименьшего сечения струя начинает постепенно расширяться. Будем считать, что наименьшее сечение струи удалено от входного сечения на величину диаметра отверстия. Площадь наименьшего сечения струи составляет примерно 60% сечения канала, т.е. $d_{min} \approx 0,6 d_1$ [3].

Такое течение считается истечением через отверстие в тонкой стенке, и стенка (в случае отсутствия вязкости) может считаться тонкой вне зависимости от ее

толщины, если струя покидает канал, не задев его стенку. Касание стенки струей происходит на удалении $(3...3,5) d_1$ [5]. При таком течении струя заполняет выходное сечение лишь частично, между поверхностью струи и стенкой канала образуется кольцевой интервал. Наименьшее статическое давление в струе соответствует наименьшему сечению струи d_{min} , где скорость струи наибольшая. Давление в камере несколько превышает величину статического давления в струе, поскольку струя на выходе из камеры частично задевает кромку выходного отверстия, и давление частично восстанавливается. При этом в камере формируется кольцевой тороидальный макровихрь.

Струя, при своем движении внутри канала сопла, вследствие наличия вязкости, увлекает за собой окружающие слои, эжектируя воздух из кольцевого пространства между стенкой канала и поверхностью струи. Давление в этом кольцевом пространстве близко к статическому давлению P_0 в струе и меньше давления в камере P . Вследствие этой разницы давлений $P > P_0$ воздух из камеры устремляется через кольцевой интервал в направлении острой входной кромки отверстия навстречу основному движению струи. Таким образом, формируется ЗОТ тороидальной формы, в которой воздух движется навстречу струе.

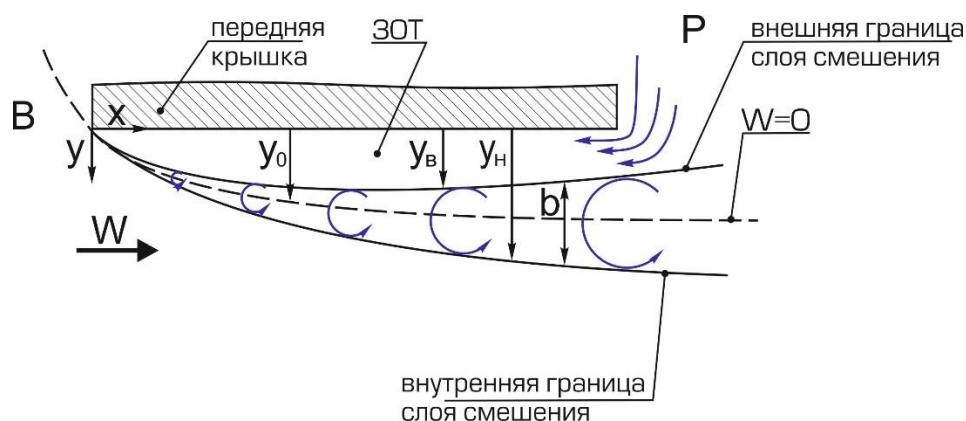


Рисунок 3.14 – Схема формирования слоя смешения

Воздух из камеры непрерывно засасывается в ЗОТ и эжектируется струей в направлении выходного отверстия. Воздух в ЗОТ движется навстречу струе, при этом, на некотором удалении y_0 от стенки канала скорости прямого и обратного движения уравниваются (рис. 3.14). На рис. 3.13 пунктирной

линией обозначена граница струи в плоском изображении, представляющая собой линию нулевой скорости $W=0$. Линия нулевой скорости проходит через центры вихрей. Ниже линии нулевой скорости струйки тока движутся вправо (рис. 3.14) вместе со струей, а выше линии нулевой скорости – влево, вместе с обратным течением в ЗОТ. На границе двух течений: прямого и обратного, формируется слой смешения толщиной:

$$b = y_H - y_B \quad (3.5)$$

где y_H – нижняя граница слоя смешения, м; y_B – верхняя граница слоя смешения, м.

Внутри слоя смешения скорость уменьшается от скорости основной струи на нижней границе слоя смешения (y_H) до 0 на линии нулевой скорости (y_0) и далее увеличивается вновь со знаком минус до скорости обратного течения на верхней границе слоя смешения (y_B). Толщина слоя смешения b определяется физическими свойствами соприкасающихся жидкостей, а также, величиной поперечного градиента продольной скорости потока dW/dy . В работе Абрамовича [2, стр. 373] утверждается, что толщина слоя смешения двух встречных турбулентных струй соответствует случаю истечения свободной струи в затопленное пространство, т.е. согласно [27, стр. 506] слой смешения утолщается под углом 8° (рис. 3.14). Следует отметить, что при истечении струи через отверстие в тонкой стенке и отрицательного продольного градиента давления развитие пограничного слоя замедляется [2].

Скорость обратного течения W_R можно оценить следующим образом. В области входа $W_R \approx -W_1$. Скорость потока в плоскости входной острой кромки:

$$W_1 \approx \frac{W_{min} \cdot F_{min}}{F_1} \quad (3.6)$$

где F_1 – площадь сечения 1 плоскости входа в сопло, m^2 ; F_{min} – площадь наименьшего сечения струи (определяется табличным коэффициентом расхода

$\alpha \approx 0,62$ [27] относительно диаметра канала сопла), м^2 ; $W_{\min}$ – скорость струи в наименьшем сечении, которая оценивается измеряемым перепадом давления на сопле, м/с .

$$W_{\min} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \sqrt{\frac{2(B-P)}{\rho}} \quad (3.7)$$

В коротком сопле скорость обратного течения W_R примерно равна скорости струи W_1 по величине ($W_R \approx -W_1$). При увеличении длины сопла до величины его диаметра $\ell_1 = d_1$, значение W_R увеличивается, поскольку внутри канала сопла живое сечение струи продолжает уменьшаться. Скорость струи W , при этом, продолжает увеличиваться, а статическое давление в струе – уменьшаться, стремясь к $P_{\min}$ в плоскости среза сопла (поскольку ранее было принято, что наименьшее сечение струи удалено от плоскости входа на величину диаметра сопла). Уменьшающееся по длине струи давление оказывает влияние на ЗОТ, которая также удлиняется и развивается при увеличении длины сопла. Слой смешения, при этом, стремится заполнить весь кольцевой интервал на срезе сопла, но здесь устанавливается динамическое равновесие между утолщающимся слоем смешения и кольцевым потоком, втекающим из камеры в ЗОТ.

При увеличении длины сопла до $(3 \dots 3,5) d_1$ [5, 60] утолщение слоя смешения приводит к тому, что струя касается своей периферией стенки канала. При этом прерывается сообщение ЗОТ с камерой и прекращается поступление воздуха из камеры в ЗОТ. Вследствие изоляции, давление в ЗОТ уменьшается до величины статического давления в струе. Это приводит к тому, что точка касания струей стенки канала резко сдвигается в сторону уменьшения ЗОТ. ЗОТ превращается в замкнутый тороидальный вихрь, в котором происходит интенсивное вращение.

Скорости на верхней и нижней границах слоя смешения равны между собой по величине и противоположны по направления. Скорость на нижней границе равна скорости основной струи W , а скорость на верхней границе слоя смешения равна скорости обратного течения W_R . Эти скорости увеличиваются по мере

развития струи в канале и уменьшения ее живого сечения.

Слой смешения представляет собой цепочку вихревых структур [4], перемещающихся в направлении основного движения струи [12, рис. 119]. В случае короткого сопла слой смешения тонкий и эти вихревые структуры едва успевают обозначить свое существование. Струя с тонким слоем смешения интенсивно взаимодействует с кольцевым вихрем за сопловым срезом. В случае длинного сопла слой смешения успевает развиться, и вихревые структуры за соплом похожи на классический вихрь. Кроме того, толстый слой смешения препятствует взаимодействию высокоскоростной центральной части струи с кольцевым вихрем за сопловым срезом. Линия нулевой скорости $W=0$ в слое смешения представляет собой траекторию центров вращения вихревых структур.

Вихревые структуры в слое смешения на всей его длине от острой входной кромки сопла до острой входной кромки выходного отверстия формируются тремя способами (рис. 3.15). Во-первых – при взаимодействии струи с ЗОТ внутри канала сопла на участке 1. Во-вторых – при взаимодействии струи с кольцевым вихрем за сопловым срезом. И в-третьих – при взаимодействии струи с тороидальным макровихрем в камере на участке 2, между сопловым срезом и острой входной кромкой выходного отверстия.

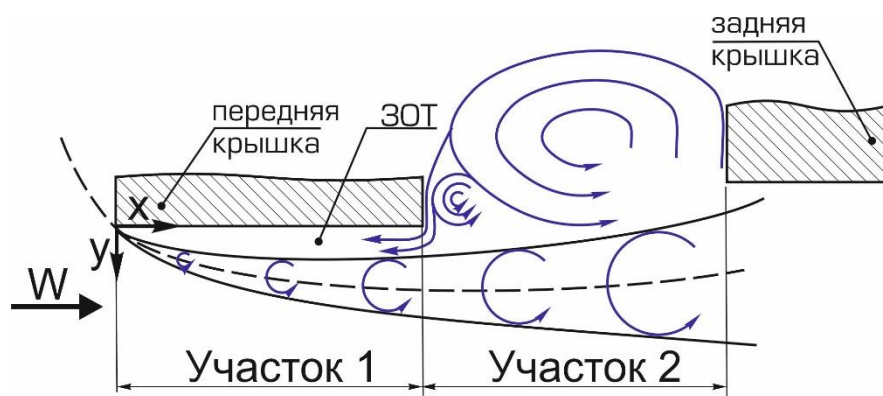


Рисунок 3.15 – Этапы формирования слоя смешения

Изначально было представление о слое смешения как о едином целом контейнере, в пределах которого системным образом развивается последовательность вихревых структур Кельвина-Гельмгольца. Кроме того

считалось, что увеличение длины Участка 1 (рис. 3.15) слоя смешения в сопле должно вызвать такое же уменьшение частоты струйного тона, как и увеличение Участка 2 на длине камеры. Из результатов проведенных экспериментальных исследований следует, что длина Участка 1 внутри сопла незначительно влияет на частоту тона струи. Длина Участка 2, соответствующая в данной конструкции длине камеры, определяет частоту тона струи.

Участок 1 имеет второстепенное значение в формировании струйного тона, а наиболее важным для генерации струйного тона является Участок 2. Можно предположить, что механизм обратной связи в струе не оказывает воздействия на вихревые структуры внутри канала сопла. Дополнительный импульс энергии вихревые структуры могут получить только на Участке 2. Из этого следует, что дополнительные импульсы энергии могут получить только вихри, производимые “материнским” кольцевым вихрем за сопловым срезом, что соответствует теории Крюгера.

3.4. Выводы по главе

В результате экспериментальных исследований выявлено наличие внутреннего механизма усиления в свободной струе, вытекающей из отверстия с острыми кромками в затопленный объем при отсутствии какого-либо препятствия перед ней. Наибольшая амплитуда тона струи соответствует длине отверстия $\ell_1/d_1=0,8$ и $Sh_\ell=0,6...0,65$.

Свободная струя при натекании на препятствие производит кромочный тон в интервале длины струи $0,3d_1 > L > d_1$, в интервале $Re_d \sim (6...30) \cdot 10^3$ и $Sh_d = (0,6...1,6)$, при этом число Струхаля сохраняет свое значение $Sh_\ell=0,6...0,65$.

Определено, что установка препятствия для свободной струи в виде пластины немного уменьшает амплитуду тона, пластина с отверстием увеличивает амплитуду в 2 раза, а обечайка расширяет интервал значений длины сопла, обеспечивающей данную амплитуду струйного тона, при этом, препятствие не влияет на число Струхаля Sh_ℓ .

Установлено, что резонанс и акустические моды возбуждаются последовательно гармониками тона отверстия в полосе усиления на частоте собственных колебаний резонатора. Выявлено отсутствие обратного влияния резонанса на частоту тона отверстия.

Экспериментально доказано, что в СОГ основная гармоника тона отверстия возникает при $Sh_\ell=0,6$, как и в случае свободной струи без камеры. При увеличении скорости струи режим генерации резко переходит на $Sh_\ell=0,3$. Заключительная мода, являющаяся ключевой при проектировании СОГ, возникает при $Sh_\ell=0,3$. Длина сопла в СОГ почти не влияет на частоту, но сильно влияет на амплитуду генерации.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ СОГ НА АМПЛИТУДУ ГЕНЕРАЦИИ

4.1. Влияние размеров камеры резонатора

Для выбора диаметра камеры резонатора (рис. 2.2) были проведены испытания СОГ с длиной камеры $L=10$ мм и длиной цилиндрического сопла $\ell_1=8$ мм, 10 мм и 16 мм. Диаметр камеры D в процессе испытаний составлял: 77,7; 67,5; 55; 39; 32 и 28 мм. Результаты испытаний представлены в Таблице 4.1 и на рис. 4.1. Оптимальное отношение диаметра камеры-резонатора к диаметру сопла составляет $D/d_1=4\dots 5$.

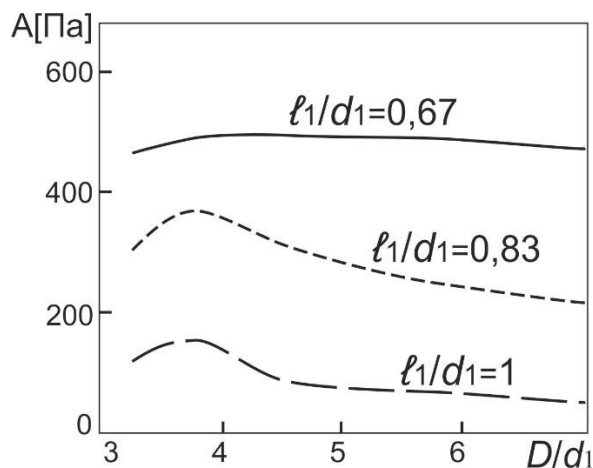


Рисунок 4.1 – Влияние относительного диаметра камеры-резонатора на амплитуду
генерации в СОГ

Результаты проведенных экспериментов показали возможность проектирования устройства с меньшими габаритами, что представляет существенный практический интерес. Все дальнейшие исследования, направленные на оценку влияния других геометрических размеров канала, проводились при полученном оптимальном диаметре камеры-резонатора 60 мм ($D/d_1=5$). Morel [111] считал оптимальным соотношение $D/d_1=8$. С меньшим диаметром камеры его осциллятор не работал.

В Таблице 4.1. представлены режимные параметры, соответствующие возникновению тона отверстия до резонанса и границам акустических мод по скорости струи при резонансе, интервалы частоты, в пределах которых наблюдаются моды, и наибольшая амплитуда моды.

Скорость струи, соответствующая возникновению тона отверстия, при последовательном уменьшении диаметра камеры-резонатора ($D/d_1=6,4 \rightarrow 5,6 \rightarrow 4,6 \rightarrow 3,75 \rightarrow 3,25$), видимо, не изменяется. Из этого факта следует, что уменьшение диаметра камеры и соответствующее увеличением ЧСК камеры не оказывает влияние на частоту обратной связи струи. При длине сопла 8 мм скорость струи росла ($1,7 \rightarrow 1,8 \rightarrow 1,9 \rightarrow 2,1 \rightarrow 2,2$ м/с). Но в случае с соплами длиной 10 ($1,6 \rightarrow 1,7 \rightarrow 1,7 \rightarrow 1,5 \rightarrow 1,4$ м/с) и 16 мм ($1,3 \rightarrow 1,4 \rightarrow 1,5 \rightarrow 1,5 \rightarrow 1,5$ м/с) небольшое изменение скорости от колонки к колонке можно объяснить некоторой неточностью измерения.

Считается (26, 34, 81), что поскольку длина камеры и струи не изменяется – не изменяется и частота обратной связи. При этом, увеличение длины сопла сопровождается уменьшением скорости струи, соответствующей нижней границе возникновения тона отверстия. Если для сопла $\ell_1=8$ мм скорость в среднем 1,9 м/с, для сопла $\ell_1=10$ мм скорость в среднем 1,6 м/с, то для сопла $\ell_1=16$ мм эта скорость в среднем 1,4 м/с, что согласуется с формулой Крюгера 3.3. При увеличении длины сопла ЧСК камеры уменьшается, соответственно. Акустические моды при уменьшении диаметра камеры-резонатора возникают на большей скорости струи ($5,8 \rightarrow 7 \rightarrow 8,5$) в первой строке, в соответствии с формулой Релея 2.2.

Оптимальная длина камеры резонатора L/d_1 (длина струи) и оптимальный диаметр выходного отверстия d_2/d_1 (рис. 2.2) определялись при неизменной длине цилиндрического сопла ($\ell_1/d_1=0,55$) [14А, 19А]. На рисунке 4.2 видно, что рассматривать оптимальную длину камеры следует в совокупности с диаметром выходного отверстия. На рисунке 4.2 представлены зависимости амплитуды из осциллограмм экспериментов.

Таблица 4.1 – Результаты экспериментов при переменном диаметре камеры D/d_1 , постоянной длине камеры $L/d_1=0,83$ и диаметре выходного отверстия $d_2/d_1=1,17$.

Сопло № 5 – $d_1=12 \times 8$ мм	$D/d_1 = 6,4$ (Пустая)			$D/d_1 = 5,6$ (67,5)			$D/d_1 = 4,6$ (55)			$D/d_1 = 3,75$ (45)			$D/d_1 = 3,25$ (39)		
	W, Па	F, Гц	A, Па	W, Па	f, Гц	A, Па	W, Па	f, Гц	A, Па	W, Па	f, Гц	A, Па	W, Па	f, Гц	A, Па
	Тон отверстия 1,7→5,6 м/с (114...273) Гц			Тон отверстия 1,8→6,3 м/с (124...310) Гц			Тон отверстия 1,9→5,8 м/с (122...324) Гц			Тон отверстия 2,1→7 м/с (124...359) Гц			Тон отверстия 2,2→8,5 м/с (126...361) Гц		
							5,8→6,4	1220→128 2	0,8	7→8,4	1447→1674	1,1	8,5→9,4	1777→1914	1,0
	5,6→7,4	800→957	6	6,3→8, 8	910→1152	6	7,3→10,7	1108→143 5	8	8,4→11,8	1308→1674	9,4	9,4→13	1540→1958	4
	7,4→17,4	585→1247	58	8,8→21	703→1420	62	10,7→24	888→1457	98	11,8→29	1027→2058	148	13,5→34	1184→2348	114
Сопло № 6 – $d_1=12 \times 10$ мм	Тон отверстия 1,6→4,7 м/с (119...236) Гц			Тон отверстия 1,7→4,8 м/с (122...244) Гц			Тон отверстия 1,7→5,3 м/с (124...283) Гц			Тон отверстия 1,5→6,4 м/с (112...334) Гц			Тон отверстия 1,4→7,6 м/с (107...412) Гц		
				5→5,4	1005→1040	1,2	5,3→7,8	1138→144 2	1,5	6,4→9,4	1308→1774	1,0	7,6→11	1538→2170	0,9
	5,1→8,4	793→1027	6,3	6→9,3	913→1160	8	7,8→11,3	1134→144 3	9,3	9,4→13,5	1311→1683	12,4	11→14,8	1540→1984	4
	8,4→15,4	708→1037	49	9,3→18	776→1250	63	11,3→22	950→1457	84	13,5→29	1097→1828	152	16,5→32	1380→2097	121
Сопло № 7 – $d_1=12 \times 16$ мм	Тон отверстия 1,3→5,3 м/с (122...246) Гц			Тон отверстия 1,4→5,5 м/с (120...244) Гц			Тон отверстия 1,5→5,8 м/с (121...276) Гц			Тон отверстия 1,5→6,8 м/с (122...316) Гц			Тон отверстия 1,5→7,4 м/с (122...346) Гц		
				5,5→6	965→1016	0,7	5,8→6,8	1108→119 0	1	6,8→8	1291→1445	1,8	7,7→8,6	1374→1455	0,8
	5,3→7,3	805→954	2,3	6,4→8, 6	917→1086	2,5	7,3→9,7	1044→125 0	1,3	8,6→11,6	1287→1516	3	9,7→11,8	1307→1533	1,4
	7,6→12	798→1021	11,2	8,6→13 ,6	857→1186	10	9,7→16	950→1362	22	11,6→19	1147→166-	29	12,5→19	1127→1652	20
	13,2→30	615→1052	268	18→36	935→1250	298	19,4→43	878→1437	366	22,4→51	1104→1877	468	24,6→54	1104→1921	353

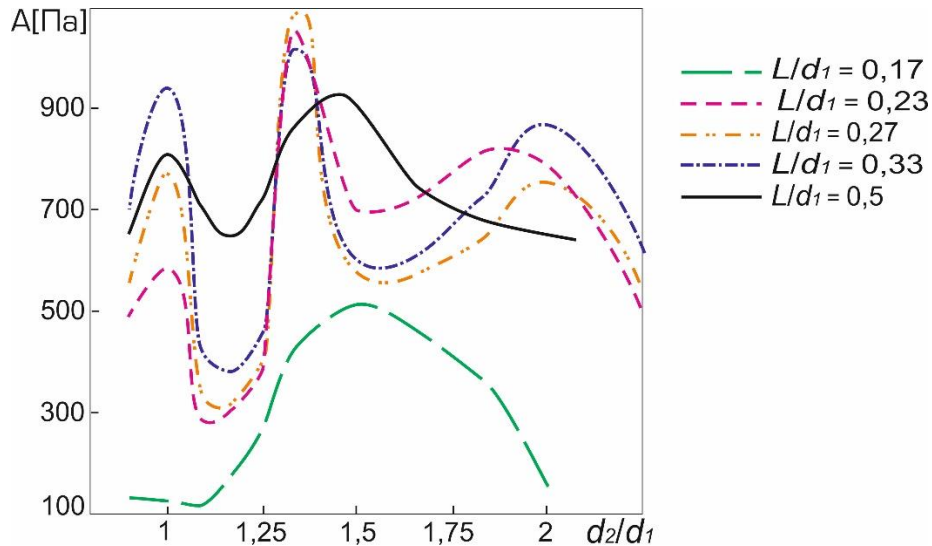


Рисунок 4.2 – Влияние относительной длины камеры L/d_1 и диаметра выходного отверстия d_2/d_1 на амплитуду генерации в СОГ

По мере уменьшения длины камеры (и длины струи) до величины $L/d_1 \sim 0,25$ амплитуда и частота генерации повышаются, при увеличении необходимой скорости струи. В то же время влияние диаметра выходного отверстия d_2/d_1 определяется не монотонной зависимостью. Максимальную амплитуду генерации обеспечивает СОГ с выходным отверстием $d_2/d_1 \sim 1,33$, в комбинации с длиной камеры $L/d_1 \sim 0,25$.

4.2. Влияние геометрии сопла

Для изучения влияния формы сопла на амплитуду генерируемых колебаний были проведены 4 серии экспериментов.

В эксперименте №1 определяли оптимальное значение относительной длины цилиндрического сопла ℓ_1/d_1 при фиксированном диаметре d_1 [1А, 16А, 18А]. Длину ℓ_1 варьировали от 0,7 мм ($\ell_1=0,06d_1$) до 50 мм ($\ell_1=4d_1$) (см. рис. 2.4). Из работы [111] было известно, что диаметр выходного отверстия d_2 следует выполнять немного большим, чем d_1 . В этой серии экспериментов $d_2=16$ мм, соответственно $d_2/d_1=1,33$. Результаты экспериментов представлены на рис. 4.3.

Режимные параметры, соответствующие возникновению тона отверстия и акустических мод представлены в таблицах А1-А8 Приложения А.

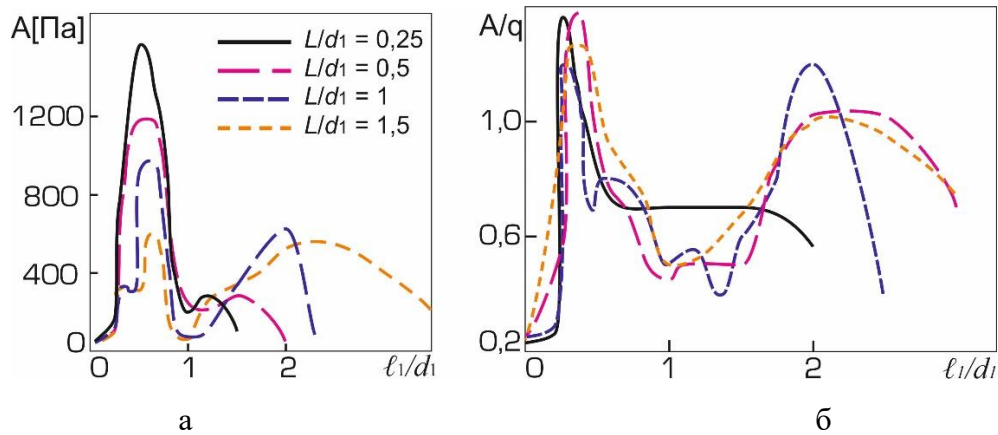


Рисунок 4.3 –Влияние: а) l_1/d_1 и L/d_1 на амплитуду генерации; б) l_1/d_1 на приведенную амплитуду генерации

Длина цилиндрического сопла очень сильно влияет на амплитуду генерации в СОГ. Следует отметить, что другие авторы [111, 123] проводили эксперименты при соотношении $l_1/d_1=1$, при этих параметрах наблюдается наименьшая амплитуда генерации колебаний давления в камере. Для всех значений L оптимальное соотношение $l_1/d_1=0,55$. Максимальная амплитуда генерации была достигнута при $l_1/d_1=0,55$ в сочетании с $L/d_1=0,25$. Следует отметить, что даже при незначительном изменении длины сопла амплитуда генерации стремительно уменьшалась.

Особенности генерации тона отверстия и акустических мод при использовании цилиндрического сопла при L/d_1 от 1 до 2 представлены в Таблице 4.2. Представлены режимные параметры, соответствующие возникновению тона отверстия и акустических мод. Вначале возбуждался тон отверстия, уверенно наблюдаемый до появления первой моды, а затем, по мере увеличения скорости струи, последовательно возникали несколько мод. Представлены также интервалы скорости, в пределах которых существуют моды, границы мод по частоте и наибольшая амплитуда колебаний давления в пределах моды.

При последовательном увеличении длины камеры ($L/d_1=1 \rightarrow 1,5 \rightarrow 2$) и длины струи, соответственно, скорость струи, при которой возникал тон отверстия,

уменьшалась ($W=2,3 \rightarrow 2,1 \rightarrow 1,7$ м/с), поскольку уменьшалась частота обратной связи в механизме обратной связи струи. Также уменьшалась и частота тона отверстия. Моды акустического резонанса плавно возникали и исчезали при меньшей скорости струи. Частота, при которой возникала первая мода на фоне тона отверстия, это частота резонанса, которая также снижалась при уменьшении ЧСК резонатора.

Таблица 4.2 – Режимные параметры, соответствующие возникновению тона отверстия и акустических мод

	$L/d_1=1$			$L/d_1=1,5$			$L/d_1=2$		
	W, м/с	f, Гц	A, Па	W, м/с	f, Гц	A, Па	W, м/с	f, Гц	A, Па
$\ell_1/d_1=0.75$	Тон отверстия 2,3→5,5 м/с (171...279) Гц			Тон отверстия 2,1→4,7 м/с (166...244) Гц			Тон отверстия 1,7→4,2 м/с (146...224) Гц		
	5,5→7,8	828→1014	5,4	4,7→6,3	693→868	4,7	4,2→6,1	623→818	5,2
	9→16,3	788→1084	63	7,3→14,3	655→957	32	6,7→12	598→800	26
				17,5→26	657→783	108	15,8→26	537→703	158
$\ell_1/d_1=1.33$	Тон отверстия 1,9→5,5 м/с (87...351) Гц			Тон отверстия 1,9→4,8 м/с (75...170) Гц			Тон отверстия 1,6→4,3 м/с (75...170) Гц		
	<i>Мода исчезла</i>			<i>Мода исчезла</i>			<i>Мода исчезла</i>		
	5,5→7,5	788→959	1,7	4,8→6,6	654→812	0,7	4,3→6	584→732	1,7
	7,9→12,2	706→1008	6	6,6→10,2	649→830	5,3	6→9	580→830	5,9
	12,2→16	764→864	29	11,1→19	607→800	70	9,7→18	573→712	61
	20→31,2	783→947	115	19→31,2	637→805	147	19→27	567→653	141
$\ell_1/d_1=2.08$	Тон отверстия 2,1→5,2 м/с (129...163) Гц			Тон отверстия 2,0→4,7 м/с (113...154) Гц			Тон отверстия 2,0→4,5 м/с (103...134) Гц		
	5,2→5,6	788→817	0,4	4,7→5,2	671→688	0,3	4,5→5	586→608	0,3
	6,2→7,5	764→876	1,4	5,5→6,4	632→742	0,7	5→6	568→627	0,7
	7,7→9,3	749→857	3,2	6,7→8,5	633→722	3,8	6,2→8	543→627	3,8
	10→13,4	671→847	22	9,8→13	627→720	19	8→11	517→664	139
	24→38	791→920	384	20→39	615→856	380	23→37	568→676	358

Из Таблицы 4.2 также следует, что высшие акустические моды возбуждаются не тоном отверстия (279/828, 244/693, 224/623 Гц), где 279, 244 и 224 Гц частота тона отверстия в момент возникновения 1-й, 2-й и 3-й моды, соответственно, и 828,

693 и 623 Гц нижние границы этих мод, а его высшими гармониками, при их попадании в полосу усиления резонатора. Частота тона отверстия соответствует частоте обратной связи в струе – частоте струйного усиления, а сам тон возбуждается одной из гармоник (не обязательно основной гармоникой) .

Для всех экспериментов строились семейства характеристических линий, одно из которых представлено на рисунке 4.4.

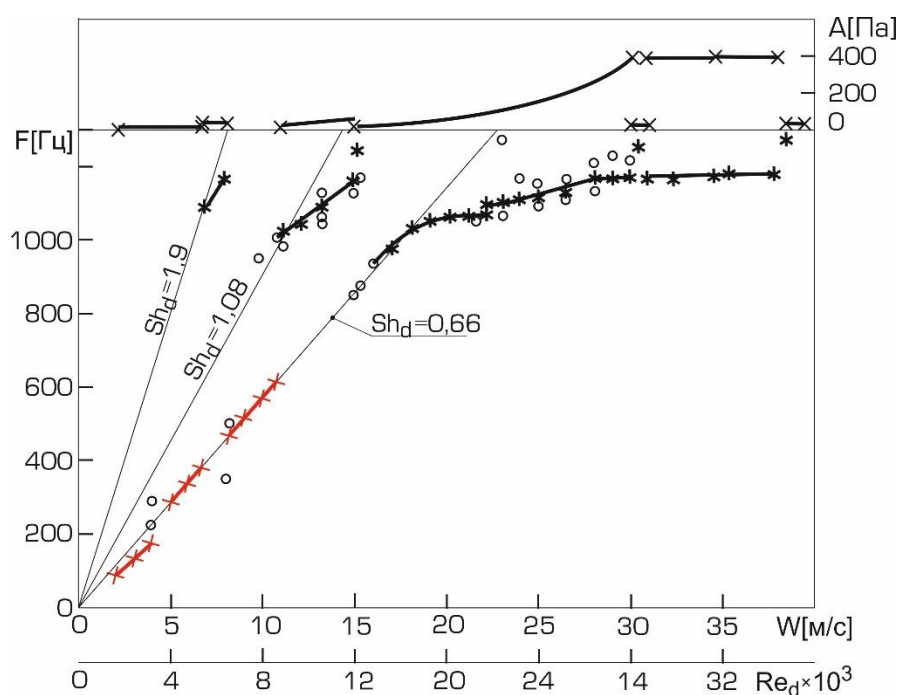


Рисунок 4.4 – Семейство характеристических линий для цилиндрического сопла без козырька.

$$\ell_1/d_1=0,75, L/d_1=1,5$$

На рисунке 4.4 видно возникновение тона отверстия при скорости $W \approx 2,1$ м/с, значение частоты которой изображено крестиками на характеристике $Sh_d=0,66$. Частота тона плавно увеличивается при постепенном увеличении скорости струи до 4,7 м/с вдоль этой характеристики. В других экспериментах тон отверстия перескакивал кратковременно на характеристику $Sh_d=0,9$ перед возникновением первой моды. Увеличение скорости струи до 4,7 м/с приводило к тому, что частота тона отверстия вдоль высшей характеристики повышается до ЧСК резонатора – возникает первая слабая мода акустического резонанса на характеристике $Sh_d=1,9$. Внутри камеры, при резонансе, колебания давления на всех остальных частотах

подавляются, кроме тех, которые соответствуют ЧСК резонатора. Амплитуда этих колебаний давления многократно увеличивается. Подавляются, также, и колебания давления на частоте тона отверстия.

Когда первая мода затухает при скорости струи 6,3 м/с, при дальнейшем увеличении скорости струи можно снова наблюдать пик амплитуды на частоте тона отверстия на характеристике $Sh_d=0,66$ в отсутствии резонанса до возникновения второй моды при скорости струи 7,3 м/с. Вторая мода развивается до скорости 14,3 м/с. Третья мода возникает при скорости 17,5 м/с и развивается до скорости струи 26 м/с. При дальнейшем увеличении скорости струи моды больше не возникают – усиливается турбулентный шум в области низкой частоты $\sim 0 \dots 500$ Гц.

Скорость струи, при которой возникает тон отверстия, составляет около 2 м/с при всех длинах сопел и снижается при увеличении объема камеры резонатора. Увеличение длины камеры и, соответственно, уменьшение ее ЧСК приводит к монотонному снижению скорости потока, при которой на фоне тона отверстия возникает первая мода. Для возникновения тона отверстия резонатор не требуется [106].

Скорости струи, при которой возникает первая мода акустического резонанса, составляет порядка 6 м/с и немного уменьшается при увеличении длины сопла. Интервал скорости, в пределах которого развиваются мода одного номера, с увеличением длины сопла – увеличивается. При увеличении диаметра выходного отверстия все моды смещаются в направлении большей скорости струи и большей частоты. Соответственно, струйная генерация прерывается на большей скорости и при большей частоте.

Завершающей и самой мощной моде всегда предшествует хотя бы одна слабая низшая мода, и между ними имеется интервал по скорости струи, в котором наблюдается тон отверстия с частотой существенно меньшей частоты резонанса. Первые слабые моды развиваются вдоль соответствующих характеристик и не проявляют склонности к перескакиванию между характеристиками. Генерация внутри завершающей сильной моды всегда перескакивает между характеристиками при увеличении скорости струи, и всегда на более

характеристику с меньшим Sh , характеризующуюся меньшим числом Струхала. Можно предположить с некоторой долей уверенности, что это определяется механизмом усиления внутри автоколебательной струйной системы и происходит вследствие необходимости согласования частоты образования первичных возмущений давления на острой кромке выходного отверстия с частотой обратной связи в струе.

Длина сопла участвует в определении частоты тона отверстия. Частота собственных колебаний камеры-резонатора не участвует в определении частоты тона отверстия.

В эксперименте №2 исследовалось влияние фаски глубиной $\ell_1 - \ell^*$ на работоспособность цилиндрических сопел длиной $\ell_1 = 6, 8, 10$ и 14 мм, где ℓ^* - длина цилиндрического участка (см. рис. 2.6). Если $\ell_1/\ell^* = 1$, то это означает, что канал полностью цилиндрический, без фаски. Фаска располагалась навстречу или же по потоку. Исследовались фаски с углом раскрытия $\varphi = 60^\circ$, $\varphi = 90^\circ$ и $\varphi = 120^\circ$. На рис. 4.5 представлено влияние различных геометрий фаски на амплитуду генерации. Фаска с углом раскрытия $\varphi = 60^\circ$ и $\varphi = 120^\circ$ оказывает слабое влияние на амплитуду генерации, поэтому на рис. 4.5а-б представлены результаты экспериментов с фаской $\varphi = 90^\circ$.

Как видно на рис. 4.5г, фаска по потоку в цилиндрическом сопле увеличивает амплитуду генерации в три раза, по сравнению с расположением фаски навстречу потоку. Оптимальная длина цилиндрического участка составляет $\ell^* = (0,3-0,4)d_1$ при отношении $\ell^*/\ell_1 = (0,4-0,5)$, $L/d_1 = 1,5$, $d_2/d_1 = 1,33$.

Влияние фаски на работу СОГ с длинным цилиндрическим соплом значительно. На рис. 4.3а с цилиндрическим соплом без фасок видно, что выраженный оптимум длины цилиндрического канала находится в интервале $6,5 \dots 7$ мм ($0,54 > \ell_1/d_1 > 0,58$). Вследствие этого, фаска в цилиндрических каналах короче $6,5$ мм лишь ухудшает работу СОГ. В слишком длинных цилиндрических каналах фаска способствует удалению излишней длины канала и приближению длины цилиндрического участка канала ℓ^* к оптимальному размеру. Этим влияние фаски ограничивается.

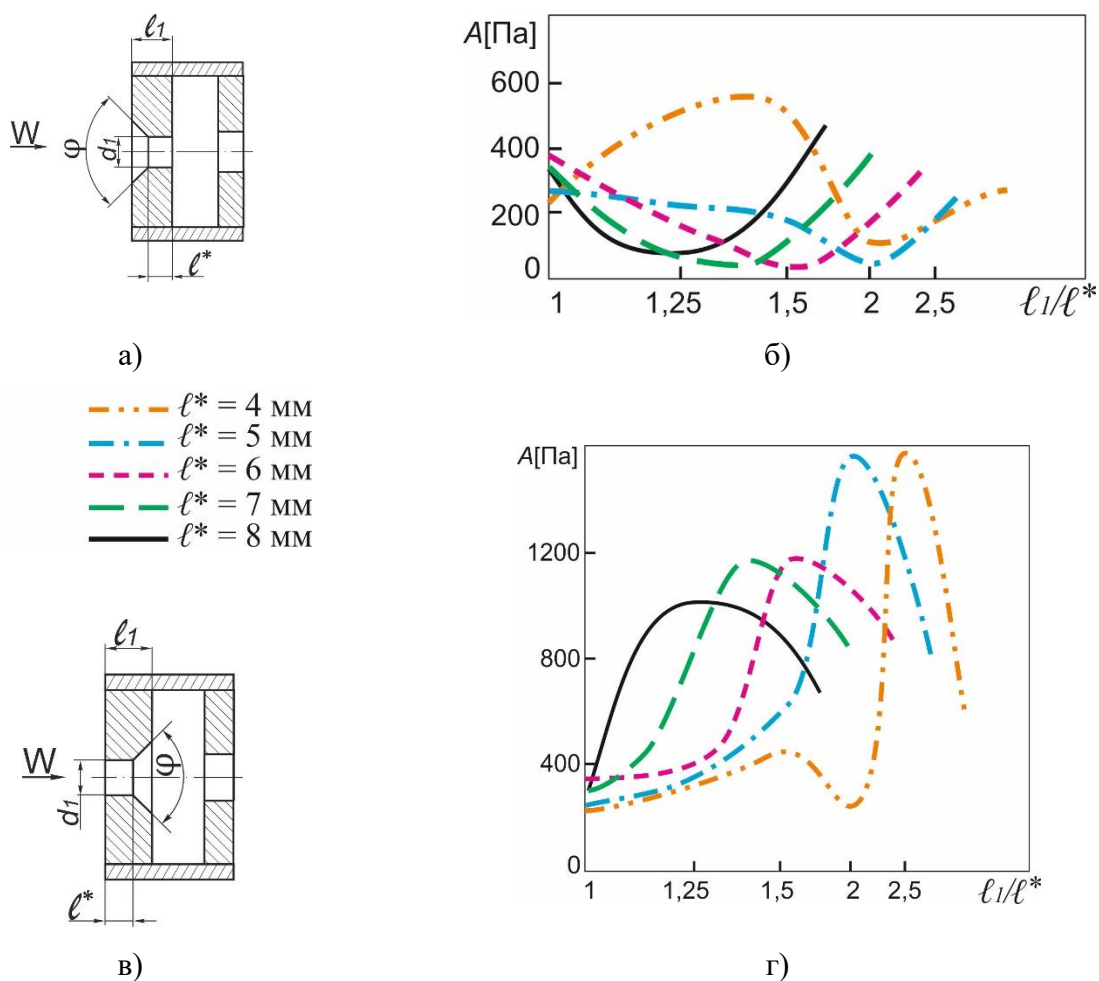


Рисунок 4.5 – Влияние фаски 90° глубиной (l_1-l^*) в цилиндрических соплах на амплитуду генерации: а) сопло с фаской навстречу потоку; б) результаты экспериментов с фаской навстречу потоку; в) сопло с фаской по потоку; г) результаты экспериментов с фаской по потоку

В эксперименте №3 определялось влияние козырька, расположенного перед соплом, и козырька-спойлера по потоку, расположенного за соплом (см. рис. 2.7). Длина цилиндрического козырька l_k в обоих случаях составляла 6 мм. Работоспособность сопел с козырьками оценивалась в сравнении с характеристиками цилиндрического сопла. Полученные режимные параметры, соответствующие возникновению тона отверстия и акустических мод представлены в Таблицах А11 и А12 Приложения А.

На рисунках 4.7 – 4.9 приведены семейства характеристических линий возникновения и развития генерации колебаний давления в СОГ с козырьками и

без ($\ell_1=16$ мм, $d_2/d_1=1,33$, $L/d_1=1,5$).

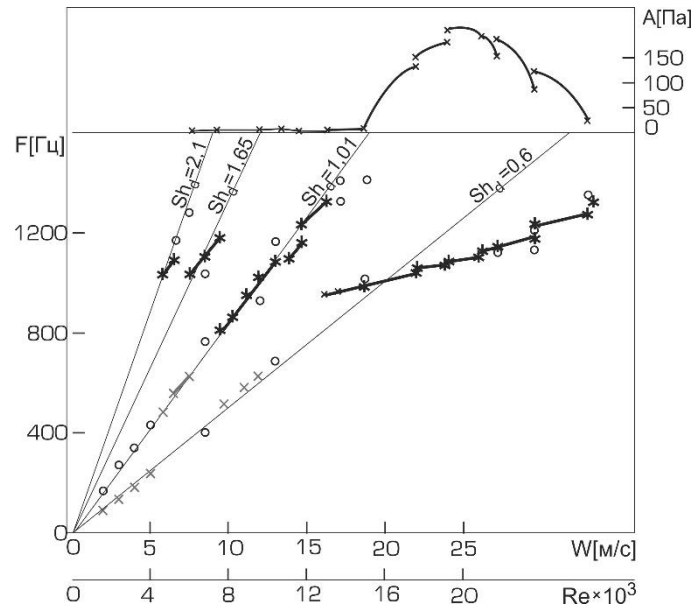


Рисунок 4.6 – Семейство характеристических линий для цилиндрического сопла без козырька

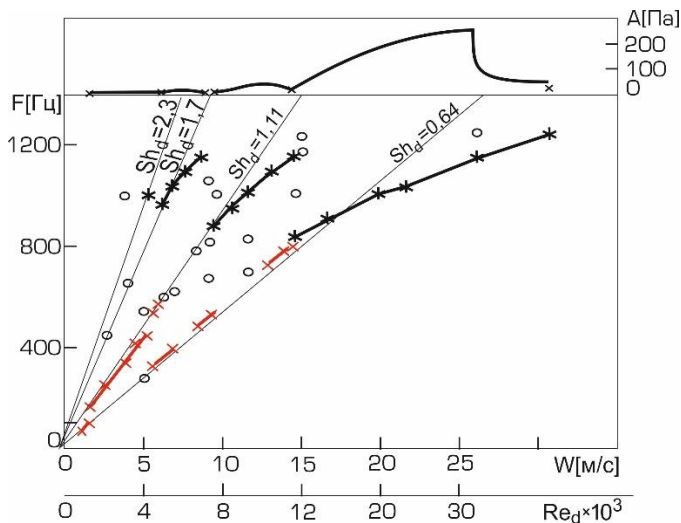


Рисунок 4.7 – Семейство характеристических линий для сопла с козырьком

Характеристические линии (характеристики) возникновения струйного тона и развитие акустических мод на резонансе, не претерпели заметного измерения при установке козырька, выступающего из передней крышки. Тон отверстия возникал при скорости струи ~ 2 м/с на характеристической линии $Sh_d=0,64$, затем тон перескакивает на линию $Sh_d=1,11$, при этом первая мода возникает сразу на второй гармонике со $Sh_d=1,7$. Вторая мода наблюдается на линии $Sh_d=1,11$ в интервале

полосы усиления резонатора, затем завершающая третья мода возникает на основной гармонике тона отверстия $Sh_d = 0,64$.

Наибольшая амплитуда генерации отмечалась в СОГ с выходным отверстием $d_2 = 16$ мм (см. рис. 4.8), как и у цилиндрического сопла.

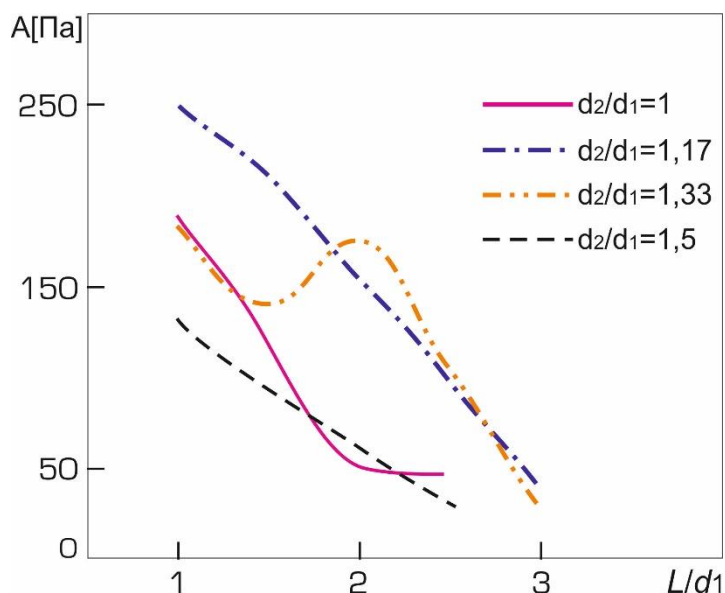


Рисунок 4.8 – Влияние L/d_1 на амплитуду генерации

В литературе не встречаются данные, относительно коэффициента расхода сопла такой формы, но из рассуждений авторов работы [5, 60] следует, что коэффициент расхода такого сопла с козырьком меньше, чем у сопла без козырька. Заполнение потоком канала сопла с козырьком меньше по сравнению с заполнением канала в цилиндрическом сопле и в сопле со спойлером.

Соответствующие характеристические линии для спойлера (рис. 4.9) похожи на линии для сопла без козырька. Начало тона отверстия и положение мод на оси скорости совпадают. Отличие для сопла со спойлером наблюдается лишь в том, что по сравнению с цилиндрическим соплом генерация прекращается при меньшей скорости струи. Вследствие этого, наибольшая амплитуда генерации у завершающей моды ниже.

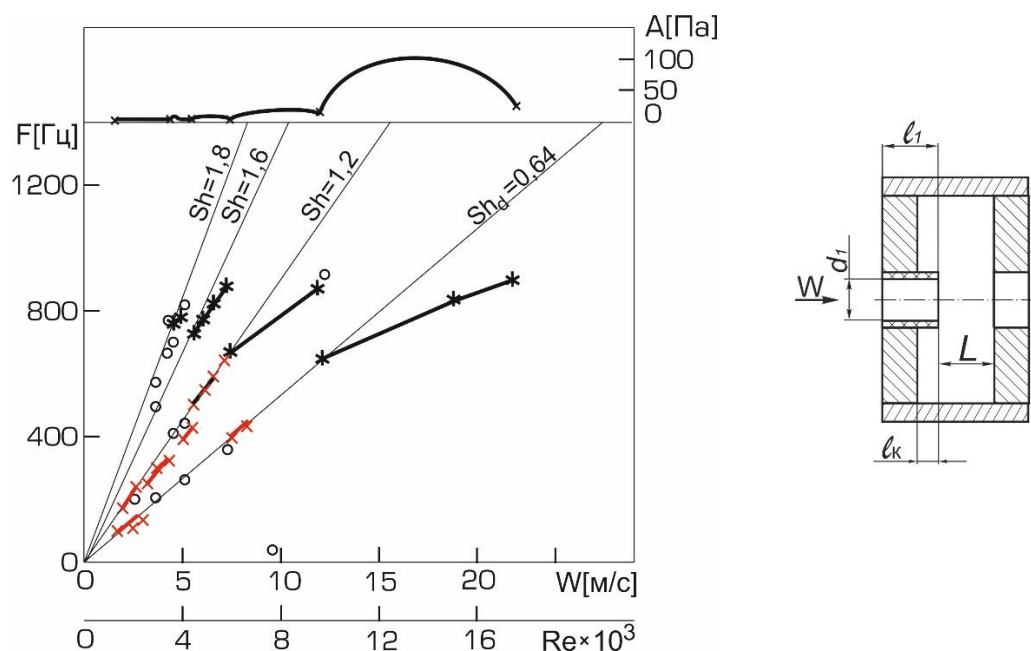


Рисунок 4.9 – Семейство характеристических линий для спойлера

Спойлер не позволял конструктивно иметь длину камеры равную длине струи, и, вследствие этого, длина камеры во всех экспериментах была больше длины струи на 6 мм. Наибольшая амплитуда генерации у сопла со спойлером обеспечивалась в комбинации с $d_2/d_1=1.33$ (рис. 4.10).

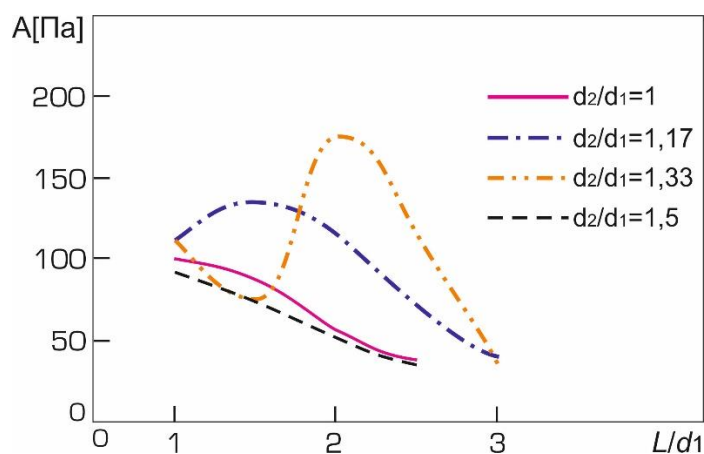


Рисунок 4.10 – Влияние L/d_1 на амплитуду генерации при использовании спойлера

Коэффициенты расхода μ цилиндрического сопла и сопла со спойлером одинаковы в случае идеального газа ($\mu \sim 0.62$) [27]. Это означает, что площадь наименьшего сечения струи составляет $\sim 62\%$ от площади сечения канала. Картина течения в этих соплах начинает развиваться также как и в случае обтекания острой

кромки, поскольку стенки канала не оказывают влияния на поток [5]. Однако, при наличии вязкого трения, длина канала, оказывает влияние на картину течения внутри сопла. Между струей и стенкой сопла формируется кольцевая зона обратных токов, направленных вдоль стенки канала из камеры к входной острой кромке канала, навстречу основному потоку.

Спойлер внутри камеры препятствует взаимодействию струи с кольцевым вихрем в области среза сопла [122]. Нарушение контакта струи с кольцевым вихрем не оказывает значительного влияния на вихреобразование в целом, поскольку возникновение вихрей вокруг струи начинается в глубине сопла, сразу за входной острой кромкой, и их развитие продолжается в слое смещения на протяжении всей длины струи. Влияние козырьков, установленных перед и за соплом, на амплитуду генерации представлено на рис. 4.11.

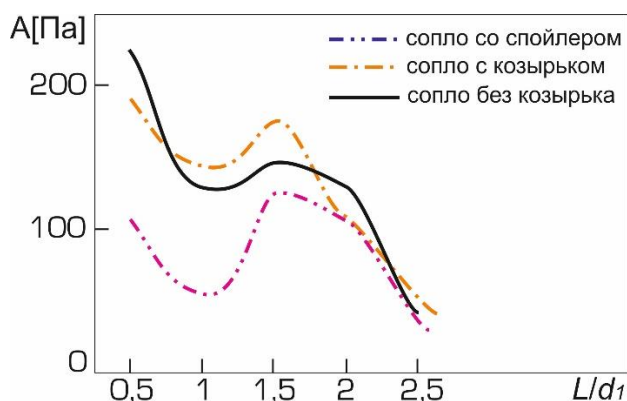


Рисунок 4.11 – Влияние относительной длины камеры на амплитуду генерации

На рисунке видно, что форма кривых повторяется. Гидродинамическая картина на срезе сопла во всех случаях одинаковая: струя вытекает из сопла с плоским срезом в затопленное пространство. При этом формируется цепочка вихрей Кельвина-Гельмгольца, которая представляет собой “псевдозвук” [9]. При деформации на острой кромке выходного отверстия вихри генерируют звук [56]. Козырек длиной $\ell_k/d_1=0,5$, расположенный наружу, немного увеличивает амплитуду генерации в СОГ. Козырек, расположенный внутрь, снижает амплитуду генерации.

Ожидалось, что установка спойлера существенно повлияет на работу устройства и приведет к уменьшению амплитуды генерации, так как он препятствует взаимодействию струи с материнским вихрем. Эта гипотеза не получила подтверждения. Следует отметить, что в работе [111] также исследовался СОГ с соплом, выступающим внутрь камеры. Было установлено, что нет заметных изменений в работе устройства.

Влияние скругления входной кромки на амплитуду генерации в цилиндрическом сопле исследовано в эксперименте №4. В цилиндрическом сопла длиной $\ell_1=16$ мм и $d_1=12$ мм оставили выравнивающий цилиндрический участок длиной $\ell^*=6$ мм и плавно вывели входной участок по дуге окружности радиусом $R=d_1$, без излома контура (рис. 2.8). Сопло “четверть круга”, обеспечивающее прямоугольный профиль скорости на выходе из сопла, было выполнено в плексигласовой передней крышке СОГ толщиной 16 мм. Для экспериментов целенаправленно была выбрана длина цилиндрического сопла, показывающая наименьшую амплитуду генерации (рис. 4.5). Небольшое уменьшение значения ℓ_1 приводило к стремительному увеличению амплитуды генерации на рис. 4.3. Результаты экспериментов представлены в Таблице 9 в Приложении 1.

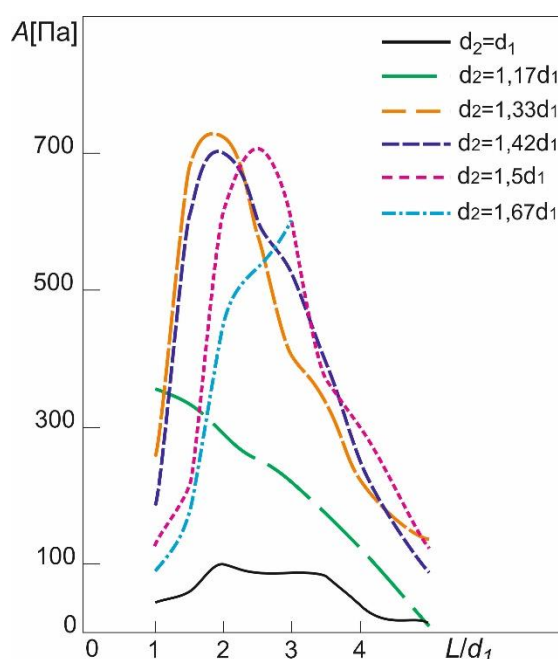


Рисунок 4.12 – Влияние L/d_1 и d_2/d_1 на амплитуду генерации в СОГ с профилированным соплом

На рис. 4.12 по оси ординат откладывались значения амплитуды в наибольшей моде при продувке отмеченной конфигурации осциллятора. Из сравнения рис. 4.12 с рис. 4.3а, видно, что для СОГ с профилированным соплом оптимальная длина камеры составляет $L/d_1 \sim 2$, и амплитуда генерации стремительно уменьшается при уменьшении длины камеры на рис. 4.12, в то время, как уменьшение длины камеры в СОГ с цилиндрическим соплом оптимальной длины $\ell_1/d_1 = 0,55$ приводило к существенному увеличению амплитуды генерации на рис. 4.3. Увеличение диаметра выходного отверстия до $d_2 \sim 1,5$ в комбинации с профилированным соплом не приводит к снижению амплитуды генерации, как с коротким цилиндрическим соплом. При $\ell_1/d_1 = 1,33$ все варианты размеров длины камеры и диаметра выходного отверстия в геометрии СОГ показывали низкую амплитуду генерации. Выполнение профилированного входа в таком цилиндрическом сопла позволяло увеличить амплитуду генерации в три раза с оптимальной длиной камеры $L/d_1 \sim 2$ и диаметром выходного отверстия 16 мм ($d_2/d_1 \sim 1,33$). Интересно заметить, что в работе [126] испытывался СОГ с профилированным соплом длиной $\ell_1/d_1 = 3$, и оно обеспечило всего 20%-е повышение амплитуды генерации.

На рисунке 4.13 представлено сравнение амплитуды генерации в СОГ с двумя соплами: нижняя кривая – цилиндрическое сопло длиной 16 мм ($\ell_1/d_1 = 1,33$), и верхняя кривая – такое же сопло, но с плавным входом. Очевидно, что сопло с плавным входом обеспечивает более высокую амплитуду генерации.

На рис. 4.14 представлено развитие акустических мод для СОГ с наиболее эффективными конфигурациями сопел при $\ell_1/d_1 = 1,17$, $L/d_1 = 1,5$. Тон струи возникает при $Re_d \sim 2000$ до возбуждения резонанса, несколько раз изменяется скачками по Sh_d и существует одновременно с первой акустической модой, характеризующейся $Sh_d \sim 1,5$. Величина Sh_d для каждой последующей моды уменьшается. Также, Sh_d уменьшается в интервале моды. Завершающие моды (с наибольшей амплитудой генерации) для различных сопел характеризуются разными Sh_d , а именно: для цилиндрических сопел $Sh_d \sim 0,3$, для профилированных сопел и цилиндрических сопел с фасками $Sh_d \sim 0,2$.

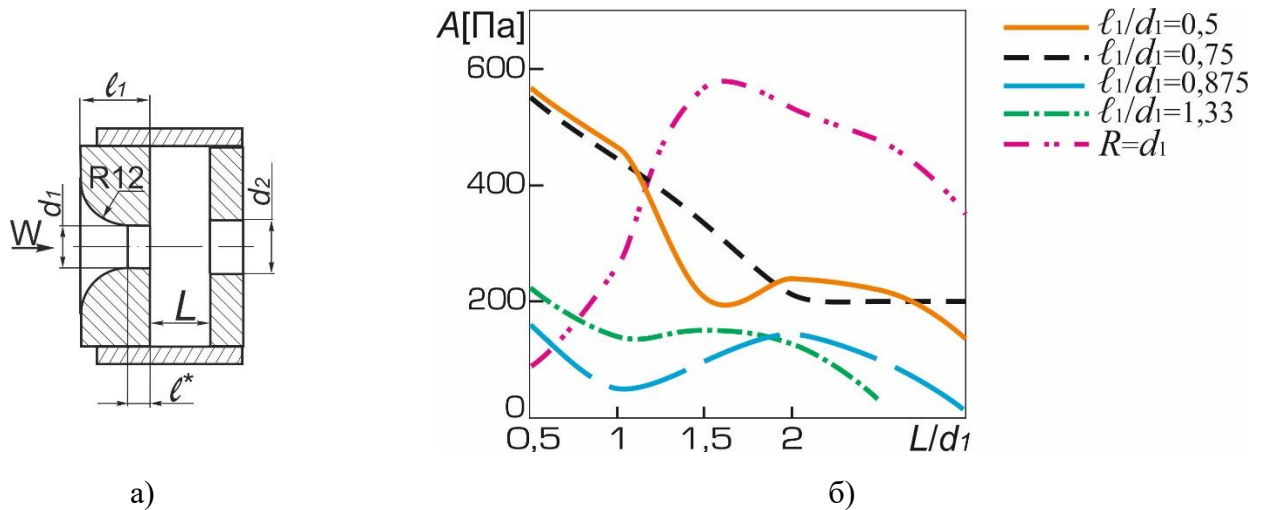


Рисунок 4.13 – Влияние профилирования сопла на амплитуду генерации; а) конструкция; б) результаты экспериментов ($\ell_1/d_1=1,33$. $d_2/d_1=1,33$. $\ell^*=d_1/2$)

Результаты экспериментов с профилированным соплом в СОГ воплотились в патенте № 2670623.

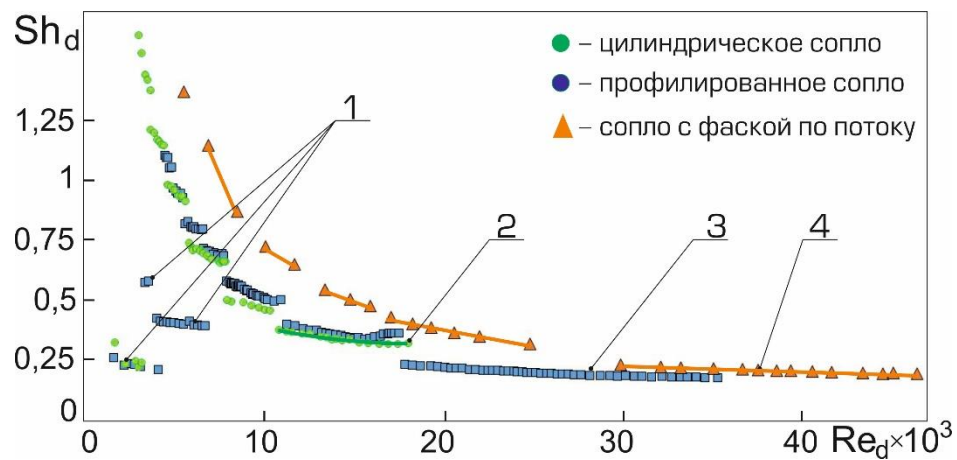


Рисунок 4.14 – Числа подобия для сопел: 1 – тон струи; 2, 3, 4 – акустические моды

4.3. Рациональное проектирование СОГ на основе полученных экспериментальных данных

При выборе геометрических размеров СОГ исходным параметром является диаметр участка, где планируется установить проектируемое устройство. На рис. 4.15 представлена рекомендуемая конструкция СОГ.

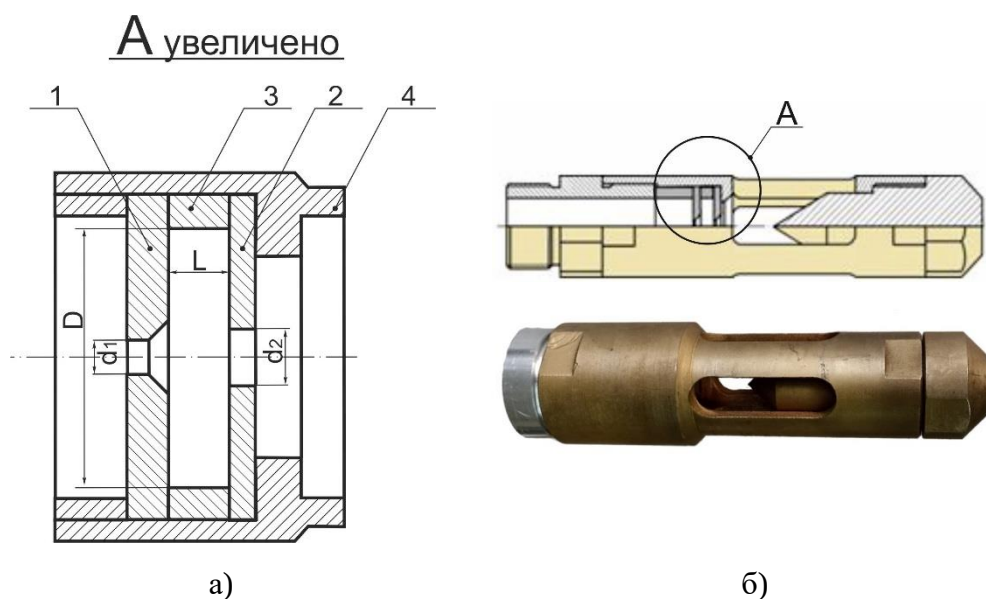


Рисунок 4.15 – Конструкция СОГ

Проектирование осуществляется следующим образом:

- 1) Необходимо задать внутренний диаметр камеры резонатора D .
- 2) Выбрать форму сопла:
 - цилиндрическое;
 - профилированное сопло “четверть круга”;
 - цилиндрическое сопло с фаской 90° по потоку.
- 3) Истинный расход воздуха через сопло G (кг/с) определяется:

$$G = \alpha \rho W F \quad (4.1)$$

где ρ – плотность воздуха перед соплом, кг/м³, W – скорость воздуха в наименьшем сечении струи на выходе из сопла, м/с, F – площадь сечения цилиндрического участка сопла, м², α – коэффициент расхода, который для профилированных сопел составляет $\approx 0,98$, для цилиндрических и коротких сопел $\approx 0,62$ [27], а в общем случае $\alpha=1$. Скорость W определяется экспериментально для каждого типа сопла в ходе предварительных испытаний. Она должна соответствовать наибольшей амплитуде генерации в самой интенсивной моде.

- 4) Диаметр цилиндрического участка сопла должен соответствовать условию

$4d_1=D$.

5) Длину цилиндрического сопла рекомендуется задать $\ell_1 \sim 0,55d_1$ в комбинации с камерой длиной $L/d_1=0,25$ и диаметром выходного отверстия $d_2/d_1=1,33$.

6) Цилиндрическое сопло с фаской 90° по потоку проектируется с длиной цилиндрического участка $\ell^*=(0,3-0,4)d_1$ при $\ell^*/\ell_1=(0,4-0,5)$.

7) Профилирование входного участка сопла по дуге окружности, имеющей радиус равный диаметру сопла, обеспечивает не только увеличение амплитуды колебаний давления, но и существенно уменьшает потерю полного давления потока. При этом цилиндрический участок сопла следует выполнять длиной $(0,5 \dots 1)d_1$.

8) Оптимальная длина камеры с цилиндрическим соплом определяется, исходя из соотношения $L/d_1=0,25$, а с профилированным соплом $L/d_1 \sim 1,5$.

9) Диаметр выходного отверстия рекомендуется принимать $d_2 \approx 1,3d_1$.

4.4. Способы и устройства генерации волн давления на основе СОГ

По результатам исследований разработано и запатентовано 20 способов и устройств для генерации волн давления, включающие эффективные схемы и конструкции СОГ [21А-40А]. Основными из них являются следующие:

- способ имитации продуктивного нефтяного пласта в условиях лабораторного стенда, с последующим вытеснением остаточной нефти из моделей при периодическом воздействии на них колебаниями давления (№2445595), и устройство для формирования колебаний давления определенной частоты в потоке протекающей жидкости (№2464109);

- способ генерации низкочастотных колебаний давления с высокой амплитудой, способных воздействовать на большую глубину пласта на забое нагнетающей скважины, за счет установки внутри камеры СОГ, имеющей низкую частоту собственных колебаний, кольца с острой кромкой в интервале между крышками, что обеспечивает высокую скорость струи в интервале между

соплом и кольцом (№2572250);

- способ генерации низкочастотных колебаний давления в СОГ с комбинированной цилиндрической камерой, состоящей из двух частей, разделенных промежуточной крышкой с отверстием и работающей на низшей из комбинационных частот (№2610598);

- способ генерации низкочастотных колебаний давления в СОГ с двумя кольцевыми камерами различной величины в кольцевом канале, формирующих колебания давления на двух близких частотах и обеспечивающих режим биений на низкой частоте (№2637009);

- способ увеличения амплитуды колебаний давления в СОГ путем профилирования сопла (№2670623 или же комбинирования конструкции СОГ из короткого цилиндрического сопла и узкой (щелевой) камеры (№2705126);

- способ увеличения нефтедобычи при низком пластовом давлении с помощью струйного насоса, эжектирующего струей технической жидкости низконапорную нефть, в котором, в камере смешения, дополнительно создают колебания давления необходимой частоты (№2574889);

- способ генерирования волнового поля на забое скважины с постоянной частотой путем стабилизации скорости струи за счет автоматического регулирования площади проходного сечения сопла (№2540756), или регулирования длины струи за счет автоматического перемещения задней крышки с выходным отверстием (№2544201);

- способ генерирования и модуляции волн давления в стволе нагнетательной скважины, при котором устанавливают последовательно между крышками в камере два кольца, направляют через них струю рабочей жидкости и производят колебания давления на двух близких частотах, обеспечивают режим биений и формирование волны на разностной частоте (№2789492);

- способ и устройство для генерирования волнового поля на забое нагнетательной скважины с автоматической настройкой резонансного режима генерации, при котором согласование скорости струи с объемом СОГ осуществляют путем автоматического перемещения задней крышки с помощью

гидроцилиндра (№2544200);

- способ генерирования и модуляции волн давления в стволе нагнетательной скважины, при котором собирают комбинированную колебательную систему, производящую в камере колебания давления высокой и низкой частоты, возбуждаемые струей на острых кромках внутренней и внешней камер-резонаторов, выполняют их модуляцию с образованием волны разностной частоты и направляют ее в призабойное пространство пласта через перфорационные отверстия в стенке обсадной трубы (№2653205).

- способ и устройство для совмещения парогравитационного дренажа с виброволновым воздействием на продуктивный пласт в условиях горизонтальных скважин (рис. 4.16), включающий прокладку в интервале продуктивного пласта пары двухустьевых горизонтальных скважин, одну над другой, из которых верхняя скважина является нагнетательной, а нижняя скважина – добывающей, установку в горизонтальный участок нагнетательной скважины двух СОГ и формирование в горизонтальном участке системы бегущих навстречу друг другу волн, которые распространяются через перфорационные отверстия в обсадной трубе в продуктивный нефтяной пласт (№2610045).

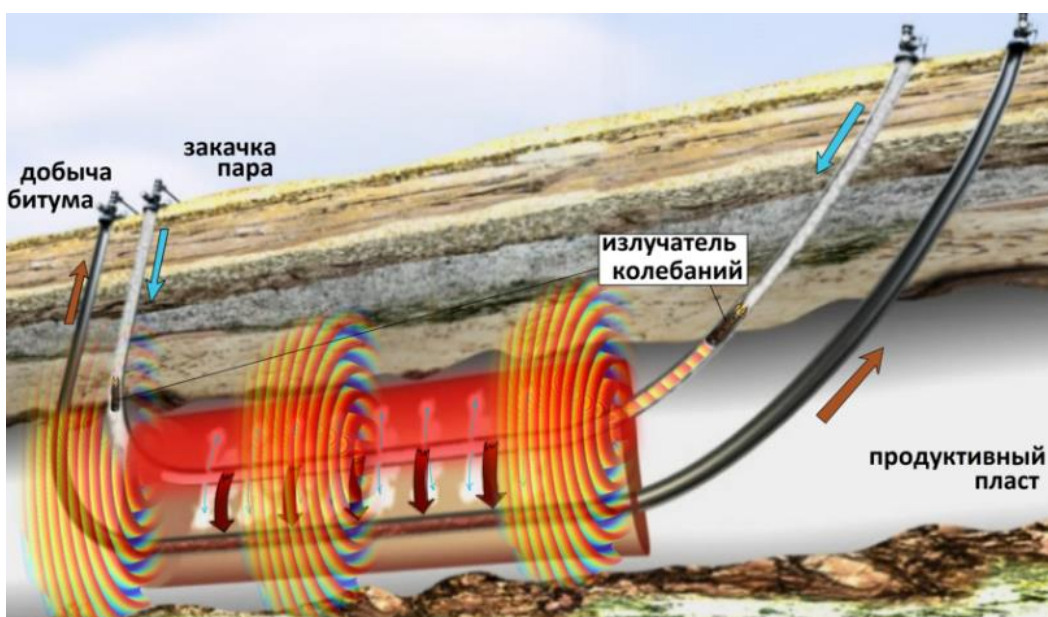


Рисунок 4.16 – Схема волнового воздействия на пласт

Экономический эффект от использования устройств на основе СОГ заключается в улучшении показателей разработки нефтяных месторождений. Так, испытания технологии акустического воздействия на Первомайском месторождении РТ показали прирост дебита нефти, который в среднем составил 1,68 т/сут (11,8%) [8А, 13А]. Кроме того, акустическое воздействие позволило повысить приемистость скважины с загрязненной призабойной зоной. Другим потенциальным направлением использования СОГ является интенсификация процесса анаэробного сбраживания в системах возобновляемой энергетики. Теоретические оценки свидетельствуют об ускорении процесса брожения после предварительной обработки биомассы проточным акустическим излучателем на основе СОГ [12А].

4.5. Выводы по главе

При уменьшении длины камеры в СОГ с цилиндрическим соплом длиной $4 > \ell_1 > 0,06$ амплитуда генерации монотонно повышается, при этом повышается скорость струи, необходимая для возбуждения резонанса в камере. Наибольшая амплитуда генерации в СОГ с камерой длиной $2 > L > 0,25$ с цилиндрическим соплом достигается при относительной длине цилиндрического сопла $\ell_1/d_1 \sim 0,55$. Приведенная амплитуда генерации достигает наибольшего значения в области $\ell_1/d_1 \sim 0,4$.

Выполнение фаски в длинном цилиндрическом сопле со стороны, направленной в камеру, целесообразно для приведения длины оставшегося цилиндрического участка к величине $\ell_1/d_1 \sim 0,55$. Фаска по потоку более полезна, чем против потока.

Козырьки в цилиндрических соплах не повышают амплитуду генерации.

Скругление входной острой кромки в длинных цилиндрических соплах $\ell_1 > d_1$ приводит к существенному повышению амплитуды генерации. Цилиндрический участок ℓ^* следует оставлять не короче $d_1/2$.

Первая мода при всех конструкциях сопел возбуждается в СОГ наивысшей

гармоникой тона отверстия при скорости струи ~ 2 м/с и $Sh_d \sim 1,6$, а завершающая мода возбуждается основной гармоникой при $Sh_d \sim 0,3$. Скорость струи W , соответствующая наибольшей амплитуде генерации в завершающей моде, значительно различается для различных конструкций сопел: для цилиндрического сопла $W \sim 28$ м/с, для профилированного сопла ~ 35 м/с, для короткого сопла со щелевой камерой ~ 62 м/с.

На наиболее перспективные варианты конструкции излучателя на основе СОГ получены патенты на изобретение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации сформулированы результаты исследований, совокупность которых представляет собой научное обоснование технических решений при проектировании скважинного излучателя на базе СОГ.

1. На основе исследований характеристик тона свободной и ограниченной струи были определены диапазоны чисел Рейнольдса, при которых обеспечивается устойчивая генерация звука в узком диапазоне чисел Струхаля. Установлено, что наличие преграды струи и возникающий при этом механизм обратной связи лишь усиливает амплитуду колебания не изменяя число Струхаля.

2. На основе комплексных исследований генерации колебаний в СОГ установлена динамика возникновения и развития семейства гармоник струйного тона отверстия. При увеличении скорости струи частота наивысшей гармоники достигает полосы усиления резонатора, возбуждая резонанс и возникновение первой моды акустического резонанса. При дальнейшем увеличении скорости, частота наивысшей гармоники выходит за границу полосы усиления и мода затухает. При этом возбуждается следующая мода на следующей гармонике. Последняя мода возбуждается на основной гармонике. Дальнейшее увеличение скорости струи не приводит к генерации гармонических колебаний.

3. Геометрические размеры проточной части струйного осциллятора Гельмгольца соотносятся с диаметром сопла. Проведенные эксперименты показали, что для эффективной генерации колебаний требуется точное соблюдение установленных относительных размеров проточной части, поскольку оптимальные значения длины сопла и длины камеры лежат в узком интервале значений. СОГ позволяет генерировать в протекающей жидкости периодические колебания давления с амплитудой, сравнимой по величине с величиной скоростного напора.

4. На основе проведенных исследований разработаны и запатентованы способы, устройства и эффективные схемы конструкции излучателей для генерации интенсивных волн давления в потоке рабочего агента. Промысловые испытания скважинного излучателя на Первомайском месторождении позволили

увеличить добычу нефти (на 1,68 т/сут), снизить её обводненность и очистить загрязненную призабойную зону скважины.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

c – скорость звука, м/с;

D – внутренний диаметр камеры резонатора, м;

d_1 – диаметр проходного сечения сопла, м;

d_2 – диаметр проходного сечения выходного отверстия, м;

f – частота колебаний давления, Гц;

f_0 – частота собственных колебаний камеры резонатора, Гц;

L – длина резонансной камеры, м;

ℓ_1 – длина проточной части сопла, м;

ℓ_2 – длина проточной части выходного сопла, м;

$M=U/c$ – число Маха;

A – амплитуда колебаний давления, Па;

G – объемный расход жидкости, м³/сут;

$q=\rho U^2/2$ – скоростной напор струи, кг/(м·с²);

Re – число Рейнольдса;

Sh – число Струхала;

U – скорость струи, м/с;

U_K – конвективная скорость, м/с;

V – объем камеры резонатора, м³;

μ – коэффициент расхода;

ν – кинематическая вязкость;

ρ – плотность, кг/м³.

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

БПФ – быстрое преобразование Фурье;

ЧСК – частота собственных колебаний;

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ТЕРМИНЫ

Амплитуда генерации – величина, получаемая в результате измерения микрофоном быстроменяющейся составляющей давления вблизи струи. Наибольшее отклонение показания измерительного прибора от нулевой линии. Половина "размаха".

Амплитуда моды характеризует колебания давления в полосе усиления резонатора.

Амплитуда из осциллограммы характеризует колебания давления в интервале измерения.

Вихревой звук – турбулентный шум, возникающий при движении струи вязкой жидкости в затопленном пространстве. Не обязательно имеет гармоническую составляющую. Псевдозвук.

Включает в себя частные случаи: тон струи, тон отверстия, клиновой тон, и др.

Динамический спектр - зависимость амплитуды сигнала A от скорости W , в отличие от частотного спектра, в котором изображается зависимость амплитуды сигнала A от частоты F .

Первичные возмущения давления – локальные возмущения давления небольшой амплитуды в области острой кромки, возникающие при деформации вихрей и формирующие упругую волну. Преобразование псевдозвука в звук.

Струйная генерация – процесс производство вихревого звука струей, в котором энергия движения жидкости частично преобразуется в колебательную энергию потока.

Тон – гармонический звук приятный для слуха, состоящий из гармоник: основной и высших, частоты которых кратны частоте основной гармоники. Осциллограмма чистого тона (без высших гармоник) представляет собой синусоиду.

Тон струи – гармонический звук очень малой амплитуды, возникающий на дискретных частотах при истечении свободной струи в затопленное пространство. Производится семейством вихрей, возникающих в струе вследствие вязкости, без

участия механизма обратной связи.

Тон отверстия – гармонический звук, возникающий при втекании струи в отверстие с острой кромкой, размер которого сравним с размером струи. Производится при деформации вихрей на острой кромке, и с участием механизма обратной связи.

Тон акустической моды - гармонический звук большой амплитуды, возникающий вследствие избирательного усиления резонатором первичных возмущений давления дискретной частоты, ближайшей к частоте собственных колебаний резонатора.

Цилиндрическое сопло – расхономерное сопло, имеющее цилиндрическое отверстие с острой входной кромкой (ГОСТ 15528-86)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, В.О. Восстановление продуктивности нефтяных пластов и очистка загрязненных вод с использованием ультразвукового воздействия / В. О. Абрамов, М. С. Муллакаев, Г. Б. Векслер. – М.: ВНИИОЭНГ, 2015. – 211 с.
2. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – М.: Наука, 1969. – 823 с.
3. Альтшуль, А.Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – М.: Недра, 1982. – 221 с.
4. Анискин, В.М. Исследование устойчивости дозвуковой газовой микроструи / В. М. Анискин, Д. А. Бунтин, А. А. Маслов, С. Г. Миронов // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82 (2). – С. 17–23.
5. Артемьева, Т.В. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод / Т. В. Артемьева, Т. М. Лысенко, А. Н. Румянцева, С. П. Стесин. – М.: Издательский центр “Академия”, 2005. – 336 с.
6. Бардаханов, С.П. Исследование свойств аэроакустического резонанса в течении с когерентными структурами / С. П. Бардаханов, Е. В. Порошин // Теплофизика и аэромеханика. – 1994. – Т. 1. № 4. – С. 313–322.
7. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
8. Биркгоф, Г. Струи, следы и каверны / Г. Биркгоф, Э. Сарантонелло. – М.: Мир, 1964. – 467 с.
9. Блохинцев, Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды / Д. И. Блохинцев. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
10. Бухариев, Б. Ф. Повышение нефтеотдачи пласта путем волнового воздействия / Б. Ф. Бухариев // Мировая наука. – 2018. – №11(20). – С. 60-62.
11. Быков, А. И. Исследование акустических характеристик резонаторов Гельмгольца в системах снижения шума: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.06 / Быков Алексей Иванович. – М., 2021. – 156 с.
12. Ван-Дайк, М. Альбом течений жидкости и газа. – М.: Мир, 1986. – 182 с.

13. Вахитов, Г. Г. Использование физических полей для извлечения нефти из пластов / Г. Г. Вахитов, Э. М. Симкин. – М.: Недра, 1985. – 231 с.
14. Волков, К. Н. Взаимодействие круглой турбулентной струи с плоской преградой / К. Н. Волков // Прикладная механика и техническая физика. – 2007. – Т. 48, №1(281). – С. 55–67.
15. Власов, Е. В. Акустическое воздействие на аэродинамические характеристики турбулентной струи / Е. В. Власов, А. С. Гиневский // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1967. – № 4. – С. 133–138.
16. Власов, Е. В. Исследование волновой структуры течения в начальном участке струи при различных уровнях начальной турбулентности / Е. В. Власов, А. С. Гиневский, Р. К. Каравосов // Ученые записки ЦАГИ. – 1978. – Т. 9, № 1. – С. 25–32.
17. Вовк, И. В. Звук, рожденный потоком / И. В. Вовк, В. Т. Гринченко. – Киев: Наукова думка, 2010. – 221 с. – ISBN 978-5-9710-0888-0.
18. Гадиев, С. М. Использование вибрации в добыче нефти / С. Гадиев. – М.: Недра, 1977. – 139 с.
19. Ганиев, О. Р. Основы волновой механики продуктивных пластов / О. Р. Ганиев, Р. Ф. Ганиев, Л. Е. Украинский, И. Г. Устенко // Доклады Академии наук. – 2016. – Т. 466, № 3. – С. 298–301.
20. Гельмгольц, Г. Основы вихревой теории / Г. Гельмгольц // Пер. с нем. под ред. С. А. Чаплыгина. – М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 81 с. – ISBN 5-93972-109-5.
21. Гиневский, А. С. Теория турбулентных струй и следов / А. С. Гиневский. – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.
22. Гиневский, А. С. Влияние начальной турбулентности на характеристики осесимметричной затопленной струи / А. С. Гиневский, К. А. Почкина // Инженерно–физический журнал. – 1967. – Т. 12. № 1. – С. 15.
23. Горин, С. В. Оптимизация конструкции резонаторов Гельмгольца по массогабаритным и акустическим показателям / С. В. Горин, М. В. Куклин // Вестник машиностроения. – 2012. – № 2. – С. 3–5.

24. Дыбленко, В.П. Волновые методы воздействия на нефтяные пласты с трудноизвлекаемыми запасами. Обзор и классификация / В. П. Дыбленко. – М.: ОАО ВНИИОЭНГ, 2008. – 80 с. – ISBN 978-5-88595-145-6.
25. Ибрагимов, Л.Х. Интенсификация добычи нефти / Л. Х. Ибрагимов, И. Т. Мищенко, Д. К. Челоянц. – М.: Наука, 2000. – 414 с. – ISBN 5-02-002450-3.
26. Иванов, Б. Н. Волновые процессы и технологии добычи и подготовки нефти / Б. Н. Иванов, А. И. Гурьянов, А. М. Гумеров. – Казань: Изд-во «Фэн» АН РТ, 2009. – 400 с.
27. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
28. Исатаев, С.И. О характерных масштабах пульсаций скорости в переходной области свободных осесимметричных струй / С. И. Исатаев, С. Б. Тарасов // Прикладная и теоретическая физика. – Алма-Ата. Каз. ГУ. 1975. – Вып. 7. – С. 140–146.
29. Козлов, Г.В. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру круглой струи / Г. В. Козлов, Г. Р. Грек, А. М. Сорокин, Ю. А. Литвиненко // Теплофизика и аэромеханика. – 2008. – Т. 15, №1. – С. 59–73.
30. Комкин, А.И. Собственная частота резонатора Гельмгольца на стенке прямоугольного канала / А. И. Комкин, М. А. Миронов, С. И. Юдин // Акустический журнал. – 2014. – Т. 60, № 2. – С. 145–151.
31. Кондратьев, В. И. Клиновой тон и его усиление / В. И. Кондратьев, Т. И. Назаренко // Аэроакустика. – М.: Наука, 1980. – С. 112–118.
32. Константинов, Б.П. Гидродинамическое звукообразование и распространение звука в ограниченной среде / Б. П. Константинов. – Л.: Наука. 1974. – 143 с.
33. Ковалева, А.Н. Обзор некоторых методов увеличения нефтеотдачи / А. Н. Ковалева, Е. П. Анисимова // Академический журнал Западной Сибири. – 2015. – Т. 11, №3(58). – С.101–102.
34. Кравцов, Я.И. О процессах, определяющих механизм интегрированного воздействия на нефтяной пласт / Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин, Э. А. Буторин, Р. Н. Гатауллин // Георесурсы. – 2009. – № 1(29). – С. 43–45.

35. Крашенинников, С.Ю. Анализ шумообразования турбулентных струй на основании исследования их ближнего акустического поля / С. Ю. Крашенинников, А. К. Миронов // Акустический журнал. – 2018. – Т. 64, № 6. – С. 704–717.
36. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества / П. П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.
37. Кристоф, Р. Основы спектрального анализа [пер. с англ.] / Р. Кристоф. – М.: Горячая линия–Телеком, 2006. – 215 с.
38. Кубанский, П.Н. К теории вихреобразования в окрестностях резонатора, омываемого потоком воздуха / П. Н. Кубанский // Акустический журнал. – 1959. – Т. V (3). – С. 324–331.
39. Кузнецов, О.Л. Колебания и волны во флюидонасыщенных геологических средах / О. Л. Кузнецов, В. П. Дыбленко, Дж. В. Чилингар, К. М. Садеги, И. А. Чиркин, Э. М. Симкин. – М.: ИКИ, 2021. – 420 с.
40. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов [пер. с англ.] / Р. Лайонс – М.: ООО «Бином–Пресс», 2006. – 656 с.
41. Марфин, Е.А. Выбор оптимальных геометрических параметров излучателя на основе резонатора Гельмгольца / Е. А. Марфин, Я. И. Кравцов // Известия академии наук. Энергетика. – 2005. – № 6. – С. 101–106.
42. Митрофанова, О.В. Исследование механизма саморегулирования акустических колебаний в импактном закрученном течении / О. В. Митрофанова, И. Г. Поздеева // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2015. – № 5. – С. 54–63.
43. Муслимов, Р.Х. Нефтеотдача: прошлое, настоящее, будущее / Р. Х. Муслимов. – Казань: Академия наук РТ, 2012. – 664 с.
44. Муллакаев, М.С. Ультразвуковое регулирование вязкоупругих свойств нефтяных дисперсных систем / М. С. Муллакаев, Р. М. Муллакаев, И. Б. Есипов // Акустический журнал. – 2023. – Т. 69, № 3. – С. 322–329.
45. Невеселова, К.В. Исследования спектра собственных колебаний в объеме цилиндрической трубы с открытыми торцами / К. В. Невеселова, Г. В. Чижов //

- Доклад на XXVII сессии Российского акустического общества, – С–П. – 2014.
46. Николаевский, В.Н. Механика насыщенных пористых сред / В. Н. Николаевский, К. С. Басниев, А. Т. Горбунов, Г. А. Зотов. – М.: Недра, 1970. – 320 с.
 47. Омелянюк, М.В. Гидравлические генераторы колебаний в нефтегазовом деле / М. В. Омелянюк // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2011. – № 3. – С. 54–60.
 48. Оппенгейм, А.В. Цифровая обработка сигналов / А. В. Оппенгейм, Р. В. Шафер. – М.: Связь, 1979. – 416 с.
 49. Пимштейн, В.Г. О возникновении системы кольцевых вихрей в слое смешения осесимметричных турбулентных струй при акустическом воздействии / В. Г. Пимштейн // Акустический журнал. – 2016. – Т. 62 (4). – С. 489–492.
 50. Прачкин, В.Г. Волновые технологии интенсификации добычи нефти / В. Г. Прачкин, А. Г. Галяутдинов // Нефтегазовое дело. – 2015. – №5. – С. 215-235.
 51. Релей (Дж. В. Стретт). Теория звука / Релей. – М.: Гостехиздат. – Т. 2. – 1955. – 475 с.
 52. Сергель, О. С. Прикладная гидрогазодинамика / О. С. Сергель ; – М: Машиностроение, 1981. – 374 с.
 53. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
 54. Симкин, Э.М. Технология и техника сейсмических методов воздействия на нефтяные пласты / Э. М. Симкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1999. – № 2. – С. 185-188.
 55. Сургучев, М.Л. Гидродинамическое, акустическое, тепловое циклическое воздействие на нефтяные пласты / М. Л. Сургучев, О. Л. Кузнецов, Э. М. Симкин. – М.: Недра, 1975. – 184 с.
 56. Сухинин, С.В. Эоловы тона пластины в канале / С. В. Сухинин, С. П. Бардаханов // Прикладная механика и техническая физика. – 1998. – Т. 39, № 2(228). – С. 69–77.
 57. Ткаченко, Л.А. Генерация высших гармоник при резонансных колебаниях в

- трубе с открытым концом / Л. А. Ткаченко, С. А. Фадеев// Акустический журнал. – 2017. – Т. 63, № 1. – С. 9–16.
58. Федотов, Е.С. Исследование работы резонатора Гельмгольца в волноводе прямоугольного сечения / Е. С. Федотов, В. В. Пальчиковский // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2014. – № 38. – С. 107–126.
59. Хавкин, А.Я. Наноявления и нанотехнологии в добыче нефти и газа / А. Я. Хавкин. – М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. – 692 с.
60. Чугаев, Р. Р. Гидравлика / Р. Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
61. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
62. Abdelmwgoud, M. Shear layer synchronization of aerodynamically isolated opposite cavities due to acoustic resonance excitation / M. Abdelmwgoud, M. Shaaban, A. Mohany // Physics of Fluids. – 2021. – V. 33. – 055112.
63. Alster, M. Improved calculation of resonant frequencies of Helmholtz resonators / M. Alster // Journal of Sound and Vibration. – 1972. – V. 24, No 1. – P. 63-85.
64. Anderson, A.B.C. Vortex–ring structure–transition in a jet emitting discrete acoustic frequencies / A. B. C. Anderson // Journal of the Acoustical Society of America. – 1956. – V. 28, No 5. – P. 914–921.
65. Becker, H. A. Vortex evolution in the round jet / H. A. Becker // Journal of Fluid Mechanics. – 1968. – V. 31(3). – P. 435–448.
66. Bennett, G. J. Resonant mode characterisation of a cylindrical Helmholtz cavity excited by a shear layer / G. J. Bennett, D. B. Stephens, R. Verdugo F. // Journal of the Acoustical Society of America – 2017. – V. 141 (1), – 7.
67. Beresnev, I.A. Elastic–wave stimulation of oil production: A review of methods and results / I. A. Beresnev, P. A. Johnson // Geophysics. – 1994. – V. 59. N. 6. – P. 1000–1017. – DOI: 10.1190/1.1443645.
68. Bogey, Chr. Effects of nozzle–exit boundary–layer profile on the initial shear–layer instability, flow field and noise of subsonic jets / Chr. Bogey, R. Sabatini // Journal of Fluid Mechanics. – 2019. – V. 876. – P. 288– 325. – DOI: 10.1017/jfm.2019.546.

69. Brackenridge, J. B. Acoustical characteristics of oscillating jet–edge systems in water / J. B. Brackenridge, W. L. Nyborg // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1957. – V. 29, No 4. – P. 459–463.
70. Brown, G. B. The mechanism of edge–tone production / G.B. Brown // *Proceedings of the Physical Society*. – 1937. – V. 49(5). – N. 307. – P. 508.
71. Chan, Y.Y. Spatial waves in turbulent jets / Y. Y. Chan // *Physics of Fluids*. – 1974. – V. 17(1). – P. 46–53.
72. Chan, Y.Y. Suppression of spatial waves by distortion of jet velocity profile / Y. Y. Chan and J. T. Templin // *Physics of Fluids*. – 1974. – V. 17. – P. 2124–2125.
73. Chanaud, R.C. Aerodynamic whistles / R. C. Chanaud // *Scientific American*. – 1970. – V. 222, No 1. – P. 40–46.
74. Cooley, J.W. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series / J. W. Cooley and J. W. Tukey // *Mathematics of Computation*. – 1965. – V. 19, No 2. – P. 297–301. – DOI: 10.2307/2003354.
75. Coope J.J. Tones produced by a Wire placed in an ignited gas jet / J. J. Coope // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1938. – V.9. – P. 321–330. – DOI: 10.1121/1.1915940.
76. Crow, S. C. Orderly structure in jet turbulence / S.C. Crow and F.H. Champagne // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1971. – V. 48(3). – P. 547–591. – DOI: 10.1017/S0022112071001745.
77. Curle, N. The mechanics of edge–tones / N. Curle // *Proceeding of the Royal Society A*. – 1953. –V. 216. – P. 412–424.
78. Dai, X. Flow–excited acoustic resonance of a Helmholtz resonator: Discrete vortex model compared to experiments / X. Dai, X. Jing and X. Sun // *Physics of Fluid*. – 2015. – V. 27. – 057102. – DOI: 10.1063/1.4921529
79. Dhamanekar, A. Effect of impingement surface roughness on the noise from impinging jets / A. Dhamanekar // *Physics of Fluids*. – 2014. – V. 26 (3). – P. 1–30. DOI: 10.1063/1.4866977.
80. Elder, S. A. Edgetones versus Pipetones / S.A. Elder // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1978. – V. 64. – P. 1721–1723. – DOI: 10.1121/1.382152.

81. Fang, Z. Large eddy simulation of self-excited oscillation inside Helmholtz oscillator / Z. Fang, F. Zeng, T. Xiong, W. Wei, P. Jiang, Q. Wu, Y. Wang, Y. Fei // International Journal of Multiphase Flow. – 2020. – V. 126. – 103253.
82. Fujisawa, N. Study of feedback control of edge tone by simultaneous flow visualization, control and PIV measurement / N. Fujisawa, Y. Takizawa // Measurement Science and Technology. – 2003. – V. 14. – P. 1412–1419.
83. Fucsh, H. V. Space correlations of the fluctuating pressure in subsonic turbulent jets / H. V. Fucsh // Journal of Sound and Vibration. – 1972. – V. 23 (1). – P. 77–99. – DOI: 10.1016/0022-460X(72)90790-0.
84. Gensheng, L. Investigation and application of self-resonating cavitating water jet in petroleum engineering / L. Gensheng, S. Zhonghou, Z. Changshan, Z. Debin and C. Hongbing // Petroleum Science and Technology. – 2005. – V. 23. – P. 1–15.
85. Ghanadi, F. Interaction of a flow-excited Helmholtz resonator with a grazing turbulent boundary layer / F. Ghanadi, M. Arjomandi, B. Cazzolato and A. Zander // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2014. – V. 58. – P. 80–92. – DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.06.016.
86. Gierke, H. von. Über Schneidentöne an Kreisrunden Gasstrahlen und ebenen Lamellen / H. von. Gierke // Z. Agnew. Physik. – 1950. – V. 3. – P. 97–106.
87. Goltsman, A. Flow pattern of double-cavity flow at high Reynolds number / A. Goltsman, I. Saushin // Physics of Fluids. – 2019. – V. 31. – 065101.
88. Howe, M. S. On the Helmholtz resonator / M. S. Howe // Journal of Sound and Vibration. – 1975. – V. 45(3). – P. 427–440.
89. Huang, M. Experimental investigation on the rock erosion characteristics of a self-excited oscillation pulsed supercritical CO₂ jet / M. Huang, Y. Kang, X.C. Wang, Y. Hu, Y.W. Liu, H. Chen // Applied Thermal Engineering. – 2018. – V. 139. – P. 445–455. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.05.014.
90. Hussain, A.K.M. Coherent structures – Reality and myth / A.K.M. Hussain // Physics of Fluids. – 1983. – V. 26(10). – P. 2816–2850. –DOI: 10.1063/1.864048.
91. Ingard, U. On the theory and design of acoustical resonators / U. Ingard // Journal of the Acoustical Society of America. – 1953. – V. 25, No 6. – P. 1037–1061. – DOI:

10.1121/1.1907235.

92. Jones, A.T. Edge tones / A. T. Jones // Journal of the Acoustical Society of America. – 1942. – V. 14, No 2. – P. 131–139.
93. Karthik, B. Mechanism of pipe–tone excitation by flow through an orifice in a duct / B. Karthik, S. R. Chakravarthy and R. I. Sujith // Aeroacoustics. – 2008. – V. 7(3–4). – P. 321–348.
94. Khosropour, R. Excitation of a Helmholtz resonator by an air jet / R. Khosropour, P. Millet // Journal of the Acoustical Society of America. – 1990. – V. 88, No 3. – P. 1211.
95. Klug, U. Experimentelle Untersuchungen zur Schneidentönbildung / U. Klug // Annalen der Physik und Chemie. – 1931. – H.1. – 53.
96. König, W. Hydrodynamisch – akustische Untersuchungen / W. König // Wied, Ann. – 1891. – V. 42. – P. 549–563.
97. Krishna, S. Characterization of the flow–field in circular subsonic impinging jets / S. Krishna // Faculty of Aerospace Engineering. – 2012. – 117 p.
98. Krüger, F. Theorie der Schneidentöne / F. Krüger // Annalen der Physik und Chemie. – 1920. – V. 62. – P. 673. – DOI: 10.1002/andp.19203671602.
99. Lee, B.H.K. Some measurements of spatial instability waves in a round jet / Lee B. H. K. // AIAA Journal. – 2012. – V. 14 (3). – P. 348–351.
100. Lerch, A. An introduction to audio content analysis: Applications in signal processing and music informatics. An Introduction to Audio Content Analysis: Applications in Signal Processing and Music Informatics. – 2012 – 248 p.
101. Lenihan, J. M. A. Observations of Edge–Tone / J. M. A. Lenihan, E. G. Richardson // Phil. Mag. – 1939 (7). – V. 29. – P. 400.
102. Li, D. Effects of feeding pipe diameter on the performance of a jet–driven Helmholtz oscillator generating pulsed waterjets / D. Li, Y. Kang, X. L. Ding, X. C. Wang, W. C. Liu // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2017. – V. 31. – P. 1–10.

103. Liu, W. Self-sustained oscillation and cavitation characteristics of a jet in a Helmholtz resonator / W. Liu, Y. Kang, M. Zhang, X. Wang, D. Li // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2017. – V. 68. – P. 158–172.
104. Ma, W. Experimental research on the water jet oscillating characteristics of Helmholtz nozzle / W. Ma, T. Cai, F. Ma // *Journal of Applied Science and Engineering*. – 2019. – V. 22 (1). – P. 83-92.
105. Marsh, A. Noise measurements around a subsonic air jet impinging on a plane, rigid surface / A. Marsh // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1961. – V. 33. – P. 1065–1066.
106. Matsuura, K. A throttling mechanism sustaining a hole tone feedback system at very low Mach numbers / K. Matsuura and M. Nakano // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2012. – V. 710. – P. 569–605.
107. Maurel, A. Experimental study of self-sustained oscillations in a confined jet / A. Maurel, P. Em, B. J. Zielinska and J. E. Wesfreid // *Physical Review E*. – 1996. – V. 54, No 4. – P. 3643–3651.
108. Meganathan, A. An experimental study of acoustic and flow characteristics of hole tones / A. Meganathan and D. Vakili // *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. – 2006. Reno. Nevada.
109. Michalke, A. On spatially growing disturbances in an inviscid shear layer / A. Michalke // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1965. – V. 23, Part 3. – P. 521–544.
110. Mollo-Christensen, E. Jet noise and shear flow instability seen from an experimenter's viewpoint / E. Mollo-Christensen // *Journal of Applied Mechanics*. – 1967. – V. 34(1). – P. 1–7.
111. Morel, Th. Experimental study of a jet-driven Helmholtz oscillator / Th. Morel // *Journal of Fluids Engineering*. – 1979. – V. 101. IX. N. 3. – P. 383–390. – DOI: 10.1115/1.3448983.
112. Mullakaev, M.S. Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery / M. S. Mullakaev, V. O. Abramov, A. V. Abramova // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2015. – V. 125. – P. 201–208.

113. Nakiboglu, G. Aeroacoustic power generated by a compact axisymmetric cavity: prediction of self-sustained oscillation and influence of the depth / G. Nakiboglu, H. B. M. Manders and A. Hirschberg // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2012. – V. 703. – P. 163–191.
114. Neuwerth, G. Acoustic feedback phenomena of the subsonic and hypersonic free jet impinging on a foreign body. NASA TT F-15719. – 1974. – 90 p.
115. Norton, M.L. Investigating the edgetone amplifier / M. L. Norton, R. E. Bidgood // *Fluid Power International*. – 1969. – V. 15. – P. 47-50.
116. Nussbauter, H.J. Fast Fourier transform and convolution algorithms / H. J. Nussbauter. – Berlin.: Springer. 1981. – 276 p.
117. Nyborg, W.L. Characteristics of jet-edge-resonator whistles / W. L. Nyborg, C. L. Woodbridge and H. K. Schilling // *Journal of the Acoustical Society of America*. – 1953. – V. 25(1). – P. 138-146.
118. Pan, Y. Resonance property and erosion ability of a submerged self-excited cavitating jet under different resonance modes / Y. Pan, T. Cai and F. Ma // *Heliyon*. – 2023.
119. Powell, A. On the edgetone / A. Powel // *Journal of the Acoustical Society of America* – 1961. – V. 33. N. 4. – P. 395–409.
120. Richardson, E. G. Edge tones / E. G. Richardson // *Proceedings of the Physical Society*. – 1931. – V. 43, No 4 – P. 394-404. – DOI: 10.1088/0959-5309/43/4/303.
121. Rockwell, D. Review – self-sustaining oscillations of flow past cavities / D. Rockwell, E. Naudascher // *Journal of Fluid Engineering*. – 1978. – V. 100, No 2. – P. 152–165. – DOI: 10.1115/1.3448624
122. Rossiter, J. E. Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds. Reports and Memoranda № 3438. 1964. London. URL: <https://reports.aerade.cranfield.ac.uk/handle/1826.2/4020>
123. Sami, S. Helmholtz oscillator for the self-modulation of a jet / S. Sami, C. Anderson. – Proc. 7th International symposium on jet cutting technology. BHRA. Cranfield. Bedford. England. 1984. – P. 91-98.
124. Sato, H. The stability and transition of two-dimensional jet / H. Sato // *Journal of*

- Fluid Mechanics. – 1959. – V. 7, No 1. – P. 53-80.
125. Savic, P. On acoustically effective vortex motion in gaseous jets / P. Savic // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1941. – V. 32, No 212. – P. 245-252.
 126. Segoufin, C. Experimental study of the influence of the mouth geometry on sound production in a recorder-like instrument: Windway length and Chamfers / C. Segoufin, B. Fabre, M. P. Verge, A. Hirschberg and A. P. J. Wijnands // Acta Acustica. – 2000. – V. 86(4). – P. 649–661.
 127. Sondhauss, C. Ueber die Form von aus runden Oeffnungen tretenden Luftströmen / C. Sondhauss // Annalen der Physik und Chemie. – 1852. – V. 1(85). – P. 58-63.
 128. 143. Strouhal, V. Ueber eine besondere Art der Tonerregung / V. Strouhal // Wied. Ann. – 1878. – V. 5. – P. 216-251.
 129. Tam, C. K. W. Theoretical model of discrete tone generation by impinging jets / C. K. W. Tam, K. K. Ahuja // Journal of Fluid Mechanics. – 1990. – V. 214. – P. 67–87.
 130. Tanda, M. G. Pressure fluctuations induced by turbulent circular jets impinging on flat plate / F. Ballio, S. Franzetti, M. G. Tanda // Excerpta. – 1994. – V. 7. – P. 41-59.
 131. Tang, C. Experimental study on dynamic characteristics of self-excited oscillation pulsed jet / C. Tang, J. Pei and D. Hu // Advanced Materials Research. – 2014. – V. 937. – P. 624–631.
 132. Trávníček, Z. Annular impinging jet recirculation zone expanded by acoustic excitation / Z. Trávníček and V. Tesai // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2004. – V. 47, No 10–11. – P. 2329–2341.
 133. Tuerke, F. Experimental study of double-cavity flow / F. Tuerke, L. R. Pastur, D. Sciamarella, F. Lusseyran, G. Artana // Experiments in Fluids. – 2017. – V. 58(7). – 76.
 134. Tuna, B. A. Self-sustained oscillation of shallow flow past sequential cavities / B. A. Tuna, D. Rockwell // Journal of Fluid Mechanics. – 2014. – V. 758. – P. 655–685.
 135. Tyler, E. Eddying flow from annular nozzles / E. Tyler and E. G. Richardson // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 7. – 1926. – V. 2, No 8.

136. Wang, Y. Characteristics of large-scale coherent structure on irregularly arranged rough-bed open-channel flows / Y. Wang, P. Zhang, S. Yang, Ch. Hu, J. Jin, R. Zhang // *Water*. – 2023. – V. 15(6). – 1105.
137. Wenchuan, L. Self-sustained oscillation and cavitation characteristics of a jet in a Helmholtz resonator / L. Wenchuan et.al. // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2017. – V. 68. – P. 158–172.
138. Wu, Q. Dynamic characteristics of the cavitation clouds of submerged Helmholtz self-sustained oscillation jets from high-speed photography / Q. Wu, W. Wei, B. Deng, P. Jiang, D. Li, M. Zhang and Z. Fang // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2019. – V. 33(2). – P. 621–630.
139. Vaik, I. Unsteady phenomena in the edge tone. International / I. Vaik and G. Paal // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2007. – V. 28(4). – P. 575–586.
140. Xu, B.P. Large-eddy simulation of vortical structures in a forced plane impinging jet / B. P. Xu, J. X. Wen, K. N. Volkov // *European Journal of Mechanics - B/Fluids*. – 2013. – V. 42. – P. 104–120.
141. Yu, S. Wind tunnel study on vortex-induced Helmholtz resonance excited by oblique flow / S. Yu // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2016. – V. 74. – P. 207–219.
142. Yuan, M. Characteristics of oscillation in cavity of Helmholtz nozzle generating self-excited pulsed waterjet / M. Yuan, D. Li, Y. Kang, H. Shi and H. Pan // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2022. – V. 35. – 73.
143. Ziada, S. Feedback control of globally unstable flows: impinging shear flows / S. Ziada // *Journal of Fluids and Structures*. – 1995. – V. 9. – P. 907–923.
144. Patent US №2,755,767. High power generators of sounds and ultra-sounds / R. Levavasseur. 1952.
145. Patent US №3,432,804. Fluid ultrasonic generator / Beeken B.B. 1966.
146. Patent US №4,041,984. Jet-driven Helmholtz fluid oscillator / Th. Morel. 1977.
147. Patent US №6,029,746. Self-excited jet stimulation tool for cleaning and stimulating wells / Rex A. Dodd. 2017.
148. Patent US №6,470,980. Self-excited drill bit sub / Rex A. Dodd. 2002.

149. Patent US № 4,041,984. Jet-driven Helmholtz fluid oscillator / Morel Th. DOI:10.1115/1.3448983.
150. Обзор современных методов повышения нефтеотдачи пласта [Электронный ресурс] / Сайт компании «Петрос». – Режим доступа: <http://www.petros.ru/rus/news/?action=show&id=267>.

Список научных работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в изданиях перечня ВАК:

по специальности диссертации:

- 1А. Абдрашитов, А. А. Влияние длины сопла на работу струйного осциллятора Гельмгольца / А. А. Абдрашитов, Е. А. Марфин // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2021. – №1. – С. 142-150. – DOI 10.31857/S0568528121010011.
- 2А. Абдрашитов, А. А. Перспективы применения резонатора Гельмгольца, возбуждаемого струёй, для интенсификации добычи углеводородов / Е. А. Марфин, А. А. Абдрашитов, Я. И. Кравцов // Труды Академэнерго. – 2013. – №4. – С. 102-110.
- 3А. Абдрашитов, А. А. Экспериментальное исследование влияния акустического резонанса на интенсивность псевдозвука в коммутационном пространстве струйного генератора / А. А. Абдрашитов, С. Я. Коханова, Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин // Труды Академэнерго. – 2012. – №4. – С. 73-87.
- 4А. Абдрашитов, А. А. Экспериментальное исследование эффективности импульсного воздействия потока жидкости на коллекторские свойства продуктивного пласта / А. А. Абдрашитов, С. Я. Коханова, Я. И. Кравцов // Труды Академэнерго. – 2010. – №3. – С. 81-89.

по смежным специальностям:

- 5А. Абдрашитов, А. А. Численные и экспериментальные исследования генерации звука в струйном осцилляторе Гельмгольца с щелевой камерой / Е. А. Марфин, А. А. Абдрашитов // Noise Theory and Practice. – 2023. – Т. 9, №3(34). – С. 7-17.
- 6А. Абдрашитов, А. А. Повышение эффективности метода парогравитационного

- дренажа за счет волнового воздействия на пласт / Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин, А. А. Абдрашитов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – №5. – С. 35-39.
- 7А. Абдрашитов, А. А. Скважинные излучатели колебаний давления для интенсификации добычи нефти / Я. И. Кравцов, А. А. Абдрашитов, Е. А. Марфин // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – №5. – С. 27-31.
- 8А. Абдрашитов, А. А. Промысловые испытания волнового воздействия на процесс добычи нефти на Первомайском месторождении / Е. А. Марфин, Я. И. Кравцов, А. А. Абдрашитов, Р. Н. Гатауллин // Георесурсы. – 2014. – №2(57). – С. 14-16.
- 9А. Абдрашитов, А. А. Моделирование волнового поля в призабойной зоне скважины / Д. Р. Сафиуллин, Е. А. Марфин, А. А. Абдрашитов, И. С. Метелев // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18, №13. – С. 182-184.
- 10А. Абдрашитов, А. А. Экспериментальная установка для исследования механизма воздействия упругих волн на процесс фильтрации / Е. А. Марфин, А. А. Абдрашитов, Е. В. Беляев // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2014. – №2(275). – С. 17-25.
- Статьи в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus:***
- 11А. Abdrashitov, A. A. Excitation of acoustic modes by tone harmonics of a hole in a jet-driven Helmholtz oscillator / A. A. Abdrashitov, E. A. Marfin // Acoustical Physics. – 2023. – Vol. 69. – P. 471–477. – DOI 10.1134/S1063771023600559.
- 12А. Abdrashitov, A. A. Cavitation reactor for pretreatment of liquid agricultural waste / A. A. Abdrashitov, A. Gavrilov, E. Marfin [et al.] // Agriculture. – 2023. – Vol. 13, No. 6. – P. 1218. – DOI 10.3390/agriculture13061218.
- 13А. Abdrashitov, A. A. Acoustic stimulation of oil production by a downhole emitter based on a jet-driven Helmholtz oscillator / E. A. Marfin, R. N. Gataullin, A. A. Abdrashitov // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 215. – P. 110705. – DOI 10.1016/j.petrol.2022.110705.
- 14А. Abdrashitov, A. Features of sound generation by the jet-driven Helmholtz oscillator

- / A. Abdrashitov, E. Marfin, E. Plekhova // *Akustika*. – 2021. – Vol. 39. – P. 214-218. – DOI 10.36336/akustika202139212.
- 15A. Abdrashitov, A. A. Influence of the nozzle shape on sound generation in a jet-driven Helmholtz oscillator / A. A. Abdrashitov, E. A. Marfin, E. A. Plakhova // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – P. 012061. – DOI 10.1088/1757-899X/927/1/012061.
- 16A. Abdrashitov, A. A. Short cylindrical nozzles in a jet-driven Helmholtz oscillator / A. A. Abdrashitov, E. A. Marfin // *Physics of Fluids*. – 2020. – Vol. 32, No. 7. – P. 077103. – DOI 10.1063/5.0006845.
- 17A. Abdrashitov, A. Improving the efficiency of the downhole radiator for acoustic impact on the formation / A. Abdrashitov, E. Marfin // *Tyumen 2019*. – 2019. – Vol. 2019. – P. 1–6. – DOI 10.3997/2214-4609.201900553.
- 18A. Abdrashitov, A. A. Experimental study of a borehole acoustic radiator with a ring in a long cylindrical chamber / A. A. Abdrashitov, E. A. Marfin, D. V. Chachkov // *Acoustical Physics*. – 2018. – Vol. 64, No. 2. – P. 237-244. – DOI 10.1134/S106377101802001X.
- 19A. Abdrashitov, A. A. Effect of nozzle shape on amplitude of well acoustic emitter generation / A. A. Abdrashitov, E. A. Marfin, D. V. Chachkov, V. M. Chefanov // *Acoustical Physics*. – 2018. – Vol. 64, No. 4. – P. 492-502. – DOI 10.1134/S1063771018030016.
- 20A. Abdrashitov, A. A. Elastic-wave effect on oil production by in situ combustion: field results / E. A. Marfin, Y. I. Kravtsov, A. A. Abdrashitov [et al.] // *Petroleum Science and Technology*. – 2015. – Vol. 33, No. 15-16. – P. 1526-1532. – DOI 10.1080/10916466.2015.1037923.

Патенты на изобретения:

- 21A. Абдрашитов, А. А. Патент №2789492 РФ. Способ генерирования и модуляции волн давления в стволе нагнетающей скважины и устройство для его осуществления / А. А. Абдрашитов, Е. А. Марфин // №2022125397: заявл. 28.09.2022: опубл. 03.02.2023.

- 22А.Абдрашитов, А. А. Патент №2705126 РФ. Способ генерирования волн давления в затрубном пространстве нагнетательной скважины и струйный акустический излучатель с коротким соплом и щелевым резонатором для его осуществления / А. А. Абдрашитов, Е. А. Марфин, Д. В. Чачков, В. М. Чефанов // №2019101241: заявл. 14.01.2019: опубл. 05.11.2019.
- 23А.Абдрашитов, А. А. Патент №2670623 РФ. Способ и устройство скважинного акустического излучателя с плавным сопловым входом для генерирования волн давления в затрубном пространстве нагнетательной скважины / А. А. Абдрашитов, Е. А. Марфин, Д. В. Чачков, В. М. Чефанов // №2017135194: заявл. 04.10.2017: опубл. 24.10.2018.
- 24А.Абдрашитов, А. А. Патент №2653205 РФ. Способ и устройство струйного комбинированного параметрического излучателя для генерирования и модуляции волн давления в стволе нагнетательной скважины / А. А. Абдрашитов, Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин // №2016108549: заявл. 09.03.2016: опубл. 07.05.2018.
- 25А.Абдрашитов, А. А. Патент №2616024 РФ. Способ и устройство с глухим днищем для генерирования волн давления в стволе нагнетательной скважины / А. А. Абдрашитов, В. М. Бородин, Е. А. Марфин // №2016114638: заявл. 14.04.2016: опубл. 12.04.2017.
- 26А.Абдрашитов, А. А. Патент №2610045 РФ. Способ и устройство для совмещения парогравитационного дренажа с виброволновым воздействием на продуктивный пласт в условиях горизонтальных скважин / А. А. Абдрашитов, А. Р. Галимзянова, Р. Н. Гатауллин [и др.] // №2015123226: заявл. 16.06.2015: опубл. 07.02.2017.
- 27А.Абдрашитов, А. А. Патент №2610598 РФ. Способ и устройство двухкамерного струйного генератора Гельмгольца для генерирования волн давления на забое скважины / А. А. Абдрашитов, С. Я. Коханова, Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин // №2015120396: заявл. 28.05.2015: опубл. 14.02.2017.
- 28А.Абдрашитов, А. А. Патент №2637008 РФ. Способ и устройство струйного сотового параметрического излучателя для генерирования и модуляции волн

- давления в стволе нагнетательной скважины / А. А. Абдрашитов, Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин // №2016105182: заявл. 16.02.2016: опубл. 29.11.2017.
- 29А. Абдрашитов, А. А. Патент №2637009 РФ. Способ и устройство струйного параметрического излучателя с двумя тороидальными камерами для генерирования и модуляции волн давления в стволе нагнетательной скважины / А. А. Абдрашитов, Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин // №2016103468: заявл. 02.02.2016: опубл. 29.11.2017.
- 30А. Абдрашитов, А. А. Патент №2572250 РФ. Способ и устройство с кольцом для генерирования волн давления на забое скважины / А. А. Абдрашитов, С. Я. Коханова, Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин // №2014112905/03: заявл. 02.04.2014: опубл. 10.01.2016.
- 31А. Абдрашитов, А. А. Патент №2574889 РФ. Способ и устройство для нефтедобычи при низком пластовом давлении / А. А. Абдрашитов, С. Я. Коханова, Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин // №2014112906/03: заявл. 02.04.2014: опубл. 10.02.2016.
- 32А. Абдрашитов, А. А. Патент №2576736 РФ. Способ и устройство для генерирования волн давления в затрубном пространстве скважины / А. А. Абдрашитов, С. Я. Коханова, Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин // №2014112907/03: заявл. 02.04.2014: опубл. 10.03.2016.
- 33А. Абдрашитов, А. А. Патент №2540746 РФ. Способ и устройство для генерирования волнового поля на забое нагнетательной скважины с постоянной частотой генерации при изменяющемся пластовом давлении / А. А. Абдрашитов, С. Я. Коханова, Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин // №2013114341/03: заявл. 29.03.2013: опубл. 10.02.2015.
- 34А. Абдрашитов, А. А. Патент №2544200 РФ. Способ и устройство для генерирования волнового поля на забое нагнетательной скважины с автоматической настройкой резонансного режима генерации / А. А. Абдрашитов, С. Я. Коханова, Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин: №2013101083/03 // заявл. 09.01.2013: опубл. 10.03.2015.
- 35А. Абдрашитов, А. А. Патент №2544201 РФ. Способ и устройство для

генерирования волнового поля на забое нагнетательной скважины с автоматической настройкой постоянной частоты генерации / А. А. Абдрашитов, С. Я. Коханова, Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин // №2013101085/03: заявл. 09.01.2013: опубл. 10.03.2015.

36А. Абдрашитов, А. А. Патент №2555738 РФ. Способ и устройство для возбуждения волнового поля на забое нагнетательной скважины / А. А. Абдрашитов, С. Я. Коханова, Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин // №2012108912/03: заявл. 07.03.2012: опубл. 10.07.2015.

37А. Абдрашитов, А. А. Патент №2478438 РФ. Способ и комбинированное устройство для генерирования колебаний давления в потоке жидкости / А. А. Абдрашитов, С. Я. Коханова, Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин // №2011113353/28: заявл. 06.04.2011: опубл. 10.04.2013.

38А. Абдрашитов, А. А. Патент №2445595 РФ. Способ и стенд для испытания гидромеханического генератора колебаний давления в потоке жидкости / А. А. Абдрашитов, Я. И. Кравцов, О. В. Лукьянов [и др.] // №2010128592/28: заявл. 09.07.2010: опубл. 20.03.2012.

39А. Абдрашитов, А. А. Патент №2464109 РФ. Способ и устройство для генерирования колебаний давления в потоке жидкости / А. А. Абдрашитов, Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин // №2010120558/28: заявл. 21.05.2010: опубл. 20.10.2012.

40А. Абдрашитов, А. А. Патент №2464456 РФ. Способ и устройство для генерирования колебаний давления в потоке жидкости / А. А. Абдрашитов, С. Я. Коханова, Я. И. Кравцов, Е. А. Мафин // №2010149816/06: заявл. 03.12.2010: опубл. 20.10.2012.

Публикации в сборниках материалов международных и всероссийских конференций:

41А. Марфин, Е. А. Особенности газодинамики потока в струйном осцилляторе Гельмгольца с щелевой камерой / Е. А. Марфин, А. А. Абдрашитов // XXIII Междун. конф. по вычислительной механике и современным прикладным

- программным системам (ВМСППС'2023): Матер. конф., с. Дивноморское, Краснодарский край, 04–10 сентября 2023 г. – М.: МАИ, 2023. – С. 383-385.
- 42А. Марфин, Е. А. Струйная генерация звука в излучателе с щелевой камерой / Е. А. Марфин, А. А. Абдрашитов, Ю. С. Степанова // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: Сб. тр. 12-й Всеросс. науч. конф. с междун. уч. им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, Москва, 15–17 ноября 2022 года. – М.: ООО "Сам Полиграфист", 2022. – С. 294-302.
- 43А. Marfin, E. A. Numerical simulation of gas-dynamics in a jet emitter with a slit chamber / E. A. Marfin, A. A. Abdrashitov // XXI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022): Abstracts, Novosibirsk, 08–14 августа 2022 года. –Vol. Part I. – Новосибирск: ФГБУ СО РАН, 2022. – Р. 130-131. – DOI 10.53954/9785604788967_130.
- 44А. Abdrashitov, A. A. Investigation of the development of the frequency spectrum of an acoustic signal with a smooth increase in the speed of a free isothermal jet in a resonating chamber using a Robotron measuring microphone / A. A. Abdrashitov, E. A. Marfin, E. A. Plakhova // XXI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022): Abstracts , Novosibirsk, 08–14 августа 2022 года. Vol. Part I. – Новосибирск: ФГБУ СО РАН, 2022. – Р. 3-4. – DOI 10.53954/9785604788967_3.
- 45А. Абдрашитов, А. А. Особенности генерации звука струйным осциллятором Гельмгольца / А. А. Абдрашитов, Е. А. Марфин, Е. А. Плахова // Защита от повышенного шума и вибрации: Сб. тр. Всеросс. науч.-практ. конф. с междун. уч., Санкт-Петербург, 23–25 марта 2021 года. – Санкт-Петербург: Институт акустических конструкций, 2021. – С. 111-117.
- 46А. Abdrashitov, A. A. Experimental study of the jet-driven Helmholtz oscillator / A. A. Abdrashitov, E. A. Marfin, E. A. Plakhova // AIP Conference Proceedings, Novosibirsk, 01–07 ноября 2020 года. Vol. 2351. – Novosibirsk: American Institute of Physics Inc., 2021. – Р. 040059. – DOI 10.1063/5.0052206.
- 47А. Абдрашитов, А. А. Влияние формы сопла на генерацию звука в струйном

- осцилляторе Гельмгольца / А. А. Абдрашитов, Е. А. Марфин, Е. А. Плахова // Матер. XIII Междун. конф. по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАИ'2020), Алушта, 06–13 сентября 2020 года. – М.: МАИ, 2020. – С. 23-25.
- 48А. Абдрашитов, А. А. Скважинный излучатель для создания поля упругих колебаний в геологической среде / А. А. Абдрашитов, Е. А. Марфин // Инженерная и рудная геофизика 2020: 16-я науч.-практ. конф. Пермь, 14–18 сентября 2020 года. – Пермь: ООО "ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ", 2020. – С. 86. – DOI 10.3997/2214-4609.202051109.
- 49А. Abdrashitov, A. A. Influence of the nozzle shape on sound generation in a jet-driven Helmholtz oscillator / A. A. Abdrashitov, E. A. Marfin, E. A. Plakhova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 13, Alushta, 06–13 сентября 2020 года. – Alushta, 2020. – P. 012061. – DOI 10.1088/1757-899X/927/1/012061.
- 50А. Abdrashitov, A. Improving the efficiency of the downhole radiator for acoustic impact on the formation / A. Abdrashitov, E. Marfin // Tyumen 2019: 6th Conference, Tyumen, 25–29 марта 2019 года. – Tyumen: EAGE Publications BV, 2019. – DOI 10.3997/2214-4609.201900553.
- 51А. Абдрашитов, А. А. Гидродинамика цилиндрического сопла струйного резонатора Гельмгольца / А. А. Абдрашитов, В. Л. Варсегов // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: Сб. тр. 9-й всеросс. науч. конф. с междун. уч. им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, посвященной 30-летию ИПРИМ РАН, Москва, 19–21 ноября 2019 года. – М.: ООО "Сам Полиграфист", 2019. – С. 12-16.
- 52А. Абдрашитов, А. А. Струйный резонатор Гельмгольца для генерации упругих волн в призабойной зоне продуктивного пласта / А. А. Абдрашитов, В. Л. Варсегов, Е. А. Марфин // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: Сб. тр. 9-й всеросс. науч. конф. с междун. уч. им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, посвященной 30-летию ИПРИМ РАН, Москва, 19–21 ноября 2019 года. – М.: ООО "Сам

Полиграфист", 2019. – С. 7-11.

- 53А. Абдрашитов, А. А. Вихревые структуры в струйном акустическом резонаторе / А. А. Абдрашитов, Е. А. Марфин, А. И. Кадыйров // Матер. XII Междун. конф. по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018), Алушта, 24–31 мая 2018 года. – Алушта: МАИ, 2018. – С. 23-25.
- 54А. Kravtsov, Y. I. Development of the oscillator of pressure fluctuations for solution oilfield and geophysical problems / Y. I. Kravtsov, E. A. Marfin, A. A. Abdrashitov // Engineering Geophysics 2017: Conference Proceedings: electronic publishing, Kislovodsk, 24–28 апреля 2017 года. – Kislovodsk: European Association of Geoscientists & Engineers, 2017. – DOI 10.3997/2214-4609.201700404.
- 55А. Моделирование генерации колебаний в проточном излучателе на основе струйных резонаторов Гельмгольца / А. А. Абдрашитов, Е. А. Марфин, Д. В. Чачков, Я. И. Кравцов // Матер. XX Юбил. Междун. конф. по вычислительной механике и современным прикладным системам (ВМСППС'2017), Алушта, 24–31 мая 2017 года. – Алушта: Изд-во МАИ-Принт, 2017. – С. 353-355.
- 56А. Кравцов, Я. И. Пульсирующее течение газа в акустическом резонаторе / Я. И. Кравцов, Е. А. Марфин, А. А. Абдрашитов // Матер. XI Междун. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016), Алушта, 25–31 мая 2016 года. – Алушта: Издательство МАИ, 2016. – С. 185-187.
- 57А. Абдрашитов, А. А. О методе расчёта частоты собственных колебаний акустического резонатора, заимствованном из механики твёрдого тела / А. А. Абдрашитов, В. М. Бородин, Е. А. Марфин // XI Всеросс. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сб. докл., Казань, 20–24 августа 2015 года. – Казань: К(П)ФУ, 2015. – С. 24-27.
- 58А. Марфин, Е. А. Собственные колебания газа в проточном резонаторе / Е. А. Марфин, А. А. Абдрашитов // Матер. XIX Междун. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015), Алушта, 24–31 мая 2015 года. – Алушта: МАИ, 2015. – С. 490-492.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А – Материалы экспериментов

Таблица А1. Результаты экспериментов с соплом №2 ($d_1=12 \times 4$ мм) при длине выходного отверстия d_2/d_1 и камеры L/d_1

	$L/d_1=0,5$			$L/d_1=1$			$L/d_1=1,5$			$L/d_1=2$			$L/d_1=2,5$		
	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па
$d_2/d_1=0,83$	Тон отверстия 3,1→5,9 м/с (363→644) Гц			Тон отверстия 1,9→4,9 м/с (159→502) Гц			Тон отверстия 1,8→4,3 м/с (107→330) Гц			Тон отверстия 1,3→5,6 м/с (78→263) Гц			Тон отверстия 0,9→4,9 м/с (49→193) Гц		
	5,9→8,9	991→1328	5,3	4,9→6,3	791 ~ 823	2,6	4,3→4,6	694→705	1,2	Первая мода исчезла			Первая мода исчезла		
	9,3→12,8	1042→1245	14	8,3→19,6	495→1084	60	6,8→18,5	616→766	87	5,6→7	544→590	5,6	4,9→7,4	385→578	7,2
	12,8→32	825→1188	530	19,6→32	764→1088	50	→ Части моды слились			8→13	593→627	23	7,9→9,8	516→583	12
				Группа поделилась иначе			и снова раздробились →			13→19,5	571→697	183	9,8→20	532→646	148
$d_2/d_1=1,0$	Тон отверстия 2,3→6,1 м/с (151→319) Гц			Тон отверстия 1,8→5,6 м/с (149→371) Гц 5,8→7,6 м/с (117→251) Гц			Тон отверстия 1,6→4,3 м/с (117→251) Гц 4,6→7,4 м/с (117→251) Гц			Тон отверстия 1,4→6 м/с (131→275) Гц			Тон отверстия 1,0→5,7 м/с (73→215) Гц		
	6,1→8,7	1068→1174	4,5	5,6→5,8	864→878	2,7	4,3→4,6	727→732	1,3	Первая мода исчезла			Первая мода исчезла		
	8,7→12,4	891→1181	20	7,6→9,6	748→842	13,6	7,4→	Моды слились		6→7,6	576→646	7,6	5,7→23	446→870	194
	14,6→35	798→1196	553	9,6→21	645→1091	73	→18,5	666→770	213	7,9→	Моды слились		↑ Непрерывная мода ↑		
	Мода поделилась →			21→29,5	815→1035	26	18,5→26	954→1105	26	→21,6	593→737	201			
$d_2/d_1=1,17$	Тон отверстия 2,2→6,6 м/с (75→388) Гц			Тон отверстия 1,8→5,1 м/с (61→363) Гц			Тон отверстия 1,7→4,4 м/с (117→236) Гц			Тон отверстия 1,6→3,8 м/с (53→196) Гц			Тон отверстия 1,4→3,7 м/с		
	6,6→7,7	1071→1132	6,5	5,1→6,9	869→949	7,4	4,4→5,4	737→754	5	3,8→4,5	652→662	1,6	3,7→4,3	595→600	1,8
	10,4→15	1015→1164	24	8,2→12,7	800→888	16	→ Моды слились.....			6,2→23,7	583→771	226	6→24	498→715	200
	15→37,5	822→1198	573	12,7→20	791→915	173	7,3→22	669→812	272	23,7→28	1002→1020	12	24→33	527→632	50
				20→29	856→1027	23	и снова разделились →			28→35	629→752	43	Три части слились в две		
$d_2/d_1=1,33$	Тон отверстия 2,2→6,7 м/с (26→58) Гц 8→11 м/с (скачет) Гц			Тон отверстия 2→5,2 м/с (18→34) Гц 6,5→10,2 м/с (18→34) Гц			Тон отверстия 1,9→4,6 м/с (17→123) Гц 5,6→8,1 м/с (17→123) Гц			Тон отверстия 1,6→4,4 м/с (73→113) Гц 4,7→7 м/с (17→123) Гц			Тон отверстия 1,4→3,4 м/с 4,2→6,5 м/с (17→123) Гц		
	6,7→8	1093→1170	5,3	5,2→6,5	883→917	5,3	4,6→5,6	766→788	5,7	4,4→4,7	695→705	6	3,4→4,2	622→634	2,5
	11→15,2	1022→1247	7,4	10,2→16	842→908	28	8,1→22,5	700→825	188	7→24	632→776	250	6,5→25	578→734	215
	17,7→38	913→1188	553	16→22,5	878→1010	252									
$d_2/d_1=1,5$	Тон отверстия 2,8→7,5 м/с (46→166) Гц			Тон отверстия 2→5,6 м/с (39→61) Гц			Тон отверстия 1,5→4,9 м/с (19→34) Гц			Тон отверстия 1,1→8,2 м/с (53→224) Гц			Тон отверстия 0,8→8 м/с (53→224) Гц		
	7,5→8,2	1259→1271	0,8	5,6→6,6	949→969	4,4	4,9→5,7	805→840	7,5	Первая мода исчезла			Первая мода исчезла		
	14,2→15	1254→1257	1,5	10→21,7	754→1044	168	8,3→16,7	744→856	103	8,2→18	637→786	67	8→18,4	627→739	52
	15,6→33	974→1379	138	21,7→27	957→1060	12	17,2→23	812→871	239	20,5→23	734→783	242			
							23→24,5	1005→102	103						

Таблица А2. Результаты экспериментов с соплом №3 ($d_1=12 \times 5,6$ мм) при длине выходного отверстия d_2/d_1 и камеры L/d_1

	$L/d_1=0,5$			$L/d_1=1$			$L/d_1=1,5$			$L/d_1=2$			$L/d_1=2,5$			$L/d_1=3$		
	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	A, Па	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	A, Па	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	A, Па	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	A, Па	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	A, Па	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	A, Па
$d_2/d_1=1.0$	Тон отверстия 2,4→6,9 м/с (141→593) Гц			Тон отверстия 1,4→5,8 м/с (117→375) Гц			Тон отверстия 1,4→5,1 м/с (127→249) Гц			Тон отверстия 1,3→4,9 м/с (102→202) Гц			Тон отверстия 1,2→4 м/с (83→148) Гц			Тон отверстия 1,6→3,8 м/с (65→120) Гц		
	6,9→12,4	993→1154	13,3	5,8→9	761→986	8	5,1→8,2	651→876	6,5	Мода выродилась			Мода выродилась			Мода выродилась		
	12,4→14	991→1025	4,3	9→19,6	568→949	41	8,2→11,6	417→676	8	4,9→7,8	597→751	6	4→6,8	520→686	6	3,8→6,6	480→703	5,6
	14→47,5	996→1596	513	21,5→50	710→1125	421	11,6→21	522→913	97	8,9→24,5	505→722	166	7,6→27	456→715	185	8→27,5	463→678	170
				Мода поделилась иначе			26→44	693→1020	48									
$d_2/d_1=1.33$	Тон отверстия 1,6→7,1 м/с (70→~) Гц			Тон отверстия 1,7→6 м/с (51→~) Гц			Тон отверстия 1,5→5,4 м/с (48→~) Гц			Тон отверстия 1,4→4,8 м/с (41→~) Гц			Тон отверстия 0,8→4,2 м/с (34...95) Гц			Тон отверстия 1,1→3,9 м/с (31...73) Гц		
	7,1→11,8	932→1254	14	6→10	798→1030	13	5,4→8,8	710→939	8,7	4,8→8	638→866	8,6	4,2→7,6	581→788	7,8	3,9→7,2	532→785	3
	21→72	954→1958	566	17→23,5	600→947	130	15→28	703→986	215	10→31	642→965	241	8,9→30,5	544→771	215	9→30,5	498→747	143
	Мода разделяется →			27,5→60	917→1364	494	Вторая часть исчезла			Мода расширилась								
$d_2/d_1=1.6$	Тон отверстия 4,4→8,6 м/с (170...302) Гц			Тон отверстия 2,4→6,8 м/с (73...207) Гц			Тон отверстия 1,6→6 м/с (51 ~) Гц			Тон отверстия 1,3→5,6 м/с (41...139) Гц			Тон отверстия 1,3→4,8 м/с (39 ~) Гц			Тон отверстия 1,2→4,5 м/с (36...90) Гц		
	8,6→14,8	1110→1657	11	6,8→11,8	910→1335	9,4	6→10,4	788→1142	7,5	5,6→9,4	695→1064	5,5	4,8→9	625→1066	7,5	4,5→8,1	588→836	5,5
	28→72	1184→1962	525	21,7→72	922→1680	420	15,9→30	771→917	200	14,7→30	656→854	230	9→30	588→766	217	11,2→20	581→632	75
$d_2/d_1=2.0$	Генерация струи не наблюдается до первой моды			Генерация струи наблюдается, но прыгает по частоте			Генерация струи неустойчива 2,7→6,8 м/с			Генерация струи неустойчива 1,9→6 м/с			Генерация струи неустойчива 1,7→5,5 м/с			Генерация струи неустойчива 1,5→4,9 м/с		
	9,2→15,5	1184→1867	3,1	7,7→11,2	971→1254	7,7	6,8→9,9	837→1013	6,2	6→8,6	773→942	4,5	5,5→8	700→876	4,2	4,9→7,8	638→825	5,3
	31,7→72	1186→1975	375	25→72	1035→1745	367	19,2→31	874→1025	132	18→30	791→876	164	18→29	744→781	210	11,9→23	630→696	122
$d_2/d_1=2.3$	Генерация струи не наблюдается до первой моды			Генерация струи не наблюдается до первой моды			Генерация струи не наблюдается до первой моды			Генерация струи не наблюдается до первой моды			Генерация струи не наблюдается до первой моды					
	9,7→16	1145→1914	4,1	8,1→14,3	1044→1687	5,7	7,3→10	917→1088	6,2	6,3→9,1	808→1008	5,5	5,8→8,4	766→944	4,2			
	34→72	1200→2065	433	26,6→31	1066→1103	67	20,2→32	915→1022	148	21→34	832→1027	125	17,6→29	788→905	75			
				34→65	1110→1660	230	52→55	917→1257	46									

Таблица А3. Результаты экспериментов с соплом №3 ($d_1=12 \times 8$ мм) при длине выходного отверстия d_2/d_1 и камеры L/d_1

	$L/d_1=0,5$			$L/d_1=1$			$L/d_1=1,5$			$L/d_1=2$			$L/d_1=2,5$			$L/d_1=3$		
	W , м/с	f , Па	A , Па	W , м/с	f , Па	A , Па	W , м/с	f , Па	A , Па	W , м/с	f , Па	A , Па	W , м/с	f , Па	A , Па	W , м/с	f , Па	A , Па
$d_2/d_1=1,0$	Тон отверстия 2→5,7 м/с (163...407) Гц			Тон отверстия 1,6→4,8 м/с (113...253) Гц			Тон отверстия 1,5→4 м/с (119...158) Гц			Тон отверстия 1,4→5,2 м/с (100...202) Гц			Тон отверстия 1,5→3,6 м/с (90...102) Гц			Тон отверстия 1,4→3,4 м/с (48...98) Гц		
	5,7→7	993→1154	3,3	4,8→5,9	783→879	1	4→4,7	664→710	1,5	Мода выродилась			Мода выродилась			Мода выродилась		
	8,9→11,7	991→1025	12,3	6,8→13,5	710→961	31	5,5→11,3	578→893	16	5,2→11	507→826	8	3,6→4,1	529→546	0,6	3,4→3,6		
	11,7→20	996→1596	105	13,5→18	632→822	21	11,3→20	500→749	110	11→26,5	422→722	124	4,6→9,7	466→646	10,6	4,4→9,5	412→732	8
	31→60	915→1262	395	20→58	610→1118	310	20→56	539→993	214	30→50	581→822	76	14,4→30	407→710	136	16→29	417→629	120
$d_2/d_1=1,17$	Тон отверстия 1,5→6 м/с			Тон отверстия 1,5→4,8 м/с			Тон отверстия 1,9→4,3 м/с			Тон отверстия 1,6→3,7 м/с			Тон отверстия 1,4→3,5 м/с			Тон отверстия 1,4→3,3 м/с		
	6→8	1020→1242	3,5	4,8→6,5	822→990	1,7	4,3→5,3	686→756	2,3	3,7→4,2			3,5→4,2	566→569	0,8	3,3→3,9		
	9,5→18,3	944→1170	70	7,5→12	871→905	36	5,9→11,3	607→880	20	5,2→11,3	527→866	17	5→10,3	470→770	14	4,7→9,7	456→750	12
	20,3→71	880→1557	531	12→18,5	670→832	20	11,3→25	476→795	164	14,2→28	476→740	190	14,7→30	446→715	193	16,8→30	450→678	175
				27,5→63	693→1170	424	26→64	595→1115	284	28→58	566→905	146						
$d_2/d_1=1,33$	Тон отверстия 2,2→6 м/с (61...166) Гц			Тон отверстия 1,6→5,3 м/с (70...126) Гц			Тон отверстия 2→4,6 м/с (53...96) Гц			Тон отверстия 1,5→4,2 м/с (51...130) Гц			Тон отверстия 1,7→3,7 м/с (39...68) Гц			Тон отверстия 1,7→3,7 м/с (31...102) Гц		
	6→7,7	1042→1250	3,5	5,3→7,1	874→1037	9,4	4,6→5,9	737→803	2,7	4,2→4,5	651→678	1,6	3,7→4,5	590→630	1,8	3,7→4,3	534→585	0,8
	10→18,3	1040→1423	43	8→15,6	793→1157	33	6,5→12,7	664→944	22	6→11,6	590→915	17	5,2→11	520→830	18	5,2→10,5	493→816	13
	37→72	1022→1662	557	20→72	781→1435	451	17→29,6	649→812	176	15→29	529→764	216	14→32	397→742	218	13,7→17	493→524	62
				Мода разделяется →			29,7→70	634→1176	335	29→60	581→942	172	32→61	548→883	75	18→34	502→705	201
$d_2/d_1=1,5$	Тон отверстия 2,2→6,5 м/с			Тон отверстия 2→5,5 м/с			Тон отверстия ?→4,9 м/с			Тон отверстия 2→4,4 м/с			Тон отверстия 1,7→4,1 м/с			Тон отверстия 2,2→3,7 м/с		
	6,5→8,1	1125→1352	3,3	5,5→7,4	893→1079	2,3	4,9→5,9	786→825	1,7	4,4→4,7			4,1→4,4			3,7→5,3	578→646	0,5
	11,1→20	1067→1547	49	8,4→16	871→1252	28	7→13,5	713→1035	19	6→12,6	622→973	16	5,6→11,8	537→900	15	5,3→11	507→817	13
	37→71	1059→1655	534	20→72	817→1442	470	18,5→26	700→817	116	15,6→31	512→795	197						
							33,5→71	686→1250	270	31→66	605→1015	166	16→33	527→756	255	17,6→34	500→683	208
$d_2/d_1=1,67$	Тон отверстия 2,5→6,7 м/с (85...534) Гц			Тон отверстия 1,8→5,5 м/с (51...463) Гц			Тон отверстия 2,2→5 м/с (70...113) Гц			Тон отверстия 1,8→4,5 м/с (48...92) Гц			Тон отверстия 2,2→3,9 м/с (63...75) Гц			Тон отверстия 2,2→3,6 м/с (48...63) Гц		
	6,7→8,6	1130→1354	2,2	5,5→6,7	944→1059	1,4	5→5,4	817→834	1,5	4,5→4,8	730→742	1	3,9→4,3	642→700	1	3,6→4,2	595→666	0,5
	8,6→18,8	717→1506	45	8,7→15,8	910→1250	30	7,6→14,5	750→1127	19	6,4→12,8	670→1052	17	5,9→12,4	595→944	15	5,3→11,6	541→866	14
	40→72	1069→1586	557	37,5→71	905→1445	452	19,3→69	720→1259	230	17→31,5	627→817	202	19→33,5	603→769	220	22→33,7	581→720	200
										34→67	632→1052	126	36→60	612→871	42			
$d_2/d_1=1,83$	Тон отверстия 3,5→7 м/с (278→550) Гц			Тон отверстия 2,7→6 м/с (70→~) Гц			Тон отверстия 3,4→5 м/с с (85→~) Гц			Тон отверстия 1,6→4,6 м/с			Тон отверстия 2,0→4,1 м/с			Тон отверстия 2,1→3,8 м/с		
	7→9	1130→1362	2,6	6→7,1	966→1083	2,7	5→6,2	825→874	1	4,6→4,8	747→769	1,1	4,1→4,3	666→686	0,9	3,8→4,1	622→737	0,5
	11,4→20	1069→1633	47	9,3→16	820→1252	36	8→14,3	794→1127	21	6,6→12,6	694→1013	17	6→12	622→915	14	5,4→10,9	544→871	14
	40→72	1103→1582	569	37→72	900→1435	424	36→72	786→1270	244	19,6→33	678→827	192	20→34	637→776	217	16→34,5	537→739	214
							Мода разделяется →			35→70	695→1018	102	→ Часть моды исчезает					

Таблица А4. Результаты экспериментов с соплом №6 ($d_1=12 \times 10$ мм) при длине выходного отверстия d_2/d_1 и длине камеры L/d_1

	$L/d_1=0,5$			$L/d_1=1$			$L/d_1=1,5$			$L/d_1=2$			$L/d_1=2,5$		
	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па
$d_2/d_1=0,83$	Тон отверстия 2,4→3,7 м/с (275...373) Гц			Тон отверстия 2→4,8 м/с (117...229) Гц			Тон отверстия 1,6→4,2 м/с (122...217) Гц			Тон отверстия 1,3→3,8 м/с (85...190) Гц					
	3,7→26,2	230→1477	153	<i>Мода раздробилась</i>			<i>Мода раздробилась</i>			<i>Мода раздробилась</i>			<i>Мода раздробилась</i>		
				4,8→7,2	678→817	3,5	4,2→6,4	600→737	3,8	3,8→5	515→593	3,5			
				7,4→13,8	612→893	44	7→8,8	571→632	6,2	5,5→13	471→649	18			
				13,8→20	686→886	65	8,8→15	576→800	29	13→18	451→578	6,5			
$d_2/d_1=1,0$	Тон отверстия 2,4→6,3 м/с (153...393) Гц			Тон отверстия 1,8→5 м/с (123...229) Гц			Тон отверстия 1,6→4,6 м/с (109...224) Гц			Тон отверстия 1,4→4,2 м/с (87...187) Гц			Тон отверстия 1,1→3,8 м/с (61...158) Гц		
	6,3→9,2	898→1132	8,3	5→7,6	710→896	4,3	4,6→6,7	617→770	3,5	4,2→6,3	534→703	3,8	3,8→5,4	485→590	5,6
	9,3→28	634→1425	152	7,6→16	603→981	50	7,1→15	551→783	35	6,3→12,3	495→737	18	5,7→9,9	456→588	15
				16→20	732→864	44	15,2→20	556→688	65	<i>Мода неустойчива</i>					
$d_2/d_1=1,17$	Тон отверстия 2→5,8 м/с (149...349) Гц			Тон отверстия 1,7→5,2 м/с (103...243) Гц			Тон отверстия 1,6→4,9 м/с (129...213) Гц			Тон отверстия 1,4→4,2 м/с (87...158) Гц			Тон отверстия 1,2→4 м/с (73...168) Гц		
	5,8→6,4	1047→1098	1,5	<i>Мода выродилась</i>			<i>Мода выродилась</i>			<i>Мода выродилась</i>			<i>Мода выродилась</i>		
	6,7→10,2	960→1213	11	5,2→8,4	742→850	6,7	4,9→7,1	644→795	4,3	4,2→6,7	576→722	2,8	4→6	510→639	7,8
	10,2→28	686→1503	180	8,4→17,2	886→905	63	7,1→11,7	622→732	23	6,8→12,8	541→615	18	6→11,6	483→607	19
							11,7→16	693→786	27	14,6→25	410→654	78	16→24	473→583	75
$d_2/d_1=1,33$	Тон отверстия 2→6,1 м/с (100...367) Гц			Тон отверстия 1,8→4,4 м/с (104...212) Гц			Тон отверстия 2→5 м/с (100...184) Гц			Тон отверстия 2→4,7 м/с (120...146) Гц			Тон отверстия 2→4,2 м/с (97...117) Гц		
	6,1→7,4	1088→1300	1,5	4,4→4,9	861→889	0,7	<i>Мода выродилась</i>			<i>Мода выродилась</i>			<i>Мода выродилась</i>		
	7,4→10	1040→1250	11	5,4→8,7	788→959	7,4	5→8	673→898	5,7	4,7→7,3	600→812	6	4,2→6,7	539→715	7,8
	10→28	747→1523	168	8,7→18	720→1008	59	8→14,8	655→790	28	7,3→13,6	578→837	32	6,7→12,2	513→705	25
							16→29	610→808	92	13,8→27	476→703	134	16,3→27	446→620	108

Таблица А5. Результаты экспериментов с соплом №7 ($d_1=12 \times 16$ мм) при длине выходного отверстия d_2/d_1 и длине камеры L/d_1

	$L/d_1=0,5$			$L/d_1=1$			$L/d_1=1,5$			$L/d_1=2$			$L/d_1=2,5$		
	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	$A, \text{ Па}$	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	$A, \text{ Па}$	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	$A, \text{ Па}$	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	$A, \text{ Па}$	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	$A, \text{ Па}$
$d_2/d_1=0,83$	Тон отверстия 2→9 м/с (161...302) Гц			Тон отверстия 1,7→7 м/с (75...295) Гц			Тон отверстия 1,6→6 м/с (61...224) Гц			Тон отверстия 1,3→4,7 м/с (70...178) Гц					
	9→13,3	815→1013	3	7→9,3	642→790	4,5	6→7,6	554→610	3	4,7→7	464→559	5			
	13,3→28	708→1247	216	11→12	661→698	10,4	7,6→	Слияние мод		7→17,3	343→705	34			
	Мода разделяется на две			12→24	524→874	94	→16	393→727	36						
$d_2/d_1=1,0$	Тон отверстия 1,8→8,5 м/с (161...446) Гц			Тон отверстия 1,5→7,3 м/с (109...307) Гц			Тон отверстия 1,6→4,4 м/с (65...151) Гц			Тон отверстия 1,4→3,9 м/с (58...173) Гц			Тон отверстия 1,3→3,5 м/с (51...139) Гц		
	8,5→14,3	771→1098	13	7,3→10,8	683→869	3	4,4→5,4	598→661	0,5	3,9→4,7	512→581	0,8	3,5→4,2	466→502	0,4
	14,8→30	773→1213	198	11→14,4	685→791	22	5,6→8,4	566→683	3	5→7,7	478→627	3	4,7→7,1	444→571	2,3
	Мода разделяется на две			14,8→27	620→935	122	8,6→17	444→756	50	8,3→10	507→532	5	7,6→12	397→562	21
				Мода разделяется на две			17→24	576→703	62	10→17	485→678	44	12→16	485→598	15
$d_2/d_1=1,17$	Тон отверстия 2→7,1 м/с (83...460) Гц			Тон отверстия 1,6→5,4 м/с (117...214) Гц			Тон отверстия 1,6→4,5 м/с (65...158) Гц			Тон отверстия 1,5→4,1 м/с (63...183) Гц			Тон отверстия неустойчивый		
	7,1→8,7	991→1101	2,5	5,4→6,8	742→850	1,7	4,5→6,1	627→725	1,3	4,1→5,5	546→627	0,8	3,6→4,8	498→541	0,8
	9→15,7	793→1242	26	7→11	706→905	10	6,1→9,4	605→756	10,5	5,5→8,5	527→668	6,4	4,8→7,3	422→588	4
	16→33	886→1279	268	11,2→17	690→820	48	9,4→17,6	493→766	50	8,5→17,2	512→688	72	7,5→12,6	417→578	30
	Мода разделяется на две			17→30	664→922	184	17,6→28	593→754	192	19,2→26	505→628	153	12,6→17	502→603	24
$d_2/d_1=1,33$	Тон отверстия 2→5,8 м/с (83...454) Гц			Тон отверстия 1,9→5,5 м/с (87...351) Гц			Тон отверстия 1,9→4,8 м/с (75...170) Гц			Тон отверстия 1,6→4,3 м/с (63...104) Гц			Тон отверстия 1,6→3,9 м/с (51...92) Гц		
	5,8→6,5	1032→1093	0,4	Мода исчезла			Мода исчезла			Мода исчезла			Мода исчезла		
	7,4→9,4	1015→1181	2,5	5,5→7,9	788→959	1,7	4,8→6,6	654→812	0,7	4,3→6	581→732	1,5	3,9→5,3	527→617	0,8
	9,4→16,2	817→1328	26	7,9→12,2	720→1008	6	6,6→10,2	649→830	5,3	6→9	585→727	6,5	5,3→8,1	522→661	4
	16,3→33	993→1271	225	13,2→16	764→844	29	11,1→18	607→800	70	9,7→18	554→720	64	8,3→13,5	583→620	35
	Мода разделяется на две			20→31,2	783→947	115	19→31,2	637→805	147	19,3→27	549→651	132	13,8→18	544→612	16
$d_2/d_1=1,5$	Тон отверстия 1,6→5,6 м/с (61...263) Гц			Тон отверстия 1,8→5,5 м/с (82...385) Гц			Тон отверстия 2→4,7 м/с (78...350) Гц			Тон отверстия →4,3 м/с (...178) Гц					
	5,6→6,7	1042→1130	0,6	Мода исчезла			Мода исчезла			Мода исчезла					
	7,3→9,3	1047→1210	2,3	5,5→8	827→986	1,3	4,7→7	666→837	0,7	4,3→6,2	605→751	1			
	9,3→15,5	852→1271	13	8→12,5	770→1035	7,6	7→10,5	646→857	5	6,4→9,2	606→812	5,7			
	19,4→34	1022→1269	160	Мода исчезла			11,5→20	642→801	58	9,8→18,8	605→744	33			

Таблица А6. Результаты экспериментов с соплом №7 ($d_1=12 \times 25$ мм) при длине выходного отверстия d_2/d_1 и длине камеры L/d_1

	$L/d_1 = 0,5$			$L/d_1 = 1$			$L/d_1 = 1,5$			$L/d_1 = 2$			$L/d_1 = 2,5$		
	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па
$d_2/d_1 = 0,83$	Тон отверстия 2,2→12,5 м/с (183...971) Гц			Тон отверстия 2,1→5,9 м/с (153...297) Гц			Тон отверстия 2→5,2 м/с (129...234) Гц			Тон отверстия 1,7→4,3 м/с (100...117) Гц					
	12,5→19	805→1052	81	5,9→7,3	673→793	1,3	5,2→5,5	612→615	0,4	4,3→4,6	490→498	0,3			
				7,3→13	653→801	15	6,1→8	536→673	3	5,3→6,4	480→530	1,1			
				13→17	662→788	27	8→12,5	510→688	19	7,2→9,1	461→546	4,6			
							12,5→16	564→678	34	9,1→11,3	486→540	12			
							19,2→25	571→664	99	11,3→19	450→620	62			
$d_2/d_1 = 1,17$	Тон отверстия 2,2→6,8 м/с (176...408) Гц			Тон отверстия 2,1→6,3 м/с (148...302) Гц			Тон отверстия 2→5,1 м/с (158...219) Гц			Тон отверстия 1,9→4,6 м/с (109...118) Гц			Тон отверстия 1,7→3,6 м/с (90...151) Гц		
	6,8→7,4	910→961	0,3	6,3→7,2	710→803	2,2	5,1→6	604→645	0,8	4,6→5,6	530→564	0,8	3,6→3,9	478→489	0,4
	7,8→9,3	917→998	2,8	7,2→9,7	702→763	4	6,5→8,4	596→678	5,8	5,8→7,5	516→583	3	4,3→5	476→507	0,7
	10,4→13	894→1008	14,3	9,7→13,3	662→812	33	8,8→13	540→688	36	7,9→10	504→586	10	5,4→6,8	474→516	2,5
	13,5→20	830→1083	124	13,3→17	690→778	54	13→17,5	578→693	86	10→11,5	527→546	14	7,2→9,8	426→520	9
				20→36	693→839	373	19,5→35	556→744	298	12→19	474→640	120	10→11,6	464→496	19
$d_2/d_1 = 1,33$	Тон отверстия 2,3→6,5 м/с (83...467) Гц			Тон отверстия 2,1→6,3 м/с (129...163) Гц			Тон отверстия 2,2→5,4 м/с (103...154) Гц			Тон отверстия 2,2→5 м/с (58...122) Гц			Тон отверстия 2,1→4,5 м/с (56...100) Гц		
	6,5→7,7	1015→1060	0,7	Мода исчезла			Мода исчезла			Мода исчезла			Мода исчезла		
	8→9,6	964→1086	1,7	6,3→8	764→876	1,4	5,4→6,4	632→742	0,7	5→5,6	581→612	0,6	4,5→5,5	515→573	0,8
	10→12,7	925→1027	6,8	8,2→10,1	749→817	3,2	7,3→9,3	637→722	3,8	6,1→8	534→644	3	5,9→7,6	515→576	2,5
	13,8→21	907→1096	84	10,3→14	671→847	22	10→13,3	627→720	19	8,3→10,7	476→703	10	8→10,3	505→571	8
				24→38	791→920	384	14→19	620→732	63	13,4→20	506→666	135	10,8→12	505→534	6
$d_2/d_1 = 1,5$	Тон отверстия 2,7→7,3 м/с (90...170) Гц			Тон отверстия 2,4...5,9 м/с (114...170) Гц			Тон отверстия 2→5,8 м/с (65...173) Гц			Тон отверстия 2→5,1 м/с (58...136) Гц			Тон отверстия 1,6→4,4 м/с (58...114) Гц		
	7,3→8,3	1047→1105	0,4	5,9→6,8	810→874	0,3	Мода исчезла			Мода исчезла			Мода исчезла		
	8,9→10,7	1037→1171	1,6	6,8→8,6	763→953	0,8	5,8→7,3	686→783	0,4	5,1→6,1	597→663	0,3	4,4→5,9	534→581	0,4
	11→14	947→1166	5	8,8→10,8	776→901	2	7,3→9,4	659→766	1,7	6,1→8,2	566→683	2,6	5,8→7,8	524→613	1,6
	16→22,2	998→1168	44	11,6→15	732→886	6,2	10,4→14	683→764	4	8,2→12	444→756	7,3	8→10,7	510→596	4,2
				28→38,5	825→945	102	25→37	666→815	225	15,5→21	576→700	90	14→21	516→620	78
										24,5→36	588→698	308	26→34	537→600	157

Таблица А7. Результаты экспериментов с соплом №7 ($d_1=12 \times 25$ мм) при длине выходного отверстия d_2/d_1 и длине камеры L/d_1

	$L/d_1=0,5$			$L/d_1=1$			$L/d_1=1,5$			$L/d_1=2$			$L/d_1=2,5$		
	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па
$d_2/d_1=1,0$	Тон отверстия 2,4→16,2 м/с (193...957) Гц			Тон отверстия 2,4→5,7 м/с (143...317) Гц			Тон отверстия 2,3→5,6 м/с (117...204) Гц			Тон отверстия 2→5,5 м/с (120...245) Гц					
	Резонанс наступает при скорости струи ~ 11 м/с			5,7→11,7	646→732	13,6	5,6→8,7	495→580	2,6	5,5→6,2	480→508	0,8			
	на 750 Гц			12→13,5	643→701	15,8	9,3→	Моды сомкнулись		6,8→8,3	458→512	3			
				13,5→20	576→725	63	→14,3	460→667	36	8,3→13,3	378→540	27			
$d_2/d_1=1,17$	Тон отверстия 2,8→7 м/с (106...408) Гц			Тон отверстия 2,3→6,2 м/с (122...278) Гц			Тон отверстия 2,3→5,4 м/с (130...239) Гц			Тон отверстия 1,9→4,6 м/с (119...128) Гц			Тон отверстия 1,4→4,2 м/с (90...151) Гц		
	7→7,6	860→914	0,3	6,2→7,4	676→740	0,5	5,4→5,7	598→610	0,3	4,6→5	490→510	0,4	4,2→4,5	466→473	0,4
	8,2→9,4	883→944	0,8	7,4→8,8	671→742	2,5	6,3→8	540→620	2,2	5,5→7,2	488→530	1,8	5,2→6,1	454→473	1,4
	10→11,8	876→952	0,7	9,5→12,4	634→750	15	8→9,5	570→622	3,8	7,2→8,9	478→540	6	6,1→7	444→478	2,5
	13,5→16	861→947	24	12,4→14	666→742	14	9,5→10,7	576→603	3,6	← Мода исчезла			Мода исчезла		
	18,6→22	897→960	91	14→20	623→736	90	10,7→15	527→578	66	10,2→14	476→544	55	8,4→10,8	427→490	18
							32→33	566→686	248	23→32	488→588	208	10,8→13	440→485	41
													14→19	456→536	84
$d_2/d_1=1,33$	Тон отверстия Одноврем. неск. пиков			Тон отверстия 2,2→6,8 м/с			Тон отверстия 2,8→5,8 м/с			Тон отверстия 2,6→5,6 м/с			Тон отверстия 2→4,6 м/с		
	8,8→10,2	927→1030	0,4	6,8→7,8	709→788	0,8	5,8→6,8	640→646	0,2	Мода исчезла			Мода исчезла		
	10,2→13	925→1022	0,7	7,8→9,6	732→798	1,6	6,8→8,2	620→666	2,7	5,6→7	546→590	1,6	4,6→6,6	502→525	1,8
	13→18	915→1020	8	10→12,6	698→790	8,5	8,2→10,3	603→652	3,8	7→9,8	514→598	3,5	6,6→8,4	485→510	1,5
	21→23,5	1015→1037	50				11,7→15	607→676	42	11,4→14	536→594	43	9,1→11,6	465→531	1,8
							26→35	627→732	272	25→36	566→642	297	11,6→14	470→514	3,6
													15,6→19	500→537	57
													26,5→32	508→535	148
$d_2/d_1=1,5$	Тон отверстия 2,9→8 м/с (неустойчива)			Тон отверстия Начало неразличимо			Тон отверстия Начало неразличимо			Тон отверстия Начало неразличимо			Тон отверстия Начало неразличимо		
	8→8,6	1027→1040	0,2	6→6,3	803→807	0,3	Мода исчезла			Мода исчезла			Мода исчезла		
	9,6→10,2	1027→1057	0,6	7→8,2	786→832	0,4	6,2→6,8	672→698	0,2	Мода исчезла			Мода исчезла		
	11,5→12	1020→1040	1,1	8,6→9,8	781→881	0,6	7,5→8,5	652→695	0,7	6,3→7,4	580→615	0,8	5,6→6,2	513→532	0,5
	15,6→...	1022→...	...	11→...	762→...		8,8→...	644→...		7,8→9,9	538→620	1,9	7→8,5	506→568	1,4
										10,6→...	584→...		9,6→...	514→...	

Таблица А8. Результаты экспериментов с соплом №7 ($d_1=12 \times 35$ мм) при длине выходного отверстия d_2/d_1 и длине камеры L/d_1

	$L/d_1=0,5$			$L/d_1=1$			$L/d_1=1,5$			$L/d_1=2$			$L/d_1=2,5$			$L/d_1=3$		
	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па
$d_2/d_1=1,0$	Тон отверстия не прослеживается до первой моды			Тон отверстия 5→5,5 м/с (285→302) Гц			Тон отверстия 2,5→6,1 м/с (183→407) Гц			Тон отверстия 2→5,9 м/с (112→292) Гц			Тон отверстия 1,7→5,4 м/с (93→302) Гц			Тон отверстия 1,5→? м/с (65→263) Гц		
	7,5→8,6	958→1030	2,3	Мода выродилась			Мода выродилась			Мода выродилась			Мода выродилась			Мода выродилась		
	8,6→13,6	810→1132	6,3	5,5→13,5	693→1035	38	6,1→8,7	564→726	20	5,9→10	517→642	31	5,2→5,4	493→495	2,5	7→8	466→493	10
	13,6→16	886→1030	8,5	13,5→19	715→830	41	8,7→16,3	578→943	56	10,7→17	515→788	108	6,8→10,5	438→586	36	8→11	426→485	54
$d_2/d_1=1,17$	Тон отверстия 4,6→8,3 м/с (166→266) Гц			Тон отверстия 2,7→6,4 м/с (173→336) Гц			Тон отверстия 2,4→4,9 м/с (126→407) Гц			Тон отверстия 1,9→6,3 м/с (124→305) Гц			Тон отверстия 1,7→6,6 м/с (92...275) Гц			Тон отверстия 1,5→6,2 м/с (115...236) Гц		
	8,3→8,9	1008→1027	3	6,4→6,9	763→795	3,7	4,9→5,1	649→658	1,3	Мода выродилась			Мода выродилась					
	8,9→13,6	814→975	29	7,2→13	635→940	35	6,4→8,8	571→719	23	6,3→6,8	571→585	3,6	6,6→7,1	500→520	4,8	6,2→6,5	468→495	9,5
	14,2→20	1005→1170	71	13→20,3	693→814	178	8,8→15,8	595→946	146	6,8→9,7	520→660	58	7,1→11	464→598	76	7,3→8,5	468→498	21
$d_2/d_1=1,33$	Тон отверстия 4,8→9,5 м/с (227...354) Гц			Тон отверстия 3→7,7 м/с (97...444) Гц			Тон отверстия 2,9→7 м/с (173...447) Гц			Тон отверстия 2,8→7,2 м/с (166...350) Гц			Тон отверстия 1,9→7,2 м/с (97→275) Гц			Тон отверстия 1,9→7,5 м/с (118...239) Гц		
	9,5→19	756→1334	29	7,7→14	643→1020	26,4	7→9,4	630→734	9,5	Мода выродилась			Мода выродилась					
	19→71	798→1752	71	14→22,2	749→866	135	9,8→15,3	642→743	96	7,2→10,4	540→674	40	7,2→8	546→572	4,5	6,5→8,1	588→836	5,5
				22,2→25	844→878	290	15,3→17	803→890	10,5	10,8→18	556→668	218	8→11,8	514→625	56	11,2→20	581→632	75
$d_2/d_1=1,5$	Тон отверстия 5,3→10,4 м/с (217...414) Гц			Тон отверстия 2,7→8 м/с (197...498) Гц			Тон отверстия 2,2→7,6 м/с (161...488) Гц			Тон отверстия 1,7→6 м/с (63...310) Гц			Тон отверстия 1,5→8 м/с (47...330) Гц			Тон отверстия 1,8→8,3 м/с (47...290) Гц		
	10,4→13	1042→1180	1	8→13,3	717→1010	8,7	7,6→8,5	700→729	9,8	6→8,3	640→654	1,4	Мода выродилась			Мода выродилась		
	13→21,6	1020→1435	29	13,3→22	781→1020	56	9,1→16,7	672→963	26	8,3→10	612→681	12	8→8,6	576→581	1,3	8,3→9,5	528→568	4,5
	21,6→66	918→1692	168	32→55	894→1170	95	16,7→24	643→788	73	10,8→18	583→820	102	9→11,5	532→642	18	9,5→12,8	500→586	27
$d_2/d_1=1,67$	Тон отверстия 6,8...13,5 м/с (266...540) Гц			Тон отверстия нечёткий: 4,6...10,3 м/с (153...240) Гц			Тон отверстия нечёткий: 3,3...9,7 м/с (~) Гц			Тон отверстия нечёткий: 3,1...8,2 м/с (113...153) Гц			Тон отверстия нечёткий: 2,9...8,8 м/с (73...197) Гц			Тон отверстия нечёткий: 2,4...10 м/с (53...147) Гц		
	13,5→22	1108→1518	10	10,3→13	878→1025	2,7	9,7→16	683→960	9,2	8,2→10,8	630→754	2,5	Мода выродилась			Мода выродилась		
	22→45	1064→1445	117	13→20	812→1027	26	16,6→20	730→800	16	10,8→17	612→815	20	8,8→11,8	593→664	6	Мода выродилась		
				24→57	808→1270	113	26→55	732→1054	151	26→50	661→903	372	11,8→20	582→740	58	10→12,7	548→598	17
$d_2/d_1=1,67$													28→52	604→850	375	12,7→22	493→665	117
																24→51	473→742	448

Таблица А9. Результаты экспериментов с профилированным соплом №12 ($R=12$ мм) при длине выходного отверстия d_2/d_1 и длине камеры L/d_1

	$L/d_1=0,5$			$L/d_1=1$			$L/d_1=1,5$			$L/d_1=2$			$L/d_1=2,5$			$L/d_1=3$		
	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па
$d_2/d_1=1.0$	Тон отверстия отсутствует до первой моды			Тон отверстия 4→5,5 м/с (256→329) Гц			Тон отверстия 2,2→5,5 м/с (187→385) Гц			Тон отверстия 1,8→4,3 м/с (122→244) Гц			Тон отверстия 1,6→6,9 м/с (92→288) Гц			Тон отверстия 1,0→6,8 м/с (51→258) Гц		
	7,9→13,3	764→1093	11,6	5,7→12,6	534→993	39	5,5→8,3	540→698	25	4,3→4,8	512→529	2,5	Мода исчезла			Мода исчезла		
	13,3→16	830→972	17,4	12,6→18	688→800	50	8,7→15,3	558→883	77	5,8→9,5	463→634	46	Мода исчезла			Мода исчезла		
							15,3→22	572→671	48	9,5→17,2	493→773	112	6,9→11	434→612	38	6,8→7,8	451→476	16
										17,2→24	490→576	46	11→19	444→708	102	7,8→11	412→485	54
$d_2/d_1=1.17$	Тон отверстия 5,3→8,4 м/с (236→296) Гц			Тон отверстия 3→5,7 м/с (187→324) Гц			Тон отверстия 2,7→6,3 м/с (206→402) Гц			Тон отверстия 1,9→6,4 м/с (109→302) Гц			Тон отверстия 1,8→6,7 м/с (95...270) Гц			Тон отверстия 1,5→7,2 м/с (91...246) Гц		
	8,4→19,5	864→1163	76	5,7→6,9	753→783	7	Мода исчезла			Мода исчезла			Мода исчезла			Мода исчезла		
				7,2→12,5	670→980	74	6,3→8,6	586→722	44	Мода исчезла			Мода исчезла			Мода исчезла		
				12,5→21	703→804	330	8,6→15,8	593→876	186	6,7→10,3	502→632	78	Мода исчезла			Мода исчезла		
							15,8→26	595→704	362	10,3→17	517→783	246	6,7→7,7	485→512	8	Мода исчезла		
										17→31	503→673	306	7,7→10,7	474→538	92	7,2→8,7	456→502	21
													10,7→19	450→688	238	8,7→11,8	446→508	104
													19→34	422→622	138	11,8→20	424→644	244
$d_2/d_1=1.33$	Тон отверстия 4,6→9,3 м/с (214...341) Гц			Тон отверстия 2,7→8 м/с (167...437) Гц			Тон отверстия 2,4→7 м/с (150...434) Гц			Тон отверстия 2,3→5,6 м/с (144...290) Гц			Тон отверстия 1,9→7,3 м/с (100→290) Гц			Тон отверстия нечёткий		
	9,3→22,3	712→1334	60	8→13,8	663→1013	34	7→9,3	630→734	14	5,6→6,3	592→614	3	Мода исчезла			Мода исчезла		
	22,3→33	830→1018	40	13,8→24	754→974	266	9,5→16	642→743	130	7,1→10,4	526→666	36	7,3→8,4	524→566	12	Мода исчезла		
							16,8→21	803→890	91	10,4→19	543→817	217	8,4→11,8	504→576	71	7,2→8,7	478→515	19
							21→35	640→725	562	21→43	574→822	543	11,8→19	480→705	315	8,7→12,5	466→540	104
$d_2/d_1=1.5$	Тон отверстия 5,5→10 м/с (212...420) Гц			Тон отверстия 2,5→8 м/с (117...485) Гц			Тон отверстия 2,3→9,2 м/с (166...410) Гц			Тон отверстия 1,8→6,3 м/с (58...327) Гц			Тон отверстия 1,7→8 м/с (100...290) Гц			Тон отверстия нечёткий		
	10→11,8	1040→1108	0,6	8→13	710→986	11	Мода исчезла			Мода исчезла			Мода исчезла			Мода исчезла		
	11,8→20	937→1503	22	13→22	764→957	100	9,2→16,8	610→944	18	6,3→7,2	634→644	1	Мода исчезла			Мода исчезла		
	20→70	920→1930	195	34→54	905→1170	70	16,8→22	672→756	46	8,2→10,5	604→690	14	8→11,8	574→636	26	7,2→8,7	478→515	19
							22→42	710→908	77	10,5→18	576→807	107	12,6→19	524→726	176	8,7→12,5	466→540	104
										23→47	604→817	503	20,5→44	476→694	531	12,5→21	446→664	294

Таблица А10. Результаты экспериментов с соплом №13 – трубкой $d_1=12\times 16$ мм, выступающей наружу из передней крышки, при длине выходного отверстия d_2/d_1 и длине камеры L/d_1 .

	$L/d_1=0,5$			$L/d_1=1$			$L/d_1=1,5$			$L/d_1=2$			$L/d_1=2,5$		
	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па	W , м/с	f , Гц	A , Па
$d_2/d_1=1.0$	Тон отверстия 1,9→15 м/с (168...1157) Гц			Тон отверстия 1,8→5,9 м/с (126...246) Гц			Тон отверстия 1,7→5 м/с (78...175) Гц 5,5→6,4 м/с (195...224) Гц			Тон отверстия 1,4→5,3 м/с (65...240) Гц					
				5,9→6,7	747→786	0,6	5→5,5	617→640	0,6	Мода выродилась					
				7,1→10,3	676→832	6,5	6,4→8,1	581→671	2,5	5,3→7,8	505→632	2,4			
				10,3→15	632→788	30	8,1→16,8	424→766	47	7,8→18	368→683	48			
	15,6→28	871→1171	188	15→27,5	622→873	125	16,8→24,5	578→703	43						
$d_2/d_1=1.17$	Тон отверстия 2→6,6 м/с (206...554) Гц			Тон отверстия 1,7→5,5 м/с (102...226) Гц			Тон отверстия 1,7→4,6 м/с (76...167) Гц			Тон отверстия 1,5→4,1 м/с (65...122) Гц			Тон отверстия 1,6→3,8 м/с (52...140) Гц		
	6,6→9,3	954→1098	2,4	5,5→7,1	749→874	1,4	4,6→5,9	630→706	2,1	4,1→5,4	541→603	1,8	3,8→4,7	498→564	1,8
	9,3→14,7	847→1054	32	7,7→10,8	690→859	10	6,6→9,2	617→744	4	5,8→8,3	530→642	5,4	5→7,4	483→600	4,8
	14,7→31	820→1252	252	10,8→16	666→827	48	9,2→17,5	503→769	66	8,3→17,6	505→703	66	7,4→12,7	434→583	31
				16→28	671→132	213	17,5→27,6	603→751	158	17,6→27	524→634	99	12,7→18	507→623	40
$d_2/d_1=1.33$	Тон отверстия 1,6→5,9 м/с (95...457) Гц			Тон отверстия 1,8→5,3 м/с (102...407) Гц			Тон отверстия 1,6→4,9 м/с (52...161) Гц			Тон отверстия 1,5→4,3 м/с (65...130) Гц			Тон отверстия 1,7→4,1 м/с (51...140) Гц		
	5,9→6,3	1042→1093	0,7*	5,3→7,5	768→959	2	4,9→6,8	646→822	1,7	4,4→5,9	593→654	1,8	4,1→5,6	529→646	1,3
	7,2→10	993→1250	3,5	7,5→11,8	720→1008	7,7	6,8→10	651→815	6	5,9→8,9	578→722	5,4	5,6→8,5	527→656	4,4
	10→15,7	895→1247	15	12,3→16	764→844	37	10→18,7	544→795	76	8,9→13	534→620	22	8,5→13,5	466→595	37
	17→32	927→1254	186	19,5→28	783→907	140	18,7→31	634→798	176	13→18,2	612→717	64	13,5→18	539→639	34
										18,2→28	539→659	114			
$d_2/d_1=1.5$	Тон отверстия 1,8→5,6 м/с (104...450) Гц			Тон отверстия 1,9→5,8 м/с (90...240) Гц			Тон отверстия 2,1→5,1 м/с (90...347) Гц			Тон отверстия 1,6→4,3 м/с (75...185) Гц					
	5,6→7,4	1045→1252	0,4*	5,8→8,4	815→1005	2,3	5,1→7,3	664→839	0,9	4,3→6,2	593→654	1,1			
	7,4→10	1047→1274	2,5	8,4→12,7	756→1083	7,7	7,3→10,5	656→837	5,2	6,2→9,4	578→722	4,7			
	10→15,8	927→1250	10	Мода не сформировалась			11,7→18,5	632→810	62	9,6→18,6	534→620	38			
	18→34	1003→1242	132												

Таблица А11. Результаты экспериментов с соплом №14 – трубкой $d_1=12 \times 16$ мм, выступающей внутрь из передней крышки, при длине выходного отверстия d_2/d_1 и длине камеры L/d_1

	$L/d_1=1; L_{СТР}/d_1=0,5$			$L/d_1=1,5; L_{СТР}/d_1=1$			$L/d_1=2; L_{СТР}/d_1=1,5$			$L/d_1=2,5; L_{СТР}/d_1=2$			$L/d_1=3; L_{СТР}/d_1=2,5$		
	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	$A, \text{ Па}$	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	$A, \text{ Па}$	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	$A, \text{ Па}$	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	$A, \text{ Па}$	$W, \text{ м/с}$	$f, \text{ Гц}$	$A, \text{ Па}$
$d_2/d_1=1,0$	Тон отверстия 2*→5 м/с (163...400) Гц			Тон отверстия 1,8→4,8 м/с (130...190) Гц			Тон отверстия 1,7→4,5 м/с (73...207) Гц			Тон отверстия 1,5→3,8 м/с (70...156) Гц					
	5→6,2	683→771	1,2	4,8→5,6	622→673	1,6	4→4,5	530→544	0,8	3,8→4,6	468→515	1,2			
	6,2→11,2	541→820	19,6	5,9→9,1	553→737	7	5,6→7,4	524→617	2,3	5→7,1	432→561	4,8			
	11,2→21	590→895	101	9,1→12	576→664	16	7,6→15	404→693	40	7,3→16	332→627	38			
				12→21	524→737	86	15→23	520→659	51						
$d_2/d_1=1,17$	Тон отверстия 2,1→4,4 м/с (178...332) Гц			Тон отверстия 2→4,6 м/с (148...178) Гц			Тон отверстия 1,7→4,2 м/с (138...148) Гц			Тон отверстия 1,7→3,8 м/с (126...109) Гц			Тон отверстия 1,6→3,5 м/с (78...134) Гц		
	4,4→5	759→788	0,9	4,6→6,3	627→753	2,4	4,2→5,6	539→664	2,3	3,8→5,3	468→578	5,2	3,5→4,7	461→529	4,8
	5,5→7,4	732→886	4	6,4→9,6	581→732	10	5,6→8	532→656	6,8	5,3→7,6	478→595	5,5	4,9→7,1	454→537	5,8
	7,4→12	661→893	22	9,6→14	581→712	37	8→15	437→690	62	7,7→10	480→517	11,7	7,1→11,5	385→532	27
	12→22	651→905	111	14→24,5	581→773	135	15→23	527→642	115	10→16,2	468→634	48	11,5→17	468→585	38
$d_2/d_1=1,33$	Тон отверстия 1,8→4,6 м/с (80...185) Гц			Тон отверстия 2→4,1 м/с (92...156) Гц			Тон отверстия 2,1→4,4 м/с (78...131) Гц			Тон отверстия 1,8→4 м/с (70...117) Гц			Тон отверстия 1,6→3,8 м/с (48...141) Гц		
	4,6→5,3	788→871	0,9	4,1→4,3	695→700	0,6									
	5,4→7,8	751→954	3,2	4,9→7	649→805	2,4	4,4→6,2	585→698	2,5	4→5,4	520→664	1,8	3,8→5,5	485→593	5
	7,8→11,8	712→895	6,3	7→10,2	632→817	8,7	6,2→8,8	578→700	4	5,4→8,1	524→649	5,5	5,5→7,7	483→605	5,9
	11,8→23	646→935	106	10,2→15,4	622→747	31	8,8→15,7	476→705	46	8,1→11,2	515→567	9,4	7,7→12,8	449→583	31
$d_2/d_1=1,5$	Тон отверстия 1,8→4,4 м/с (48...190) Гц			Тон отверстия 2,5→5,1 м/с (109...205) Гц			Тон отверстия 2,2→4,4 м/с (87...153) Гц			Тон отверстия 1,6→4,4 м/с (83...126) Гц			Тон отверстия 1,5→4 м/с (53...148) Гц		
	4,4→5,4	830→939	0,5												
	5,4→8	840→1018	3,2	5,1→7,1	664→876	1,37	4,4→6,1	598→771	1,5	4,1→5,8	539→690	2,2	4→5,2	510→620	1,5
	8→12,2	764→1010	10,6	7,1→10,7	681→857	7,3	6,1→9,1	620→773	4,7	5,8→9,2	544→715	6	5,2→8	505→645	4
	12,4→23	654→957	96				9,1→16,2	495→725	45	9,2→16,8	522→659	43	8,5→13	483→598	26
													20→31	493→595	9

Таблица А12. Результаты экспериментов при переменном диаметре камеры D/d_1 , постоянной длине камеры ($L/d_1=0.8$)
и диаметре выходного отверстия $d_2/d_1=1,17$

Сопло № 5 – $d_1=12 \times 9$ мм	$D/d_1=6,4$ (Пустая)			$D/d_1=5,6$ (67,5)			$D/d_1=4,6$ (55)			$D/d_1=3,75$ (45)			$D/d_1=3,25$ (39)		
	W , м/с	f , Гц	A , Па	W	f , Гц	A , Па	W	f , Гц	A , Па	W	f , Гц	A , Па	W	f , Гц	A , Па
Сопло № 5 – $d_1=12 \times 9$ мм	Тон отверстия 1,7→5,6 м/с (114...273) Гц			Тон отверстия 1,9→6,3 м/с (134...310) Гц			Тон отверстия 1,9→5,8 м/с (122...324) Гц			Тон отверстия 2,1→7 м/с (124...359) Гц			Тон отверстия 2,2→8,5 м/с (126...361) Гц		
	5,6→7,4	800→957	6	6,3→8,8	910→1152	6	5,8→6,4	1220→1282	0,8	7→8,4	1447→1674	1,1	8,5→9,4	1777→1914	1,0
	7,4→17,4	585→1247	58	8,8→21	703→1420	62	7,3→10,7	1108→1435	8	8,4→11,8	1308→1674	9,4	9,4→13	1540→1958	4
							10,7→24	888→1457	98	11,8→29	1027→2058	148	13,5→34	1184→2348	114
Сопло № 6 – $d_1=12 \times 10$ мм	Тон отверстия 1,6→4,7 м/с (119...236) Гц			Тон отверстия 1,7→4,8 м/с (122...244) Гц			Тон отверстия 1,7→5,3 м/с (124...283) Гц			Тон отверстия 1,5→6,4 м/с (112...334) Гц			Тон отверстия 1,4→7,6 м/с (107...412) Гц		
				5→5,4	1005→1040	1,2	5,3→7,8	1138→1442	1,5	6,4→9,4	1308→1774	1,0	7,6→11	1538→2170	0,9
	5,1→8,4	793→1027	6,3	6→9,3	913→1160	8	7,8→11,3	1134→1443	9,3	9,4→13,5	1311→1683	12,4	11→14,8	1540→1984	4
	8,4→15,4	708→1037	49	9,3→18	776→1250	63	11,3→22	950→1457	84	13,5→29	1097→1828	152	16,5→32	1380→2097	121
Сопло № 7 – $d_1=12 \times 16$ мм	Тон отверстия 1,3→5,3 м/с (122...246) Гц			Тон отверстия 1,4→5,5 м/с (120...244) Гц			Тон отверстия 1,5→5,8 м/с (290...276) Гц			Тон отверстия 1,5→6,8 м/с (122...316) Гц			Тон отверстия 1,5→7,4 м/с (122...346) Гц		
				5,5→6	965→1016	0,7	5,8→6,8	1108→1190	1	6,8→8	1291→1445	1,8	7,7→8,6	1374→1455	0,8
	5,3→7,3	805→954	2,3	6,4→8,6	917→1086	2,5	7,3→9,7	1044→1250	1,3	8,6→11,6	1287→1516	3	9,7→11,8	1307→1533	1,4
	7,6→12	798→1021	11,2	8,6→13,6	857→1186	10	9,7→16	950→1362	22	11,6→19	1147→166-	29	12,5→19	1127→1652	20
	13,2→30	615→1052	268	18→36	935→1250	298	19,4→43	878→1437	366	22,4→51	1104→1877	468	24,6→54	1104→1921	353

Приложение Б – Акт внедрения

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ
ОБЩЕСТВО «ТАТНЕФТЬ»
имени В.Д. Шашина
(ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина)



В.Д. Шашин исемендәге
«ТАТНЕФТЬ» АЧЫК
АКЦИОНЕРЛЫК ҖӨМГЯЯТЕ
(В.Д. Шашин исемендәге «Татнефть» ААҖ)

ул. Ленина, 75, г. Альметьевск,
Республика Татарстан, 423450

Ленин ур., 75, Әлмәт шәһәре,
Татарстан Республикасы, 423450

Телеграф: Альметьевск, Татарстан, «Татнефть»; телетайп 724149 RADUG RU
Телефон: справочная 37-11-11; факс: (8553) 30-78-00, 31-86-46; канцелярия 45-64-92; e-mail: tnr@tatneft.ru
ИНН/КПП 1644003838/164401001, расчетный счет №40702810700730001890 в ПАО Банк Зенит,
корреспондентский счет №30101810000000000272, БИК 044525272

«05» февраля 2024г. № 2231/ВнСл(750)

На № _____ от _____

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
Абдрашитова Алексея Аллановича на тему
«Повышение амплитуды колебаний давления в струйном осцилляторе
Гельмгольца»**

Настоящий Акт свидетельствует о том, что представленные в диссертационной работе научные и практические результаты по исследованию струйной генерации звука представляют большой интерес при разработке и проектированию скважинных излучателей колебаний давления на основе струйного осциллятора Гельмгольца. В ПАО «Татнефть» запланированы промышленные испытания по оценке эффективности акустической стимуляции добычи нефти с использованием таких скважинных излучателей колебаний давления звуковой частоты.

Заместитель директора по
инновациям и НИР в области ГИС

Э. Р. Асадуллин

Мурзакаев Владислав Маркович, начальник отдела ГИС и технологий в открытом стволе
(85594) 7-888-6