

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНОГО ПРЯМОТОЧНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ СО СТУПЕНЧАТЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ

О. В. СУХАРЬКОВ, к.т.н., доцент

*Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова
ул. Ковальська, 1, 65029, г. Одесса, Украина,
тел. 723-83-45, e-mail: olegvs07@rambler.ru*

The results of experimental researches on optimization of parameters of stream of a direct-flow hydrodynamic radiator are considered. The flooded stream shell as an equivalent cylinder is the physical model of radiator. Influence of hydrodynamic and geometrical parameters of circular nozzle and step obstacle, and also diameter of less foundation, length and thickness of stream shell on the integral level of the acoustic signal generated by an radiator is explored.

ВВЕДЕНИЕ

Применение гидродинамических источников акустических колебаний для интенсификации различных технологических процессов в ряде случаев оказывается предпочтительным по сравнению с использованием других излучателей. Особый интерес, в этой связи, представляют собой струйные гидродинамические излучатели (ГДИ) с пульсирующей кавитационной областью [1]. Неоспоримыми преимуществами излучателей такого типа являются простота эксплуатации, отсутствие источников высокого напряжения и вредных высокочастотных электромагнитных полей, малые габариты и масса, отсутствие вибрирующих элементов конструкции, что обуславливает длительный срок их службы. Данные ГДИ можно разделить на прямоточные, у которых струя после встречи с препятствием удаляется от сопла, и противоточные – струя разворачивается вогнутым отражателем в виде лунки, близкой по форме к параболоиду вращения, и направляется в сторону сопла, частично замыкаясь на его наружную кромку. Ранее было исследовано влияние параметров струйных противоточных ГДИ на интенсивность акустического поля [2, 3]. Представляет интерес провести экспериментальные исследования по оптимизации геометрических и гидродинамических параметров струйного прямоточного ГДИ со ступенчатым препятствием.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим физическую модель струйного прямоточного ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием (рис. 1,а) [4]. При включении насоса из кругового щелевого сопла 1 с регулируемой скоростью вытекает осесимметричная кольцевая струя 2. За счет эффекта Бернулли в кольцевом пазе ступенчатого препятствия 3 создается, в форме тороида, неустойчивый первичный кавитационный вихрь 4, который является накопителем энергии рассматриваемой акустической системы. Пульсации вихря 4 возбуждают изгибные колебания в затопленной струйной оболочке 2 на ее собственной частоте. Поток с кавернами, вырывающийся периодически наружу, формирует вторичную тороидальную область 5 с развитой кавитацией. Внутри области 5 паровые каверны практически синфазно захлопываются и генерируют тональный звук в

окружающей жидкой среде. Таким образом, в рабочей зоне излучателя образуется своеобразная резонансная система, состоящая из внутренне упругой кавитирующей среды, самой струйной оболочки и внешней присоединенной массы жидкости. Эта резонансная система обеспечивает обратную акустическую связь, навязывая автоколебания струйной оболочке и обеспечивая ей стабильную частоту колебаний [5]. На рис. 1,б представлена фотография излучателя на просвет в процессе генерирования интенсивных акустических волн. Видно, что зона звукообразования (зона наибольшей кавитационной активности 5) находится за пределами конструктивных элементов излучателя.

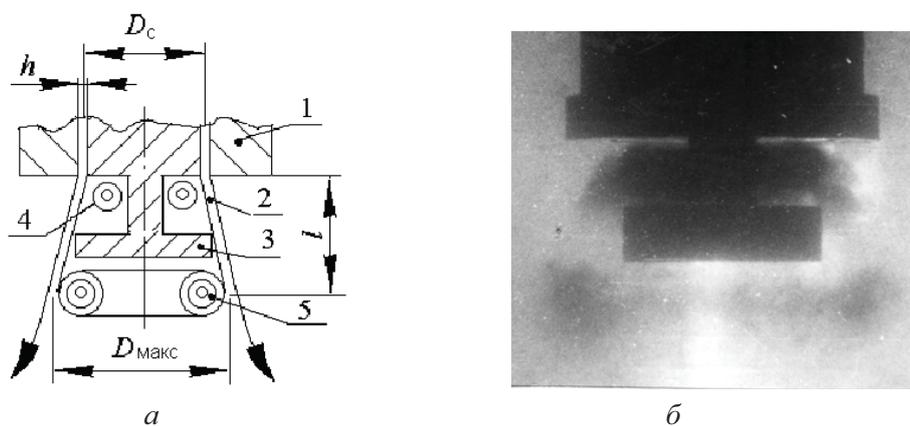


Рис. 1

В качестве геометрических параметров струйной оболочки служат: D_c , $D_{\text{макс}}$, l , h – диаметры оснований, длина и толщина оболочки. Гидродинамическими параметрами оболочки являются: ρ , Γ , P^* , V – плотность, параметр адиабатической сжимаемости, внутреннее давление (прочность жидкости) и скорость струи на выходе из сопла. Анализ экспериментальных исследований акустических характеристик прямоточного излучателя подтвердил предположение о том, что оболочка имеет длину порядка радиуса ($\pi R/l \sim 1$) и угол между ее образующей и осью мал [6]. Это позволило рассматривать динамику колебаний цилиндрической струйной оболочки, жестко заземленной на одном основании и свободной на другом [4]. Средний диаметр эквивалентного цилиндра оболочки $D_{\text{цил}} = (D_c + D_{\text{макс}})/2$ и ее длину l можно оценить по фотографиям работающего излучателя (см. рис. 1,б).

В ходе экспериментов данный источник звука помещался в герметичной емкости с водопроводной водой, которая для достижения стабильного газосодержания предварительно отстаивалась в течение двух недель. Температура воды поддерживалась в пределах $(19...21)^\circ\text{C}$, что обеспечивало постоянными плотность и вязкость жидкой среды; избыточное статическое давление составляло $(3...5)\text{кПа}$. Скорость истечения струи из сопла ГДИ изменялась с помощью насоса с регулируемым расходом. Изменение геометрических параметров струйной оболочки (D_c , $D_{\text{макс}}$, l , h) производилось за счет замены кольцевого сопла и цилиндрического ступенчатого препятствия. Калиброванный пьезокерамический гидрофон устанавливался вне турбулентного потока, образуемого отходящей от ГДИ затопленной струей, в зоне линейного затухания экспоненциального импульса, генерируемого излучателем [7]. Сигнал от гидрофона поступал на электронный вольтметр и анализатор спектра для измерения интегрального уровня и частоты основной (низшей) гармоники. Критерием оптимизации рабочих параметров ГДИ служил

максимальний рівень акустического сигналу, генерируемого излучателем. Визуальное наблюдение рабочей зоны ГДИ и ее фотосъемка проводились через иллюминаторы в рабочей емкости.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Динамика струйной оболочки определяет характеристики акустического поля, в частности, интегральный уровень сигнала. Чем больше амплитуда деформации изгиба свободного края оболочки, тем большее количество паровых каверн выйдет наружу из внутренней области оболочки (первичный вихрь). И тем выше будет уровень генерируемого сигнала при коллапсе каверн во вторичной тороидальной области. Этому соответствует оптимальная скорость струи, при которой собственная частота струйной оболочки совпадает с собственной частотой пульсаций неустойчивого тороидального вихря. Акусто-гидродинамический КПД излучателя возрастет, так как наибольшая часть кинетической мощности затопленной струи будет преобразовываться в интенсивность акустического поля. Поэтому важно исследовать зависимость интегрального уровня звукового сигнала, генерируемого струйными прямоточными ГДИ от геометрических и гидродинамических параметров эквивалентной цилиндрической оболочки.

Влияние гидродинамических и геометрических параметров кольцевого сопла на уровень сигнала. Струйный прямоточный ГДИ состоит из конусно-цилиндрического обтекателя 1, цилиндрического корпуса 2, кольцевого насадка 3 и ступенчатого цилиндрического препятствия 4 (рис. 2).

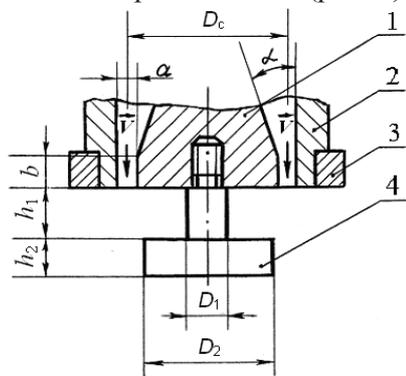


Рис. 2

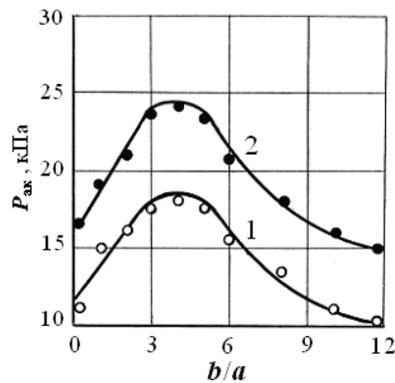


Рис. 3

Основным типоразмером ГДИ служит отношение a/D_c , где a – ширина щели кольцевого сопла, D_c – средний диаметр сопла. Исследовались акустические характеристики девяти излучателей, у которых ширина щели сопла a изменялась в интервале (0,3...1,5)мм, а средний диаметр сопла D_c принимал значения от 6,5мм до 32мм. Зависимости гидродинамических параметров ГДИ от основного типоразмера излучателя для $a = \text{const}$ и $D_c = \text{const}$ представлены соответственно в таблицах 1 и 2 [8]. Как видно из таблиц с уменьшением основного типоразмера ГДИ оптимальная скорость струи возрастает. Что касается кинетической мощности струи, то с увеличением среднего диаметра сопла от 6,5 мм до 32 мм она возрастает примерно в 20 раз (табл. 1). Однако увеличение толщины струйной оболочки за счет расширения параметра a от 0,3 мм до 1,5 мм повышает N всего лишь на 14 % (табл. 2).

Табл. 1. Гидродинамические параметры ГДИ ($a = \text{const} = 0,5 \text{ мм}$)

Основной типоразмер ГДИ, a/D_c	0,5/6,5	0,5/13	0,5/19,5	0,5/26	0,5/32
Оптимальная скорость струи, $V_{\text{опт}}$ [м/с]	25	31	34,5	37,5	40
Кинетическая мощность струи, N [Вт]	80	303	629	1076	1608

 Табл. 2. Гидродинамические параметры ГДИ ($D_c = \text{const} = 13 \text{ мм}$)

Основной типоразмер ГДИ, a/D_c	1,5/13	1,0/13	0,8/13	0,5/13	0,3/13
Оптимальная скорость струи, $V_{\text{опт}}$ [м/с]	22	25	26,5	31	36
Кинетическая мощность струи, N [Вт]	326	319	305	303	286

В разработанном излучателе коническая часть щелевого сопла переходит в цилиндрическую часть, что обеспечивает формирование струйной оболочки заданной толщины перед обтеканием ею ступенчатого препятствия. Такая конструкция сопла позволяет существенно повысить стабильность режима генерирования интенсивных акустических волн, а также уменьшить габариты и массу излучателя, сохраняя при этом заданную производительность. Угол между конической поверхностью обтекателя 1 и цилиндрической поверхностью корпуса 2 излучателя $\alpha = 13,5^\circ$. Конические сопла с таким углом обладают наибольшими коэффициентами расхода и скорости в широком диапазоне чисел Рейнольдса, и близки по гидродинамическим характеристикам к коноидальным соплам. На рис. 3 представлена зависимость уровня сигнала от высоты b цилиндрической части обтекателя для двух значений a/D_c : 1 - 0,5/13; 2 - 0,5/26. Видно, что зависимость акустического давления $P_{\text{ак}}$ от относительной высоты b/a имеет экстремальный характер и принимает максимальное значение при $b/a = 3 \dots 5$. Уменьшение высоты цилиндрической части обтекателя до нуля, также как и ее увеличение до $12a$, ведет к снижению уровня сигнала примерно на 40 %. В частотном спектре генерируемых колебаний существенных изменений при этом не наблюдается.

На рис.4 отражена зависимость уровня звукового сигнала от диаметра меньшего основания струйной оболочки D_c ($a = \text{const} = 0,5 \text{ мм}$). Как и следовало ожидать, увеличение среднего диаметра кольцевого сопла ведет к значительному росту акустического давления, что обусловлено возрастанием гидродинамической мощности струи (табл.1) при неизменном акусто-гидродинамическом КПД струйных ГДИ [9].

Зависимость уровня сигнала от толщины h струйной оболочки показана на рис. 5 ($D_c = \text{const} = 13 \text{ мм}$). Видно, что увеличение ширины щели сопла и, соответственно, толщины струйной оболочки ($a=h$) от 0,3 мм до 1,5 мм снижает величину звукового давления с 19 кПа до 15 кПа. Полученный результат на первый взгляд можно считать парадоксальным, так как в этом случае происходит некоторое повышение гидродинамической мощности струи (табл.2). Объяснение данного факта следует искать в физических свойствах жидкоструйной оболочки. Очевидно, что с увеличением параметра h и возрастанием удельной массы единицы площади оболочки повышается ее инертность. Это ведет к уменьшению акусто-гидродинамического КПД и, соответственно, снижению интенсивности сигнала.

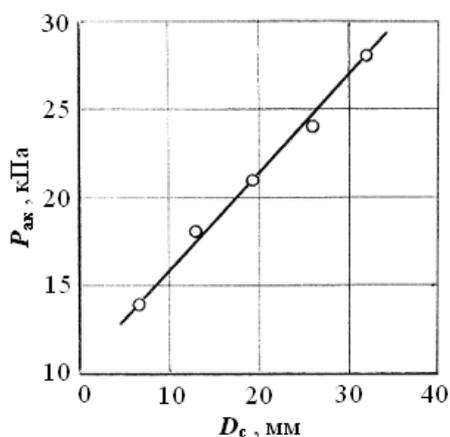


Рис. 4

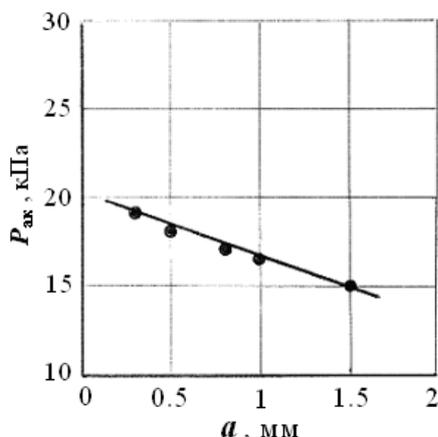


Рис. 5

Влияние геометрических параметров ступенчатого препятствия на уровень сигнала. Результаты исследования геометрических параметров ступенчатого препятствия, влияющих на формирование первичного кавитационного вихря, представлены на рис. 6 - 8 для трех значений типоразмера излучателя a/D_c : 1 - 0,5/13; 2 - 0,5/19,5; 3 - 0,5/26. На рис. 6 отражена зависимость уровня акустического сигнала от относительного расстояния h_1/D_c между торцевым сечением сопла и большим цилиндром препятствия. Зависимость $P_{ак}(h_1/D_c)$ для каждой из кривых характеризуется наличием экстремума и принимает максимальное значение при $h_1 = (0,25...0,35) D_c$. В диапазоне изменения $h_1 = (0,15...0,40) D_c$ для всех излучателей наблюдается хорошее соответствие теоретического расчета частоты основного тона генерируемых колебаний с экспериментальными данными [6]. Увеличение параметра h_1/D_c ведет к возрастанию длины l струйной оболочки и уменьшению частоты основной гармонике обратно пропорционально длине оболочки.

На рис. 7 показана зависимость уровня сигнала от относительной глубины $\Delta r/D_c$ кольцевого паза, где $\Delta r = (D_c - D_1)/2$. В ходе этого эксперимента расстояние между торцевым сечением сопла и большим цилиндром препятствия $h_1 = 0,3D_c$. При малых значениях параметра $\Delta r/D_c$ (0,15...0,20) кавитационная область 4 деформирована и несколько вытеснена за пределы кольцевого паза, что приводит к уменьшению амплитуды колебаний струйной оболочки. В этом случае излучатели, работающие в оптимальном скоростном режиме, генерируют звуковые волны низкой интенсивности. Увеличение этого параметра от 0,20 до значения 0,35 ведет к значительному возрастанию уровня сигнала и понижению частоты основного тона. Дальнейшее углубление кольцевого паза (уменьшение диаметра D_1 малого цилиндра препятствия) на интенсивность и частоту основной гармонике генерируемых колебаний практически не влияет. Из конструктивных соображений увеличивать параметр $\Delta r/D_c > 0,38 D_c$ и, соответственно, уменьшать диаметр малого цилиндра до нуля нецелесообразно (см. рис. 2).

Зависимость уровня сигнала от относительного диаметра D_2/D_c большого цилиндра препятствия (рис. 8) имеет экстремальный характер и принимает максимальное значение при $D_2/D_c = 0,8...0,9$. Уменьшение диаметра большого цилиндра до величины $D_2 = 0,6D_c$ ведет к уменьшению $P_{ак}$ примерно на (40...50) %. Если же диаметр большого цилиндра увеличивать до значения $D_2 = 1,1D_c$, то гидрофон регистрирует резкое снижение величины акустического давления до уровня шума затопленной струи.

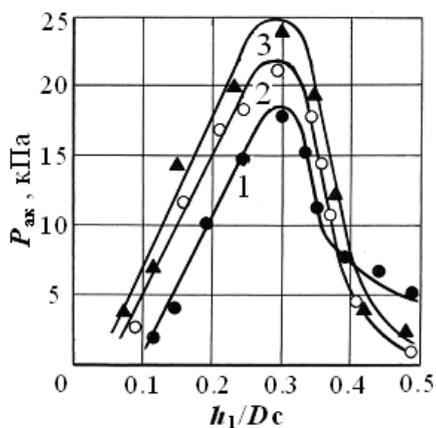


Рис. 6

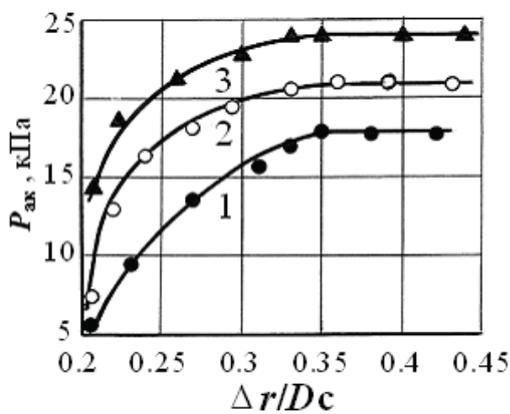


Рис. 7

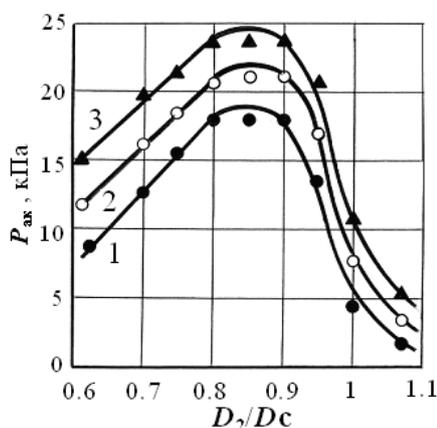


Рис. 8

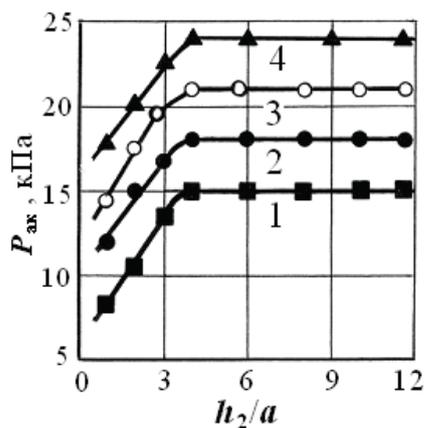


Рис. 9

На рис. 9 отражена зависимость уровня сигнала от относительной высоты h_2/a большого цилиндра ступенчатого препятствия. Экспериментальные кривые представлены для четырех значений типоразмера излучателя a/D_c : 1 – 1,5/13; 2 – 0,5/13; 3 – 0,5/19,5; 4 – 0,5/26. Установлено, что уменьшение высоты h_2 большого цилиндра от 12а до 4а как на уровень генерируемого сигнала, так и на частоту основной гармоники звука практически не влияет. Если же параметр h_2/a уменьшить до единицы, то величина $P_{ак}$ понизится примерно на (30...40) %. В этом случае исследуемые ГДИ работают нестабильно, что проявляется в неустойчивости уровня низших гармоник регистрируемого частотного спектра. Визуальные наблюдения и фотосъемка показали, что соблюдение условия $h_2/a = 4...6$ позволяет вынести вторичную кавитационную область (зону эрозионной активности излучателя) за конструкционные элементы ГДИ. Последнее обстоятельство значительно увеличивает срок службы струйного прямооточного излучателя.

ВЫВОДЫ

1. Конструкция кольцевого сопла прямооточного ГДИ обеспечивает формирование струйной оболочки заданной толщины, что позволяет существенно повысить стабильность режима генерирования интенсивных акустических волн.

2. Исследовано влияние гидродинамических и геометрических параметров кольцевого сопла (диаметра меньшего основания и толщины струйной оболочки) на интегральный уровень акустического сигнала, генерируемого данным излучателем. Выявлено оптимальное значение скорости струи на выходе из сопла. Установлено оптимальное соотношение между высотой цилиндрической части обтекателя и шириной щели сопла.

3. Исследовано влияние геометрических параметров ступенчатого препятствия на интегральный уровень генерируемого акустического сигнала. Выявлены оптимальные соотношения для расстояния между торцевым сечением сопла и большим цилиндром препятствия (влияющего на длину струйной оболочки), для диаметра большого цилиндра, глубины кольцевого паза и среднего диаметра сопла, а также между высотой большого цилиндра и шириной щели сопла.

4. Обнаружено незначительное влияние ширины щели сопла на кинетическую мощность струи, амплитуду и частоту основной гармоники генерируемого сигнала при оптимальном режиме работы излучателя. В акустических технологиях для питания прямоточных ГДИ это позволяет использовать насосы различной производительности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой.— М. : Советская энциклопедия, 1979. — С. 79—81.
2. Дудзинский Ю. М. Оптимизация параметров широкополосного акустического излучателя в условиях избыточных статических давлений / Ю. М. Дудзинский, Н. В. Маничева, О. А. Назаренко // Акуст. вісник. — 2001. — 4, № 2. — С. 38—46.
3. Маничева Н. В. Энергетика затопленных конических струйных оболочек / Н. В. Маничева // КОНСОНАНС – 2007: Акустичний симпозіум, 25—27 вересня 2007 р. : зб. праць. — К., 2008. — С. 176—182.
4. Дудзінський Ю.М. Модель прямоточного гідродинамічного випромінювача з кільцевим соплом і східчастою перешкодою / Ю. М. Дудзінський, О. В. Сухарьков, Н. В. Манічева // Акуст. вісник. — 2004. — 7, № 3. — С. 49—54.
5. Вовк И. В. О возможном механизме автоколебаний в струйных гидродинамических излучателях с развитой кавитацией / И. В. Вовк, В. Т. Гринченко, Ю. М. Дудзинский // Акуст. вісник. — 2008. — 11, № 2. — С. 16—23.
6. Сухарьков О. В. Экспериментальное исследование акустических характеристик осесимметричных прямоточных гидродинамических излучателей / О. В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. — 2006. — №1. — С. 74—79.
7. Сухарьков О. В. Экспериментальное исследование акустического поля прямоточного гидродинамического излучателя / О. В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. — 2007. — №1. — С. 39—44.
8. Сухарьков О. В. Акустические характеристики осесимметричных прямоточных гидродинамических излучателей / О. В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. — 2005. — №2. — С. 60—65.
9. Дудзинский Ю. М. Эффективность работы осесимметричных гидродинамических излучателей в условиях избыточного статического давления / Ю. М. Дудзинский, А. Ф. Назаренко // Акустический журнал. — 1996. — 42, № 4. — С. 569—572.