

УДК 534.141.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СКВАЖИННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ С КОЛЬЦОМ В ДЛИННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

© 2018 г. А. А. Абдрашитов^{a, *}, Е. А. Марфин^{a, **}, Д. В. Чачков^{a, b, ***}

^aКазанский научный центр РАН 420111 Казань, ул. Лобачевского 2/31

^bКазанское отделение МСЦ РАН 420111 Казань, ул. Лобачевского 2/31

*e-mail: abdary@mail.ru

**e-mail: marfin76@mail.ru

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

Поступила в редакцию 16.02.2017 г.

Выполнено экспериментальное исследование генерации колебаний давления в модели скважинного акустического излучателя с кольцом, которое перемещалось внутри цилиндрической камеры. Изучена возможность сохранения короткой струи при увеличении длины камеры резонатора. Рассмотрено влияние длины струи, задаваемой интервалом между соплом и кольцом, на частоту и интенсивность генерации. Отмечено постоянство резонанса камеры на частоте собственных колебаний, вне зависимости от длины и скорости струи. Даны рекомендации по выбору длины камеры и связанной с ней частоты генерации.

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

DOI: 10.7868/S0320791918020016

1. 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]. Это устройство, не имеющее подвижных элементов конструкции, также целесообразно использовать для генерации в потоке жидкости колебаний давления низкой частоты [4].

САИ скомбинирован из двух самостоятельных устройств: струйного генератора и объемного резонатора. Струйный генератор первичных колебаний давления состоит из сопла, струи воздуха 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 $f_c \sim W/L$, где W – скорость струи, L – длина струи, генерируются локальные возмущения давления неболь-

шой амплитуды [5]. Объемный резонатор представляет собой цилиндрическую камеру с двумя отверстиями – в передней и задней крышках. Эта камера с двумя горлами при умеренных числах Рейнольдса ($Re_L < 5 \dots 7 \times 10^4$) 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

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

где c – скорость звука в среде, V – объем камеры, d_1 и d_2 – диаметры сопла и выходного отверстия, ℓ_1 и ℓ_2 – длины сопла и выходного отверстия соответственно. При достижении больших чисел Рейнольдса ($Re_L > 7 \dots 8 \times 10^4$) за счет увеличения скорости или же удлинения струи эта камера резонирует при возбуждении струей на частоте полуволнового резонатора $f_0 = c/2L$, 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 камеры), но, если отверстия достаточно

малы, превращается в классический полуволновой резонатор.

При совпадении частоты генерации первичных колебаний давления с частотой собственных колебаний (ЧСК) объемного резонатора наступает резонанс. При этом из выходного отверстия излучаются акустические волны.

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 $W_k \approx W/2$. 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 получаем механизм положительной обратной связи и 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 амплитуда колебаний давления в них мала.

Alster в работе [6] предложил общую методику расчета ЧСК резонатора Гельмгольца, учитывающую перемещение частиц массы воздуха внутри камеры, пропорциональное удалению частиц от дна, и амплитуды смещения частиц воздуха в горле, колеблющихся в одной фазе. Cornett [7] заметил одновременное существование в резонаторе нескольких тонов и тонов разностной частоты типа $(f_1 + f_2)$ и $(f_1 - f_2)$. Авторы работы [8] пишут "... характерный резонансный эффект может появиться всякий раз, когда частота тона кромки находится вблизи собственной частоты резонатора.... Когда параметры системы струя–кромка или резонатора изменяются непрерывно, имеет место сложный ряд событий, вытекающих из возникновения один за другим таких резонансных откликов". Авторы работы [9] называют моду на частоте Гельмгольца первой модой, а моды на частоте полуволнового и четвертьволнового резонансов – высшими модами или "модами стоячей волны" цилиндриче-

ской камеры. Кондратьев и Назаренко [10] провели прецизионные эксперименты со свободной струей, набегающей на клин в безэховой камере, и показали, что при плавном увеличении скорости струи генерация преимущественного тона перепрыгивает скачками с моды на моду. Это объясняется механизмом обратной связи в системе сопло–струя–острая кромка. Авторы работы [11] устанавливали перед соплом кольцо $d = 5$ мм из медной проволоки $d = 1.5$ мм на захватах и отметили схожесть процессов в системе с кольцом и в системе с отверстием. В работе [12] рассмотрена возможность создания САИ с кольцевым соплом и кольцом, жестко закрепленным перед камерой резонатора. В работе [13] выполнен краткий обзор методов расчета ЧСК камеры с отверстием и представлено исследование работы резонатора Гельмгольца в волноводе прямоугольного сечения. В работе [14] представлены экспериментальные данные по влиянию несоответствия возбуждающей частоты частоте собственных колебаний резонатора Гельмгольца, установленного в трубопроводе, на эффективность снижения уровня колебаний давления. В работе [15] описана безэховая 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 [16] описаны исследования колебания газа в трубе, открытой с одной стороны и возбуждаемой синусоидальными колебаниями поршня на противоположной стороне.

Основополагающими работами, используемыми при проектировании САИ, состоящего из цилиндрической камеры с двумя круглыми соосными отверстиями в плоских торцевых крышках, являются статья Morel [4], а также его патент на устройство [17]. В конструкции САИ, которую исследовал Morel, длины струи и камеры определяются интервалом между крышками. Небольшой (до трех калибров по диаметру струи) интервал между крышками обеспечивает формирование струи с высоким скоростным напором и высокой интенсивностью генерации первичных колебаний давления на острой кромке выходного отверстия, что позволяет получить на выходе из резонатора волны давления с высокой интенсивностью. При этом, к сожалению, короткая камера обладает высокой частотой собственных колебаний.

Для усиления в САИ колебаний давления низкой частоты необходимо увеличивать объем камеры резонатора, диаметр которой ограничен диаметром обсадной трубы скважины. Это возможно лишь при увеличении интервала между крышками камеры. В то же время длину струи увеличивать нежелательно, хотя формально такое

увеличение должно привести к уменьшению частоты генерации первичных колебаний давления. Причина этого состоит в том, что при увеличении длины затопленной струи ее структура размывается, а вихревые возмущения, окутывающие струю, быстро растворяются и теряют свою энергию. Вследствие этого амплитуда первичных колебаний давления, генерируемых на острой кромке выходного отверстия, значительно уменьшается.

Решить эту задачу можно путем размещения кольца с острой кромкой соосно входному соплу в камере резонатора [18]. При этом в генерации тона отверстия принимают участие острые кромки кольца, а не выходного отверстия, как это имеет место в [4]. Положение кольца определяет длину струи, которая в свою очередь определяет частоту и интенсивность генерации первичных колебаний давления на его острой кромке – тона отверстия, а положение крышек – объем резонансной камеры и частоту ее собственных колебаний. Острые кромки выходного отверстия не являются частью струйного генератора, не участвуют в генерации тона отверстия и могут располагаться так, как это целесообразно для компоновки камеры резонатора.

Целью настоящей работы является исследование возможности сохранения короткой струи с высоким скоростным напором на острой кромке кольца при увеличении длины камеры резонатора для снижения частоты резонанса, а также конструктивных и режимных условий формирования мод с высокой интенсивностью в камере резонатора с кольцом.

2. МЕТОДИКА И ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальная модель САИ изготавливалась из отрезков различной длины пластиковой трубы 1 внутренним диаметром $D_K = 77$ мм (рис. 1). Торцы трубы закрывались плексиглазовыми крышками 2 и 4 толщиной 9.3 мм. Диаметры осевых отверстий в крышках: входного сопла 3 – 12 мм, выходного отверстия 5 – 16 мм. Соотношения основных размеров модели были взяты из работы [4]. В передней крышке монтировался измерительный микрофон 6 и штуцер 7 для замера статического давления внутри камеры. Кольцо диаметром $d_K = 16$ мм на радиальных стойках 8 плотно вставлялось в цилиндрическую камеру с возможностью перемещения вдоль ее оси. При установке кольца в камеру задняя крышка 4 заменялась на другую такой же толщины 9.3 мм, но имеющую отверстие диаметром 21 мм.

В ходе экспериментов диаметр сопла $d_C = 12$ мм оставался неизменным, с его величиной соотно-

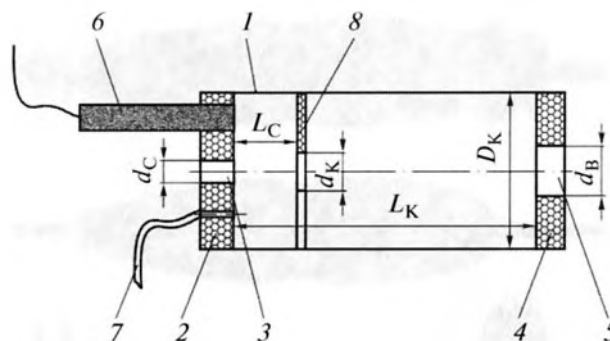


Рис. 1. Схема скважинного акустического излучателя с кольцом в длинной камере. 1 – труба; 2, 4 – передняя и задняя крышки; 3 – сопло; 5 – выходное отверстие; 6 – микрофон; 7 – штуцер; 8 – кольцо. D_K , d_C , d_K и d_B – диаметры: камеры, сопла, кольца и выходного отверстия соответственно; L_C и L_K – длины струи и камеры соответственно.

сились остальные размеры. Диаметр выходного отверстия принят равным $d_B = 16$ мм в случае пустой камеры для возможности сравнения результатов и $d_B = 21$ мм в случае установки в камеру кольца. При установке кольца в камеру на острую кромку выходного отверстия наносился валик из пластилина для предотвращения неорганизованной генерации. Установленная частота дискретизации и размер спектрального окна БПФ позволяли определять частоту резонанса с точностью порядка 1 Гц. Располагаемая измерительная аппаратура позволяет уверенно регистрировать высшие моды при скорости струи порядка 1 м/с.

При установке кольца на стойках в камеру резонатора ЧСК камеры несколько увеличивалась вследствие уменьшения полезного объема камеры. При этом разделение всего объема на части в акустическом смысле не происходило: при озвучивании динамиком камеры с кольцом через сопло и перемещении кольца вдоль оси камеры ЧСК всего объема оставалась неизменной.

Модель монтировалась в крышку пластмассовой бочки объемом 0.230 м³ таким образом, чтобы входное отверстие (сопло) оставалось снаружи, а выходная часть модели с выходным отверстием располагалась внутри бочки. Воздух из бочки отсасывался вакуумным 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 подводным и отводящим шлангами. Это обстоятельство отмечено в работе [4]. Предварительное экспериментальное исследование показало, что ЧСК установленной в бочку модели не отличалась от частоты извлеченной модели. Не допускалась также установка крышек

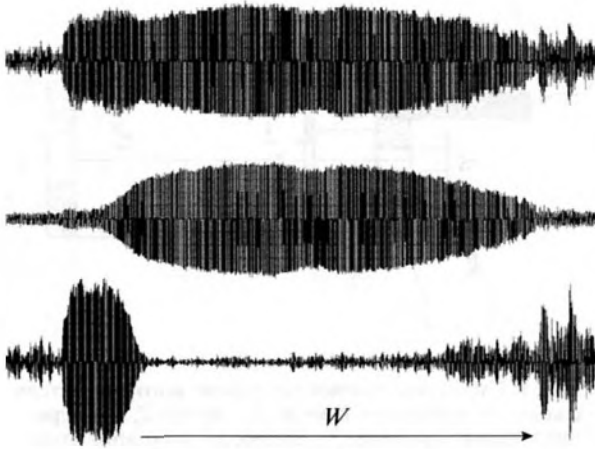


Рис. 2. Изображение чередования резонансов на частоте Гельмгольца (нижняя кривая) и на полуволновой частоте (центральная кривая) при плавном увеличении скорости струи.

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 от исследуемой камеры.

Числа Струхаля и Рейнольдса в настоящей работе рассчитывались по идеальной скорости струи $W^2 = \varphi \times 2\Delta P/\rho$, где коэффициент скорости φ равен 0.97 для нашего случая (для упрощения рассуждений и расчетов можно принять его равным 1), ΔP – перепад давления на сопле, ρ – плотность воздуха. При этом положение мод в наших экспериментах совпадало с положением мод в работе [4]. 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 E14-140 14-разрядного программно-аппаратного аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 10 кГц и передавались на персональный компьютер. Для регистрации и обработки сигналов использовалась программа Power Graph 3.3.8. Общая погрешность акустической измерительной системы при регистрации частоты тарированного сигнала составляла величину 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.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Длина камеры

В экспериментах регистрировались величина перепада давления на сопле и параметры колебания давления в камере резонатора. Вычислялась скорость струи на срезе сопла и спектральные характеристики колебаний давления в камере резонатора. Результаты экспериментов сведены в табл. 1.

Характерным примером чередования двух резонансов (на частоте Гельмгольца и полуволнового) являлась картина, изображенная на рис. 2 (абсцисса – скорость струи, ордината – амплитуда колебаний давления в резонаторе), где мода на частоте Гельмгольца в окне самописца сменялась модой первой полуволновой гармоники при увеличении скорости струи и затем восстанавливалась вновь.

Верхняя кривая представляет собой изображение записанного сигнала до применения полосового фильтра, средняя кривая – изображение моды первой полуволновой гармоники после отсечки колебаний низкой частоты, а нижняя кривая – мода на частоте Гельмгольца после отсечки из сигнала колебаний высокой частоты. Можно видеть, что механизм полуволнового резонанса подавляет механизм резонанса на частоте Гельмгольца, несмотря на то, что для того существует подходящее число Струхаля. Можно также видеть, как при затухании полуволнового резонанса восстанавливается резонанс по механизму Гельмгольца.

Высшие гармоники у механизма усиления на частоте Гельмгольца не наблюдались, это следует из механизма объемного резонирования камеры – целый объем камеры не разделяется на части, все параметры состояния в камере изменяются одновременно. В коротких камерах ($L_K/d_K < 0.5$) моды на частоте полуволновых гармоник не наблюдались. Все моды появлялись последовательно на частоте Гельмгольца при монотонном увеличении скорости струи. В камерах большей длины ($L_K/d_K > 1$) сначала появлялись моды Гельмгольца, а далее, при монотонном увеличении скорости струи, наблюдались моды как на частоте основной гармоники полуволнового резонанса, так и на частоте высших гармоник, и их моды могли чередоваться различным образом. При этом следует отметить отсутствие при струйной генерации нескольких гармоник в одной моде одновременно. Пик в окне спектроанализатора всегда только один – картина колебаний давления в точности повторяет форму синусоиды. Во время переключения генерации с одного режима на другой в интервале между модами наблюдались одновремен-

Таблица 1. Результаты экспериментов с соплом № 1 и с кольцом. W [м/с]; f [Гц]; A [Па]. Жирным шрифтом выделены полуволновые гармоники

L_C/d_C	$L_K/d_C = 1$			2			3			4			7			10			13			
	W	f	A	W	f	A	W	f	A	W	f	A	W	f	A	W	f	A	W	f	A	
1	6.1	891	3.1	4.4	770	2.1	3.5	618	2.3	4.9	530	1.7	5.3	401	7.8	4.3	342	5.7	2.7	293	5.1	
	13.6	903	45.1	10.1	770	28	7.7	618	19	7.7	530	13	13.7	1855	3.6	20.3	1550	43	12	280	12.1	
							28.5	625	91	31.7	530	31	31.4	1866	83				16.7	1208	42	
2				4	660	2.7	3.2	608	2.0	4.6	542	1.6	5.9	401	3.1	4.0	342	6.4	3.1	293	5.5	
				8.5	660	22	7.3	608	18.3	6.9	542	13	13.2	1855	3.1	20.3	1464	43.0	12.8	280	9.5	
				24	660	155							28.6	1866	31				16.7	1196	36	
3							2.8	525	2.4	4.9	531	1.6	5.8	401	7.7	4.0	342	5.7	3.0	293	6.3	
							5.8	525	18	6.9	531	13	26.5	1801	2.5	18.3	1416	27	13	280	14.6	
							22.6	525	127										16.7	1147	40	
4										3.9	477	1.4	5.7	401	9	4.0	342	7.2	2.2	293	6.4	
										6.6	477	14				18.5	1391	29	11.2	283	12.4	
										23.3	477	27							16.7	1123	32	
7													5.8	358	6.4	4.2	330	6.5	3.4	293	5.3	
																18.9	1513	26	11.4	280	9.6	
																			16.7	1123	28	
10																3.6	293	6.9	2.9	280	5.9	
																20.3	1513	46	13	280	7.6	
																			16.7	1220	37	
13																				2.7	256	5.2
																				13	256	7.6
																				15.7	1160	31

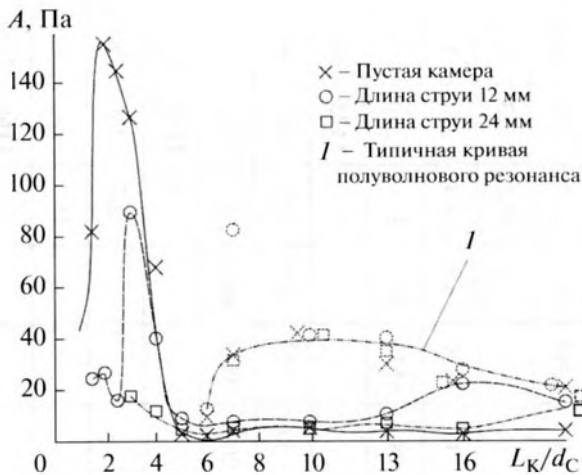


Рис. 3. Изображение кривых резонанса на частоте Гельмгольца при постоянной длине струи L_C и переменной длине камеры L_K/d_C .

но несколько частот, но в середине моды всегда присутствовала только одна частота.

В ходе экспериментов камера резонатора удлинялась от $L_K/d_C = 1$ до 35, применялись все более длинные куски трубы. Первое появление в спектре основной полуволновой гармоники замечено при удлинении камеры свыше 0.8 ее собственного диаметра ($L_K/D_K > 0.8$), числе Струхалья порядка $Sh_L \approx 1.0$ и длине струи $L_C/d_C = 1$. Длина струи в этом случае определялась положением кольца внутри камеры. Небольшое увеличение длины камеры до $L_K/D_K \sim 0.95$ приводит к усложнению модальной картины: при длине струи $L_C/d_C = 1$ и плавном увеличении скорости струи появляется слабая первая мода первой полуволновой гармоники, соответствующая числу Струхалья $Sh_L \sim 0.55$, и сильная вторая мода, соответствующая числу Струхалья $Sh_L \sim 0.9$. Удлинение струи путем перемещения кольца от соплового среза приводит к размыванию струи и исчезновению мод полуволнового резонанса, при этом мода на частоте Гельмгольца ослабевает в меньшей степени.

При удлинении камеры до $L_K/D_K \sim 2.5$, числе Струхалья порядка $Sh_L \approx 0.6$ и длине струи $L_C/d_C = 2$ начинает появляться слабая мода второй полуволновой гармоники, которая весьма чувствительна к длине струи и при $L_C/d_C = 11$ и числе Струхалья порядка $Sh_L \approx 0.1$ значительно усиливается.

При удлинении камеры свыше трех ее диаметров ($L_K/D_K \approx 3.2$) и длине струи $L_C/d_C = 1$ начинает появляться слабая первая мода третьей полуволновой гармоники при числе Струхалья $Sh_L \approx 0.55$ и

сильная вторая мода при числе Струхалья $Sh_L \approx 1.15$, которые так же быстро исчезают при удлинении струи.

Моды на частоте резонанса Гельмгольца присутствуют в камере всегда: в коротких камерах мод может быть несколько, по мере увеличения скорости струи их интенсивность увеличивается, но и в случае длинной камеры при скорости потока 1.5–2 м/с труба резонирует на частоте Гельмгольца при очень большом числе Струхалья, хотя амплитуда колебаний давления невелика. Интервал скорости, в котором могут наблюдаться моды на частоте резонанса Гельмгольца, находится в пределе 2–35 м/с, что соответствует данным работы [4], а высшие полуволновые моды возникают и при большей скорости струи.

На рис. 3 представлена наибольшая достижимая амплитуда колебаний давления в камере при определенных длинах камеры и струи, вне зависимости от скорости струи, которая соответствует условию возникновения резонанса и моды с наибольшей амплитудой. Непрерывной линией изображена зависимость наибольшей амплитуды колебаний давления в пустой камере от ее длины. Длина камеры равна длине струи в этом случае. Пунктирной кривой изображена зависимость наибольшей амплитуды колебаний давления в камере с кольцом при постоянной длине струи $L_C/d_C = 1$ и при постепенном увеличении длины камеры. Штрихпунктирной кривой изображена зависимость наибольшей амплитуды колебаний давления в камере с кольцом при длине струи $L_C/d_C = 2$ и при увеличении длины камеры. Эта же зависимость для камер с кольцом при больших длинах струи не изображена, чтобы не загромождать рисунок. Такие кривые располагались бы еще ниже, поскольку организованная структура струи разрушается еще до соударения с острой кромкой кольца или выходного отверстия.

Анализируя рис. 3, отметим возможность достижения значительной амплитуды колебаний давления при длине пустой камеры резонатора $L_K/D_K \approx 1.5...2$, однако незначительное изменение скорости струи существенно нарушает режим наибольшей генерации. Очевидно, что рассогласование частот (частоты генерации первичных колебаний и частоты собственных колебаний объемного резонатора) становится непреодолимым. Установка кольца в короткую камеру приводит к существенному уменьшению амплитуды генерации.

На рис. 4 изображена зависимость наибольшей амплитуды колебаний давления в камере резонатора постоянной длины $L_K/D_K = 13$ при изменяющейся длине струи (кольцо перемещается). Использо-

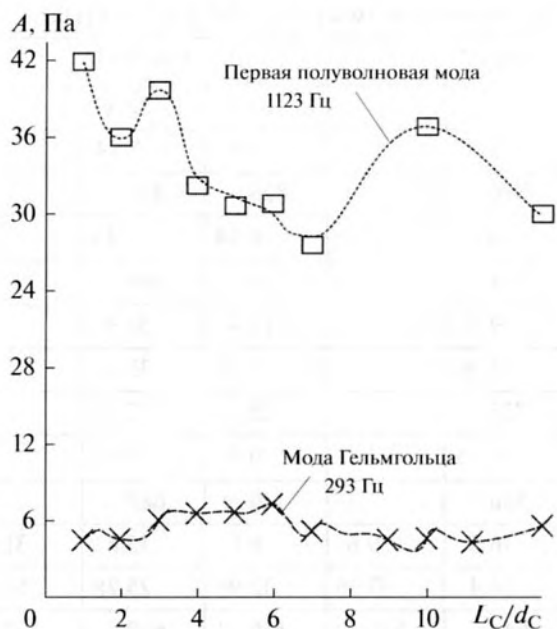


Рис. 4. Изображение амплитуд резонансов на частоте Гельмгольца и полуволнового при $L_K/D_K = 13$ в зависимости от длины струи L_c/d_c .

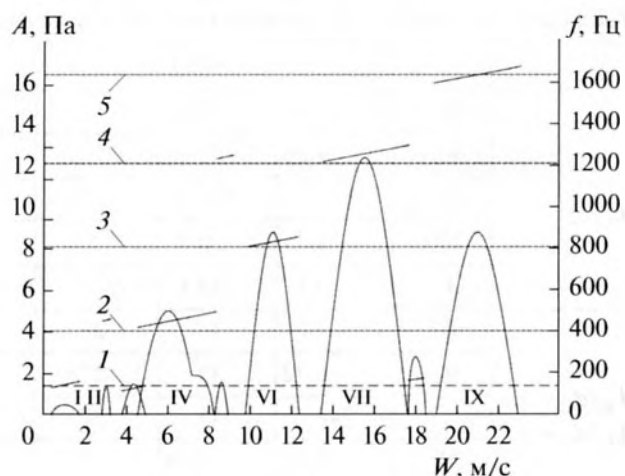


Рис. 5. Изображение типичной “модовой картинки”. Сопло $\varnothing 12 \times 10$ мм. Выходное отверстие $\varnothing 16 \times 16.5$ мм. Длина пустой камеры 450 мм. 1 – частота Гельмгольца; 2, 3, 4 и 5 – частоты первой, второй, третьей и четвертой полуволновых гармоник соответственно. Латинские цифры – номера мод. Наклонные линии над изображением мод – изображение соответствующей частоты генерации.

вание такой конфигурации камеры позволяет устойчиво работать на частоте основной полуволновой гармоники, причем установка кольца перед выходным отверстием приводит к некоторому увеличению амплитуды. Частота основной полуволновой гармоники значительно выше, но амплитуда колебаний на частоте полуволнового резонанса также значительно выше, нежели на частоте Гельмгольца.

На рис. 5 представлена “модовая картина” при продувке длинной пустой камеры. Горизонтальными прерывистыми линиями изображены частоты, присущие камере с данной геометрией: 1 – частота Гельмгольца, 2, 3, 4 и 5 – частоты первой, второй, третьей и четвертой полуволновой гармоник соответственно. Длинные камеры имеют более богатую “модовую картину”, нежели короткие. Хорошо видно, как вначале, при скорости струи W менее 1 м/с, появляется мода на частоте Гельмгольца, а при постепенном увеличении скорости струи возникают и исчезают по порядку моды полуволновых гармоник. При этом видно, что моды II, V, VIII, которые появляются не впаде, существуют в узком интервале скоростей. Наклонные линии над изображением мод – это их частоты.

У авторов вызывала сомнения правомочность применения чисел Струхала и Рейнольдса для длинных камер в том виде, как они использовались для коротких камер, при описании режимов струйной генерации, поскольку при большой

длине струя размывалась до соприкосновения с острой кромкой кольца или же выходного отверстия, и говорить о ее существовании не приходится. Формально число Струхала имеет некоторую величину на такой длине струи, а по сути струя уже не существует. В работе [4] показано, что первые три моды затухают при увеличении длины камеры до 4.5 калибров струи. В нашей работе определено несколько большее значение этой величины – 6. Какие-то высшие моды всегда существуют и при большей длине камеры. Но тогда вызывает интерес источник этих небольших колебаний давления, поскольку говорить об организованном натекании струи на острую кромку кольца уже не приходится.

3.2. Скругление входа сопла

Для определения наилучшей формы сопла были проведены эксперименты с двумя дополнительными соплами того же диаметра $d_c = 12$ мм в дополнение к соплу, представляющему собой простое сверление в плоской крышке камеры резонатора и обозначенному как сопло № 1. Сопло № 2 имело осевой размер 16.5 мм, в то время как сопло № 1 имело длину 9.3 мм. Входная кромка сопла № 2 имела скругление $R_1 = 5$ мм, и его цилиндрический участок имел протяженность 11.5 мм. Сопло № 3 имело осевой размер 25 мм. Входная кромка сопла № 3 имела скругление $R_1 = 10$ мм, и его цилиндрический участок имел протяженность 15 мм.

Таблица 2. Результаты экспериментов с различными соплами без кольца. W [м/с]; $Re \times 10^3$; f [Гц]; A [Па].

		Сопло 1			Сопло 2			Сопло 3		
$L_K/d_C = 1$ $L_C/d_C = 1$	W	6.1	13.6		11.5	21.3		10.5	22.3	
	Re	4.88	10.40		9.2	17.2		8.4	17.84	
	f	891	903		870	870		825	823	
	Sh_L	1.75	0.8		0.91	0.48		0.94	0.44	
	A	3.1	45.1		21.5	171		29	260	
$L_K/d_C = 1.5$ $L_C/d_C = 1.5$	W	5.6	10	23	13.4	29.3		14.4	31.3	
	Re	6.72	12	27.6	16.08	35.16		17.28	37.56	
	f	744	745	732	727	735		725	732	
	Sh_L	2.4	1.34	0.57	0.98	0.45		0.9	0.42	
	A	3.4	26	83.1	67	580		140	688	
$L_K/d_C = 2$ $L_C/d_C = 2$	W	4	8.5	24	8.8	16.5	29.6	8.1	15.8	31.6
	Re	6.4	13.6	38.4	14.08	26.4	47.36	12.96	25.28	50.56
	f	660	660	660	625	644	640	610	630	637
	Sh_L	3.96	1.86	0.66	1.7	0.94	0.52	1.8	0.96	0.48
	A	2.7	22	155	29	214	526	44	258	725
$L_K/d_C = 2.5$ $L_C/d_C = 2.5$	W	3.7	7.6	24.4	9.5	16.5	32.3	9.5	17.5	33.3
	Re	7.4	15.2	48.8	19	33	64.6	19	35	66.6
	f	586	586	586	576	576	590	566	578	578
	Sh_L	4.75	2.3	0.72	1.82	1.05	0.55	1.8	0.99	0.52
	A	1.7	18	145	40.5	218	443	65	318	574
$L_K/d_C = 3$ $L_C/d_C = 3$	W	2.8	5.8	22.6	11.4	17.7	32	9.4	17.3	32.5
	Re	6.72	13.92	54.24	27.36	42.48	76.8	22.56	42.24	78
	f	525	525	525	517	537	530	503	517	517
	Sh_L	6.75	3.26	0.84	1.63	1.09	0.6	1.93	1.08	0.57
	A	2.4	18	127	88.1	273	321	88.7	326	406
$L_K/d_C = 4$ $L_C/d_C = 4$	W	3.9	6.6	23.3	12.1	18	32	10.1	17	34
	Re	12.48	21.12	74.56	38.4	57.6	102.4	32	54.4	108.8
	f	477	477	477	464	459	446	449	459	451
	Sh_L	5.87	3.5	0.98	1.85	1.22	0.67	2.15	1.3	0.64
	A	1.4	14	27	53	113	106	75	200	137

В табл. 2 представлены как результаты экспериментов (значения скорости струи W , частоты генерации f и амплитуды A), так и результаты расчетов чисел подобия Re_L и Sh_L .

На рис. 6 представлены зависимости наибольшей амплитуды колебаний давления в пустой камере резонатора от длины этой камеры для этих трех сопел. Величина скорости струи не рассматривается, значение имеет возникновение резонанса в камере и появление наибольшей моды в окне самописца.

Из рассмотрения рис. 6 видно, что небольшое скругление входной кромки сопла приводит к заметному увеличению амплитуды колебаний давления в камере. Дальнейшее повышение плавности соплового входа уже не дает столь значительного результата. Камера резонирует при большем перепаде давления и скорости струи. Числа Струхала, при которых наступает резонанс, для каждой конфигурации сопла различны.

АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 64 № 2 2018

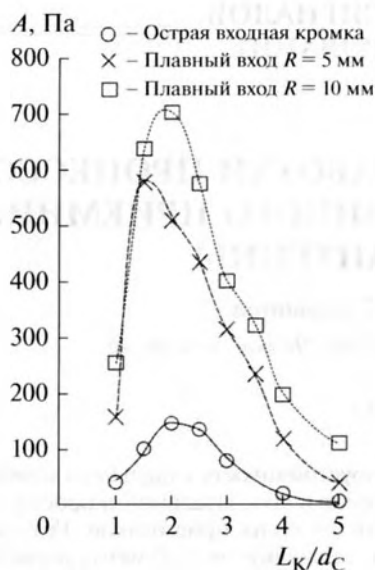


Рис. 6. Влияние формы входа сопла на амплитуду генерации.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные эксперименты показали, что установка промежуточного кольца с острой кромкой в камеру резонатора в интервале между соплом и выходным отверстием и его перемещение по оси камеры не позволяют регулировать частоту колебаний давления в камере независимо от ее длины. Частота колебаний давления в камере понижается при увеличении ее длины, а длина и скорость струи при этом не влияют на частоту колебаний давления на выходе из устройства.

2. Увеличение длины камеры свыше $L_k/d_c = 3$ приводит к уменьшению частоты Гельмгольца и амплитуды колебаний, а увеличение длины камеры в интервале $L_k/d_c = 6 \dots 10$ позволяет повысить амплитуду колебаний давления в камере на частоте полуволнового резонанса.

3. При перепадах давления подачи воздуха через нагнетательную скважину в продуктивный пласт до 300 Па использование цилиндрических камер длиннее 6 калибров (относительно диаметра сопла) для получения акустического излучения с частотой Гельмгольца нецелесообразно, поскольку в них возбуждаются только моды при маленькой скорости струи, характеризующиеся невысокой амплитудой колебаний давления.

Целесообразно в таком случае проектировать камеры длиной 6–10 калибров с расчетом на возбуждение мод основной полуволновой гармоники при высокой скорости струи, характеризующихся более высокой частотой колебаний давления, но и существенно большей амплитудой.

4. Выполнение плавного входа в сопло позволяет существенно повысить амплитуду генерации и работать при большем перепаде давления на сопле и при большей скорости струи.

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. Issue 15–16. P. 1526–1532.
3. *Марфин Е.А., Кравцов Я.И.* Выбор оптимальных геометрических параметров излучателя на основе резонатора Гельмгольца // *Известия Академии наук. Энергетика*. 2005. № 6. С. 101–106.
4. *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.
5. *Sami S., Anderson C.* Helmholtz oscillator for the self-modulation of a jet // *Proc. 7th Int. symposium on jet cutting technology*. BHRA. Cranfield. Bedford, England. 1984. P. 91–98.
6. *Alster M.* Improved calculation of resonant frequencies of Helmholtz resonators // *J. Sound Vibr.* 1972. V. 24. № 1. P. 63–85.
7. *Cornett R.O.* Ph.D. Thesis. University of Texas, 1940.
8. *Nyborog 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. *Panton R.L., Miller J.M.* Resonant frequencies of cylindrical Helmholtz resonators // *J. Acoust. Soc. Am.* 1975. V. 57. № 6. P. 1533–1535.
10. *Кондратьев В.И., Назаренко Т.И.* *Аэроакустика*. М.: Наука, 1980.
11. *Chanaud R.C., Powell A.* Some experiments concerning the hole and ring tone // *J. Acoust. Soc. Am.* 1965. V. 37. № 5. P. 902–911.
12. *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.
13. *Федотов Е.С., Пальчиковский В.В.* Исследование работы резонатора Гельмгольца в волноводе прямоугольного сечения // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2014. № 38.
14. *Горин С.В., Куклин М.В.* Эффективность работы резонаторов Гельмгольца в замкнутых волноводах с жидкими рабочими средами // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 3. С. 396–401.
15. *Копьев В.Ф., Пальчиковский В.В., Беляев И.В., Берсенев 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.
16. *Ткаченко Л.А., Сергиенко М.В.* Резонансные колебания газа в открытой трубе в безударно-волновом режиме // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 1. С. 44–51.
17. *Morel Th.* Jet-driven Helmholtz fluid oscillator. United States patent № 4041984.
18. *Абдрашитов А.А., Бородин В.М., Марфин Е.А.* Патент РФ № 2572250. Способ и устройство с глухим днищем для генерирования волн давления в стволе нагнетательной скважины. Заявл. 14.04.2016. Оpubл. 12.04.2017. Бюлл. № 11.