

УДК: 541.183.5
OECD: 1.03.AA

Численные и экспериментальные исследования генерации звука в струйном осцилляторе Гельмгольца с щелевой камерой

Марфин Е.А.^{1*}, Абдрашитов А.А.²

¹ Ведущий научный сотрудник

² Младший научный сотрудник

^{1,2} Институт энергетики и перспективных технологий ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, Россия

Аннотация

В работе представлены результаты исследования струйного осциллятора Гельмгольца, представляющего собой осесимметричный канал переменного сечения, который состоит из цилиндрической камеры-резонатора, закрытой с боков двумя крышками. Осциллятор возбуждается струей воздуха, протекающей через камеру между входным и выходным отверстиями, выполненных по центру в боковых крышках. Основное внимание в работе уделено экспериментальному изучению влияния диаметра и длины выходного отверстия на амплитуду генерируемых колебаний давления. Определены оптимальные соотношения геометрических параметров устройства, при которых достигается максимальная амплитуда колебаний. Численное моделирование позволило лучше понять поле течения газа внутри осциллятора, подчеркнув сложную динамику струйного течения и резонанс акустической моды, а также обосновать механизм генерации колебаний. Полученные результаты и установленные зависимости позволят спроектировать проточные излучатели колебаний давления для различных приложений и, в частности, для реализации акустического воздействия на добычу нефти.

Ключевые слова: струйная генерация, тон отверстия, резонанс, акустические моды, резонатор Гельмгольца.

Numerical and experimental studies of sound generation in a jet-driven Helmholtz oscillator with a slit chamber

Marfin E.A.^{1}, Abdrashitov A.A.[2]*

¹ *Leading Researcher*

² *Junior Researcher*

^{1,2} *Institute of Power Engineering and Advanced Technologies, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia*

Abstract

The paper reports on a study of the jet-driven Helmholtz oscillator, an axisymmetric channel with a varying cross-section that comprises a cylindrical resonator chamber closed by two covers. The oscillator is stimulated by a stream of air that flows through the chamber via inlet and outlet holes, located centrally in the side covers. The study focuses on experimentally investigating how the diameter and length of the outlet affect the amplitude of generated pressure oscillations. The optimal ratios for the device's geometrical parameters are identified for achieving maximum oscillation amplitude. Numerical simulations have facilitated a deeper comprehension of the gas flow field within the oscillator, highlighting the intricate dynamics of the

jet flow and resonance of the acoustic mode, while also substantiating the mechanism of oscillation generation. The obtained outcomes and established relationships will pave the way for the design of flow-through pressure fluctuation radiators to be utilised in various applications, particularly in the implementation of acoustic impact on oil production.

Keywords: *jet generation, hole tone, resonance, acoustic modes, Helmholtz resonator.*

Введение

Шумы и вибрации очень часто являются нежелательными явлениями и с ними необходимо бороться. Однако, в ряде практических применений воздействие интенсивными упругими колебаниями оказывает положительный эффект. Например, известно, что акустическое воздействие на нефтяной пласт интенсифицирует добычу нефти. Результатом такого воздействия, помимо повышения темпа отбора нефти, является увеличение коэффициента извлечения нефти, снижение ее обводненности и энергетических затрат [1-3]. Для осуществления продолжительного воздействия целесообразно использовать проточные излучатели, преобразующие часть энергии потока нагнетаемой в пласт жидкости в энергию колебаний давления.

Одной из наиболее перспективной конструкцией проточного излучателя является устройство со струйным осциллятором Гельмгольца (СОГ), в котором отсутствуют подвижные элементы. Сам осциллятор выполнен из цилиндрической камеры с двумя боковыми крышками, в которых по центру выполнены отверстия [4]. С акустической точки зрения такая конструкция представляет собой резонатор Гельмгольца с двумя горлами, частота собственных колебаний которого определяется его геометрическими параметрами и свойствами рабочей среды. Закачиваемая в скважину технологическая жидкость протекает через СОГ, за которым в потоке возникают регулярные колебания давления на частотах близких к собственным.

Исследованию процесса возбуждения резонатора Гельмгольца потоком посвящено много работ. Наиболее полезный экспериментальный материал для проектирования СОГ содержится в работе [4], автор которой определил, что при плавном увеличении скорости W воздушной струи режим в камере проходит через последовательность периодов колебаний – мод, разделенных периодами покоя. При этом частота колебаний давления в каждой моде близка к частоте собственных колебаний камеры f_0 . В основе механизма генерации мод колебаний лежит тон отверстия, который возникает при натекании струи на острую кромку отверстия в выходной крышке [5-6]. Частотные и фазовые характеристики такого тона описаны в работе [7]. Нашими предыдущими исследованиями показано, что эффективность генерации колебаний в первую очередь зависит от геометрической формы [8] и длины [9] сопла во входной крышке. Также показано [10], что возбуждение акустических мод производится не только тоном отверстия, но и его гармониками. Целью настоящей работы является исследование процесса зарождения тона отверстия и изучение влияния длины выходного отверстия на амплитуду генерируемых колебаний.

1. Численное моделирование газодинамики потока в проточном канале СОГ с целевой камерой

Объектом исследования в работе является СОГ (рис.1), который имеет цилиндрическую камеру диаметром D и длиной L . Во входной крышке толщиной l_1 по центру выполнено сопло в виде цилиндрического отверстия диаметром d_1 . В выходной крышке толщиной l_2 также по центру выполнено выходное отверстие диаметром d_2 .

Значения геометрических размеров осциллятора представлены в Таблице 1. Поскольку длина камеры L значительно меньше ее диаметра D , то такую камеру можно назвать щелевой. Рабочим агентом при численном моделировании и экспериментальных исследованиях являлся воздух. Численные расчеты проводились с использованием математической модели течения жидкости, включающий уравнения Навье-Стокса, неразрывности и сохранения энергии. Расчетная область, включающая проточный канал осциллятора, была построена в системе CAD моделирования.

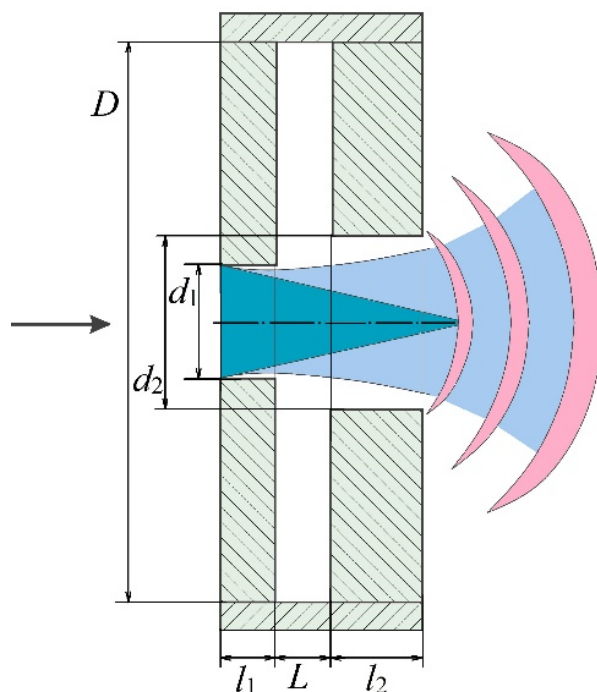


Рис. 1. Схема струйного осциллятора Гельмгольца с щелевой камерой

Таблица 1

Геометрические размеры струйного осциллятора Гельмгольца

Параметр	Значение
Диаметр резонансной камеры D , мм	78
Длины резонансной камеры L , мм	2-14
Диаметр входного сопла d_1 , мм	12
Длина входного сопла l_1 , мм	10
Диаметр выходного отверстия d_2 , мм	13-24
Длина выходного отверстия l_2 , мм	0,9-12

Численное моделирование течения газа в СОГ осуществлялось с помощью пакета FlowVision, основанном на конечно-объемном методе решения, на вычислительном сервере SuperMicro SYS-7049-TR (512 Гб оперативной памяти). Граничными условиями задачи были: на входе – постоянное давление; на стенках – условие прилипания; на выходе – нулевое давление (свободный выход). Результатами численного моделирования являлись мгновенные картины распределения модуля скорости и ее компонент в осевом сечении расчетной области, а также записанные в фиксированных точках области для каждой итерации значения давления и скорости. Общее число расчетных ячеек области более 330 тысяч.

Несмотря на то, что на входе было задано постоянное значение давления, моделируемый процесс оказался нестационарным. В резонансной камере наблюдались интенсивные колебания давления. Скорость струи была также нестационарная. При этом, значение характерной частоты процесса было близким к расчетному значению собственной частоты резонатора Гельмгольца с двумя горлами [11]. На рисунке 2 представлены картины распределения компонентов скорости в осевом сечении осциллятора при давлении на входе $P_{вх} = 5000$ Па после 250 тысяч итераций. Анализ полученных данных позволяет утверждать, что наблюдаемый автоколебательный процесс изменяет форму струи, которая сильно отличается от классической турбулентной или ламинарной затопленной струи. В частности, можно наблюдать как в струе существуют области повышенной скорости (рис.2а). Это объясняется «поджатием» струи, которое обусловлено влиянием вихревых структур вокруг струи, перемещающимися вниз по потоку со скоростью W_k меньшей примерно в 2 раза, чем скорость струи W [12].

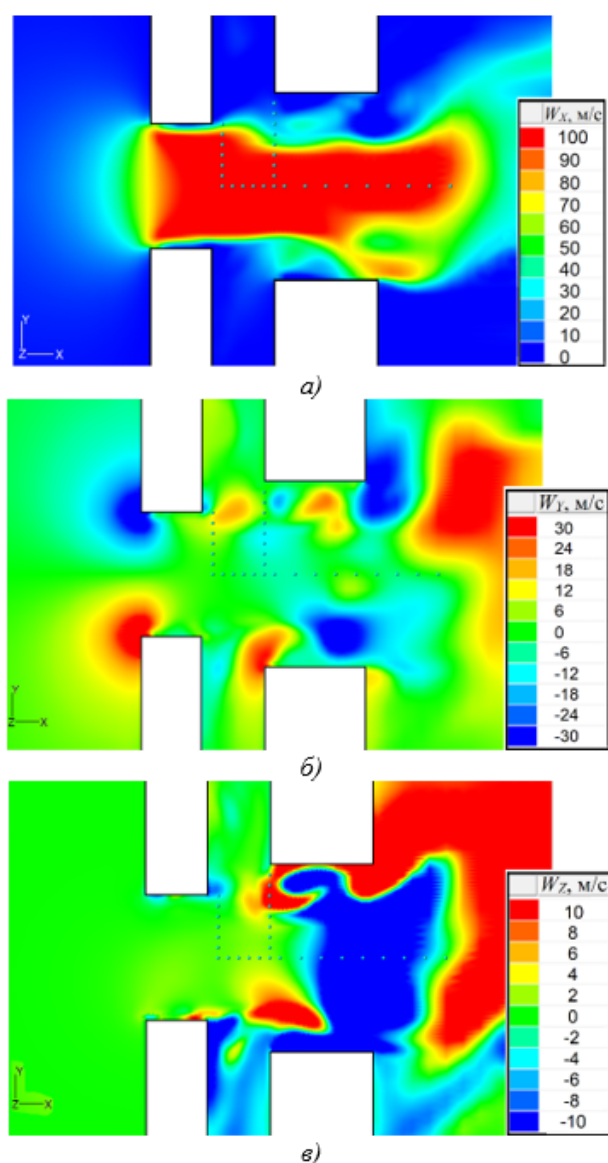


Рис. 2. Распределение X (а), Y (б) и Z (в) компонент скорости в осевом сечении осциллятора

О присутствии вихревых структур говорят смежные области положительных и отрицательных значений Y-компонент струи (рис.2б). Интересным результатом

полученных данных является то, хоть расчетная область является осесимметричной при течении жидкости формируются закрученные потоки. В данном случае закрутка потока пограничной зоны начинается внутри входного сопла и имеет направление против часовой если смотреть по направлению потока струи. Об этом говорят синие и красные области Z -компоненты скорости внутри входного сопла (рис.2в). Подобное явление описано в работе [13], посвященной исследованию механизма саморегулированию акустических колебаний в закрученном течении.

Спектральные характеристики колебаний компонент скорости вблизи среза выходного сопла представлены на рисунке 3. Видно, что максимальные колебаний имеются у X -компоненты скорости и эти колебания имеют два выраженных пика. Второй пик имеет частоту в 2 раза большую, чем первый, и эта частота близка к расчетному значению частоты собственных колебаний осциллятора. Амплитуды колебаний Y - и Z -компонент скорости примерно в 3 раза меньше колебаний X -компоненты скорости.

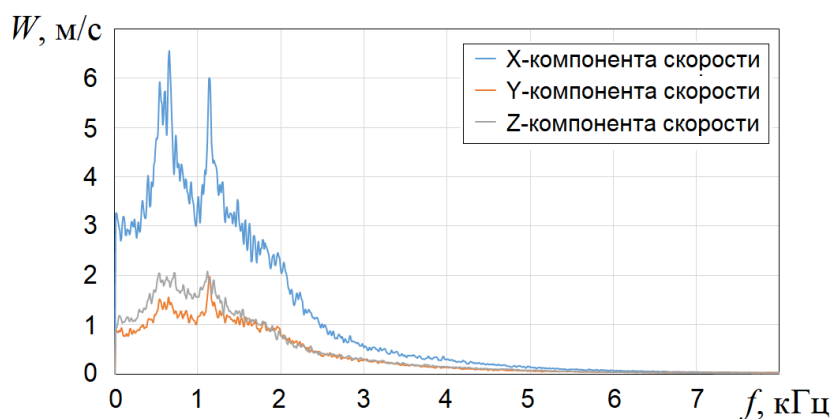


Рис. 3. Спектры колебаний скорости

На рисунке 4 представлены профили средней скорости потока в струе у среза входного сопла (голубая линия) и среднеквадратичного значения амплитуды колебаний скорости потока (красная линия). Видно, что в цилиндрическом сопле струя не полностью заполняет сечение сопла, ее профиль имеет вид близкий к прямоугольному. Колебания скорости потока в струе зависят от расстояния до оси струи. Если в центре струи среднеквадратичное значение амплитуды колебаний скорости примерно постоянно и составляет около 4,5% от скорости струи, то на расстоянии $0,42d_1$ амплитуда колебаний скорости сильно увеличивается и составляет 38% от средней скорости в данной точке. Полученные данные свидетельствуют о том, что в этой области начинаются процессы формирования и срыва вихревых структур.

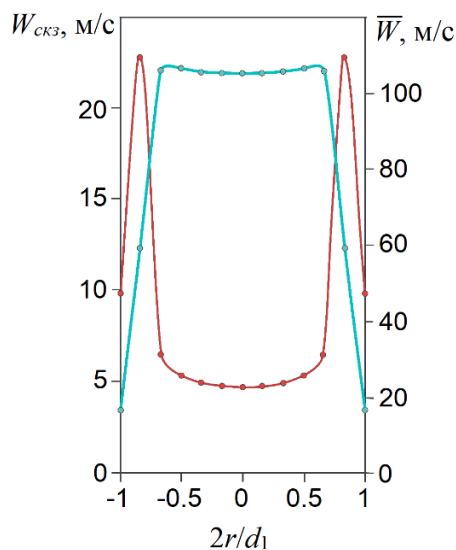


Рис. 4. Профили среднеквадратичной амплитуды колебаний скорости (голубая линия) и средней скорости (красная линия) у среза входного сопла

Сопоставление спектров колебаний давления в середине камеры и колебаний скорости струи, а именно то, что спектры колебаний давления в камере и колебаний скорости в центре струи практически совпадают (рис.5), предполагает следующую последовательность событий. Вихревые структуры вокруг струи при натекании на кромку выходного отверстия генерируют колебания давления (тон отверстия), которые усиливаются резонатором Гельмгольца на частотах, близких к собственным. При этом часть колебаний с частотами выше и ниже резонансной поглощаются. Далее, колебания давления в камере воздействуют на тело струи, что приводит к регулярным колебаниям скорости на частоте собственных колебаний (рис.5 серая кривая). Таким образом, по результатам численных исследований предложен механизм генерации колебаний в струйном осцилляторе Гельмгольца.

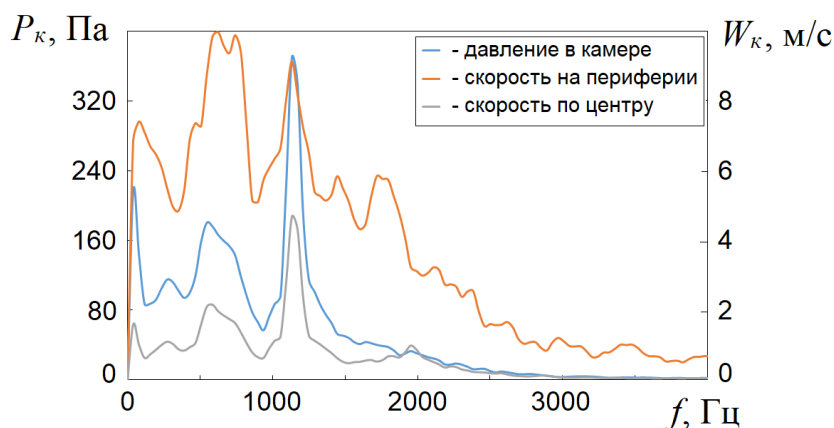


Рис. 5. Сопоставление спектров колебаний давления и скорости

2. Экспериментальное исследование процесса генерации звука в СОГ с щелевой камерой

Физическая модель струйного осциллятора Гельмгольца была выполнена из отрезка пластиковой трубы. С торцов он был закрыт вставленными в него неподвижными крышками из плексигласа, в которых выполнены цилиндрические отверстия. Расстояние между крышками жестко фиксировалось. Геометрические размеры осциллятора представлены в Таблице 1. Частота собственных колебаний такого резонатора может быть рассчитана по формуле (1), в которой эффективные длины отверстий зависят от их диаметра [11]:

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi D} \sqrt{\frac{1}{L} \left(\frac{d_1^2}{l_1} + \frac{d_2^2}{l_2} \right)}, \quad (1)$$

где c_0 – скорость звука в рабочей среде, м/с; D – внутренний диаметр камеры резонатора, м; L – длина камеры резонатора, м; d_1, d_2 – диаметры входного сопла и выходного отверстия, м; l_1, l_2 – эффективные длины входного сопла и выходного отверстия.

Варьируемыми параметрами в эксперименте были диаметр и длина выходного отверстия, и длина камеры (расстояние между крышками). Серия экспериментов для каждого варианта излучателя была проведена на стенде, описанном в работах [8-10], в диапазоне скорости струи от 0 до 100 м/с.

Увеличение перепада давления на излучателе при помощи вакуумного насоса приводит к формированию струи, скорость которой определяется свойствами рабочего агента (в нашем случае воздуха) и значением перепада давления, которое измеряется тензометрическим датчиком разности давления. При определенном значении скорости струи начинается генерация тона отверстия, усиленная резонансом. Частота генерируемых колебаний давления близка к частоте собственных колебаний осциллятора. При увеличении скорости амплитуда колебаний повышается и, достигнув максимального значения, определяемого различными факторами, начинает снижаться. Процесс сопровождается незначительным увеличением частоты генерируемых колебаний. Такая закономерность в работе [14] названа модой колебаний.

На рисунке 6 представлены зависимости среднеквадратичной амплитуды генерируемых колебаний от скорости струи для различных геометрических соотношений диаметра выходного отверстия при постоянной длине выходного отверстия, равного 10 мм, и длине камеры 6 мм. Видно, что с увеличением скорости струи амплитуда колебаний вначале растет, а затем снижается. Максимальная амплитуда колебаний проявляется у осциллятора с диаметром выходного отверстия равного $d_2 = 1.5d_1$. Вместе с тем, максимальные значения амплитуды колебаний достигаются при разных скоростях струи. Это обусловлено тем, что изменение диаметра выходного отверстия приводит к изменению частоты собственных колебаний, а это означает, резонанс возможен на других скоростях струи, поскольку от скорости струи зависит частота тона отверстия и его гармоник.

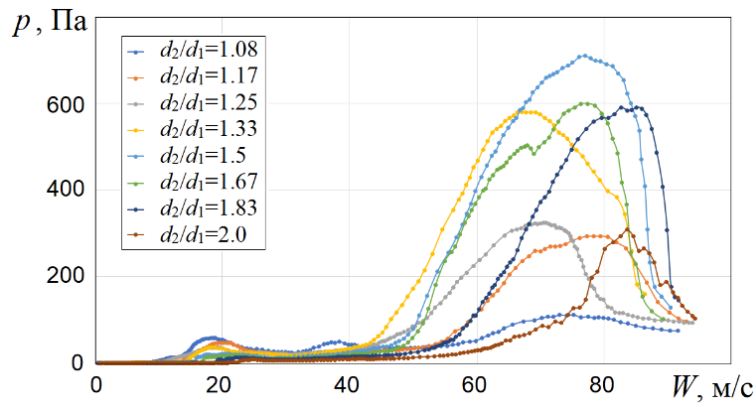


Рис. 6. Зависимости амплитуды колебаний давления в камере от скорости струи при различных диаметрах d_2 выходного отверстия

На рисунке 7 представлены графики зависимости среднеквадратичной амплитуды колебаний от скорости струи и длины резонансной камеры при диаметре выходного отверстия $d_2/d_1 = 1.4$. Видно, что существует оптимальная длина камеры равная $L/d_1 = 0.33$. При этом для данного излучателя с щелевой камерой диапазон скорости струи, при которой генерируются сильные колебания, больше, чем для «классического» осциллятора Гельмгольца [8, 14].

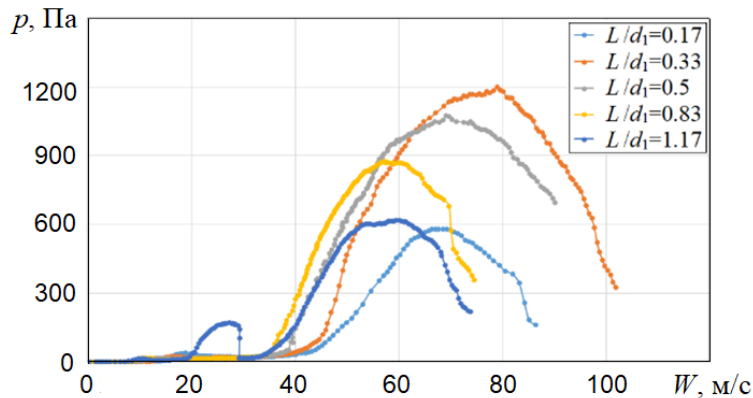


Рис. 7. Зависимости амплитуды колебаний давления в камере от скорости струи при различных длинах L резонансной камеры

Исследование влияния длины выходного отверстия на амплитуду колебаний было выполнено для модели с длиной камеры $L = 6$ мм и диаметром выходного отверстия $d_2 = 16$ мм. На рисунке 8 представлена зависимость максимальной среднеквадратичной амплитуды колебаний, которая практически линейно зависит от толщины выходной крышки (длины выходного отверстия). С увеличением длины выходного отверстия максимально достижимая амплитуда колебаний снижается.

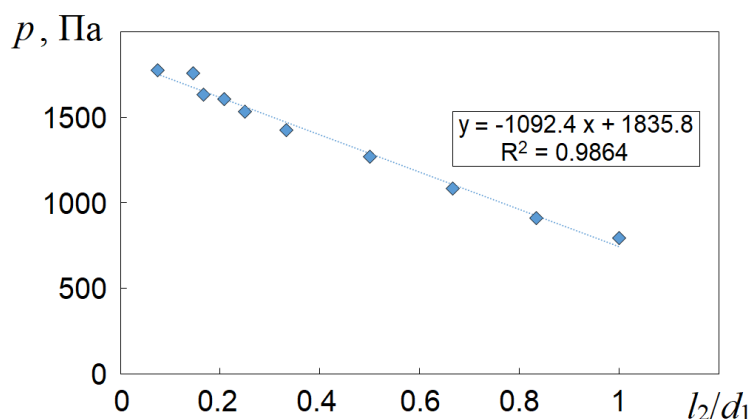


Рис. 8. Зависимость максимальной амплитуды колебаний от длины выходного отверстия

В результате проведенных экспериментальных исследований, установлено, что достижение максимального значения амплитуды генерируемых колебаний зависит от согласованности режимных параметров и геометрических размеров канала осциллятора.

Заклучение

Струйный осциллятор Гельмгольца является проточным излучателем звука, способный генерировать интенсивные колебания давления на собственных частотах. Экспериментально установлено, что особенность осциллятора с щелевой камерой состоит в том, что возможно достижение большей амплитуды колебаний, чем для камеры большей длины. Получены зависимости амплитуды колебаний давления от скорости струи, которые показывают, что диапазон скорости струи, при котором существуют акустические моде, больше для осциллятора с щелевой камерой чем для осциллятора с камерой большей длины. Проведенное численное моделирование процесса генерации колебаний на модели струйного осциллятора Гельмгольца позволило выявить особенности динамики струйного течения и предложить механизм возбуждения автоколебаний. В частности, выявлен факт закрутки потока вокруг струи в цилиндрическом сопле. Полученные результаты могут быть использованы при разработке проточных излучателей как для интенсификации добычи нефти, так и для других промышленных приложений, где имеется поток рабочего агента и необходима интенсификации процесса акустическими колебаниями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01174, <https://rscf.ru/project/22-29-01174/>.

Список литературы

1. Marfin E.A., Kravtsov Y.I., Abdrashitov A.A., Gataullin R.N., Galiimzyanova A.R. Elastic-Wave Effect on Oil Production by In Situ Combustion: Field Results // Petroleum Science and Technology. – 2015. – Vol. 33, No. 15-16. – P. 1526-1532. – DOI 10.1080/10916466.2015.1037923.

2. Кравцов Я.И., Марфин Е.А., Абдрашитов А.А. Повышение эффективности метода парогравитационного дренажа за счет волнового воздействия на пласт // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 5. – С. 35-39.

3. Marfin E.A., Abdrashitov A.A., Kravtsov Y. I. On the selection of the optimal mode of the wave stimulation in oil production // 7th EAGE Saint Petersburg International

Conference and Exhibition: Understanding the Harmony of the Earth's Resources Through Integration of Geosciences. – Saint Petersburg, 2016. – P. 334-338. – DOI 10.3997/2214-4609.201600094.

4. Marfin E.A., Gataullin R.N., Abdrashitov A.A. Acoustic stimulation of oil production by a downhole emitter based on a jet-driven Helmholtz oscillator // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Vol. 215. – P. 110705. – DOI 10.1016/j.petrol.2022.110705.

5. Bennett G.J., Stephens D.B., Rodrigues Verdugo F. Resonant mode characterisation of a cylindrical Helmholtz cavity excited by a shear layer // Journal of the Acoustical Society of America – 2017. – V. 141. – № 1. P. 7–18.

6. Ziada S., Bolduc M., Lafon P. Flow-excited resonance of diametral acoustic modes in ducted rectangular cavities // AIAA Journal – 2017. – V. 55. – № 11. – P. 3817–3830. – DOI: 10.2514/1.J056010.

7. Vaik I., Varga R., Paal G. Frequency and phase characteristics of the edge-tone // Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. – 2014. – V. 58. – № 1. – P. 55–67. – DOI: 10.3311/PPme.7031.

8. Abdrashitov A.A., Marfin E.A., Chachkov D.V., Chefanov V.M. Effect of nozzle shape on amplitude of well acoustic emitter generation // Acoustical Physics. – 2018. – Vol. 64, No. 4. – P. 492-502. – DOI 10.1134/S1063771018030016.

9. Abdrashitov A.A., Marfin E.A. Nozzle length effect on the performance of the jet-driven Helmholtz oscillator // Fluid Dynamics. – 2021. – Vol. 56, No. 1. – P. 142-151. – DOI: 10.1134/S0015462821010018.

10. Абдрашитов А.А., Марфин Е.А. Возбуждение акустических мод гармониками тона отверстия в струйном осцилляторе Гельмгольца // Акустический журнал. – 2023. – Т. 69, № 4. – С. 430-437. – DOI 10.31857/S0320791922600329.

11. Ветошко Р.А., Марфин Е.А., Гаврилов А.Г. Исследование влияния геометрии резонатора Гельмгольца на присоединенную длину горла // Инженерная физика. – 2018. – № 4. – С. 12-19.

12. Sami S., Anderson C. Helmholtz oscillator for the self-modulation of a jet // Proc. 7th Int. Symp. on jet cutting technology. BHRA. Cranfield. Bedford. England. – 1984. – P. 91-98.

13. Mitrofanova O.V., Pozdeeva I.G. Investigation of the acoustic oscillation self-adjustment mechanism in impinging swirling flows // Fluid Dynamics. – 2015. – Vol. 50, No. 5. – P. 646-654. – DOI 10.1134/S0015462815050063.

14. Morel Th. Experimental study of a jet-driven Helmholtz oscillator // Journal of Fluids Engineering – 1979. – V. 101. – № 3. – P. 383–390. – DOI: 10.1115/1.3448983

15. Marfin E.A., Abdrashitov A.A. Numerical simulation of gas-dynamics in a jet emitter with a slit chamber // XXI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022): Abstracts, Novosibirsk, 08–14 августа 2022 года. Vol. Part I. – Novosibirsk: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Сибирское отделение Российской академии наук», 2022. – P. 130-131. – DOI 10.53954/9785604788967_130.

References

1. Marfin E.A., Kravtsov Y.I., Abdrashitov A.A., Gataullin R.N., Galiimzyanova A.R. Elastic-Wave Effect on Oil Production by In Situ Combustion: Field Results // Petroleum Science and Technology. – 2015. – Vol. 33, No. 15-16. – P. 1526-1532. – DOI 10.1080/10916466.2015.1037923.

2. Kravtsov YA.I., Marfin E.A., Abdrashitov A.A. Povyshenie effektivnosti metoda parogravitacionnogo drenazha za schet volnovogo vozdejstviya na plast // *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanyh i gazovyh mestorozhdenij*. – 2016. – № 5. – P. 35-39.
3. Marfin E.A., Abdrashitov A.A., Kravtsov Y. I. On the selection of the optimal mode of the wave stimulation in oil production // 7th EAGE Saint Petersburg International Conference and Exhibition: Understanding the Harmony of the Earth's Resources Through Integration of Geosciences. – Saint Petersburg, 2016. – P. 334-338. – DOI 10.3997/2214-4609.201600094.
4. Marfin E.A., Gataullin R.N., Abdrashitov A.A. Acoustic stimulation of oil production by a downhole emitter based on a jet-driven Helmholtz oscillator // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 215. – P. 110705. – DOI 10.1016/j.petrol.2022.110705.
5. Bennett G.J., Stephens D.B., Rodrigues Verdugo F. Resonant mode characterisation of a cylindrical Helmholtz cavity excited by a shear layer // *Journal of the Acoustical Society of America* – 2017. – V. 141. – № 1. P. 7–18.
6. Ziada S., Bolduc M., Lafon P. Flow-excited resonance of diametral acoustic modes in ducted rectangular cavities // *AIAA Journal* – 2017. – V. 55. – № 11. – P. 3817–3830. – DOI: 10.2514/1.J056010.
7. Vaik I., Varga R., Paal G. Frequency and phase characteristics of the edge-tone // *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. – 2014. – V. 58. – № 1. – P. 55–67. – DOI: 10.3311/PPme.7031.
8. Abdrashitov A.A., Marfin E.A., Chachkov D.V., Chefanov V.M. Effect of nozzle shape on amplitude of well acoustic emitter generation // *Acoustical Physics*. – 2018. – Vol. 64, No. 4. – P. 492-502. – DOI 10.1134/S1063771018030016.
9. Abdrashitov A.A., Marfin E.A. Nozzle length effect on the performance of the jet-driven Helmholtz oscillator // *Fluid Dynamics*. – 2021. – Vol. 56, No. 1. – P. 142-151. – DOI: 10.1134/S0015462821010018.
10. Abdrashitov A.A., Marfin E.A. Vozbuzhdenie akusticheskikh mod garmonikami tona otverstiya v strujnom oscillyatore Gel'mgol'ca // *Akusticheskij zhurnal*. – 2023. – T. 69, № 4. – P. 430-437. – DOI 10.31857/S0320791922600329.
11. Vetoshko R.A., Marfin E.A., Gavrilov A.G. Issledovanie vliyaniya geometrii rezonatora Gel'mgol'ca na prisoedinennuyu dlinu gorla // *Inzhenernaya fizika*. – 2018. – № 4. – P. 12-19.
12. Sami S., Anderson C. Helmholtz oscillator for the self-modulation of a jet // *Proc. 7th Int. Symp. on jet cutting technology*. BHRA. Cranfield. Bedford. England. – 1984. – P. 91-98.
13. Mitrofanova O.V., Pozdeeva I.G. Investigation of the acoustic oscillation self-adjustment mechanism in impinging swirling flows // *Fluid Dynamics*. – 2015. – Vol. 50, No. 5. – P. 646-654. – DOI 10.1134/S0015462815050063.
14. Morel Th. Experimental study of a jet-driven Helmholtz oscillator // *Journal of Fluids Engineering* – 1979. – V. 101. – № 3. – P. 383–390. – DOI: 10.1115/1.3448983
15. Marfin E.A., Abdrashitov A.A. Numerical simulation of gas-dynamics in a jet emitter with a slit chamber // *HKHI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022): Abstracts*, Novosibirsk, 08–14 avgusta 2022 goda. Vol. Part I. – Novosibirsk: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie «Sibirskoe otdelenie Rossijskoj akademii nauk», 2022. – P. 130-131. – DOI 10.53954/9785604788967_130.