

На правах рукописи



АБДРАШИТОВ АЛЕКСЕЙ АЛЛАНОВИЧ

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

Специальность:

1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2025

Работа выполнена в Институте энергетики и перспективных технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Марфин Евгений Александрович

Официальные оппоненты: **Комкин Александр Иванович**,
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва;

Жилин Александр Анатольевич,
кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь

Защита состоится «27» июня 2025 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.312.11, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» по адресу: 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, Зал заседаний Ученого совета (А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=546035>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.312.11,
к.т.н.



Т.Н. Мустафин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С ростом доли трудноизвлекаемых запасов нефти рентабельность разработки месторождений снижается. Перспективным методом интенсификации добычи является воздействие на продуктивный пласт упругими колебаниями, которое снижает вязкость нефти и увеличивает проницаемость породы. Ультразвуковые волны эффективны в лаборатории, но их применение на промысле ограничено из-за сильного затухания в пласте. Поэтому более перспективным считается воздействие в звуковом диапазоне частот. Для реализации такой технологии требуется разработка эффективных скважинных излучателей. В настоящей работе предложено техническое решение – струйный осциллятор Гельмгольца (СОГ), преобразующий часть энергии потока в колебания давления. Механизм генерации таких колебаний остаётся недостаточно изученным и представляет научный интерес в области гидрогазодинамики.

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

Задачи работы:

- 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 – $\ell_1/d_1=0,25\dots 2,5$, диаметр резонансной камеры – $D/d_1=3\dots 6$, длина резонансной камеры – $L/d_1=0,25\dots 4$, диаметр выходного отверстия – $d_2/d_1=0,8\dots 2,5$, скорость течения струи – $W=0\dots 100$ 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. Эксперименты проводились с использованием стандартных аэроакустических методов на специальном стенде, оборудованном измерительными приборами, прошедшими своевременную поверку и испытания. Перепад давления на сопле измерялся преобразователем давления ПД 150-ДИВ1250 Овен, колебания давления – микрофоном RFT MV 201 Robotron с микрофонным усилителем 00 011 Robotron. Сигналы оцифровывались модулем E14-140 с частотой 10 кГц и обрабатывались в программе Power Graph. Микрофоны тарировались пистонфонами Robotron RFT 05 001 и BSWA Technology Co. Данные анализировались методом быстрого преобразования Фурье. Погрешность измерения частоты – 0,4 %, амплитуды колебаний – 0,07 %; скорости струи – 2,1 %, числа Рейнольдса – 3,5 %, 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 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, защищённых 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 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 56 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 работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (150 наименований) и двух приложений. Общий объем работы составляет 138 страниц машинописного текста. В ней содержится 47 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и практическая значимость, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, показана новизна результатов исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор работ по повышению нефтеотдачи продуктивных пластов при воздействии на них упругими волнами в комбинации с иными методами, а также по теоретическому и экспериментальному исследованию механизма генерации звука свободной струей, натекающей на препятствие и резонанса в СОГ. 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. В обзоре литературы проанализированы пионерские и современные исследования в области струйной генерации вихревого звука. Установлено, что при наличии значительного научного задела основное внимание уделяется гидродинамическим аспектам струйных течений, тогда как акустические характеристики и механизмы генерации звука остаются недостаточно изученными.

Во второй главе описываются разработанный экспериментальный стенд, физическая модель СОГ, методика проведения экспериментальных исследований и верификация результатов эксперимента.

Рабочее тело – воздух засасывался в модель СОГ 1 (рис. 1) из помещения лаборатории бесконечного объема вакуумным насосом 2, и модель монтировалась в стенку вакуумной безэховой камеры 3 с целью имитации квазибесконечного объема на выходе из осциллятора для ее акустической локализации. Колебания давления внутри вакуумной камеры 3 измерялись микрофоном 4, а внутри модели – микрофоном 5, и усиливались микрофонным усилителем 8. Шланг для замера давления в камере соединял штуцер 9 с преобразователем давления 7. Регистрируемые сигналы оцифровывались внешним модулем аналого-цифрового преобразователя 9 и передавались на персональный компьютер 10.

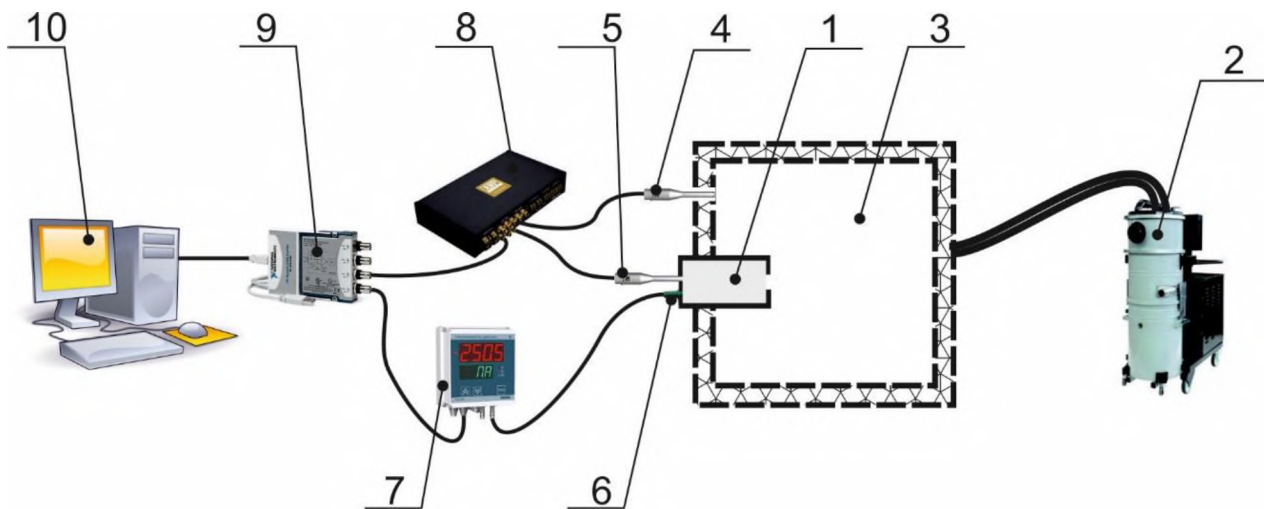


Рисунок 1 – Схема лабораторного стенда для испытаний СОГ.

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

Конструктивно модель СОГ (рис. 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 (рис. 2) 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.

Методика проведения эксперимента с собранной моделью СОГ состояла в плавном увеличении скорости струи за счет увеличения перепада давления на сопле и записи на ПК синхронизированных сигналов с преобразователя давления и микрофонов. Обработка записанных сигналов с помощью программы PowerGraph состояла в построении амплитудно-частотных спектров и их привязка к скорости струи. Размеры СОГ (рис. 2) с соплами различной конфигурации представлены в табл. 1.

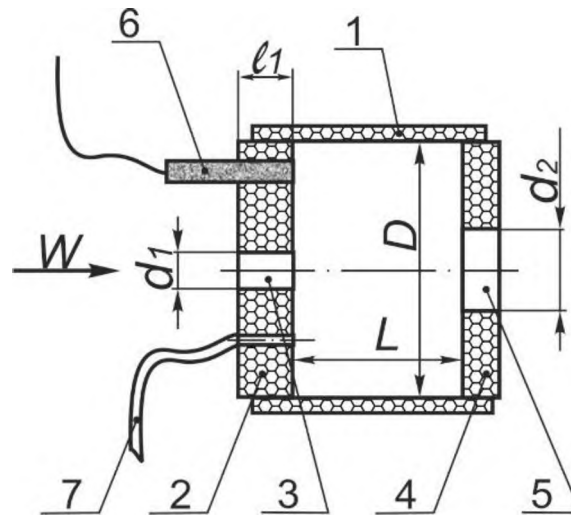


Рисунок 2 – Модель СОГ: 1 – обечайка, 2 – крышка передняя, 3 – сопло, 4 – крышка задняя, 5 – отверстие выходное, 6 – микрофон, 7 – штуцер

Таблица 1

Программа экспериментов

Эксперимент №	Форма сопла	d_1 , мм	L/d_1	l_1/d_1	l_1/l^*	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	–

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований генерации вихревого звука, в том числе тона свободной (нестесненной) струи без резонатора (рис. 3) и струи, протекающей через резонатор. Размещение перед соплом препятствия не оказывает влияния на числа Струхала тона свободной струи, но влияет на его амплитуду (верхний график на рис. 3). Свободная струя производит вихревой звук в интервале длины сопла $0,5d_1 > L > d_1$, в интервале $Re_d \sim (6 \dots 30) \cdot 10^3$ и $Sh_l \sim 0,6$.

Возбуждение акустических мод гармониками тона отверстия в СОГ. На рисунке 4 в трехмерном виде представлены характерные особенности возникновения тона отверстия и последующего возбуждения акустического резонанса в камере при продувке воздухом. Значение частоты собственных колебаний камеры-резонатора составляла $f_0 = 712$ Гц.

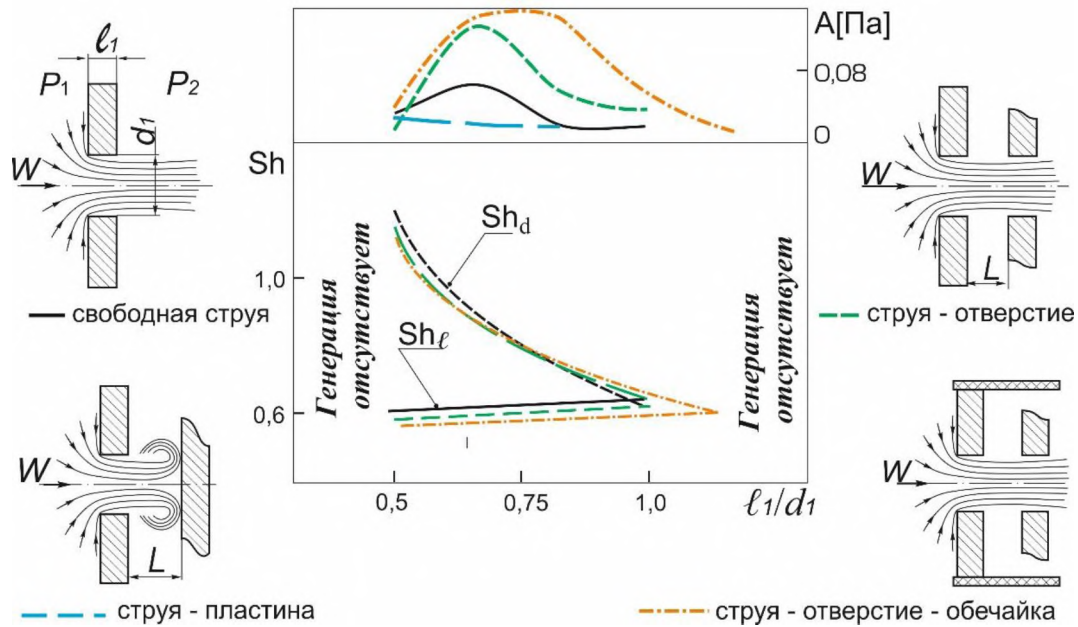


Рисунок 3 – Числа Струхала (Sh_d – по диаметру сопла и Sh_ℓ – по длине сопла) свободной струи, вытекающей из сопла диаметром d_1 и длиной ℓ_1 в затопленное пространство и натекающей на различные препятствия

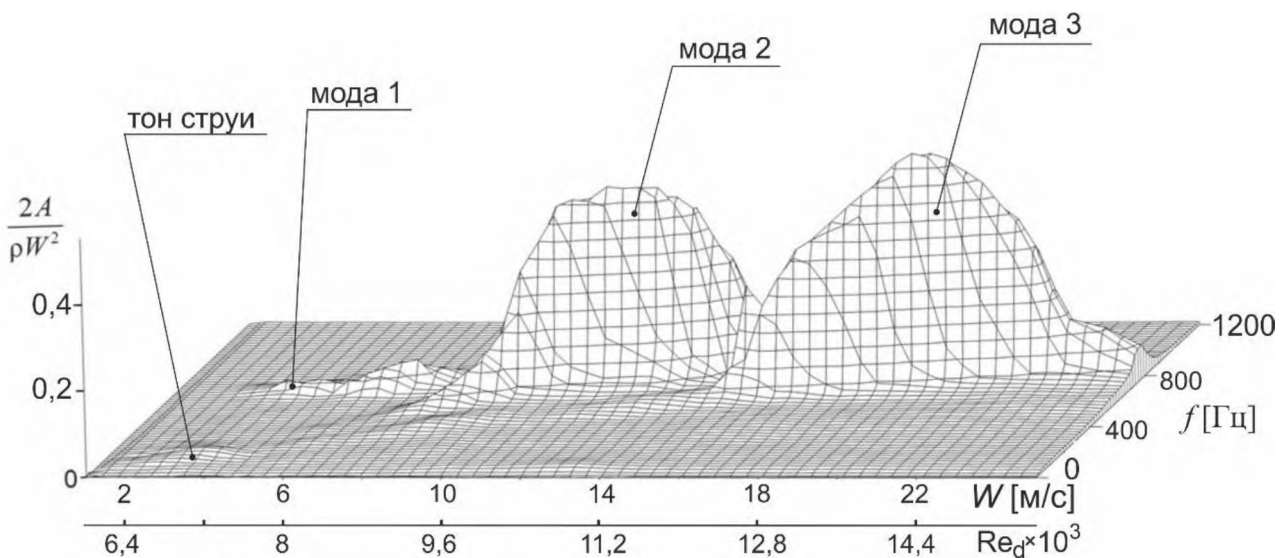


Рисунок 4 – Акустические моды в СОГ

Формирование вихревых структур в слое смешения. Исходя из теоретической модели генерации Крюгера цепочка периодических вихрей формируется непосредственно за кромкой сопла (рис. 5а), и импульсы акустической обратной связи воздействуют на эту область. В действительности, в соответствии с законами гидродинамики, между поверхностью струи и стенкой цилиндрического сопла образуется кольцевой интервал (рис. 5б), давление в котором соответствует давлению в наименьшем сечении струи. При достаточной длине сопла возвратное течение препятствует формированию тороидального вихря за кромкой сопла, но поддерживает формирование цепочки вихрей Кельвина-Гельмгольца в слое смешения по длине струи.

Оценить значение частоты генерации можно по формуле Крюгера (1) в соответствии с его теоретической моделью генерации, схематично изображенной на рисунке 5а

$$\frac{1}{f_{имп}} = \frac{L}{W_k} + \frac{L}{c - W} \quad (1)$$

где $f_{имп}$ – частота импульсов обратной связи в струе, Гц, W_k – конвективная скорость, м/с, W – средняя скорость струи, м/с.

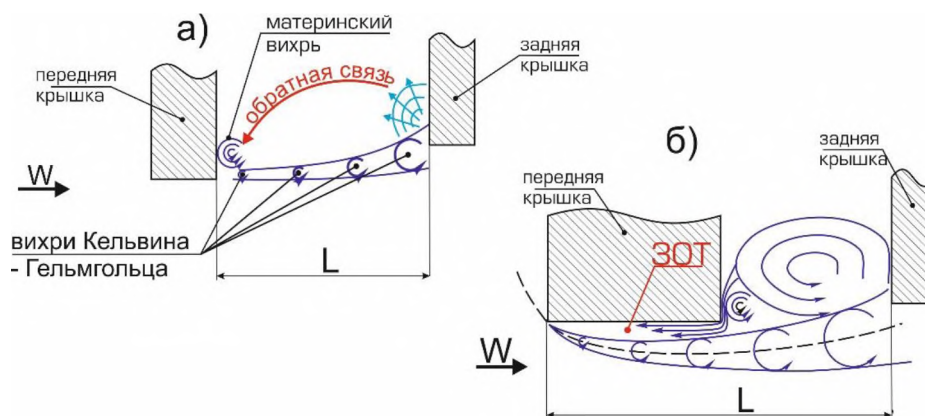


Рисунок 5 – Формирования цепочки вихревых структур в слое смешения.

а) – по Крюгеру, б) – фактически

Результат вычисления при L равной интервалу между крышками дает удовлетворительное соответствие частоты тона струи с экспериментальными значениями. При использовании в качестве L интервала между входной острой кромкой сопла и задней крышкой расчет дает значительно меньшую частоту тона струи в сравнении с экспериментальными значениями. Из этого следует, что механизм обратной связи не оказывает влияния на течение внутри сопла. Таким образом, подтверждается, что обратная связь имеет акустическую природу.

В четвертой главе представлены результаты экспериментов с моделями СОГ и их анализ. Экспериментам по оптимизации геометрии сопла предшествовали эксперименты по оптимизации размеров камеры-резонатора и выходного отверстия. Критерием оптимизации в работе является достижение максимально возможной амплитуды генерации.

Влияние диаметра камеры-резонатора на амплитуду генерации колебаний давления исследовалось при длине камеры $L=10$ мм. Диаметр камеры в процессе испытаний составлял: 78, 67.5, 55, 39, 32 и 28 мм. Оптимальное отношение диаметра камеры-резонатора к диаметру сопла составляет $D/d_1=4...5$. Соответственно, в дальнейших экспериментах использовался диаметр камеры-резонатора 60 мм ($D/d_1=5$).

Оптимальная длина камеры L/d_1 (струи) и оптимальный диаметр выходного отверстия d_2/d_1 определялись при неизменной длине

цилиндрического сопла ($\ell_1/d_1=0,67$). Результаты экспериментальных исследований показали значительное влияние длины цилиндрического сопла на амплитуду генерации (рис. 6). Для всех рассмотренных длин камеры наибольшая амплитуда генерации достигалась при соотношении $\ell_1/d_1 \sim 0,55$. Сопло длиной $\ell_1/d_1=0,55$ в комбинации с камерой $L/d_1=0,25$ показывало максимальное значение. Увеличение или уменьшение длины сопла приводило к общему снижению амплитуды генерации.

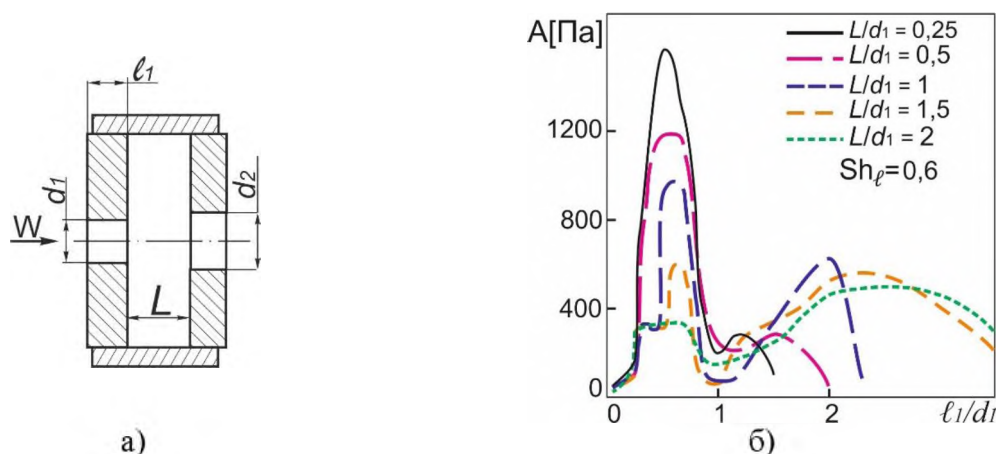


Рисунок 6 – Влияние длины цилиндрического сопла и камеры на амплитуду генерации: а) конструкция; б) результаты экспериментов

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. Фаска располагалась навстречу или же по потоку (рис. 7а-б). Фаска с углом раскрытия $\varphi=60^\circ$ и $\varphi=120^\circ$ оказывает слабое влияние на амплитуду генерации, поэтому на рис. 7а-б представлены результаты экспериментов с фаской $\varphi=90^\circ$.

Как видно на рис. 7г, 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 $\ell^*/\ell_1=(0,4-0,5)$, $L/d_1=1,5$, $d_2/d_1=1,33$.

В эксперименте №3 определялось влияние **цилиндрического козырька**, расположенного перед соплом или за соплом. Длина козырька ℓ_K составляла 6 мм. Работоспособность сопел с козырьками оценивалась в сравнении с характеристиками цилиндрического сопла. **Козырек** длиной $\ell_K/d_1=0,5$, расположенный наружу, немного увеличивает амплитуду генерации в СОГ. **Козырек**, расположенный внутрь, снижает амплитуду генерации в интервале $L/d_1=1,3-1,8$.

В эксперименте №4 исследовалось **профилированное сопло**, отличающееся от цилиндрического сопла наличием скругленного входного участка (рис. 8), обеспечивающее профиль скорости на срезе сопла, приближающийся к прямоугольному. 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 $d_1/2$.

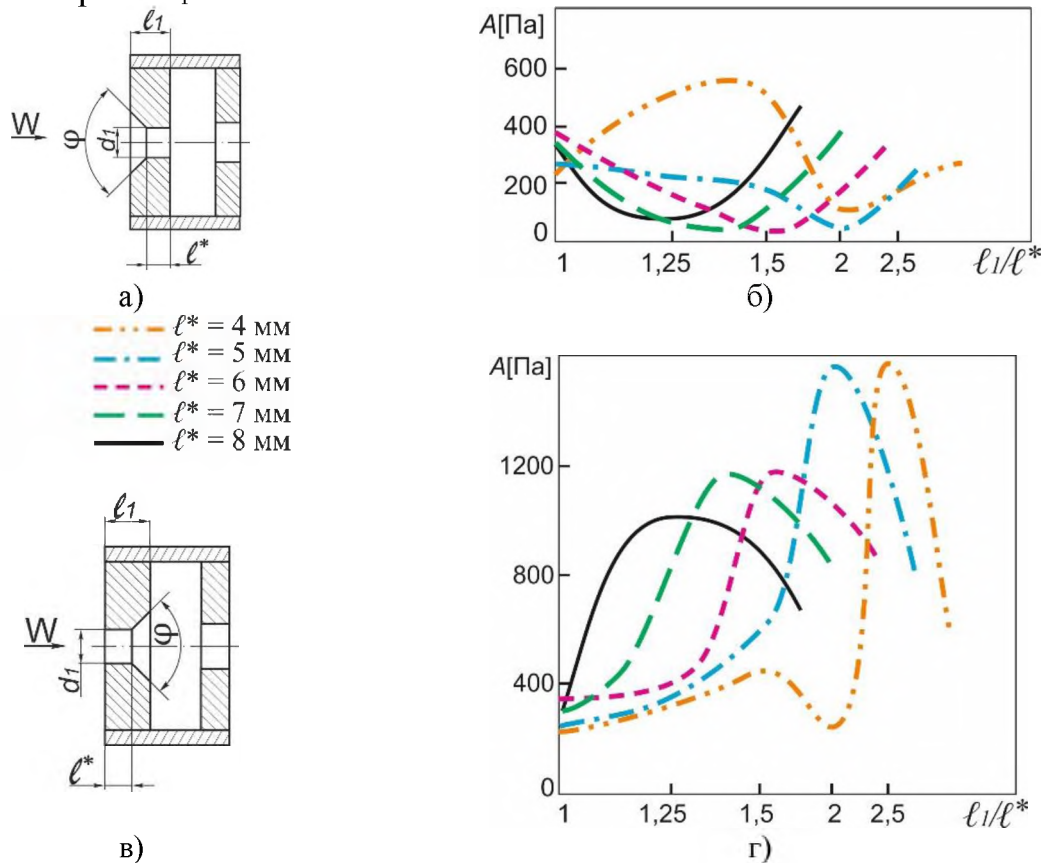


Рисунок 7 – Влияние фаски 90° глубиной $(\ell_1 - \ell^*)$ в цилиндрических соплах на амплитуду генерации: а) сопло с фаской навстречу потоку; б) результаты экспериментов с фаской навстречу потоку; в) сопло с фаской по потоку; г) результаты экспериментов с фаской по потоку

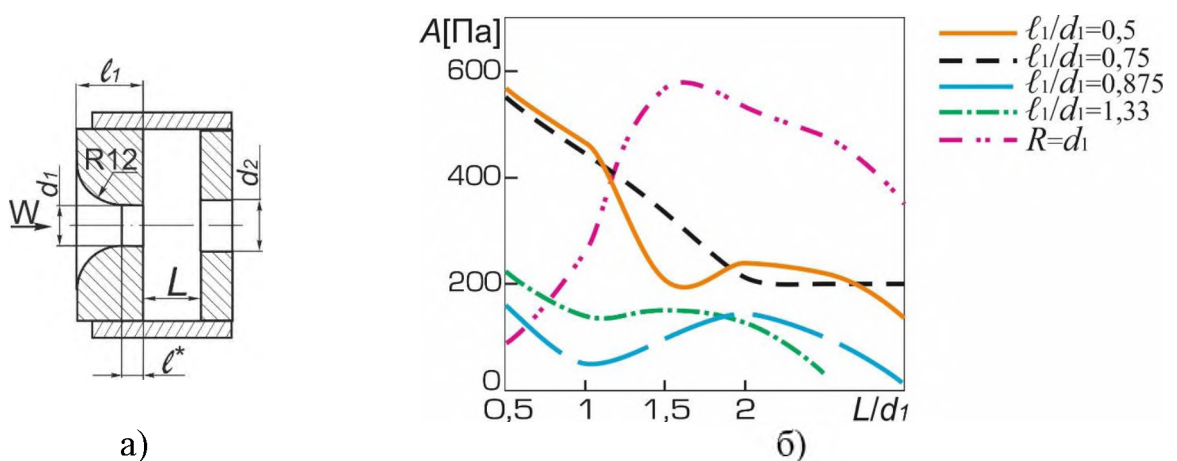


Рисунок 8 – Влияние профилирования сопла на амплитуду генерации: а) конструкция; б) результаты экспериментов, $\ell_1/d_1 = 1,33$

Таким образом, наибольшую амплитуду генерации в модели СОГ обеспечивают следующие конфигурации:

- **цилиндрическое сопло** $\ell_1 \sim 0,55d_1$ в комбинации с камерой длиной $L/d_1 = 0,25$.
- **профилированное сопло** в комбинации с камерой длиной $L/d_1 = 1,5$.
- цилиндрическое сопло **с фаской** 90° по потоку, с длиной цилиндрического участка $\ell^* = (0,3-0,4)d_1$, $\ell^*/\ell_1 = (0,4-0,5)$.

На рисунке 9 представлено развитие акустических мод для СОГ с наиболее эффективными конфигурациями сопел при $\ell_1/d_1 = 1,17$, $L/d_1 = 1,5$. Тон отверстия 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 $Sh_d \sim 0,25$.

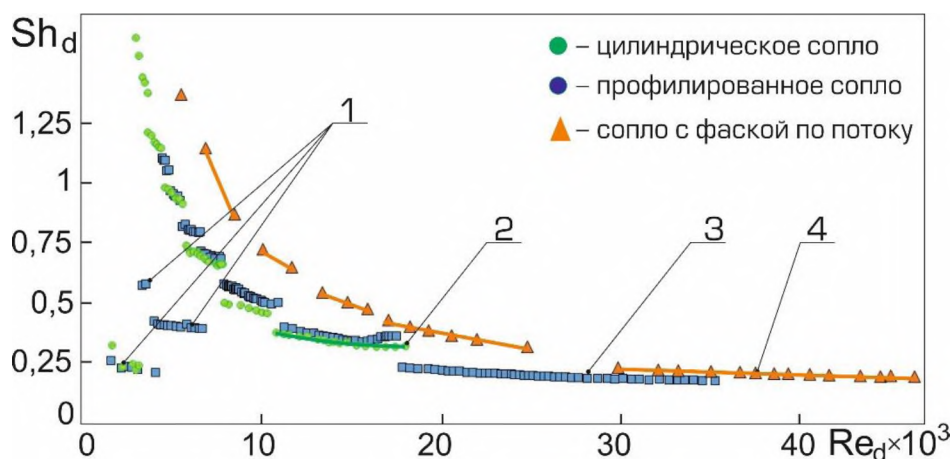


Рисунок 9 – Числа подобия для сопел: 1 – тон струи; 2, 3, 4 – акустические моды

В ходе работы разработано и запатентовано 20 технических решений, направленных на повышение эффективности генерации колебаний давления в струйном осцилляторе Гельмгольца (СОГ). Разработки охватывают способы увеличения амплитуды генерируемых колебаний за счёт оптимизации геометрии камеры и сопла, использования резонансных режимов и режимов биений, а также автоматической настройки параметров генерации. Часть решений ориентирована на лабораторное моделирование процессов в продуктивном пласте, другие – на внедрение в скважинные условия, в том числе на совмещение волнового воздействия с современной технологией парогравитационного дренажа. Реализованные устройства и методы обеспечивают стабильную генерацию колебаний давления в нужном диапазоне частот и могут использоваться для повышения нефтеотдачи в трудноизвлекаемых пластах.

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 %). 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.

Основные результаты и выводы

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 Струхала. Установлено, что наличие преграды струи и возникающий при этом механизм обратной связи лишь усиливает амплитуду колебания не изменяя число Струхала.

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.

5. Дальнейшая работа будет развиваться в двух направлениях: фундаментальном и прикладном. Для более глубокого понимания природы генерации колебаний в осцилляторе планируется исследовать процесс формирования вихревых структур в потоке и их взаимодействие с твёрдыми препятствиями с помощью оптических методов визуализации течения (таких как SIV и PIV) и численного моделирования гидродинамики потока. Прикладные исследования будут направлены на промысловые испытания разработанных и запатентованных скважинных излучателей при применении технологии акустического воздействия на нефтяных месторождениях.

СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи в журналах перечня ВАК:

по специальности диссертации:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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:

5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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 Scopus и Web of Science:

11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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
18. 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.
19. 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.
20. 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:

21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

33. 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.

34. 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.

35. 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.

36. 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.

37. 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.

38. 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.

39. 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.

40. 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 трудов российских и международных конференций:

41. 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.

42. 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.

43. 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.

44. 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.

45. 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.

46. 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.

47. 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 (АММАГ'2020), Алушта, 06–13 сентября 2020 года. – М.: МАИ, 2020. – С. 23–25.

48. 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.

49. 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.

50. 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 междуна. 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.

51. Абдрашитов, А.А. Вихревые структуры в струйном акустическом резонаторе / А.А. Абдрашитов, Е.А. Марфин, А.И. Кадыйров // Матер. XII Междуна. конф. по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (NPNJ'2018), Алушта, 24–31 мая 2018 года. – Алушта: МАИ, 2018. – С. 23–25.

52. 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.

53. 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. Междуна. 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.

54. Кравцов, Я.И. Пульсирующее течение газа в акустическом резонаторе / Я.И. Кравцов, Е.А. Марфин, А.А. Абдрашитов // Матер. XI Междуна. конф. по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016), Алушта, 25–31 мая 2016 года / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – Алушта: Издательство МАИ, 2016. – С. 185–187.

55. 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.

56. Марфин, Е.А. Собственные колебания газа в проточном резонаторе / Е.А. Марфин, А.А. Абдрашитов // Матер. XIX Междуна. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015), Алушта, 24–31 мая 2015 года. – Алушта: МАИ, 2015. – С. 490–492.

Подписано в печать 18.04.2025.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Формат 60х84 1/16. Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 0,93.
Уч.-изд. л. 1,07. Тираж 120 экз. Заказ 83/4

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательства Казанского университета

420008, г. Казань, ул. Профессора Нужи́на, 1/37
тел. (843) 206-52-14 (доп. 1705), 206-52-14 (доп. 1704)