

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СОПЛА НА АМПЛИТУДУ ГЕНЕРАЦИИ В СКВАЖИННОМ АКУСТИЧЕСКОМ ИЗЛУЧАТЕЛЕ

© 2018 г. А. А. Абдрашитов^{а, *}, Е. А. Марфин^{а, **}, Д. В. Чачков^{б, ***}, В. М. Чефанов^с

^аКазанский Научный Центр РАН
420111 Казань, ул. Лобачевского 2/31, Россия

^бКазанское отделение МСЦ РАН
119334 Москва, ул. Ленинский проспект 32а, Россия

^сКазанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева
420111 Казань, ул. К. Маркса 10, Россия

*e-mail: abdary@mail.ru

**e-mail: marfin76@mail.ru

***e-mail: de2005c@gmail.com

Поступила в редакцию 29.08.2017 г.

Выполнено экспериментальное исследование генерации колебаний давления в модели скважинного акустического излучателя с соплами различной формы. Изучено влияние плавного входного участка сопла на амплитуду генерации, оптимальную длину струи и диаметр выходного отверстия. Рассмотрена картина формирования в сопле, между стенкой канала и периферией струи, области обратных токов, сообщающейся с камерой резонатора. Отмечено существенное увеличение амплитуды генерации при изготовлении плавного соплового входа и формировании в канале сопла равномерного профиля скорости.

Ключевые слова: резонатор Гельмгольца, тон отверстия, моды струйной генерации, интенсификация нефтедобычи

DOI: 10.1134/S0320791918030012

ВВЕДЕНИЕ

Скважинный акустический излучатель (САИ) предназначен для формирования в потоке воздуха, закачиваемого через нагнетательные скважины в продуктивный нефтяной пласт, регулярных колебаний давления, которые способствуют увеличению подвижности пластовых флюидов и повышению дебита добывающих скважин [1–3].

Конструкция САИ скомбинирована из двух самостоятельных устройств: струйного генератора и объемного резонатора. Струйный генератор первичных колебаний давления состоит из сопла, струи жидкости и острой кромки выходного отверстия. Струйный генератор размещается внутри камеры объемного резонатора, и струя жидкости устремляется из сопла к выходному отверстию через всю камеру. Струя задевает своей возмущенной периферией острые кромки выходного отверстия, и вблизи кромок с определенной частотой $f_r \sim W/L$, где W – скорость струи, L – длина струи, генерируются локальные возмущения давления небольшой амплитуды [4].

Объемный резонатор представляет собой цилиндрическую камеру с двумя отверстиями –

передней и задней крышками. Это камера с двумя горлами, при умеренных числах Рейнольдса ($Re_L < 5...7 \times 10^4$) она ведет себя подобно классическому резонатору Гельмгольца с одним горлом и резонирует на низкой частоте (частоте Гельмгольца) f_0 , которая возбуждается как динамиком, так и струей и определяется выражением

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{V} \left(\frac{d_1}{\ell_1} + \frac{d_2}{\ell_2} \right)}, \quad (1)$$

где c – скорость звука в среде, V – объем камеры, d_1 и d_2 – диаметр сопла и выходного отверстия соответственно, ℓ_1 и ℓ_2 – длины сопла и выходного отверстия соответственно. При достижении больших чисел Рейнольдса ($Re_L > 7...8 \times 10^4$) за счет увеличения скорости или же удлинения струи эта камера резонирует при возбуждении струей на частоте полуволнового резонатора $f_{1/2} = c/2L$, где L – интервал между крышками. При возбуждении динамиком цилиндрическая камера с двумя горлами резонирует на частоте Гельмгольца, которая и принимается в качестве частоты собственных колебаний (ЧСК) камеры, но, ес-

ли отверстия достаточно малы, — превращается в классический полуволновой резонатор.

При совпадении частоты генерации этих первичных колебаний с ЧСК объемного резонатора наступает резонанс и отчетливо слышен “тон”. При этом из выходного отверстия излучаются акустические волны.

Обе части устройства настроены “в унисон”, режимные и линейные параметры струйного генератора, определяющие частоту генерации первичных колебаний давления, должны соответствовать конструктивному размеру камеры резонатора, объем которой определяет частоту ее собственных колебаний.

Механизм генерации схематически выглядит следующим образом. В застойной зоне за срезом сопла крутится кольцевая вихрь, от которого со строгой периодичностью отрываются кольцевые вихревые структуры, подобные кольцам дыма, увлекаемые струей в направлении острой кромки выходного отверстия со скоростью $W_k \approx W/2$ в соответствии с теорией Крюгера—Шмидке, образуя подобие “дорожки Кармана”. При соударении этих вихревых структур с кольцевой острой кромкой они деформируются, и при этом формируются локальные слабые возмущения давления, которые распространяются во всех направлениях со скоростью звука. Достигая области кольцевого вихря за срезом сопла, эти импульсы давления участвуют в формировании новых вихревых структур и увеличивают их запас энергии. Если периодичность перемещения вихревых структур в направлении выходного отверстия и обратного движения импульсов давления к сопловому срезу совпадает с периодичностью формирования и срыва новых вихревых структур от среза сопла, то получается механизм положительной обратной связи и формируется автоколебательный процесс, а амплитуда колебаний давления вокруг струи многократно увеличивается. На частоте обратной связи формируется тон отверстия, промежуточные вихревые структуры не получают дополнительной энергии по механизму обратной связи в струе, и их амплитуда колебаний давления мала [5–7].

Авторы работы [8] подтвердили, что система струя—кромка генерирует в определенных областях, уникально определяемых скоростью потока W и длиной струи L . Эти устойчивые режимы функционирования они называют “модами”.

Авторы работы [9] установили, что частота тона, производимого струйной системой струя—кромка, определяется расстоянием между срезом сопла и кромкой L и скоростью струи W , но соотношение это нелинейно. Они определили в результате измерений, что частота генерации изменяется скачкообразно при плавном изменении скорости струи, при достижении ею некоторого

предельного значения для данной моды. При переходе от одной моды к другой амплитуда одной моды плавно уменьшается, а другой — плавно возрастает.

Частота излучения определяется ЧСК камеры объемного резонатора. Струя генерирует при натекании на острую кромку отверстия слабые колебания давления дискретных частот в широком интервале частоты. Однако усиливаются резонатором лишь те первичные колебания давления, периодичность возникновения которых согласуется с его ЧСК. Никакие изменения конструктивных параметров струйного генератора не изменяют частоту излучения. Вместе с этим, конструктивные параметры струйного генератора сильно влияют на амплитуду излучения, поскольку она определяется не только добротностью объемного резонатора, но зависит также и от амплитуды генерации первичных колебаний давления на острой кромке выходного отверстия.

В работе [10] рассматривается система автоматического управления, которая обеспечивает совпадение частоты тона кромки с частотой собственных колебаний САИ за счет регулирования расхода жидкости через сопло струйного генератора.

Предыдущие экспериментаторы использовали в генерирующей системе сопло—струя—кромка либо плоские сопла в виде щели, либо сопла в виде цилиндрических отверстий с острыми кромками. Предполагалось, что струя занимает всю площадь соплового среза диаметром d_c и распределение скорости в поперечном сечении струи на срезе сопла равномерное.

Однако в работе [11] установлено экспериментально, что осесимметричная струя на выходе из круглого сопла, представляющего собой цилиндрический канал с острой входной кромкой и длиной $l_c \leq d_c$, заполняет только часть площади среза сопла. Коэффициент сжатия ϵ струи с острой входной кромкой составляет примерно 0.62 при $Re > 10^4$.

В работе [12] сообщается, что непосредственно за острой входной кромкой распределение скорости параболическое и приобретает равномерный вид только в центральной части струи за минимальным сечением d_{\min} , которое располагается за срезом сопла на расстоянии порядка $0.5d_c$. При этом на периферии струи скорость меньше, нежели в центральной области. Скругление входной кромки сопла радиусом $2d_c$ обеспечивает формирование равномерного профиля скорости на всем протяжении сопла, поскольку на входе в сопло отсутствует радиальная составляющая скорости. Коэффициент скорости ϕ в обоих случаях примерно равен 0.97. Коэффициент сжатия ϵ струи с плавным входом составляет примерно 1.

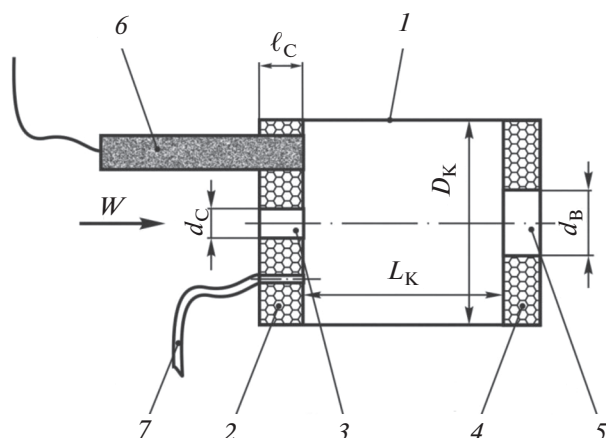


Рис. 1. Схема конструкции скважинного акустического излучателя.

В работе [13] исследовались колебания газа на частотах второй и третьей гармоник в цилиндрической трубе, открытой с одной стороны. Отмечено, что граничные условия на открытом конце трубы не содержат эмпирических параметров.

В работе [14] описана беззеховая камера для измерения шума аэродинамических источников, формирующая условия свободного поля. Источником шума может являться турбулентная струя, истекающая из сопла и уходящая в принимающий коллектор.

В работе [15] оценивалась ЧСК резонатора Гельмгольца круглого сечения, установленного перпендикулярно в боковой стенке прямоугольного канала. Определялась присоединенная длина горла резонатора, и анализировалось влияние на нее и ЧСК резонатора формы канала.

Из рассмотрения вихревой теории Крюгера–Шмидке сформировалось предположение, что для увеличения амплитуды генерации в САИ целесообразно увеличивать скорость на периферии струи, а также полностью заполнять струей канал сопла в области соплового среза. Таким образом повышается способность струи увлекать за собой кольцевые вихревые структуры, формирующиеся за срезом сопла, а также сообщать им большую скорость в интервале между срезом сопла и острой выходной кромкой. В работе [6] рассматривается как один из вариантов профилированное сопло, но никаких преимуществ при его использовании автор не заметил.

Целью настоящей работы является изучение влияния формы сопла и структуры струи на амплитуду генерации системы сопло–струя–кромка, расположенной в объемном резонаторе.

МЕТОДИКА И ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальная модель скважинного акустического излучателя (САИ) изготавливалась из отрезков пластиковой трубы различной длины l внутренним диаметром $D_k = 77$ мм (рис. 1). Торцы трубы закрывались плексигласовыми крышками 2 и 4. Передняя крышка имела осевое профилированное отверстие – сопло для разгона жидкости перед подачей ее внутрь камеры резонатора. В задней крышке имелось выходное отверстие 5 цилиндрической формы для удаления отработавшей жидкости из резонатора. В передней крышке монтировался измерительный микрофон 6 и штуцер 7 для замера статического давления внутри камеры. Длина струи $L_{стр}$ в такой конструкции равна интервалу между крышками, т.е. длине камеры L_k .

Сопло № 1 представляло собой цилиндрический канал диаметром $d_c = 12$ мм и длиной $l_c = 10$ мм. Сопло № 2 представляло собой цилиндрический канал диаметром $d_c = 12$ мм и длиной $l_c = 16.5$ мм, у которого входная кромка имела скругление радиусом 5 мм. Сопло № 3 представляло собой цилиндрический канал диаметром $d_c = 12$ мм и длиной $l_c = 25$ мм, у которого входная кромка имела скругление радиусом 13 мм. Сопло № 4 представляло собой трубку с внутренним диаметром $d_c = 12$ мм и длиной $l_c = 50$ мм. Выходное отверстие выполнялось цилиндрической формы диаметром от 10 до 19 мм и длиной 10.3 мм. Длина камеры резонатора изменялась в интервале между 12 и 60 мм. Соотношения основных размеров модели были взяты из работы [6]. В ходе экспериментов диаметр сопла $d_c = 12$ мм оставался неизменным, с его величиной соотносились остальные размеры модели САИ. Установленные частота дискретизации и размер спектрального окна БПФ позволяли определять частоту резонанса с точностью порядка 0.6 Гц. Располагаемая измерительная аппаратура позволяла уверенно регистрировать высшие моды при скорости струи менее 1 м/с.

Модель монтировалась в крышку пластмассовой бочки объемом 0.23 м³ таким образом, чтобы входное отверстие (сопло) оставалось снаружи, а выходная часть модели с выходным отверстием располагалась внутри бочки. Воздух из бочки отсасывался вакуум-насосом. Объем бочки был на три порядка больше объема камеры резонатора. При таком расположении камера резонатора акустически не была связана с другими объемами, например, с подводящим и отводящим шлангами. Это обстоятельство отмечено в работе [6]. Предварительное экспериментальное исследование показало, что ЧСК установленной в бочку модели не отличалась от ЧСК извлеченной модели. Также не допускалась установка крышек не

заподлицо с торцом трубы камеры, поскольку было замечено уменьшение ЧСК модели при незначительном утапливании крышек внутрь трубы вследствие создания таким образом четвертьволнового резонатора снаружи исследуемой камеры и формирования акустической системы из двух связанных резонаторов, характеризующейся меньшей ЧСК.

Числа Струхала и Рейнольдса в настоящей работе рассчитывались по идеальной скорости струи $W^2 = \varphi 2\Delta P/\rho$, где ΔP – перепад давления на сопле, ρ – плотность воздуха. Коэффициент скорости $\varphi \sim 0.97$ во всех исследованных случаях, для упрощения рассуждений и расчетов можно принять его равным единице. При этом положение мод у САИ с цилиндрическим соплом в координатах $Sh - f/f_0(A_{max})$ в наших экспериментах совпадало с положением мод в работе [6]. Перепад давления на сопле замерялся преобразователем давления ПД 150-ДИВ1250 Овен. Колебания давления внутри камеры измерялись полудюймовым микрофоном RFT MV 201 Robotron чувствительностью 10 мВ/Па с микрофонным усилителем 00 011 Robotron. Регистрируемые сигналы оцифровывались модулем Е14-140 14-разрядного программно-аппаратного аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 10 кГц и передавались на компьютер. Для регистрации и обработки сигналов использовалась программа Power Graph 3.3.8. Общая погрешность акустической измерительной системы при регистрации частоты тарированного сигнала составляла порядка 0.4%.

Для тарировки амплитуды измеряемых колебаний давления 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Форма канала сопла

Скругление входа (сопло № 2 $R = 5$ мм) существенно изменяло технические характеристики САИ, амплитуда генерации увеличилась в три раза (рис. 2).

Наивысшая амплитуда генерации достигалась, как правило, на первой моде, если она возникала. Если же комбинация режимных и геометрических параметров не соответствовала условиям возникновения первой моды, то наивысшая амплитуда генерации достигалась на второй моде. При этом, как замечено, вторая мода смещалась в область большей скорости. Число Струхала при этом уменьшалось незначительно, поскольку увеличивалась не только скорость струи, но и частота генерации. Отсутствие двух первых мод приводило к такому же изменению третьей моды.

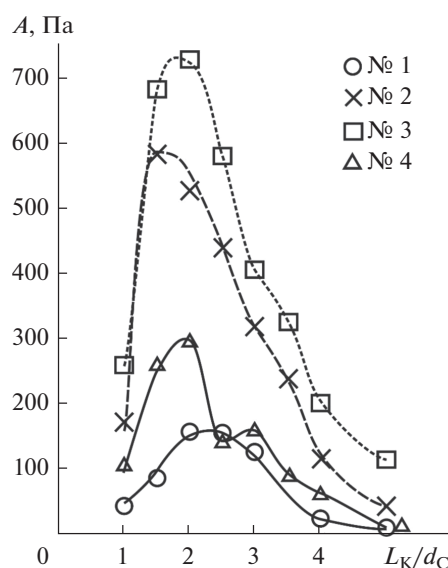


Рис. 2. Влияние формы соплового входа на наибольшую амплитуду генерации при определенном диаметре выходного отверстия. $d_B = 1.33d_C$.

Если изменение геометрии камеры вызывало появление еще одной промежуточной моды, то низшая мода смещалась в сторону большей скорости, а высшая мода – в сторону меньшей скорости. Как правило, между модами существует интервал по скорости. Высшие моды начинают выделяться на уровне шума при скорости струи порядка 1 м/с, причем у них отношение амплитуды колебаний давления A к скоростному напору q наибольшее. У низших мод, более интенсивных по абсолютной величине A , это соотношение значительно меньше. На рис. 3 точки на графике принадлежат наиболее интенсивной моде, вне зависимости от скорости, при которой она возникала.

На рис. 2 видно, что небольшое скругление входной кромки сопла приводит к значительному увеличению амплитуды генерации. Дальнейшее увеличение плавности входа в сопло не приводит к такому замечательному результату.

Сопло в форме трубки с внутренним диаметром 12 мм и длиной 50 мм, установленное заподлицо с внутренней поверхностью камеры, также обеспечило повышение амплитуды генерации, но в меньшей степени, нежели сопла с плавным входом.

Для сопел с плавным входом было замечено, что моды возникали при большей скорости струи (рис. 3), чем у цилиндрического сопла.

На рис. 3 представлены графики первых трех мод, которые последовательно возникали в окне монитора при плавном увеличении скорости струи.

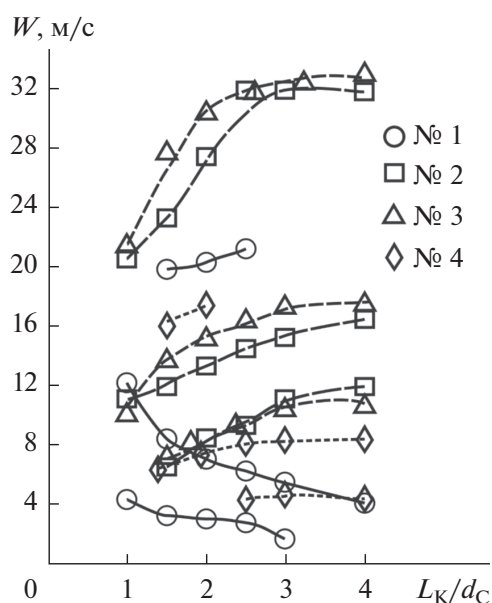


Рис. 3. Скорость струи, при которой появляются первые три моды струйной генерации, при различной длине камеры для разных сопел. $d_B = 1.33d_C$.

Низшие, самые интенсивные моды (верхняя группа на рис. 3) возникали при наименьшем из приемлемых чисел Струхаля ($Sh = fL/W$) для данной конфигурации устройства. Для сравнения — в работе [6] графики построены в координатах с обратным числом Струхаля для каждой отдельной конфигурации устройства. Для различающихся конфигураций устройства САИ числа Струхаля также различные. Для всех четырех форм сопел при увеличении длины камеры скорость струи, на которой возникали низшие моды, увеличивалась. Видно, что с цилиндрическим соплом все моды возникают при меньшей скорости струи, нежели для сопел с плавным входом. Центральная группа кривых принадлежит второй моде. Вторая мода для сопел различной формы велась по-разному. Удлинение камеры с цилиндрическим соплом № 1 приводило к уменьшению скорости струи, на которой возникала вторая мода. Удлинение камеры с соплом № 2 и № 3 приводило к увеличению скорости струи, на которой возникала вторая мода. В камере с соплом № 4 увеличение длины камеры не приводило к существенному увеличению скорости струи, на которой образовывалась вторая мода.

Высшие моды соответствуют нижней группе кривых. Видно, что высшая (третья) мода возникла при наименьшей скорости струи в случае сопла № 1 цилиндрической формы. Причем при увеличении длины камеры и, соответственно, струи скорость струи, при которой возникает высшая мода, уменьшалась. Первая и вторая моды возникали на существенно большей скорости

струи, и величина этой необходимой скорости продолжала увеличиваться при удлинении камеры и струи.

Высшая и центральная моды для сопла-трубки возникают при большей скорости струи, нежели для цилиндрического сопла, а низшие моды — при меньшей. Заметно, что скорость струи, при которой возникают моды у сопла-трубки, меняется незначительно при удлинении камеры.

Длина камеры

Влияние длины камеры резонатора на амплитуду генерации можно оценить из рис. 4. Видно, что длина камеры должна быть вполне определенной при всей совокупности геометрических размеров резонатора.

Амплитуда генерации имеет выраженный экстремум при изменении длины камеры от 1 до 4 калибров сопла ($1 < L_K/d_C < 4$) в том случае, если положение острой кромки выходного отверстия не нарушает образование цепочки вихревых возмущений за срезом сопла. На рис. 4. видно, что интервал между срезом цилиндрического сопла и острой кромкой выходного отверстия, равный диаметру сопла ($L_K/d_C = 1$), слишком мал для нормального функционирования генерирующей системы сопло—струя—кромка. Изменение диаметра выходного отверстия в этом случае не влияет на амплитуду генерации. А интервал в четыре калибра сопла ($L_K/d_C = 4$) слишком велик — очевидно, по причине размывания вихревых структур на такой длине струи. Оптимальный интервал — порядка двух калибров ($L_K/d_C = 2$). На такой длине вихревые структуры успевают сформироваться, но при этом сохранить свою энергию до соударения с острой кромкой.

Для сопла с плавным входом № 3 оптимальный интервал длины камеры равен тем же двум калибрам ($L_K/d_C = 2$). Но при интервале в четыре калибра струи ($L_K/d_C = 4$) увеличение диаметра выходного отверстия приводит к непрерывному увеличению амплитуды генерации. Генерирующая система работает даже при самом маленьком интервале в один калибр ($L_K/d_C = 1$) с выходным отверстием диаметром немного большим диаметра сопла. Большой интервал между срезом сопла и выходным отверстием лучше согласуется с большим диаметром отверстия. В общем, амплитуда генерации для цилиндрического сопла № 1 повышается при увеличении диаметра выходного отверстия до $1.33d_C$. Дальнейшее увеличение диаметра выходного отверстия приводит к снижению амплитуды генерации, вероятно, по причине того, что вихревые возмущения, окружающие струю, проскальзывают внутри отверстия, не задевая его острую кромку.

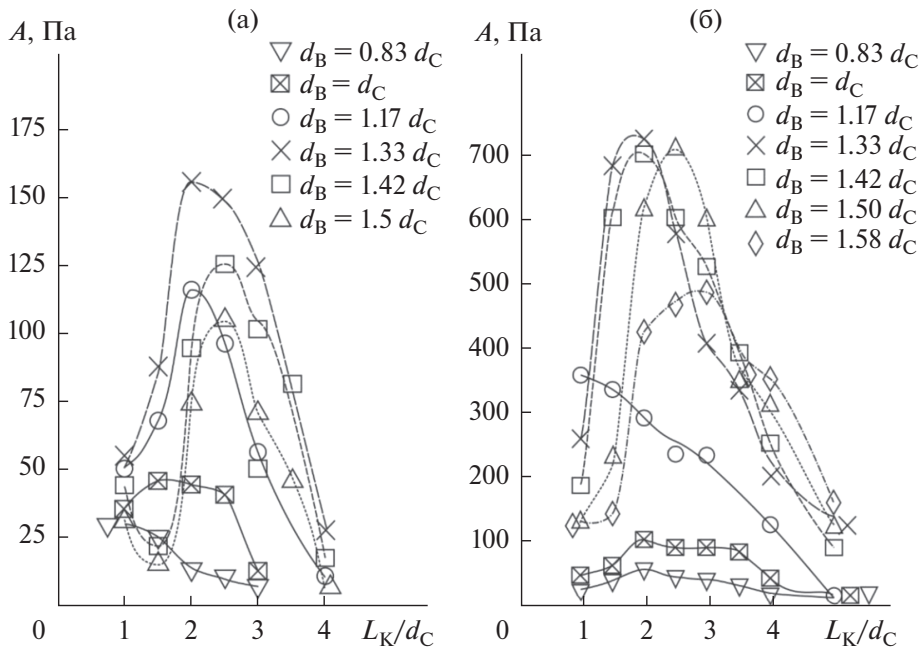


Рис. 4. Влияние длины камеры и струи на амплитуду генерации при неизменном диаметре выходного отверстия для сопел: (а) № 1 и (б) № 3.

Размер выходного отверстия

Выходное отверстие представляло собой сверление в плоской задней крышке и имело острую входную кромку. Толщина задней крышки не изменялась, и при увеличении диаметра выходного отверстия ЧСК камеры также увеличивалась.

Для сопла № 1 на рис. 5а заметно, что экстремумы кривых при меньших диаметрах выходного отверстия ($d_B/d_C \approx 1.17...1.33$) смещены влево, в область меньшей длины камеры ($L_K/d_C \approx 1.5...2$), а экстремумы кривых при больших диаметрах выходного отверстия ($d_B/d_C \approx 1.42...1.5$) смещены вправо, в область большей длины камеры ($L_K/d_C \approx 2...2.5$). В работе [12] выходное отверстие диаметром 16 мм ($d_B/d_C = 1.33$) обеспечивает существенно лучшие показатели в комбинации с соплом № 1.

Выполнение плавной входной кромки сопла расширяет интервал приемлемых размеров выходного отверстия (см. рис. 5б). При общем повышении амплитуды генерации видно, что не только выходное отверстие диаметром 16 мм ($d_B/d_C = 1.33$) показывает наилучший результат, но и увеличение диаметра выходного отверстия до 18 мм ($d_B/d_C = 1.5$) обеспечивает почти такую же амплитуду генерации. Увеличение диаметра выходного отверстия до 19 мм ($d_B/d_C = 1.58$) позволяет еще немного увеличить длину камеры (экстремум смещается еще дальше вправо), но амплитуда генерации не достигает уже таких высоких значений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Форма струи

Результаты экспериментов с САИ, имеющим сопло № 1 цилиндрической формы, хорошо согласуются с материалами, представленными в статье [6]. Наибольшая амплитуда генерации достигалась при длине камеры $L_K = 2d_C$ и диаметре выходного отверстия $d_B = 1.33d_C$.

На рис. 6 изображена граница круглой струи, движущейся внутри генерирующей системы сопло—струя—кромка, а также изменение ее внутренней структуры.

Втекая внутрь цилиндрического сопла, струя немного поджимается вследствие влияния радиальной составляющей скорости в сечении входа в сопло. В этой области эпюра скорости существенно неравномерная, в работе [12] считается, что она близка к параболической форме. Внутри сопла и на некотором протяжении за срезом сопла струя продолжает поджиматься. В работе [11] сообщается, что струя продолжает поджиматься на протяжении $1...1.5d_C$ за сопловым срезом. В работе [12] эта величина называется в пределе $0.5d_C$. Достигнув сечения, в котором струя имеет наименьший диаметр d_{min} , струя начинает расширяться. В работе [11] приводится коэффициент поджатия струи ϵ близкий к 0.62 для $Re > 10^4$. Форма струи и распределение давления в поперечном сечении не зависят от перепада давления на сопле. В минимальном сечении d_{min} профиль скорости равномерный, и далее развитие струи

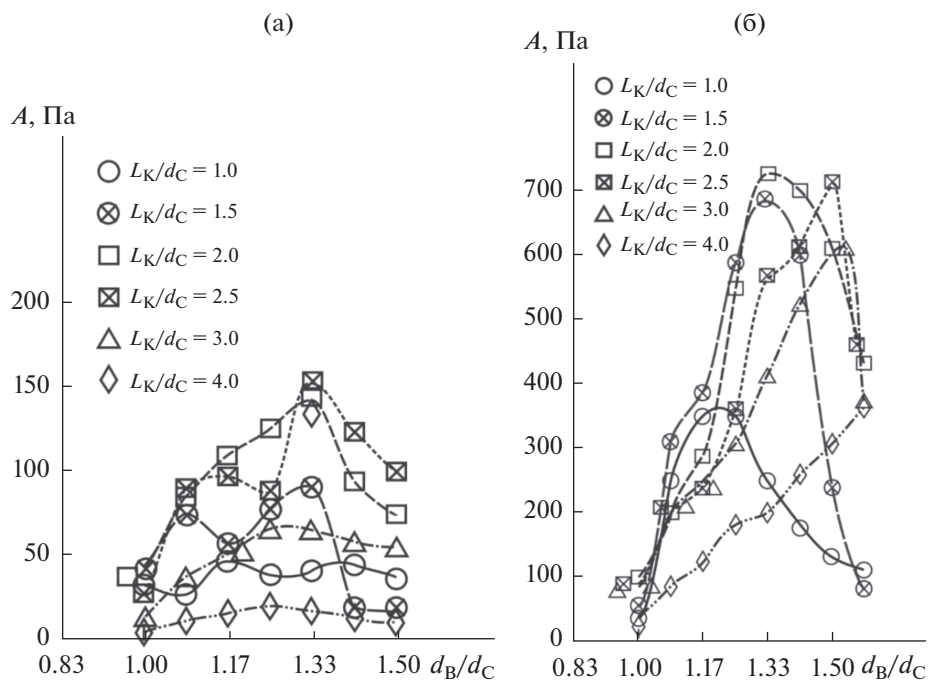


Рис. 5. Влияние диаметра выходного отверстия на амплитуду генерации при неизменной длине камеры и струи для сопел: (а) № 1 и (б) № 3.

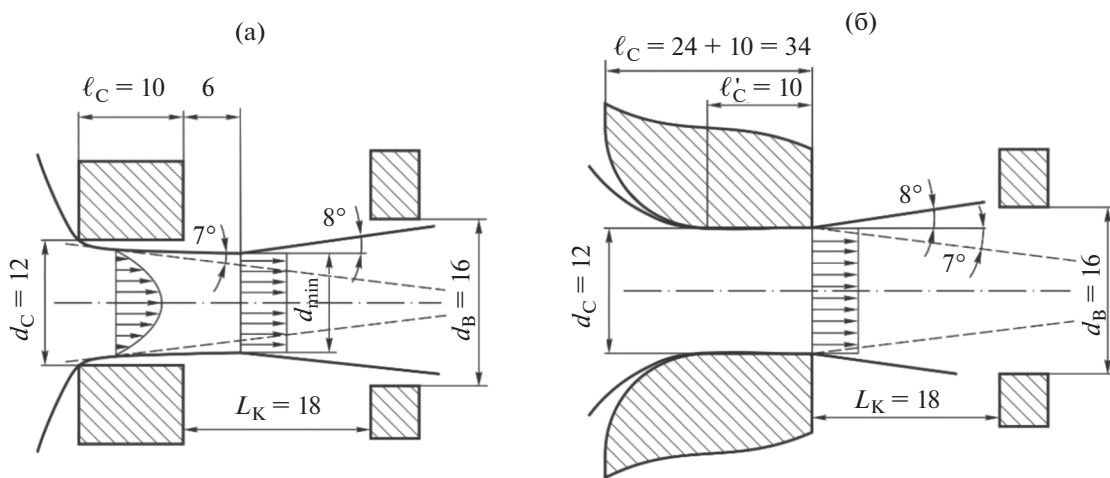


Рис. 6. Изображение границы и структуры струи для сопел: (а) с острой кромкой и (б) с плавным входом.

можно считать как истечение свободной затопленной струи, граница которой расширяется под углом $8^{\circ}20'$.

Средняя скорость струи внутри канала сопла изменяется незначительно, а коэффициент скорости $\varphi \sim 0.97$ [11]. Но на периферии струи скорость внутри сопла монотонно увеличивается от параболического распределения к равномерному. Струя внутри сопла монотонно сужается и вытекает из канала, не задевая выходную кромку,

если длина цилиндрического сопла не превышает $2-2.5d_C$.

Внутри сопла, между стенкой канала и оболочкой струи, формируется область обратных токов, давление в которой близко к статическому давлению в струе и ниже давления в камере резонатора. Эта область незамкнута, она сообщается с камерой резонатора. Жидкость устремляется вдоль стенки канала внутрь области обратных токов, в направлении входной острой кромки, подхватывается струей, увлекается и выносится в камеру.

Эта “вялотекущая” пленка затрудняет взаимодействие струи с кольцевым вихрем, формирующимся вокруг соплового среза, что приводит к уменьшению амплитуды генерации.

Скругление острой кромки на входе в сопло радиусом $2d_c$ обеспечивает плавность втекания жидкости в цилиндрический участок канала l'_c , при этом отсутствует радиальная составляющая скорости на входе в сопло. Струя не испытывает поджатия и заполняет все сечение канала, не позволяя формироваться области обратных токов. Распределение скорости в поперечном сечении канала равномерное на всем протяжении канала.

В центральной части струи прерывистой линией показано ламинарное ядро струи. На рис. 6а видно, что ламинарное невозмущенное ядро начинает сужаться сразу за острой кромкой вследствие взаимодействия струи с областью обратных токов. Угол одностороннего сужения ядра потока дается в [11] как $7^\circ 10'$. На рис. 6б видно, что ламинарное невозмущенное ядро начинает сужаться значительно позднее, поскольку течение внутри канала безотрывное, и струя вступает во взаимодействие с неподвижной жидкостью за сопловым срезом.

Поскольку струя имеет на периферии большую скорость, она более интенсивно увлекает части кольцевого вихря за срезом сопла в направлении острой кромки выходного отверстия. Увеличивается амплитуда первичных колебаний давления в локальной области возле кромки и амплитуда генерации на выходе из САИ.

Несколько неожиданной является невысокая амплитуда генерации в случае с соплом-трубкой, поскольку на выходе из трубы длиннее пяти калибров ($l_c > 5d_c$) [11] струя заполняет всю площадь выходного среза, и эпюра скорости на выходе равномерная.

Число Струхали

Следует отметить, что вычисление числа Струхали для струй одинаковой длины и при одинаковой скорости приводит к различным результатам. Перескакивание преимущественной частоты генерации с одной характеристики на другую обусловлено только механизмом обратной связи в струе, в соответствии с теорией Крюгера–Шмидке. Одновременно с преимущественной частотой можно услышать несколько других частот, амплитуда которых незначительна вследствие несоответствия периодов их генерации и усиления. Эта преимущественная частота используется при вычислении числа Струхали Sh_L .

Преимущественная частота генерации определяется не механизмом усиления в струе, а механизмом усиления в объемном резонаторе. Это яв-

ление еще недостаточно изучено, и нет ясного представления, например, о том, как согласуются частоты в механизме усиления в струе с ЧСК камеры-резонатора. Может ли любая характеристика получить усиление объемным резонатором при попадании ее частоты в полосу усиления резонатора, или же мы наблюдаем только те характеристики, которые прошли предварительное усиление механизмом обратной связи в струе?

Очевидно, что преимущественная частота в генерирующей системе сопло–струя–кромка может изменяться в значительно большем интервале, нежели в системе сопло–струя–кромка–резонатор. В системе с резонатором число Струхали увеличивается при увеличении длины струи и постоянной скорости, несмотря на уменьшение ЧСК резонатора (длина струи определяется интервалом между передней и задней крышками), поскольку снижение ЧСК не компенсирует увеличение длины струи. В системе без резонатора число Струхали остается неизменным при увеличении длины струи и неизменной скорости, как это заметил В. Струхаль, за счет пропорционального уменьшения преимущественной частоты при увеличении характерного размера, будь то диаметр обтекаемого стержня или длина струи.

Строить графики в координатах число Рейнольдса–число Струхали можно только в пределах одной моды, где эти комплексы изменяются непрерывно, а частота изменяется вдоль одной характеристики. Характерной чертой моды является непрерывное изменение частоты в ее пределах, амплитуда может вести себя самым различным образом. Обычно при плавном увеличении скорости в пределах одной моды амплитуда сначала плавно увеличивается от нуля до предельной величины, а затем плавно уменьшается до нуля. Реже одна мода резко переходит в другую со скачком частоты.

ВЫВОДЫ

Из рассмотрения результатов выполненных экспериментов следует, что скругление входной кромки сопла:

- 1) обеспечивает увеличение амплитуды генерации в скважинном акустическом излучателе,
- 2) позволяет увеличить длину камеры резонатора на 25%,
- 3) позволяет увеличить диаметр выходного отверстия на 15%,
- 4) позволяет генерирующей системе работать при большем перепаде давления и большей скорости струи.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1. Результаты экспериментов с соплом № 1 при различной величине выходного отверстия d_B [мм] и относительной длине камеры L_K/d_C . W [м/с]; $Re \times 10^{-3}$; f [Гц]; A [Па]. Пустые строки означают отсутствие генерации

Сопло № 1	$L_K/d_C = 1$						$L_K/d_C = 2$						$L_K/d_C = 3$						$L_K/d_C = 4$					
	W	Re	f	Sh_L	A		W	Re	f	Sh_L	A		W	Re	f	Sh_L	A		W	Re	f	Sh_L	A	
$d_B = 10$	9.6	7680	812	1	29		6.4	10240	573	2.2	9.5		4.2	10080	468	4	5							
	16.6	13280	791	0.57	18		13.5	21600	493	0.88	11													
$d_B = 11$	9.6	7680	820	1	27		6	9600	600	2.4	10		4.1	9840	478	4.2	6							
							15.5	24800	557	0.86	26													
$d_B = 12$	11.6	9280	845	0.87	33		5.8	9280	583	2.4	7.5		4.5	10800	500	4	6							
							16.1	24800	507	0.78	42		14.8	42240	485	1	11							
$d_B = 13$	9.6	7680	857	1.1	27		6.4	10240	625	2.3	16		4.5	10800	503	4	8							
							18.3	29600	605	0.78	83.5		18.6	44640	508	0.98	34							
$d_B = 14$	11.6	9280	879	0.91	48		7.8	12480	632	1.95	18.7		5	12000	505	3.64	13.7							
							20.5	32800	617	0.72	115		20.6	49440	508	0.89	53							
$d_B = 15$	4.2						2.6						1.7											
	11.3	9040	896	0.95	43		6.8	10880	645	2.3	15		4.7	11280	512	3.9	13							
$d_B = 16$							21	32000	634	0.76	125		24.8	59040	507	0.73	69							
	6.9	5520	884	1.5	4		5.2	8320	654	3	4		4.5	10800	542	4.3	3							
$d_B = 17$	12.7	10160	908	0.9	46		9.2	14720	660	1.7	19		7.4	17760	537	2.6	16							
							22	35200	656	0.7	142		21.5	51600	527	0.9	68							
$d_B = 18$	5	4000	908	2.2	5		2.8	4480	664	5.7	3		2.4	5760	537	8	2							
	11.5	8800	913	1.0	45		6.6	10560	671	2.44	12		5.3	12720	544	3.7	11							
$d_B = 18$							22.2	35520	679	0.71	88		23.6	56640	571	0.87	52							
	10.6	9440	917	0.97	38		7.6	12160	691	2.18	13.7		5.4	12960	547	3.6	11							
							20.2	35520	664	0.72	74		24.3	59040	581	0.85	67							

Таблица 2. Результаты экспериментов с соплом № 3 при различной величине выходного отверстия d_B [мм] и относительной длине камеры L_K/d_C . W [м/с]; $Re \times 10^3$; f [Гц]; A [Па]. Пустые строки означают отсутствие генерации

Сопло № 3	$L_K/d_C = 1$						$L_K/d_C = 2$						$L_K/d_C = 3$						$L_K/d_C = 4$					
	W	Re	f	Sh_L	A		W	Re	f	Sh_L	A		W	Re	f	Sh_L	A		W	Re	f	Sh_L	A	
$d_B = 10$	7	5600	698	1.2	21		5.3	6360	517	2.3	18		7	16800	422	2.2	24		11.4	36480	361	1.54	19	
	14.7	11700	703	0.6	35		10	16000	513	1.23	55		12	28800	432	1.3	38							
$d_B = 11$							5.3	8480	527	2.4	20		7.3	17520	451	2.2	33		12	38400	366	1.5	31	
	6.1	4800	727	1.5	20		10.5	16800	527	1.2	70		12.5	30000	452	1.3	82							
$d_B = 12$	14.7	11760	734	0.6	36		17.6	28160	498	0.7	30													
	3.7	2960	734	2.3	8		5.7	9120	544	2.3	24		8.5	20400	456	1.9	46		9.1	25200	415	1.9	31	
$d_B = 13$	7.3	6080	759	1.2	23		11.3	18080	537	1.14	102		13.7	32880	466	1.2	87							
	15.7	12560	766	0.6	45		18.8	30800	522	0.66	48													
$d_B = 14$							6.1	11690	542	2.1	48		9.5	22800	461	1.74	100		10	32000	403	1.9	59	
	7.2	5760	745	1.25	75		12.8	20480	569	1.07	200		14.7	35280	466	1.1	216		15.8	50560	410	1.24	86	
$d_B = 15$	17.7	14160	750	0.51	259		25.5	40800	593	0.56	122		24.7	59280	456	0.65	54							
							7.1	11360	576	1.95	64		8.5	20400	473	2.0	71		10.8	34560	420	1.86	62	
$d_B = 16$	9.2	7360	774	1.0	55		14	22400	586	1.0	249		14.7	35280	478	1.17	240		16.8	53760	419	1.2	126	
	20.1	16800	784	0.47	360		26.5	42400	590	0.53	283		26.7	64080	483	0.65	94							
$d_B = 17$							7.7	12320	590	1.85	55		9.5	22800	491	1.9	98		7.1	22400	437	3	16	
	9	7200	791	1.05	43		14.8	23860	605	0.98	281		16.7	40080	498	1.07	302		11.1	35520	442	1.9	61	
$d_B = 18$	22.5	18000	815	0.43	361		29.5	47200	620	0.5	550		29.4	74400	502	0.58	144		17.8	56960	451	1.2	178	
							8.1	12960	610	1.8	44		9.4	22560	503	1.93	88.7		10.1	32000	449	2.15	75	
$d_B = 19$	10.5	8400	825	0.94	29		15.8	25280	630	0.96	258		17.3	42240	517	1.08	326		17	54400	459	1.3	200	
	22.3	17840	823	0.44	260		31.6	50560	637	0.48	725		32.5	78000	517	0.57	406		34	108800	451	0.64	137	
$d_B = 20$							7.1	11360	615	2.1	19		8.9	21360	507	2.05	69		9.7	31040	449	2.22	63	
	9.8	7840	823	1.0	13		14.4	23040	630	1.05	174		16.5	39600	520	1.13	277		17	54400	459	1.3	205	
$d_B = 21$	22.3	17840	867	0.47	180		32.6	52160	650	0.48	701		32.5	78000	522	0.58	521		34.7	111040	471	0.65	256	
	8.5	6800	881	1.24	8.8		7.8	12480	640	1.96	12		9.3	22320	522	2.02	30		11.7	37440	474	1.94	42	
$d_B = 22$	23.3	18640	901	0.46	133		15.4	24640	652	1.0	94		16.5	39600	537	1.17	204		18	57600	481	1.3	148	
	33.6	26880	1023	0.36	120		36.6	58560	696	0.46	607		37.5	90000	579	0.56	601		37	118400	483	0.62	310	
$d_B = 23$							12.8	20480	659	1.23	42		10.3	24720	542	1.9	20		11.3	36160	474	2	58	
	19.5	15600	952	0.6	57		33	52800	698	0.5	429		16.5	39600	542	1.2	117		19	60800	478	1.2	203	
$d_B = 24$	38	18640	971	0.3	125							37.5	90000	542	0.5	480		36	115200	483	0.64	365		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Beresnev I.A., Johnson P.A.* Elastic-wave stimulation of oil production: A review of methods and results // *Geophysics*. 1994. V. 59. № 6. P. 1000–1017.
2. *Marfin E.A., Kravtsov Y.I., Abdrashitov A.A., Gataulin R.N., Galimzyanova A.R.* Elastic-wave effect on oil production by in situ combustion: Field results // *Petroleum Science and Technology*. 2015. V. 33. № 15–16. P. 1526–1532.
3. *Марфин Е.А., Кравцов Я.И.* Выбор оптимальных геометрических параметров излучателя на основе резонатора Гельмгольца // *Известия РАН. Энергетика*. 2005. № 6. С. 101–106.
4. *Sami S., Anderson C.* Helmholtz oscillator for the self-modulation of a jet / *Proc. 7th International symposium on jet cutting technology*. BHRA. Cranfield, Bedford, England. 1984. P. 91–98.
5. *Chanaud R.C., Powell A.* Some experiments concerning the Hole and Ring tone // *J. Acoust. Soc. Am.* 1965. V. 37. № 5. P. 902–911.
6. *Morel Th.* Experimental study of a jet-driven Helmholtz oscillator. ASME Paper 78-WA/FE-16 // *J. Fluid Engineering*. 1979. 101. IX. № 3. P. 383–390.
7. *Powell A.* Vortex action in edgetones // *J. Acoust. Soc. Am.* 1962. V. 34. № 2. P. 163–165.
8. *Nyborg W.L., Burkhard M.D., Schilling H.K.* Acoustical characteristics of jet-edge and jet-edge-resonator systems // *J. Acoust. Soc. Am.* 1952. V. 24. № 3. P. 293–304.
9. *Norton M.L., Bidgood R.E.* Investigating the edgetone amplifier // *Fluid Power International*. 1969. V. 34. № 402. P. 47–50.
10. *Бурьян Ю.А., Сорокин В.Н., Капелюховский А.А.* Струйный гидродинамический генератор с резонатором Гельмгольца // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2012. № 5. С. 6–11.
11. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992.
12. *Артёмьева Т.В., Лысенко Т.М., Румянцева А.Н., Степин С.П.* Гидравлика, гидромашины и гидропривод. М.: Издательский центр “Академия”, 2005.
13. *Ткаченко Л.А., Фадеев С.А.* Генерация высших гармоник при резонансных колебаниях в трубе с открытым концом // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 1. С. 9–16.
14. *Копьев В.Ф., Пальчиковский В.В., Беляев И.В., Берсенёв Ю.В., Макашов С.Ю., Храмов И.В.* Создание заглушенной установки для аэроакустических экспериментов и исследование ее акустических характеристик // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 1. С. 114–126.
15. *Комкин А.И., Миронов М.А., Юдин С.И.* Собственная частота резонатора Гельмгольца на стенке прямоугольного канала // *Акуст. журн.* 2014. Т. 60. № 2. С. 145–151.