

**АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМОТОЧНЫХ
ЖИДКОСТРУЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

**АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМОТОЧНИХ
РІДИННОСТРУМІННИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

**AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS
OF THE DIRECT-FLOW HYDRODYNAMIC CONVERTERS**

Аннотация. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований амплитудно-частотных характеристик и добротности прямооточных жидкоструйных преобразователей с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием.

Анотація. Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень амплітудно-частотних характеристик і добротності прямооточних рідиннострумінних перетворювачів з кільцевим соплом і східчастою перешкодою.

Summary. The results of theoretical and experimental investigations of amplitude-frequency characteristics and the quality factor ramjet hydrodynamic converters with the circular nozzle and a stepped obstacle are presented.

В настоящее время решение проблемы совершенствования звукоподводной связи проводится в направлении увеличения дальности действия передающей аппаратуры за счет использования более низких частот. Особое внимание при этом уделяется разработке эффективных глубоководных преобразователей, являющихся неперемными элементами гидроакустических излучающих антенн [1...3]. Проведенные ранее исследования показали, что прямооточные жидкоструйные преобразователи способны эффективно работать в широком диапазоне гидростатических давлений (на глубине от 10м до 240м). Неоспоримыми преимуществами этих излучателей являются простота эксплуатации, малые габариты и масса, отсутствие вибрирующих элементов конструкции, что обуславливает длительный срок их службы. Жидкоструйные преобразователи обладают достаточно высоким уровнем акустического сигнала, при этом их рабочий диапазон тонального сигнала находится в интервале от 300 Гц до 9 кГц [4, 5]. Однако, амплитудно-частотные характеристики и добротность преобразователей такого типа ранее не исследовались.

Целью данной статьи является исследование амплитудно-частотных характеристик и добротности прямооточных жидкоструйных преобразователей с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием.

1. Физическая модель жидкоструйного преобразователя. Рассмотрим уточненную физическую модель прямооточного жидкоструйного преобразователя с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием (рис. 1, а).

Из кругового щелевого сопла 1 с регулируемой скоростью вытекает струя жидкости, которая представляет собой затопленную цилиндрическую струйную оболочку 2. Можно считать, что верхнее основание оболочки 2 жестко заземлено на торце сопла, а нижнее основание является свободным. Ступенчатое препятствие 4 способствует тому, что вытекающая струя раздваивается: часть потока уходит во внешнюю среду, а другая часть заворачивается в сторону оси симметрии и образует первичный вихрь 3 тороидальной формы. На теневой фотографии работающего преобразователя (рис. 1, б) хорошо видны струйная оболочка и первичный тороидальный вихрь.

В центре вихря за счет эффекта Бернулли создаются условия для разрыва жидкости и образования парогазовых кавитационных пузырьков. С увеличением концентрации каверн давление внутри области развитой кавитации 3 возрастает и достигает критического значения. В этот момент свободный край упругой струйной оболочки деформируется и происходит выброс содержимого кавитационной зоны во внешнюю среду. Ниже ступенчатого препятствия 4 за счет вязкостного трения образуется вторичный кольцевой вихрь, в котором выброшенные каверны захлопываются, генерируя микроударные волны высокой интенсивности. После этого давление во внутренней полости струйной оболочки 2 становится меньше гидростатического давления в окружающей невозмущенной среде, что

вновь приводит к повороту части струи в сторону оси Z и возникновению первичного вихря. В дальнейшем процесс периодически повторяется [4, 5].

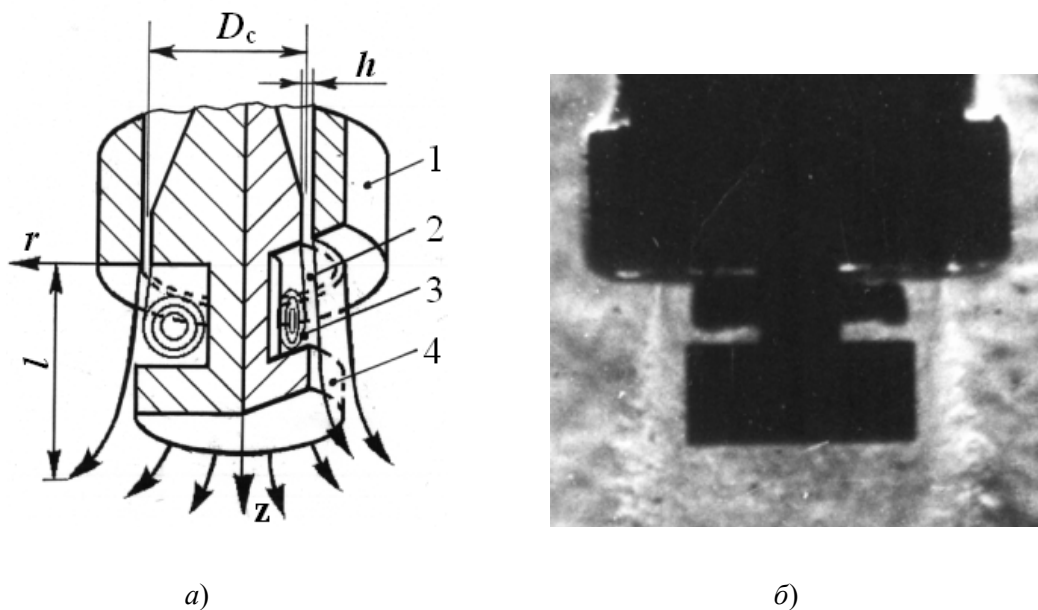


Рисунок 1 – Прямоточный жидкоструйный преобразователь:
 а) физическая модель, б) тенья фотография работающего преобразователя

Из вышесказанного следует, что накопителем энергии является первичный вихрь 3 с развитой кавитацией, а его пульсации возбуждают изгибные колебания в цилиндрической струйной оболочке 2. Частота пульсаций вихря 3 зависит от скорости струи на выходе из сопла. При оптимальной скорости струи, когда частота пульсаций вихря совпадает с собственной частотой оболочки, генерируется тональный акустический сигнал максимального уровня. Таким образом, рабочая зона излучателя представляет собой своеобразную резонансную систему, состоящую из внутренней упругой кавитирующей среды, струйной оболочки и присоединенной массы жидкости. Эта резонансная система и обеспечивает обратную акустическую связь, навязывая стабильную частоту автоколебаний струйной оболочки [6].

2. Решение задачи вынужденных колебаний цилиндрической струйной оболочки. У реальных прямоточных жидкоструйных преобразователей струйная оболочка имеет длину порядка радиуса ($\pi \cdot r / l \sim 1$) и угол между ее образующей и осью мал. Это позволяет в качестве модели прямоточного излучателя рассматривать цилиндрическую струйную оболочку, жестко защемленную на одном основании и свободную на другом [4, 5]. В первом приближении затопленную струйную оболочку можно считать твердотельной с некоторым эквивалентным модулем упругости \tilde{E} . Воспользуемся уравнениями динамики вынужденных колебаний для твердотельных оболочек [7]. В случае цилиндрической оболочки параметры Ламе $A = 1$, $B = r$ (где r – средний радиус эквивалентного цилиндра), а радиусы кривизны $R_1 \rightarrow \infty$, $R_2 = r$. Кроме того, при осевой симметрии все упругие величины не зависят от угловой координаты φ . Поскольку оболочка деформируется только в направлении нормали к ее поверхности, то сдвигающие усилия и крутящие моменты отсутствуют. При этом на любом сечении $\varphi = \text{const}$ также равны нулю изгибающие моменты и перерезывающая сила. В связи с тем, что материалом оболочки является жидкость и оболочка, испытывающая колебания, находится в затопленном состоянии в этой же рабочей жидкости, то коэффициент Пуассона $\mu = 0$ [8]. Компоненты удельных внешних усилий в направлении оси симметрии Z , окружной оси φ и нормали принимают соответственно следующие значения:

$$q_z = 0, \quad q_\varphi = 0, \quad q_n = Q_0 \cdot e^{i\omega t}, \quad (1)$$

где t – параметр времени; ω – круговая частота. Предполагаем, что оболочка деформируется под действием сил, равномерно распределенных по ее внутренней поверхности, и

потому совершает только изгибные гармонические колебания. С учетом этих допущений после преобразования системы уравнений движения оболочки [7] оставим только уравнения, в которые входит интересующее нас изгибное смещение w :

$$w(z, t) = w \cdot e^{i\omega t}.$$

Тогда система уравнений движения оболочки принимает вид [9]

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_z}{\partial z} - \frac{Eh}{r^2} w(z, t) &= \rho h \frac{\partial^2 w(z, t)}{\partial t^2} + q_n, & \frac{\partial M_z}{\partial z} - N_z &= 0, \\ \frac{\partial w}{\partial z} + \Psi_z &= 0, & \frac{\partial \Psi_z}{\partial z} - \frac{12}{Eh^3} M_z &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где ρ, r, l, h – плотность материала, радиус средней поверхности, длина и толщина струйной оболочки; E – модуль объемной упругости жидкости; z – осевая координата; φ – окружная координата; n – нормаль к элементу поверхности; Ψ_z – угол между касательной к окружной оси и нормалью в точках на поверхности цилиндра. На элемент оболочки действуют удельное перерезывающее усилие N_z и удельный изгибающий момент M_z . Поскольку материалом оболочки является жидкость, то сдвигающие усилия и крутящий момент отсутствуют. Согласно физической модели преобразователя (рис. 1, а) верхнее основание оболочки ($z = 0$) жестко защемлено, а нижнее основание ($z = l$) является свободным. На защемленном основании оболочки отсутствует смещения, а на свободном – равны нулю перерезывающие усилия и изгибные моменты. Граничные условия на основаниях оболочки имеют вид

$$w(0) = \frac{\partial w(0)}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial^2 w(l)}{\partial t^2} = \frac{\partial^3 w(l)}{\partial t^3} = 0. \quad (3)$$

Учтем выражения (1) в системе уравнений (2). Используя методику работы [10] по исследованию автоколебаний противоточного жидкоструйного излучателя, эту систему можно свести к одному уравнению:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial z^4} - k^4 w = -f_0, \quad (4)$$

$$k = \sqrt[4]{\frac{12(\rho r^2 \omega^2 - E)}{E h^2 r^2}}, \quad f_0 = \frac{12 Q_0}{E h^3}, \quad (5)$$

где k – характеристическое волновое число оболочки; Q_0 – амплитуда удельной возбуждающей силы со стороны тороидального вихря, которая равномерно распределена по внутренней поверхности оболочки. Модуль упругости E струйной оболочки можно выразить [10] через адиабатический модуль объемной упругости жидкости $K_{ад}$:

$$E = \frac{K_{ад}}{3(1-2\mu)} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \chi_i (P^* + \Delta P_{ст})^i, \quad (6)$$

где P^* – предел прочности жидкости на разрыв; $\Delta P_{ст}$ – избыточное (по сравнению с атмосферным) статическое давление на глубине моря; $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \dots$ – коэффициенты, которые практически не изменяются в широком диапазоне температур жидкости, но зависят от объема включений (мелкодисперсные твёрдые частицы, растворенный газ, зародыши кавитационных пузырьков и др.). Для отстоянной в течении трех недель водопроводной воды $P^* = 0,51$ МПа; $\chi_1 = 7,5$; $\chi_2 = 8 \cdot 10^{-6}$; $\chi_3 = 1,2 \cdot 10^{-11}$.

Общее решение неоднородного уравнения (4) имеет вид [9]

$$w(z) = C_1 \cdot \operatorname{ch}(kz) + C_2 \cdot \operatorname{sh}(kz) + C_3 \cdot \cos(kz) + C_4 \cdot \sin(kz) + \frac{f_0}{k^4}. \quad (7)$$

Неизвестные коэффициенты C_1 , C_2 , C_3 и C_4 найдем, подставив выражение (7) в граничные условия (3). Тогда для функции изгибных колебаний $w(z)$ получим

$$w(z) = \frac{f_0}{2k^4(1 + \cos(kl) \cdot \operatorname{ch}(kl))} \cdot [\cos(kz) + \cos(k(l-z)) \cdot \operatorname{ch}(kl) + \cos(kl) \cdot \operatorname{ch}(k(l-z)) + \operatorname{ch}(kz) - \sin(k(l-z)) \cdot \operatorname{sh}(kl) + \sin(kl) \cdot \operatorname{sh}(k(l-z))]. \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет определить формулы (9) и (10) для расчета амплитуды вынужденных изгибных колебаний свободного края оболочки ($z=l$):

$$A_{\text{вч}}(l) = \frac{f_0(\cos(kl) + \operatorname{ch}(kl))}{k^4(1 + \cos(kl) \cdot \operatorname{ch}(kl))}. \quad (9)$$

$$A_{\text{нч}}(l) = \frac{f_0 \cos(nl) \cdot \operatorname{ch}(nl)}{2n^4[1 + \operatorname{sh}^2(nl) + \cos^2(nl)]}; \quad n = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{\frac{12(E - \rho r^2 \omega^2)}{E h^2 r^2}}. \quad (10)$$

Функцией (9) можно пользоваться в интервале частот выше резонансной частоты, а функцией (10) – в интервале частот ниже резонансной частоты.

Для проверки соответствия приведенной математической модели были проведены экспериментальные исследования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) прямооточных жидкоструйных преобразователей

3. Анализ результатов экспериментальных исследований. В ходе экспериментов преобразователи (рис.1) помещались в гидроакустическом бассейне с водопроводной водой, которая для достижения стабильного газосодержания предварительно отстаивалась в течение трех недель. Температура воды поддерживалась в пределах (19...21) °С, что обеспечивало практически постоянными плотность и вязкость жидкой среды; избыточное статическое давление составляло 5 кПа. Частота пульсаций первичного вихря регулировалась за счет плавного изменения скорости струи на выходе из сопла преобразователя с помощью насоса с регулируемым расходом. Изменение геометрических параметров струйной оболочки (средний диаметр, длина, толщина) производилось за счет замены кольцевого сопла и цилиндрического ступенчатого препятствия. Средний диаметр эквивалентного цилиндра оболочки $D_{\text{цил}} = 2r = (D_c + D_{\text{max}}) / 2$ и длина оболочки l оценивалась по фотографиям работающего излучателя с подсветкой позади объекта [4]. Калиброванный пьезокерамический гидрофон устанавливался в зоне линейного затухания экспоненциального импульса, генерируемого излучателем [11]. Сигнал от гидрофона поступал на электронный вольтметр и анализатор спектра для измерения интегрального уровня (звуковое давление P) и частоты f_0 основной (низшей) гармоники.

Затопленная кольцевая струя жидкости является границей пульсирующей кавитационной зоны. Динамика струйной оболочки определяет АЧХ жидкоструйных преобразователей и спектр генерируемого акустического сигнала в виде коротких экспоненциальных импульсов [11]. При этом АЧХ источников звука зависит от геометрических и гидродинамических параметров затопленной струйной оболочки и свойств жидкости. Чем больше амплитуда деформации изгиба A свободного края оболочки, тем большее количество парогазовых каверн выйдет наружу из внутренней области оболочки (первичный вихрь). И тем выше будет интегральный уровень генерируемого сигнала (звуковое давление P) при коллапсе каверн во вторичной тороидальной области. Этому соответствует оптимальная скорость струи, при которой собственная частота струйной оболочки совпадает с частотой пульсаций неустойчивого первичного вихря. Наибольшая часть кинетической мощности затопленной струи преобразовывается в интенсивность акустического поля именно при резонансной частоте.

На рис. 2,а; 3,а; 4,а сплошными линиями отражены теоретические кривые амплитуды вынужденных изгибных колебаний свободного края оболочки в относительных единицах (A/A_{\max}), рассчитанные по формулам (9) и (10). Результаты экспериментальных измерений АЧХ излучателей представлены там же точками в относительных единицах звукового давления (P/P_{\max}). При этом учтено, что $A/A_{\max} = P/P_{\max}$. Добротность Q жидкоструйных преобразователей определялась как отношение $f_0 / \Delta f$, где Δf – ширина частотной полосы, на границах которой акустическая энергия излучателя при вынужденных колебаниях вдвое меньше энергии на резонансной частоте.

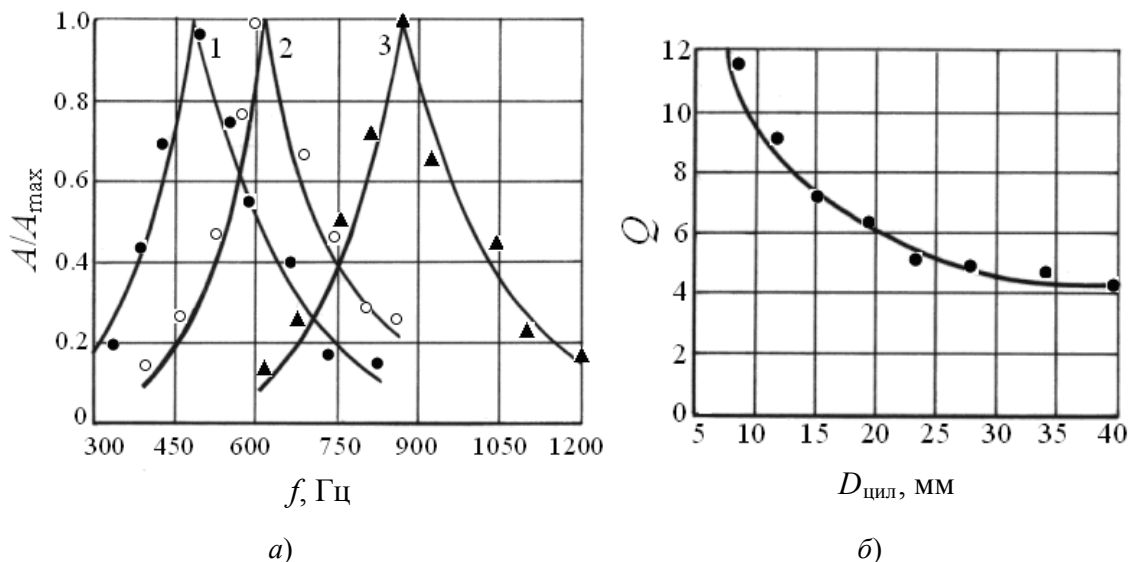


Рисунок 2 – а) АЧХ жидкоструйного преобразователя при среднем диаметре струйной оболочки:
 1 – $D_{\text{цил}} = 34$ мм, 2 – $D_{\text{цил}} = 23$ мм, 3 – $D_{\text{цил}} = 15$ мм;
 б) зависимость добротности преобразователя от среднего диаметра оболочки

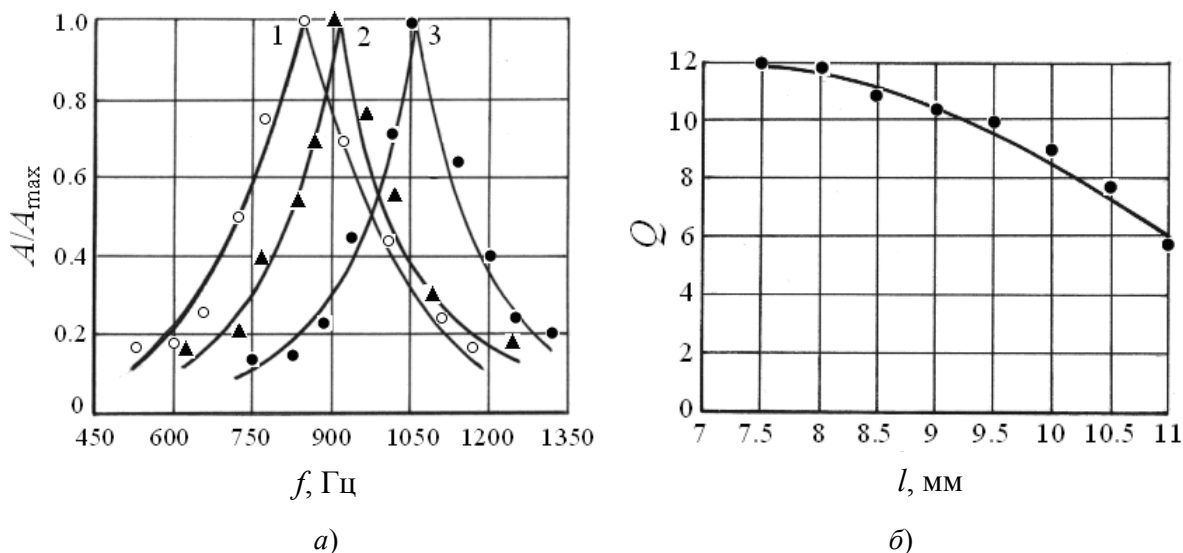


Рисунок 3 – а) АЧХ жидкоструйного преобразователя при длине струйной оболочки:
 1 – $l = 11$ мм, 2 – $l = 9$ мм, 3 – $l = 7,5$ мм;
 б) зависимость добротности преобразователя от длины оболочки

Вначале были исследованы зависимости уровня акустического сигнала от частоты пульсаций первичного тороидального вихря для прямоточных преобразователей с различным средним диаметром струйной оболочки. На рис. 2 (а) представлены АЧХ жидкоструйных преобразователей, у которых средний диаметр оболочки принимал значения: $D_{\text{цил}} = 34$ мм, 23 мм, 15 мм. Поддерживались

неизменными толщина струйной оболочки ($h = 0,5$ мм) и соотношение длины и среднего диаметра струйной оболочки ($\ell/D_{\text{цил}} = 0,6$). Видна хорошая корреляция амплитудно-частотных характеристик преобразователей и функции изгибных колебаний свободного края цилиндрической струйной оболочки. На рис. 2 (б) показана зависимость добротности $Q(D_{\text{цил}})$ от среднего диаметра оболочки.

Расчет показал, что добротность жидкоструйного преобразователя с ростом среднего диаметра струйной оболочки существенно понижается, асимптотически приближаясь к значению $Q = [4,5 \dots 5]$.

На втором этапе исследовалась зависимость АЧХ прямооточных преобразователей от длины затопленной струйной оболочки. Для этого у излучателей при постоянном среднем диаметре и толщине струйной оболочки изменяли ее длину, регулируя расстояние от торца сопла до ступенчатого препятствия. На рис. 3,а отражены результаты измерений для излучателя с неизменными геометрическими параметрами $D_{\text{цил}} = 15$ мм и $h = 1,0$ мм для трех значений длины оболочки. На рис. 3,б представлена зависимость добротности $Q(l)$ от длины струйной оболочки. Видно, что добротность жидкоструйного преобразователя с увеличением длины оболочки также проявляет тенденцию к уменьшению.

Известно, что увеличение габаритов пульсирующего или осциллирующего тела (в нашем случае это первичный кавитационный вихрь) приводит к уменьшению его нижней собственной частоты. Анализ зависимостей $A/A_{\text{max}}(f)$, представленных на рис. 2,а и 3,а, хорошо согласуется с этой закономерностью: с увеличением габаритов жидкоструйных преобразователей (среднего диаметра и длины струйной оболочки) резонансная частота уменьшается.

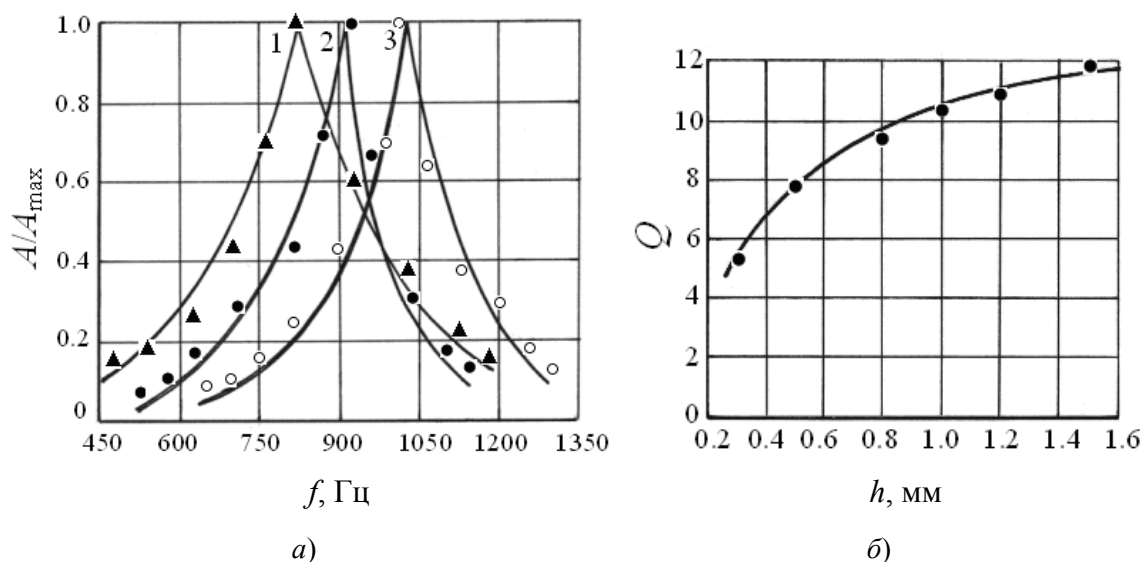


Рисунок 4 – а) АЧХ жидкоструйного преобразователя при толщине струйной оболочки:

1 – $h = 0,3$ мм, 2 – $h = 1,0$ мм, 3 – $h = 1,50$ мм

б) зависимость добротности преобразователя от толщины оболочки

Представляет интерес оценить влияние толщины струйной оболочки на АЧХ и добротность прямооточных преобразователей. На рис. 4,а точками отражены результаты экспериментальных исследований АЧХ преобразователей. Там же сплошными линиями представлены теоретические кривые АЧХ изгибных колебаний оболочек, рассчитанные по формулам (9) и (10). Постоянными оставались следующие параметры излучателя: $D_{\text{цил}} = 15$ мм, $\ell = 9$ мм. Изменение толщины струйной оболочки производилось за счет замены кольцевого сопла. На рис. 4,б показана зависимость добротности $Q(h)$ от толщины струйной оболочки, получена она по результатам экспериментального исследования АЧХ прямооточных жидкоструйных преобразователей.

Следует отметить, что влияние параметра h на величину частоты основного тона для жидкоструйных излучателей связано с двумя противоположными тенденциями. С одной стороны, с увеличением толщины струйной оболочки возрастает ее коэффициент жесткости [10], что должно приводить к повышению собственной частоты. С другой стороны, увеличение параметра h сопровождается возрастанием удельной массы единицы поверхности оболочки и, соответственно,

понижением собственной частоты. Очевидно, первый фактор оказывает большее влияние на амплитудно-частотные характеристики по сравнению со вторым. Анализ зависимостей $A/A_{\max}(f)$ (рис. 4) для прямооточных преобразователей показывает, что с увеличением толщины струйной оболочки повышается резонансная частота колебательной системы и возрастает ее добротность.

Для обеспечения широкой равномерной частотной характеристики излучения, позволяющей воспроизводить без искажений акустический сигнал на электрической стороне (в приемниках) добротность излучателей должна быть невелика (≤ 10) [12]. На основании проведенных исследований АЧХ прямооточных жидкоструйных преобразователей можно сделать вывод, что их добротность ($Q = 4 \dots 12$) позволяет эффективно использовать прямооточные преобразователи в качестве элементов гидроакустических излучающих антенн.

В заключение отметим: рассмотрена уточненная модель прямооточного жидкоструйного преобразователя с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием. Применительно к предложенной модели решена задача вынужденных колебаний затопленной струйной цилиндрической оболочки. Установлено соответствие между функциями амплитуды изгибных колебаний свободного края оболочки и АЧХ реальных преобразователей. Для струйных оболочек средней длины, в этом случае реальные преобразователи генерируют звуковые волны максимальной интенсивности, расхождение между теоретической зависимостью и данными эксперимента не превышает 5 %. Проанализировано влияние геометрических параметров затопленной струйной оболочки на добротность рассмотренной резонансной системы.

Литература

1. Урик Роберт Дж. Основы гидроакустики / Роберт Дж. Урик. – Л. : Судостроение, 1978. – 448 с.
2. Митько В.Б. Гидроакустические средства связи и наблюдения / Митько В.Б., Евтютов А. П., Гущин С. Е. – Л. : Судостроение, 1982. – 200 с.
3. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика / Г.М. Свердлин. – Л. : Судостроение, 1990. – 320 с.
4. Сухарьков О.В. Оптимизация параметров прямооточного гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления / О. В. Сухарьков // Акустичний вісник. – 2008. –11. – № 4. – С. 54 – 63.
5. 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.
6. 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.
7. Огибалов П. М. Оболочки и пластины / П. М. Огибалов, М. А. Колтунов. – М. : Изд-во МГУ, 1969. – 695 с.
8. Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей / М. Корнфельд. – М. : ГТТИ, 1951. – 200 с.
9. Дудзінський Ю. М. Спектр звуку, генерованого зануреною осесиметричною струминною оболонкою / Ю. М. Дудзінський, О. В. Сухарьков // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 2007. – 50, № 2. – С. 129 – 134.
10. Дудзинский Ю. М. Вынужденные колебания осесимметричной затопленной струйной оболочки / Ю. М. Дудзинский, В. Г. Попов // Прикладная механика. – 2005. – 41. – № 4. – С. 60 – 65.
11. Сухарьков О. В. Экспериментальное исследование акустического поля прямооточного гидродинамического излучателя / О. В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2007. – № 1. – С. 39 – 44.
12. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / [науч. ред. Голямина И. П. и др.]. – М. : Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.