

**ЖИДКОСТРУЙНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ СО СТУПЕНЧАТЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ  
И КРУГОВЫМ ЩЕЛЕВЫМ СОПЛОМ В ВИДЕ СООСНЫХ ДИСКОВ**

**РІДКОСТРУМІННИЙ ВИПРОМІНЮВАЧ ЗІ СХІДЧАСТОЮ ПЕРЕШКОДОЮ  
ТА КОЛОВИМ ЩІЛИННИМ СОПЛОМ У ВИГЛЯДІ СПІВВІСНИХ ДИСКІВ**

**HYDRODYNAMIC RADIATOR WITH THE STEP OBSTACLE  
AND CIRCULAR CRACK NOZZLE AS DISKS**

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментального исследования по оптимизации геометрических параметров жидкоструйного излучателя со ступенчатым препятствием и круговым щелевым соплом в виде соосных дисков. Ключевые слова: гидроакустическая аппаратура, гидродинамические излучатели, оптимизация параметров.

**Анотація.** Наведено результати експериментальних досліджень з оптимізування геометричних параметрів рідкострумінного випромінювача зі східчастою перешкодою й коловим щілинним соплом у вигляді співвісних дисків. Ключові слова: гідроакустична апаратура, гідродинамічні випромінювачі, оптимізування параметрів.

**Summary.** The results of experimental research on optimization of geometrical parameters of hydrodynamic radiator with the step obstacle and circular crack nozzle as disks are presented. Key words: hydroacoustic apparatus, hydrodynamic radiators, optimization of parameters.

В подводной связи и гидролокации проблеме увеличения дальности действия передающей гидроакустической аппаратуры традиционно уделяется особое внимание [1 – 3]. Для решения этой проблемы перспективно использовать низкочастотные (0,3...8) кГц осесимметричные гидродинамические излучатели (ГДИ) с пульсирующей кавитационной областью [4...10]. 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 были оптимизированы рабочие параметры как противоточных, так и прямоточных излучателей [5...10]. Однако отсутствуют научные исследования по оптимизации параметров осесимметричного жидкоструйного ГДИ [11], у которого выходящая из кольцевого сопла струя формируется под прямым углом к оси излучателя.

Цель данной статьи – проведение экспериментальных исследований по оптимизации геометрических параметров жидкоструйного излучателя со ступенчатым препятствием и круговым щелевым соплом в виде соосных дисков.

**1. Модель жидкоструйного излучателя.** Рассмотрим физическую модель жидкоструйного излучателя с круговым щелевым соплом в виде соосных дисков [11]. В основу предлагаемой модели положены автоколебания упругой затопленной осесимметричной струйной кольцевой мембраны (рис. 1, а).

Из кругового щелевого сопла радиуса  $r_c$ , образованного корпусом 1 и обтекателем б, с заданной скоростью перпендикулярно оси излучателя вытекает затопленная плоская струя 5. Ступенчатое препятствие 3 способствует формированию осесимметричной струйной мембраны в форме шайбы с геометрическими параметрами: шириной  $S$  и толщиной  $h$ . Говоря о мембране в общем случае, мы подразумеваем упругую изгибающуюся натянутую пленку [12]. В нашем случае считаем, что внутренний край кольцевой мембраны жестко защемлен на выходе из сопла, а наружный край – свободно опирается на ступенчатое препятствие 3. За счет эффекта Бернулли в кольцевой проточке корпуса 1 создается неустойчивый первичный кавитационный вихрь 2 в форме

торида, который является накопителем энергии рассматриваемой акустической системы. Следует отметить, что область 2 представляет собой двухфазную среду – жидкость с парогазовыми микропузырьками. Пульсации области 2 возбуждают изгибные колебания в струйной кольцевой мембране 5. Частота пульсаций тороидальной зоны развитой кавитации 2 зависит от скорости струи на выходе из сопла. При совпадении частоты пульсаций области 2 и собственной частоты струйной мембраны генерируется акустический сигнал максимального уровня.

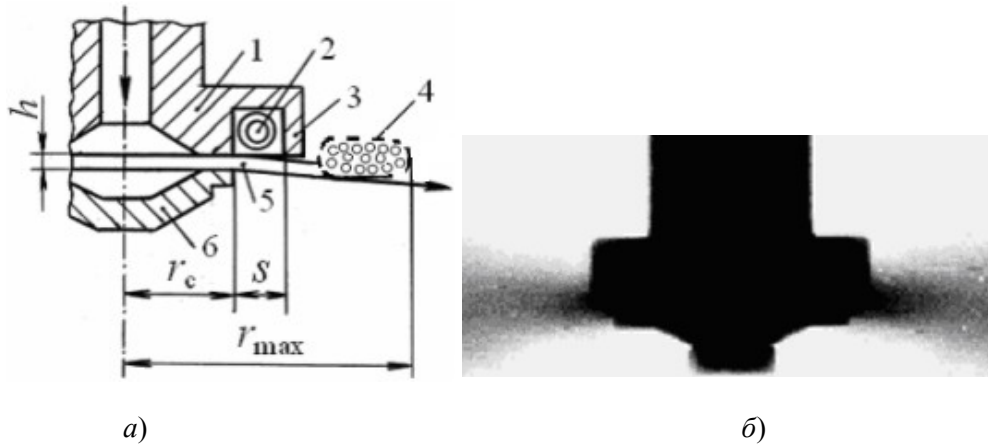


Рисунок 1 – Жидкоструйный излучатель: а – физическая модель; б – фотография излучателя на просвет при оптимальном режиме его работы

Таким образом, в рабочей зоне излучателя образуется своеобразная резонансная система, состоящая из внутренней упругой кавитирующей среды, струйной мембраны и присоединенной массы внешней среды. Создаваемая обратная акустическая связь обеспечивает стабильную частоту автоколебаний [13]. Вырывающийся наружу поток с парогазовыми кавернами создает вторичную тороидальную область 4 с развитой кавитацией. Форма сечения этой области близка к эллипсу (рис. 1, б). В области 4 происходит коллапс кавитационных пузырьков, в результате чего в окружающей жидкой среде генерируются микроударные волны, что приводит к усилению интенсивности генерируемого акустического сигнала. Фотография жидкоструйного излучателя на просвет при оптимальном режиме его работы (см. рис. 1, б) позволяет оценить максимальный радиус  $r_{max}$  всей его области гидродинамического звукообразования.

**2. Оборудование и методика проведения исследований.** Для проведения экспериментальных исследований по оптимизации рабочих параметров жидкоструйного излучателя использовался лабораторный стенд, схема которого представлена рис. 2.

Оборудование стенда включает в себя силовую и измерительную части. Силовая часть состоит из емкости 1, фильтра 2, насосного агрегата 3 с плавно регулируемым расходом жидкости и системы трубопроводов. Внутри емкости 1 в затопленном состоянии помещены жидкоструйный излучатель 7, гидрофон 8 и термометр 4. Расход рабочей жидкости измеряется индукционным расходомером 5, а давление нагнетания жидкости в излучатель контролируется манометром 6. По показаниям расходомера 5 можно вычислить среднюю по расходу скорость  $V$  истечения жидкости на выходе из сопла излучателя. Гидродинамическая мощность  $N_{гд}$

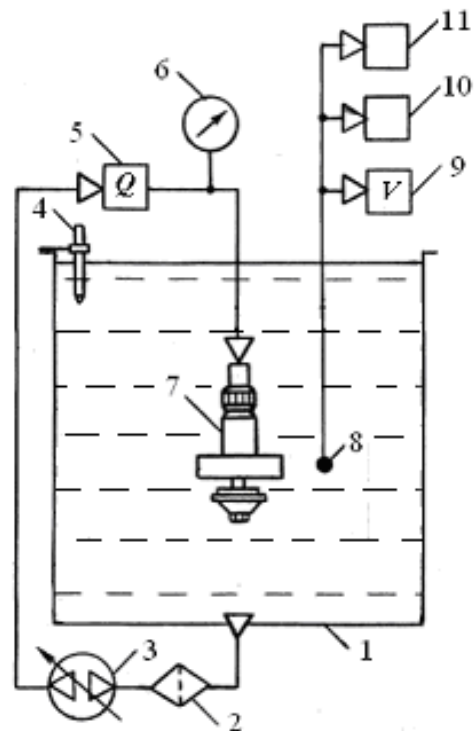


Рисунок 2 – Схема лабораторного стенда

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

$$N_{\text{аа}} = \pi r_{\text{н}}^2 h \rho V_{\text{н0}}^3, \quad (1)$$

где  $r_{\text{н}}$  – радиус кругового щелевого сопла излучателя;  $h$  – ширина щели сопла;  $\rho$  – плотность рабочей жидкости;  $V_{\text{н0}}$  – скорость струи при оптимальном режиме работы излучателя.

Аппаратура регистрации и анализа акустических сигналов, поступающих от гидрофона 8, включает 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, приблизительно 5 кПа. Рабочей жидкостью служила водопроводная вода, которая для установления равновесия газосодержания отстаивалась в течение трех недель. Температура воды поддерживалась в пределах (19...21) °С, что обеспечивало неизменность плотности и вязкости жидкой среды. Калиброванный пьезокерамический гидрофон 8 устанавливался вне турбулентного потока, образуемого отходящей от ГДИ прерывистой струей, в зоне линейного затухания экспоненциального импульса, генерируемого излучателем. При этом гидрофон располагался на расстоянии 50 мм от оси жидкоструйного излучателя и 20 мм – от плоскости струи, выходящей из сопла. Сигнал от гидрофона поступал на электронный вольтметр и анализатор спектра для измерения интегрального уровня и частоты основной (низшей) гармоники. Критерием оптимизации геометрических параметров ГДИ служил максимальный уровень акустического сигнала, генерируемого излучателем.

**3. Анализ результатов экспериментальных исследований.** Динамика осесимметричной струйной кольцевой мембраны 5 (см. рис. 1, а) определяет характеристики акустического поля, в частности интегральный уровень сигнала. Чем выше амплитуда деформации изгиба свободного края мембраны, тем большее количество парогазовых каверн выйдет наружу из внутренней области 2 (первичный вихрь). И тем больше будет усиление интенсивности генерируемого сигнала при коллапсе каверн во вторичной тороидальной области 4. Этому соответствует оптимальная скорость  $V_{\text{н0}}$  струи, при которой собственная частота струйной мембраны совпадает с собственной частотой пульсаций тороидальной области 2. Акустический 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 жидкоструйным излучателем от геометрических параметров ступенчатого препятствия 3, струйной мембраны 5 и кольцевой проточки как места формирования первичного кавитационного вихря 2. Во всех экспериментах излучатель настраивался на максимальный уровень сигнала подбором оптимальной скорости истечения струи из сопла.

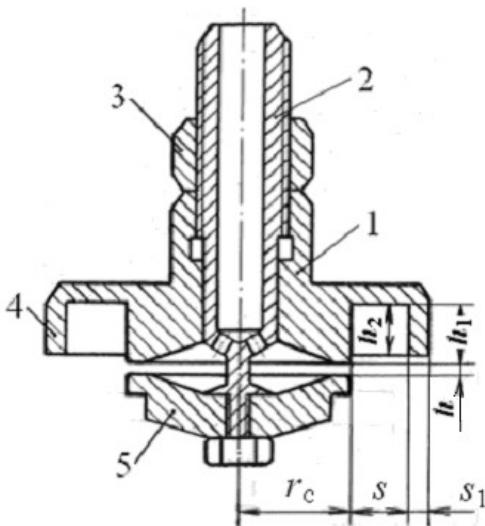


Рисунок 3 – Схема жидкоструйного излучателя

Схема разработанного жидкоструйного излучателя изображена на рис. 3. Излучатель содержит: корпус 1 с кольцевой проточкой и ступенчатым препятствием 4, обтекатель 5, штуцер 2 для подвода рабочей жидкости, контргайку 3. Регулировка ширины  $h$  щели кругового сопла (толщины струйной мембраны) выполняется путем перемещения корпуса 1 по штуцеру 2 с последующей фиксацией корпуса 1 контргайкой 3. Изменение ширины кольцевой проточки  $s$  (ширины струйной мембраны), а также других геометрических параметров ГДИ ( $r_{\text{н}}$ ,  $s_1$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ) производилось за счет замены корпуса 1 и обтекателя 5 излучателя.

На рис. 4, а представлена зависимость интегрального уровня акустического сигнала от относительной высоты ступенчатого препятствия  $P_{\text{ак}}(h_2/s)$ . В данном эксперименте постоянными

оставались параметры излучателя:  $r_{\text{н}} = 13$  мм;  $h_1/s = 5/5$  [мм/мм]. При этом толщина  $h$  струйной кольцевой мембраны принимала значения: 0,5 мм, 0,7 мм, 1,0 мм, а оптимальная скорость струи  $V_{\text{н0}} = 33; 27,5; 24$  [м/с], соответственно. Видно, что зависимость  $P_{\text{ак}}(h_2/s)$  для каждой из кривых характеризуется наличием экстремума и принимает максимальное значение при  $h_2 = (0,8 \dots 1,0)s$ . Уменьшение высоты ступенчатого препятствия до величины  $h_2 = 0,4s$  ведет к уменьшению  $P_{\text{ак}}$  примерно в 3 – 4 раза. Если же высоту ступенчатого препятствия увеличивать до значения  $h_2 = 1,2s$ , то гидрофон регистрирует резкое снижение величины акустического давления до уровня шума затопленной струи, ударяющейся в препятствие.

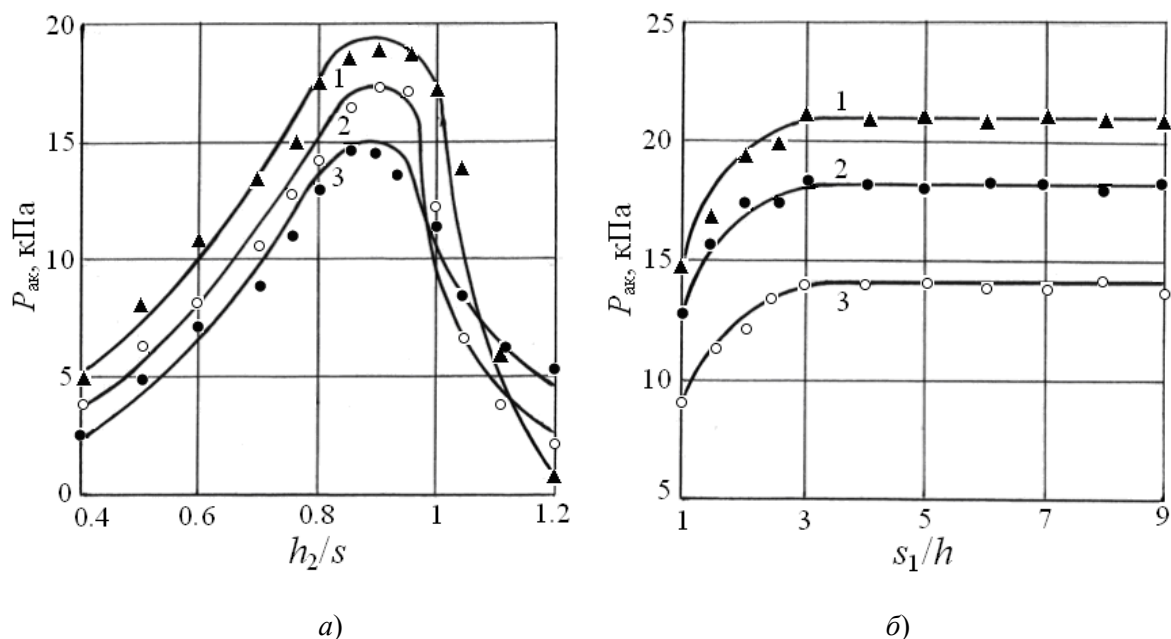


Рисунок 4 – Зависимость уровня акустического сигнала от высоты (а) и ширины (б) ступенчатого препятствия: 1 –  $h/s = 0,10$ ; 2 –  $h/s = 0,14$ ; 3 –  $h/s = 0,20$

На рис. 4, б отражена зависимость уровня сигнала от относительной ширины ступенчатого препятствия  $P_{\text{ак}}(s_1/h)$ . Постоянными оставались следующие параметры излучателя:  $r_c = 13$  мм;  $h_1/s = 5/5$ ;  $h_2/s = 4,5/5$  [мм/мм]. Экспериментальные кривые также представлены для трех значений толщины струйной мембраны:  $h = 0,5$  мм, 0,7 мм, 1,0 мм. Установлено, что уменьшение ширины  $s_1$  ступенчатого препятствия от  $9h$  до  $3h$  как на уровень генерируемого сигнала, так и на частоту основной гармоники звука практически не влияет. Если же параметр  $s_1/h$  уменьшить до единицы, то величина  $P_{\text{ак}}$  понизится примерно на (25...30) %. В этом случае исследуемый ГДИ работает нестабильно, что проявляется в неустойчивости уровня низших гармоник регистрируемого частотного спектра. Визуальные наблюдения и фотосъемка (рис. 1, б) показали, что соблюдение условия  $s_1/h = 3 \dots 4$  позволяет вынести вторичную кавитационную область (зону эрозионной активности излучателя) за конструкционные элементы ГДИ. Последнее обстоятельство значительно увеличивает срок службы жидкоструйного излучателя.

Результаты экспериментальных исследований влияния глубины  $h_1$  кольцевой проточки на интегральный уровень и частоту основной гармоники акустического сигнала представлены на рис. 5. Неизменными были параметры излучателя:  $h/r_{\text{н}} = 0,5/13$ ;  $h_2/s = 4,5/5$  [мм/мм]. При этом ширина  $s$  струйной кольцевой мембраны принимала значения: 3,5 мм, 5 мм, 6 мм, а оптимальная скорость струи  $V_{\text{онт}} = 28, 33, 35,5$  [м/с] соответственно.

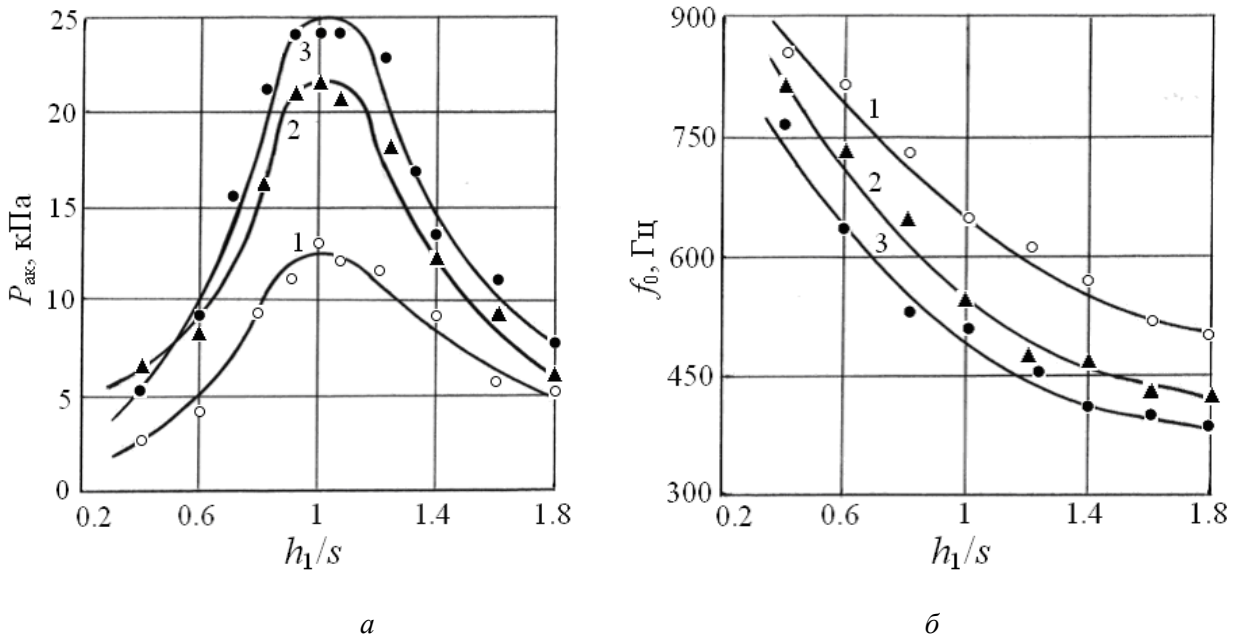


Рисунок 5 – Зависимость уровня акустического сигнала (а) и частоты основной гармоники (б) от глубины кольцевой проточки ГДИ: 1 –  $s = 3.5$  мм; 2 –  $s = 5$  мм; 3 –  $s = 6$  мм

Из зависимости  $P_{ак}(h_1/s)$  (рис. 5, а) можно сделать вывод, что она имеет экстремальный характер. При значениях параметра  $h_1/s$  (0,4 ... 0,6) объем пульсирующей двухфазной области 2 внутри кольцевой проточки мал (рис. 1, а), поэтому амплитуда изгиба свободного края струйной мембраны незначительна. В этом случае излучатель генерируют звуковые волны низкой интенсивности. Изменение параметра  $h_1$  от  $0,6s$  до  $0,9s$ , позволяет увеличить объем пульсирующей области 2, что приводит к существенному возрастанию уровня акустического сигнала. Оптимальное значение глубины кольцевой проточки  $h_1 = (0,9 \dots 1,1)s$  характеризует пульсацию симметрично сформированной тороидальной области 2 (ее сечение представляет собой круг). Дальнейшее углубление кольцевой проточки:  $h_1 = (1,1 \dots 1,8)s$ , несмотря на увеличение объема области 2, приводит к снижению интегрального уровня сигнала. Можно предположить, что в этом случае уменьшение амплитуды изгибных колебаний струйной кольцевой мембраны связано с деформацией двухфазной области 2 и уменьшением амплитуды ее пульсаций. Что касается частоты основной гармоники генерируемых колебаний, то с увеличением глубины проточки  $h_1$  от  $0,4s$  до  $1,8s$  частота  $f_0$  монотонно уменьшается для каждого значения ширины  $s$  струйной мембраны (рис. 5, б). Известно [14], что увеличение габаритов пульсирующего или осциллирующего тела приводит к уменьшению низшей из его собственных частот. Результаты эксперимента, представленные на рис. 5, б, хорошо согласуются с этой закономерностью для пульсирующей внутри кольцевой проточки ГДИ двухфазной области 2.

При исследовании влияния геометрических параметров струйной кольцевой мембраны на интегральный уровень звукового сигнала постоянными параметрами ГДИ оставались:  $r_c = 13$  мм;  $h_1/s = 1,0$ ;  $s_1/h = 3$ ;  $h_2/s = 0,9$ . Ширина  $s$  струйной мембраны принимала значения: 3,5 мм, 5 мм, 6 мм. Регулировка ширины щели кругового сопла позволяла изменять относительную толщину струйной мембраны в диапазоне:  $h/s = 0,08 \dots 0,24$ . В табл. 1 отражены гидродинамические параметры жидкоструйного излучателя в случае, когда струйная кольцевая мембрана имела ширину  $s = 5$  мм.

Таблица 1 – Гидродинамические параметры ГДИ для струйной кольцевой мембраны с шириной  $s = 5$  мм

$h$ , мм	$h/s$	$V_{\text{опт}}$ , м/с	$N_{\text{гд}}$ , Вт	$\rho h$ , г/см <sup>2</sup>
0,4	0,08	36,5	793	0,04
0,5	0,10	33	733	0,05
0,6	0,12	30	662	0,06
0,7	0,14	27,5	593	0,07
0,8	0,16	26	574	0,08
0,9	0,18	25	572	0,09
1,0	0,20	24	564	0,10
1,2	0,24	21	454	0,12

Здесь  $\rho h$  – удельная масса единицы поверхности струйной мембраны, а гидродинамическая мощность  $N_{\text{гд}}$  излучателя определялась по формуле (1). Как видно из табл. 1, с увеличением толщины струйной мембраны уменьшаются как оптимальная скорость струи, так и гидродинамическая мощность  $N_{\text{гд}}$  излучателя, в то же время величина  $\rho h$  возрастает в три раза. Аналогичные таблицы были получены для  $s = 3,5$  мм и  $s = 6$  мм.

На рис. 6 представлена зависимость уровня акустического сигнала от относительной толщины струйной мембраны  $P_{\text{ак}}(h/s)$ . Видно, что увеличение толщины мембраны для каждого параметра  $s$  практически линейно понижает уровень акустического сигнала примерно в два раза. Объяснение данного факта следует искать в физических свойствах струйной мембраны. Очевидно, что с увеличением толщины  $h$  мембраны и возрастанием удельной массы единицы поверхности струйной мембраны (см. табл.1), существенно повышается ее инертность. Это обстоятельство, наряду с уменьшением гидродинамической мощности излучателя, ведет к уменьшению его акустического КПД и, соответственно, снижению интенсивности сигнала.

В заключение отметим: жидкоструйный излучатель со ступенчатым препятствием и круговым щелевым соплом в виде соосных дисков является источником мощных акустических волн в диапазоне низких звуковых частот и перспективен для применения в гидроакустической аппаратуре. В основу предложенной физической модели излучателя положены автоколебания упругой затопленной осесимметричной струйной кольцевой мембраны. Экспериментально исследовано влияние геометрических параметров ступенчатого препятствия, кольцевой проточки и струйной кольцевой мембраны на интегральный уровень акустического сигнала, генерируемого данным излучателем. Установлены оптимальные соотношения между высотой ступенчатого препятствия и шириной струйной мембраны, между шириной препятствия и толщиной струйной мембраны, а также между глубиной и шириной кольцевой проточки излучателя.

### Литература

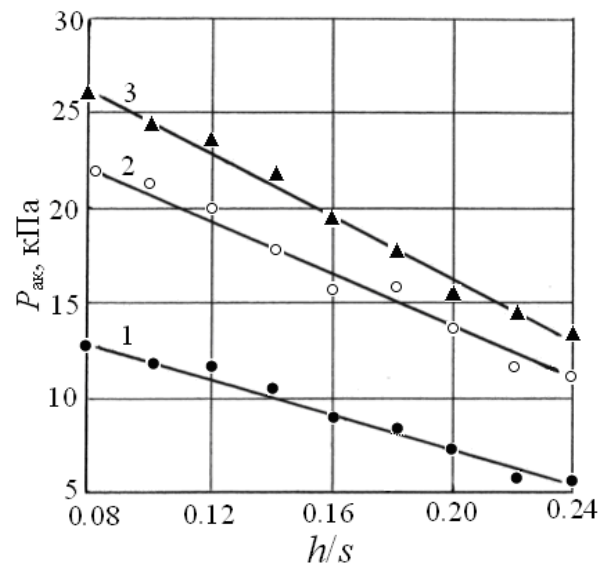


Рисунок 6 – Зависимость уровня акустического сигнала от соотношения между толщиной и шириной струйной кольцевой мембраны: 1 – мм; 2 – мм; 3 – мм

1. *Гидроакустика за 20 лет* / [пер. с англ., ред. Ю. Ф. Тарасюк] // Сб. статей по материалам 80-го съезда Акуст. общества США. – Л. : Судостроение, 1975. – 176 с.
2. *Урик Роберт Дж.* Основы гидроакустики / Роберт Дж. Урик. – Л. : Судостроение, 1978. – 448 с.
3. *Митько В.Б.* Гидроакустические средства связи и наблюдения / В.Б. Митько, А.П. Евтютов, С.Е. Гуцин. – Л. : Судостроение, 1982. – 200 с.
4. *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.
5. *Дудзинский Ю.М.* Оптимизация параметров широкополосного акустического излучателя в условиях избыточных статических давлений / Ю.М. Дудзинский, Н.В. Маничева, О.А. Назаренко // *Акустичний вісник*. – 2001. – 4. – № 2. – С. 38–46.
6. *Сухарьков О.В.* Экспериментальное исследование акустических характеристик осесимметричных прямооточных гидродинамических излучателей / О. В. Сухарьков // *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. – 2006. – № 1. – С. 74–79.
7. *Сухарьков О.В.* Влияние скорости струи на акустические характеристики осесимметричного гидродинамического излучателя / О. В. Сухарьков // *Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова*. – 2006. – № 2. – С. 78–84.
8. *Сухарьков О.В.* Оптимизация параметров прямооточного гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления / О. В. Сухарьков // *Акустичний вісник*. – 2008. – 11. – № 4. – С. 54–63.
9. *Сухарьков О.В.* Влияние гидростатического давления на энергетические характеристики прямооточного гидродинамического излучателя / О.В. Сухарьков // *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. – 2009. – № 1. – С. 70–77.
10. *Сухарьков О.В.* Оптимизация параметров струйного прямооточного гидродинамического излучателя со ступенчатым препятствием // НАН України, Інститут гідромеханіки: тези доповідей акустичного симпозиуму “КОНСОНАНС – 2009.” – 2009. – С. 56.
11. *А.с. 1151329 СССР*, М. Кл.<sup>3</sup> В 06 В 1/20. Жидкоструйный излучатель / А.В. Кортнев, О.В. Сухарьков (СССР). – № 3623866/18–28; заявл. 20. 05. 83 ; опубл. 23. 04. 85, Бюл. № 15.
12. *Шендеров Е.Л.* Излучение и рассеяние звука / Е.Л. Шендеров. – Л.: Судостроение, 1989. – 301 с.
13. *Вовк И.В.* О возможном механизме автоколебаний в струйных гидродинамических излучателях с развитой кавитацией / И. В. Вовк, В. Т. Гринченко, Ю. М. Дудзинский // *Акустичний вісник*. – 2008. – 11, № 2. – С. 16–23.
14. *Скучик Е.* Основы акустики / Скучик Е. – М. : Мир, 1976. – 2, – 542 с.