

УДК 534.232

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАТОПЛЕННОЙ КОЛЬЦЕВОЙ СТРУЙНОЙ ПЛАСТИНКИ ПРИ НАЛИЧИИ РАЗВИТОЙ КАВИТАЦИИ

О. В. СУХАРЬКОВ

*Одесская национальная академия связи имени А. С. Попова**Получено 19.03.2010*

Рассмотрены особенности генерирования акустических волн жидкоструйным излучателем со ступенчатым препятствием и круговым щелевым соплом в виде соосных дисков. Предложена физическая модель такого устройства на основе автоколебаний затопленной кольцевой струи при наличии зоны развитой кавитации. Представлены результаты экспериментального исследования энергетических характеристик излучателя в зависимости от геометрических и гидродинамических параметров затопленной плоской осесимметричной струи жидкости.

Розглянуті особливості генерації акустичних хвиль рідиноструйним випромінювачем із східчастою перешкодою й круговим щілинним соплом у вигляді співвісних дисків. Запропоновано фізичну модель такого пристрою на основі автоколивань зануреного кільцевого струменя за наявності розвиненої кавітації. Наведено результати експериментального дослідження енергетичних характеристик випромінювача залежно від геометричних і гідродинамічних параметрів зануреного плоского осесиметричного струменя рідини.

The features of acoustic wave generation by a hydrodynamic radiator with the step obstacle and circular gap nozzle as disks are considered. A physical model based on self-oscillations of the flooded circular stream plate in presence of developed cavitation is offered for such device. The paper presents the results of experimental studying of energy characteristics of the radiator depending on geometrical and hydrodynamic parameters of the flooded plane axisymmetric liquid jet.

ВВЕДЕНИЕ

Для интенсификации различных технологических процессов, наряду с электроакустическими преобразователями пьезоэлектрического и магнитострикционного типа, широко применяются гидродинамические излучатели. Перспективными источниками акустических волн высокой интенсивности считаются струйные гидродинамические излучатели (ГДИ) с развитой кавитацией [1, 2], для которых характерны экономичность, простота в эксплуатации и отсутствие сложных генерирующих электронных устройств. В таких источниках звука активным элементом является затопленная осесимметричная “струйная оболочка” цилиндрической или усеченной конической формы, которая несимметрично натекает на фланец (клин), имеющий угол 90° относительно потока. При этом часть кинетической энергии поступательного движения частиц жидкости в струе благодаря их поперечным колебаниям превращается в энергию акустических волн [2].

Струйные ГДИ условно можно разделить на прямоточные и противоточные. В прямоточных излучателях кольцевая струя после встречи со ступенчатым препятствием удаляется от сопла, а в противоточных – разворачивается вогнутым отражателем в виде лунки, близкой по форме к

параболоиду вращения, и направляется в сторону сопла, частично замыкаясь на его наружную кромку. Ранее были проведены экспериментальные исследования энергетических характеристик как противоточных, так и прямоточных излучателей в диапазоне гидростатических давлений (0.1...2.5) МПа [3–10]. Это позволило уточнить границы зоны звукообразования ГДИ [4, 10], определить их акусто-гидродинамический КПД [3, 9], а также интенсивность звука и удельную энергию вблизи зоны звукообразования за один период колебаний [4, 10].

Однако, судя по отсутствию соответствующих публикаций, до сих пор не проводились исследования энергетики жидкоструйного излучателя со ступенчатым препятствием и круговым щелевым соплом в виде соосных дисков [11]. Особенность такого модифицированного струйного ГДИ заключается в том, что выходящая из щелевого сопла затопленная плоская струя формируется под прямым углом к его оси. В качестве физической модели механизма звукообразования такого излучателя можно предложить динамику изгибных колебаний упругой затопленной кольцевой струйной пластинки при наличии развитой кавитации. Представляет интерес экспериментальное исследование влияния геометрических и гидродинамических параметров плоской осесимметричной струи на уро-

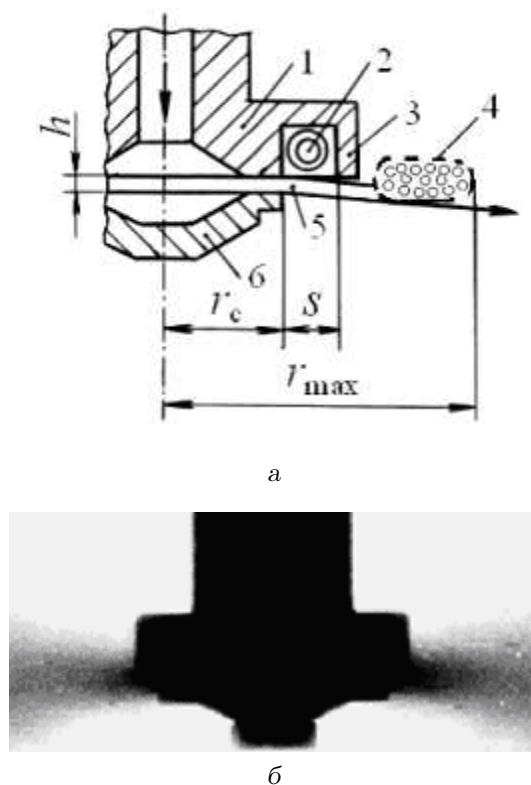


Рис. 1. Жидкоструйный излучатель с круговым щелевым соплом в виде соосных дисков:
а – физическая модель, б – фотография излучателя на просвет при оптимальном режиме его работы

вень и интенсивность интегрального акустического сигнала рассматриваемого ГДИ [11].

1. ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ЗВУКООБРАЗОВАНИЯ В ЖИДКОСТРУЙНОМ ИЗЛУЧАТЕЛЕ

Рассмотрим возможный механизм генерации звука жидкоструйным излучателем со ступенчатым препятствием и круговым щелевым соплом в виде соосных дисков (рис. 1, а). В основу предлагаемой физической модели положена идея об автоколебаниях упругой затопленной кольцевой струйной пластинки при наличии развитой кавитации.

Из кругового щелевого сопла ГДИ, образованного соосными дисками корпуса 1 и обтекателя 6, с регулируемой скоростью перпендикулярно оси излучателя вытекает затопленная плоская осесимметричная струя 5. Она представляет собой затопленную кольцевую струйную пластинку, совершающую изгибные колебания [12]. Можно считать, что внутренний край кольцевой пластинки жестко заземлен на выходе из сопла, а нару-

жный свободно опирается на ступенчатое препятствие 3. Геометрическими параметрами кольцевой струйной пластинки являются радиус ее внутреннего края r_c , ширина s и толщина h . В корпусе 1 излучателя выполнена кольцевая проточка, форма поперечного сечения которой близка к квадрату. Ступенчатое препятствие 3 (прямоугольный клин) способствует тому, что часть кинетической энергии струи за счет эффекта Бернулли расходится на формирование в проточке корпуса 1 первичного тороидального вихря 2. В центре вихревой области 2 создаются условия для развития кавитации. Поэтому область 2 заполнена сложной двухфазной средой – жидкостью с парагазовыми микропузырьками [13].

С увеличением концентрации газовых и паровых каверн давление внутри проточки возрастает и достигает критического значения. В этот момент происходит деформация наружного края кольцевой струйной пластинки и выброс содержимого кавитационной области во внешнюю среду. При этом создается вторичная тороидальная область 4 с развитой кавитацией, имеющая эллиптическое поперечное сечение (рис. 1, б). В области 4 происходит коллапс кавитационных пузырьков, в результате чего в окружающей жидкой среде возникают микроударные волны. Это приводит к генерации акустического сигнала. Давление в кольцевой проточке корпуса 1 после выброса парагазовых каверн становится меньше гидростатического давления в невозмущенной среде и в ней вновь создаются условия для формирования вихря 2. Далее этот процесс периодически повторяется и пульсации двухфазной области 2 возбуждают изгибные колебания в кольцевой струйной пластинке 5. Частота пульсаций зоны развитой кавитации 2 зависит от скорости и кинетической мощности струи на выходе из сопла. При совпадении частоты пульсаций области 2 и собственной частоты струйной пластинки генерируется акустический сигнал максимального уровня. Можно сказать, что в рабочей зоне излучателя образуется своеобразная резонансная система, состоящая из упругой кавитирующей среды внутри кольцевой проточки корпуса 1, струйной пластинки 5 и присоединенной массы внешней среды. Эта резонансная система и обеспечивает обратную акустическую связь, навязывая струйной пластинке автоколебания со стабильной частотой [2].

На рис. 1, б представлена фотография жидкоструйного излучателя на просвет при оптимальном режиме его работы. Видно, что область 4 представляет собой зону развитой кавитации. Именно наличие здесь облака захлопывающихся

парогазовых каверн затрудняет прохождение световых лучей, из-за чего на снимке возникает затемнение. Это позволяет оценить максимальный радиус r_{\max} зоны гидродинамического звукообразования излучателя (см. рис. 1, а).

Следует отметить, что описанный механизм звукообразования в целом аналогичен предложенному ранее механизму звукообразования противоточных и прямооточных ГДИ [14].

2. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования энергетических характеристик жидкоструйного излучателя проводились в акустическом бассейне 1 со звукопоглощающими стенками (рис. 2), размеры которого составляли $4 \times 2.5 \times 2.5$ м. Оборудование лабораторного стенда включало в себя фильтр 2, насосный агрегат 3 с плавно регулируемым расходом жидкости и систему трубопроводов. Внутри бассейна 1 в затопленном состоянии размещались излучатель 7, гидрофон 8 и термометр 4. Расход рабочей жидкости измерялся индукционным расходомером 5, а давление нагнетания жидкости в излучатель контролировалось манометром 6. По показаниям расходомера 5 вычислялась средняя по расходу скорость V истечения жидкости на выходе из сопла излучателя.

Кинетическая мощность N жидкоструйного излучателя, настроенного на максимальный уровень акустического сигнала, определялась по формуле

$$N = \pi r_c h \rho V_{\text{опт}}^3, \quad (1)$$

где r_c – радиус кругового щелевого сопла излучателя; h – ширина щели сопла; ρ – плотность рабочей жидкости; $V_{\text{опт}}$ – скорость струи при оптимальном режиме работы излучателя.

Аппаратура регистрации и анализа акустических сигналов, поступающих от гидрофона 8, включала в себя вольтметр 9, осциллограф 10, анализатор частотного спектра 11, комплект переключателей и соединительных проводов. В ходе экспериментов глубина погружения ГДИ составляла 50 см, т. е. звукообразование происходило при малом избыточном статическом давлении ≈ 5 кПа. В качестве рабочей жидкости использовалась водопроводная вода, которая для установления равновесного газосодержания предварительно отстаивалась в течение трех недель. Температура воды поддерживалась в пределах $(19 \dots 21)^\circ\text{C}$, что обеспечивало неизменность плотности и вязкости жидкой среды. Калиброванный пьезокерами-

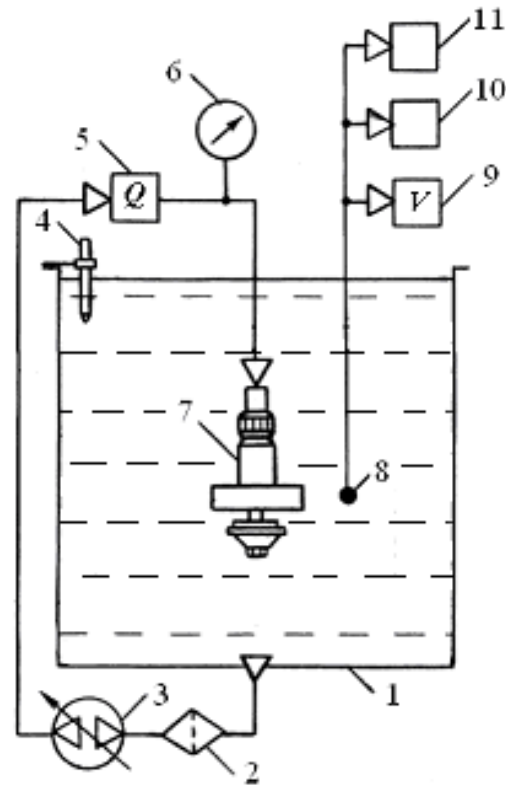


Рис. 2. Схема лабораторного стенда, использовавшегося в экспериментах

ческий гидрофон 8 устанавливался вне турбулентного потока, образуемого отходящей от ГДИ прерывистой струей, в зоне линейного затухания генерируемого излучателем экспоненциального импульса. При этом гидрофон располагался на расстоянии 50 мм от оси жидкоструйного излучателя и 20 мм от плоскости струи, выходящей из сопла. Далее принятый сигнал поступал на электронный вольтметр и анализатор спектра для измерения интегрального уровня и частоты основной (низшей) гармоники. Критерием оптимизации геометрических и гидродинамических параметров плоской осесимметричной струи жидкости был максимальный уровень акустического сигнала, генерируемого излучателем.

У рассматриваемого жидкоструйного излучателя [11], как и у ранее исследованных прямооточных и противоточных ГДИ [15, 16], отношение размера $2r_{\max}$ зоны звукообразования к длине волны λ_0 основной гармоники составляет величину, значительно меньшую единицы. Поэтому такой излучатель с достаточной степенью точности можно аппроксимировать источником звука нулево-

Табл. 1. Гидродинамические параметры излучателя при ширине струйной пластинки $s=3.5$ мм

h , мм	$Q_{\text{опт}}$, л/с	$V_{\text{опт}}$, м/с	N , Вт	ρh , г/см ²
0.3	0.81	33	733	0.03
0.4	0.94	29	498	0.04
0.5	1.12	27.5	424	0.05
0.6	1.18	24	282	0.06
0.7	1.28	22.5	232	0.07
0.8	1.37	21	189	0.08
0.9	1.47	20	163	0.09

Табл. 2. Гидродинамические параметры излучателя при ширине струйной пластинки $s=5$ мм

h , мм	$Q_{\text{опт}}$, л/с	$V_{\text{опт}}$, м/с	N , Вт	ρh , г/см ²
0.4	1.19	36.5	794	0.04
0.5	1.35	33	733	0.05
0.6	1.47	30	662	0.06
0.7	1.57	27.5	593	0.07
0.8	1.70	26	574	0.08
0.9	1.84	25	573	0.09
1.0	1.96	24	564	0.10
1.2	2.20	22.5	558	0.12

Табл. 3. Гидродинамические параметры излучателя при ширине струйной пластинки $s=6$ мм

h , мм	$Q_{\text{опт}}$, л/с	$V_{\text{опт}}$, м/с	N , Вт	ρh , г/см ²
0.5	1.59	36.5	1211	0.05
0.6	1.74	35	1096	0.06
0.7	1.88	33	1027	0.07
0.8	1.99	30.5	926	0.08
0.9	2.13	29	896	0.09
1.0	2.28	28	895	0.10
1.1	2.38	26.5	836	0.11
1.2	2.50	25.5	812	0.12
1.3	2.65	25	829	0.13
1.4	2.74	24	790	0.14

го порядка, создающим сферические расходящиеся волны в неограниченной жидкой среде – монополю. Кроме того, экспериментально установлено, что интегральный уровень сигнала жидкоструйного ГДИ убывает обратно пропорциональ-

но расстоянию с удалением от зоны звукообразования на 10 мм и более. С учетом этого для оценки интенсивности генерируемых излучателем акустических волн использовалась формула

$$I = \frac{P_{\text{ак}}^2}{\rho c}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ак}}$ – эффективное значение звукового давления, измеренное калиброванным гидрофоном; c – скорость звука в невозмущенной водной среде. Для излучателя с параметрами $r_c=13$ мм, $h=0.5$ мм, $s=3.5$ мм, $V_{\text{опт}}=27.5$ м/с считалось, что относительная интенсивность акустического сигнала будет $I/I_0=1$. С этой величиной сравнивались значения I при переменных r_c , h , s и V .

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Акусто-гидродинамический КПД излучателя напрямую зависит от того, насколько близка скорость струи к оптимальной $V_{\text{опт}}$, при которой собственная частота струйной пластинки совпадает с частотой пульсаций двухфазной области 2. Поэтому очень важно исследовать зависимость уровня интегрального звукового сигнала, генерируемого жидкоструйным излучателем, от геометрических и гидродинамических параметров плоской осесимметричной струи. Во всех экспериментах излучатель настраивался на максимальный уровень сигнала подбором оптимальной скорости истечения жидкости из сопла.

На первом этапе исследований изучалось влияние толщины кольцевой струйной пластинки на гидродинамические параметры и энергетику жидкоструйного излучателя. В данном эксперименте постоянным оставался радиус кругового целевого сопла – $r_c=13$ мм. Регулировка ширины щели сопла позволяла изменять толщину h струйной пластинки в диапазоне (0.3...1.4) мм. В табл. 1–3 отражены гидродинамические параметры жидкоструйного излучателя для случаев, когда струйная пластинка имела ширину $s=3.5$, 5 и 6 мм соответственно. Здесь $Q_{\text{опт}}$ – оптимальный расход рабочей жидкости; N – кинетическая мощность струи, определяемая по формуле (1); ρh – удельная масса единицы поверхности кольцевой струйной пластинки.

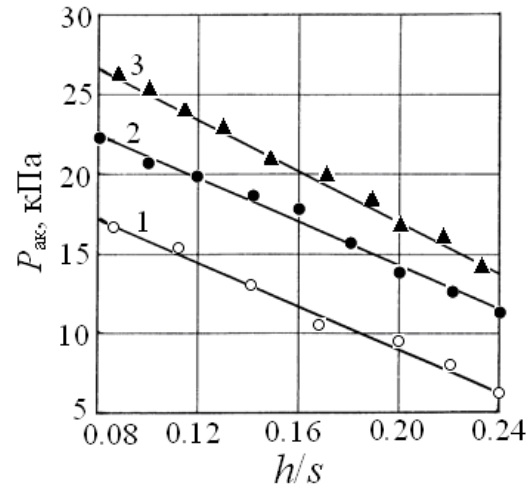
Очевидно, что с увеличением толщины струйной пластинки для достижения максимального уровня акустического сигнала необходимо повышать расход рабочей жидкости. Однако с возрастанием h увеличивается также площадь кругового целевого сопла, что в итоге приводит к

уменьшению оптимальной скорости и кинетической мощности струи. Кроме того, удельная массы единицы поверхности затопленной струи с увеличением ее толщины также существенно возрастает.

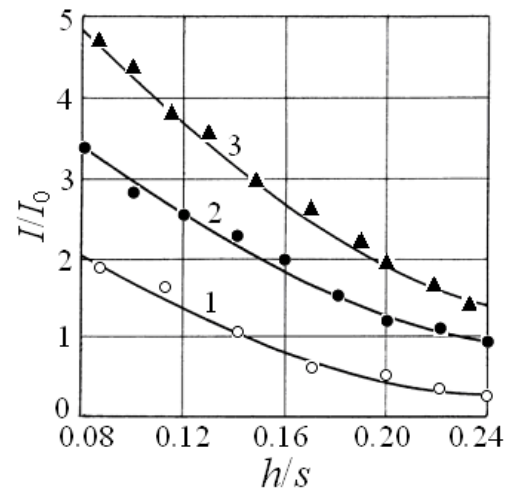
На рис. 3, а представлена зависимость уровня, а на рис. 3, б – относительной интенсивности акустического сигнала от относительной толщины струйной пластинки. Из графиков видно, что увеличение толщины кольцевой пластинки для каждого параметра s приводит к практически линейному снижению уровня звукового сигнала (рис. 3, а). Объяснение этого следует искать в физических свойствах струйной пластинки: с увеличением толщины h и возрастанием удельной поверхностной массы существенно повышается ее инертность. Это, наряду с уменьшением кинетической мощности излучателя, ведет к уменьшению его акусто-гидродинамического КПД α , следовательно, к снижению интенсивности сигнала.

Второй этап экспериментальных исследований был посвящен изучению влияния ширины s кольцевой струйной пластинки на гидродинамические и энергетические характеристики ГДИ. При этом использовались три жидкоструйных ГДИ, у которых радиус сопла (радиус внутреннего края струйной пластинки) принимал значения $r_c = 10, 13$ и 21 мм, а толщина затопленной струи оставалась неизменной – $h = 0.5$ мм. Для того, чтобы варьировать размер s струйной пластинки в интервале $2 \dots 6$ мм, был изготовлен набор корпусов ГДИ с различными по ширине кольцевыми проточками. На рис. 4, а показана аппроксимация расчетных данных зависимости оптимальной скорости струи на выходе сопла от ширины кольцевой струйной пластинки. На рис. 4, б представлена зависимость кинетической мощности струи от s . Из графиков видно, что, вне зависимости от радиуса r_c сопла ГДИ, каждому конкретному значению ширины струи s соответствует некоторое значение $V_{\text{опт}}$. Однако с увеличением ширины s струйной пластинки от 2 до 6 мм оптимальную скорость струи для всех излучателей необходимо практически линейно повышать примерно от 24 до 37 м/с. При этом, согласно выражению (1), ее кинетическая мощность и энергетические затраты на работу ГДИ будут возрастать пропорционально $V_{\text{опт}}^3$.

На рис. 5, а показана зависимость уровня, а на рис. 5, б – зависимость относительной интенсивности звукового сигнала от ширины струйной пластинки. Оказалось, что увеличение s для каждого значения радиуса r_c ее внутреннего края ведет к значительному повышению как интегрального уровня, так и интенсивности акустического сигнала. Установленные закономерности находятся



а



б

Рис. 3. Зависимости уровня (а) и интенсивности (б) сигнала, генерируемого жидкоструйным ГДИ, от относительной толщины струйной пластинки:

1 – $s = 3.5$ мм, 2 – $s = 5$ мм, 3 – $s = 6$ мм

в полном согласии с возрастанием кинетической мощности (рис. 4, б) и акусто-гидродинамического КПД излучателя.

На третьем этапе изучалась зависимость энергии жидкоструйного излучателя от скорости струи. Как уже было показано, максимальный уровень акустического сигнала достигается при оптимальной скорости струи $V_{\text{опт}}$. Для исследуемого ГДИ [11], подобно струйным противоточным и прямоточным излучателям [8, 17], изменение этого параметра позволяет регулировать частоту основного тона генерируемого звука. Зави-

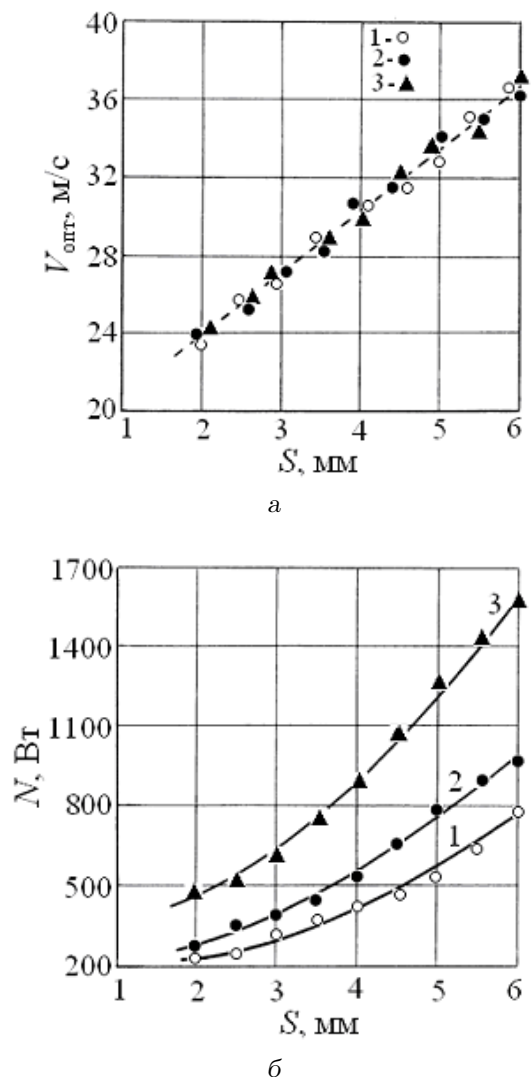


Рис. 4. Зависимости оптимальной скорости (а) и кинетической мощности (б) плоской струи от ширины кольцевой пластинки:
 1 - $r_c = 10$ мм, 2 - $r_c = 13$ мм, 3 - $r_c = 21$ мм

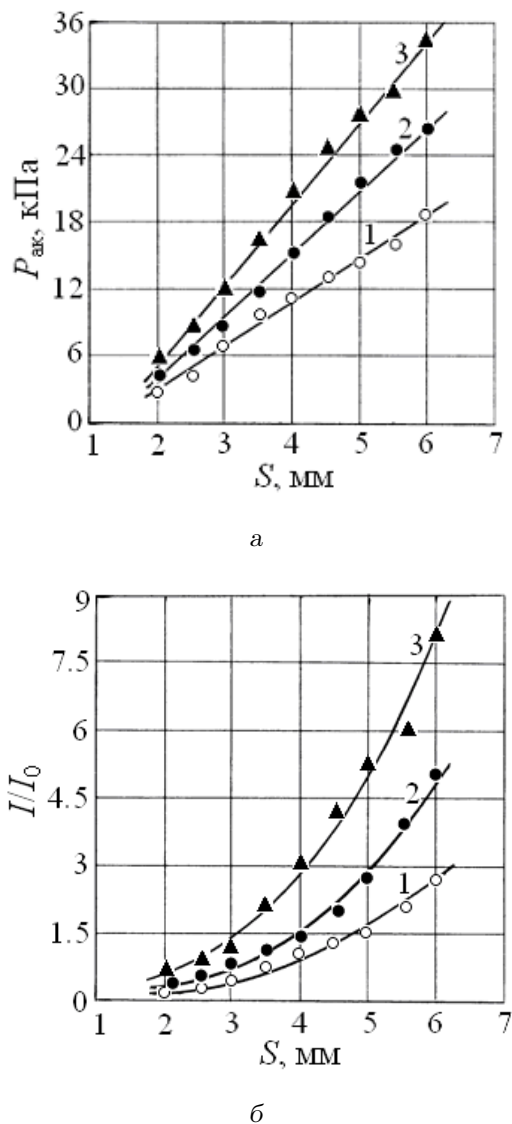


Рис. 5. Зависимость уровня (а) и интенсивности (б) сигнала, генерируемого жидкоструйным ГДИ, от ширины кольцевой пластинки:
 1 - $r_c = 10$ мм, 2 - $r_c = 13$ мм, 3 - $r_c = 21$ мм

симости уровня сигнала от относительной скорости струи отражены на рис. 6, а для одного из жидкоструйных ГДИ ($h/r_c = 0.5/13$) при трех значениях ширины кольцевой струйной пластинки - $s = 4, 5, 6$ мм. На рис. 6, б в относительных единицах представлены зависимости относительной интенсивности акустических полей как функции скорости истечения жидкости, нормированной к оптимальной.

Полученные зависимости энергетических характеристик имеют резонансный характер. Рабочие скорости потока жидкости для струйного излучателя с щелевым соплом в виде соосных дисков ограничены диапазоном значений от $0.6V_{opt}$ до

$1.4V_{opt}$. При малых скоростях ($V < 0.6V_{opt}$) явление кавитации в кольцевой проточке корпуса ГДИ исчезает, что ведет к срыву процесса гидродинамического звукообразования. Увеличение же скорости истечения струи ($V > 1.4V_{opt}$) приводит к возникновению кавитации в канале щелевого сопла и выходу наружу образовавшихся микропузырьков как кольцевая струйная пластинка, так и первичный концентрированный вихрь, исчезает тональный сигнал и ГДИ генерирует широкополосный шум низкой интенсивности.

ВЫВОДЫ

1. Для жидкоструйного излучателя со ступенчатым препятствием и круговым щелевым соплом в виде соосных дисков предложена физическая модель на основе автоколебаний затопленной кольцевой струйной пластинки, при наличии развитой кавитации.
2. Проведена оценка зависимости уровня и интенсивности интегрального акустического сигнала от геометрических параметров затопленной плоской осесимметричной струи жидкости.
3. Исследованы зависимости уровня и интенсивности звука жидкоструйного излучателя от скорости затопленной струи. Проведена оптимизация гидродинамических параметров излучателя.

1. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой и др. – М.: Сов. энцикл, 1979. – 400 с.
2. Вовк И. В., Гринченко В. Т., Дудзинский Ю. М. О возможном механизме автоколебаний в струйных гидродинамических излучателях с развитой кавитацией // Акуст. вісн. – 2008. – 11, № 2. – С. 16–23.
3. Дудзинский Ю. М., Назаренко А. Ф. Эффективность работы осесимметричных гидродинамических излучателей в условиях избыточного статического давления // Акуст. ж. – 1996. – 42, № 4. – С. 569–572.
4. Дудзинский Ю. М., Назаренко А. А. Энергетические характеристики вторичной вихревой области осесимметричного гидродинамического излучателя // Акуст. вісн. – 2000. – 3, № 1. – С. 36–41.
5. Дудзинский Ю. М., Маничева Н. В., Назаренко О. А. Оптимизация параметров широкополосного акустического излучателя в условиях избыточных статических давлений // Акуст. вісн. – 2000. – 4, № 2. – С. 38–46.
6. Сухарьков О. В. Акустические характеристики осесимметричных прямооточных гидродинамических излучателей // Наук. праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2005. – № 2. – С. 60–65.
7. Сухарьков О. В. Экспериментальное исследование акустических характеристик осесимметричных прямооточных гидродинамических излучателей // Наук. праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2006. – № 1. – С. 74–79.
8. Сухарьков О. В. Влияние скорости струи на акустические характеристики осесимметричного гидродинамического излучателя // Наук. праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2006. – № 2. – С. 78–84.
9. Сухарьков О. В. Оптимизация параметров прямооточного гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления // Акуст. вісн. – 2008. – 11, № 4. – С. 54–63.

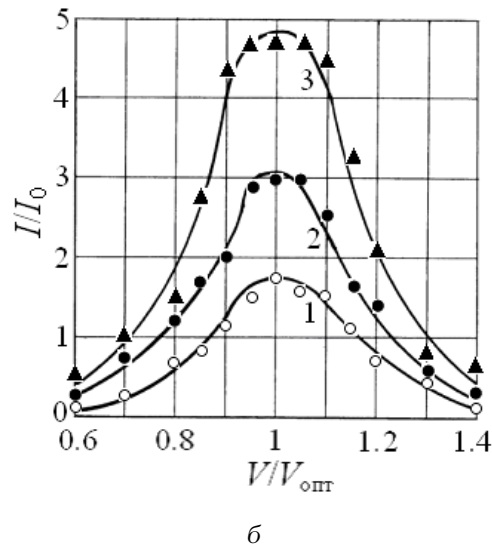
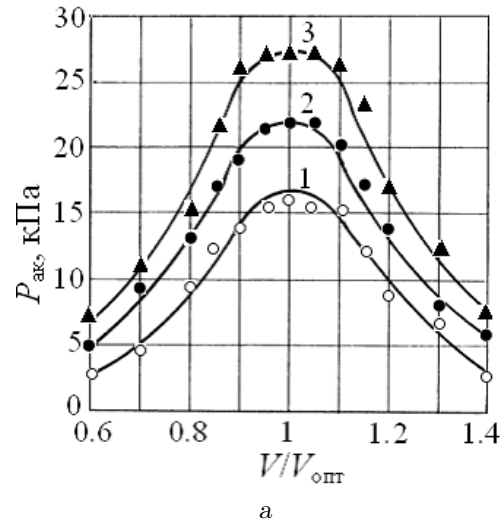


Рис. 6. Зависимость уровня (а) и интенсивности (б) акустического сигнала от скорости струи:

1 – $s=4$ мм, $V_{\text{опт}}=30$ м/с; 2 – $s=5$ мм, $V_{\text{опт}}=33$ м/с;
3 – $s=6$ мм, $V_{\text{опт}}=36.5$ м/с

10. Сухарьков О. В. Влияние гидростатического давления на энергетические характеристики прямооточного гидродинамического излучателя // Наук. праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2009. – № 1. – С. 70–77.
11. Жидкоструйный излучатель / Кортнев А. В., Сухарьков О. В. – Авт. свид. СССР. – N 1151329, МПК В06В 1/20. – 1985 // Бюл. N 15.
12. Шендеров Е. Л. Излучение и рассеяние звука. – Л.: Судостроение, 1989. – 301 с.
13. Singhal A. K., Athavale M. M., Li H., Jiang Y. Mathematical basis and validation of the full cavitation model // Trans. ASME, J. Fluids Eng. – 2002. – № 124. – P. 617–624.
14. Дудзинский Ю. М. Динамика затопленной осесимметричной кольцевой струи // Доп. НАН України. – 2006. – № 1. – С. 46–51.

15. Дудзинский Ю. М. Ближнее поле осесимметричного гидродинамического излучателя // Акуст. вісн.– 2004.– 7, № 4.– С. 48–51.
16. Сухарьков О. В. Экспериментальное исследование акустического поля прямого гидродинамического излучателя // Наук. праці ОНАЗ ім. О. С. Попова.– 2007.– № 1.– С. 39–44.
17. Дудзінський Ю. М., Сухарьков О. В. Спектр звуку, генерованого зануреною осесимметричною струминною оболонкою // Мат. методи та фіз.-мех. поля.– 2007.– 50, № 2.– С. 129–134.