

УДК 534.232

О.В. Сухарьков, канд. техн. наук

Акустические свойства модифицированного жидкоструйного преобразователя в условиях гидростатического давления

Для жидкоструйного преобразователя с круговым щелевым соплом в виде соосных дисков рассмотрена модель на основе автоколебаний затопленной плоской осесимметричной струи. Вычислена основная частота акустического сигнала как функция свойств рабочей жидкости и геометрических параметров струи. В зависимости от глубины погружения экспериментально исследованы частотные и энергетические характеристики пяти преобразователей. Проведено сопоставление численных данных с результатами экспериментов.

For hydrodynamic transducer with a circular gap nozzle in the form of coaxial disks, based on the model of self-oscillations of a submerged axisymmetric jet plane. Basic frequency of the acoustic signal is calculated as a function of fluid properties and geometric parameters of the jet. Depending on the depth experimentally investigated the frequency and energy characteristics of the five transducers. The numerical data are compared with the experimental results.

Ключевые слова: гидроакустика, жидкоструйный преобразователь, затопленная струя, частотные и энергетические характеристики преобразователей.

Введение

При решении различных задач информационной гидроакустики особое внимание уделяется проблеме увеличения дальности действия излучающих антенн, обязательными элементами которых являются низкочастотные преобразователи. Практика показала, что традиционные преобразователи магнитострикционного и пьезоэлектрического типа эффективны лишь в ультразвуковом диапазоне частот (≥ 20 кГц). Однако при понижении рабочих частот (< 6 кГц) КПД электроакустических преобразователей существенно уменьшается, а использование их на частотах менее 1 кГц становится нецелесообразным из-за непомерного возрастания габаритов и массы [1 – 3].

Поиск новых низкочастотных источников звука проходил в направлении создания преоб-

разователей, потребляющих в процессе работы вещества, либо всегда имеющиеся на судне, либо находящиеся в непосредственной близости от него: дизельное топливо, газ, воздух, вода. Так, например, долгое время предметом исследований были водяные молоты и реактивные струи. Систематические попытки использовать энергию гидравлических аккумуляторов, путем контролируемого преобразования в модулированный жидкостный поток, привели к разработке нескольких типов излучателей, генерирующих тональный сигнал в диапазоне частот (50 Гц...6 кГц). Однако к их недостаткам следует отнести сложность эксплуатации и практически полную потерю работоспособности при увеличении глубины более 100 м, что связано с возникновением усталостных явлений в колеблющихся мембранах, диафрагмах и сильфонах [2, 4].

Отдельный тип источников звука представляют низкочастотные жидкоструйные преобразователи с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием [5, 6]. В данных гидродинамических излучателях часть кинетической энергии затопленной струи преобразуется в энергию акустических волн [3]. Неоспоримыми достоинствами преобразователей [5, 6] являются экономичность (дешевизна изготовления излучателей), простота в эксплуатации, малые габариты и масса, отсутствие вибрирующих элементов конструкции, что обуславливает длительный срок их службы. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что жидкоструйные преобразователи имеют ряд свойств, отвечающих современным требованиям к передающей гидроакустической аппаратуре [5 – 13]. Ранее, в широком диапазоне гидростатических давлений (0,1...2,5) МПа, были проведены исследования частотных и энергетических характеристик прямоочных жидкоструйных преобразователей [5, 9]. Однако, судя по отсутствию соответствующих публикаций, до сих пор не проводилось исследование акустических свойств модифицированного жидкоструйного излучателя [6] в зависимости от глубины погружения. Особенность такого преобразователя заключается в том, что выходящая из щелевого

сопла затопленная плоская струя формируется под прямым углом к оси излучателя.

Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований влияния гидростатического давления на частотные и энергетические характеристики жидкоструйных преобразователей со ступенчатым препятствием и круговым щелевым соплом в виде соосных дисков.

1. Автоколебания затопленной плоской осесимметричной струи

Рассмотрим механизм генерации звука жидкоструйным преобразователем со ступенчатым препятствием и круговым щелевым соплом в виде соосных дисков (рис. 1, а).

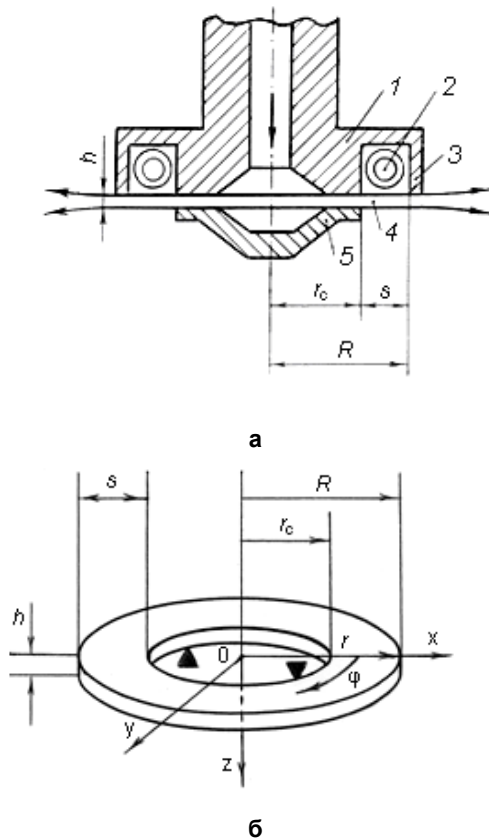


Рис. 1. Модифицированный жидкоструйный преобразователь: а – схема, б – модель кольцевой струйной пластинки

Затопленная струя, вытекающая из кругового щелевого сопла, образованного соосными дисками корпуса 1 и обтекателя 5, формируется в плоскую осесимметричную струю 4. В корпусе 1 излучателя выполнена кольцевая проточка, форма поперечного сечения которой близка к квадрату [6]. Ступенчатое препятствие 3 (прямоугольный клин) способствует тому, что часть кинетической энергии струи расходуется на

формирование в кольцевой проточке корпуса 1 вихря 2, внутри которого за счет эффекта Бернулли возникает кавитация. Пульсации торoidalного вихря 2 возбуждают изгибные колебания кольцевой струйной пластинки 4 на собственной частоте. Можно сказать, что в рабочей зоне излучателя образуется своеобразная резонансная система, состоящая из упругой кавитирующей среды внутри кольцевой проточки корпуса 1, струйной пластинки 4 и присоединенной массы внешней среды. Эта резонансная система и обеспечивает обратную акустическую связь, навязывая кольцевой струйной пластинке автоколебания со стабильной частотой [14]. Оптимальный режим гидродинамического звукообразования, при котором генерируется тональный акустический сигнал максимального уровня, соответствует совпадению частоты пульсаций вихря с частотой основной гармоники изгибных колебаний струйной пластинки [7].

Итак, в предлагаемой акустической модели кольцевая пластинка характеризуется геометрическими параметрами: толщиной h , шириной s , внутренним радиусом r_c (радиус сопла) и внешним радиусом R , причем толщина пластинки h мала по сравнению с радиусом R (рис. 1, б). Гидродинамическими параметрами струйной пластинки являются: ρ, E, V – плотность, модуль упругости затопленной струи и ее скорость на выходе из сопла. В первом приближении упругую струйную пластинку можно рассматривать как твердотельную пластинку с некоторым эквивалентным модулем упругости [10]. Будем считать, что кольцевая пластинка жестко закреплена по внутреннему контуру и свободно оперта по внешнему контуру. При этом пластинка деформируется под действием сил, равномерно распределенных по ее внутренней поверхности, и потому совершает вертикальные изгибные гармонические колебания. Тогда для определения частот собственных колебаний кольцевой пластинки можно использовать дифференциальное уравнение изгиба круглой пластинки постоянной толщины в полярных координатах r, φ [15]. В результате решения данного уравнения в работе [13] получена формула для определения частоты основной гармоники f_0 колебаний струйной пластинки:

$$f_0 = \frac{\beta_0^2}{2\pi(s)^2} \sqrt{\frac{Eh^2}{12\rho} \left(1 - \frac{r_c}{R}\right)}, \quad (1)$$

где $\beta_0 = 4,611$ – первый корень соответствующего трансцендентного уравнения [16].

2. Влияние гидростатического давления на частоту основной гармоники кольцевой струйной пластинки

Согласно (1) низшая гармоника автоколебаний затопленной кольцевой струйной пластинки зависит от геометрических параметров струи и упругих свойств рабочей жидкости. В работе [13] проведена проверка соответствия предложенной математической модели геометрическим параметрам модифицированного жидкоструйного преобразователя. С этой целью в акустическом бассейне исследовались частотные характеристики пяти излучателей, у которых радиус сопла принимал значения: $r_c = (8,0 \dots 21,0)$ мм. Исследования показали, что все испытываемые излучатели начинают генерировать тональный акустический сигнал при ширине кольцевой струйной пластинки $s = s_1 = 2,0$ мм. Сравнение теоретических и экспериментальных данных зависимости $f_0(s/s_1)$ позволило предложить критерий соответствия разработанной модели и расчетных соотношений для данного типа жидкоструйных излучателей: $s/s_1 \geq 1,7$. Отметим, что при выполнении данного критерия излучатели генерируют акустический сигнал максимальной интенсивности, а ошибка расчета частоты основной гармоники по формуле (1) по сравнению с экспериментальными данными не превышает 5 %.

Для оценки упругих свойств затопленной струи представляет интерес рассмотреть вопрос о функциональной зависимости модуля E от гидростатического давления. Известно, что с целью учета сжимаемости жидкостей во многих практических задачах используется эмпирическое уравнение Тэта [17]:

$$P = P^* \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\chi,$$

где ρ_0, ρ – плотности сжимаемой жидкости при атмосферном и избыточном статическом давлении, соответственно; P^* – внутреннее давление в жидкости, обусловленное взаимодействием молекул при атмосферном давлении; χ – параметр, характеризующий отклонение адиабатической сжимаемости жидкости от закона Гука. Согласно [18] адиабатический модуль объемной упругости жидкости можно определить выражением

$$K_{ад} = \sum_{n=1}^{\infty} \chi_n (P^* + \Delta P_{ст})^n, \quad (2)$$

где $\Delta P_{ст}$ – избыточное (по сравнению с атмосферным давлением) статическое давление в невозмущенной жидкости. Внутреннее давление P^* существенно зависит от температуры. Коэффициенты $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \dots$ практически не изменяются в широком диапазоне температур, но зависят от объема включений в жидкости (мелкодисперсные твердые частицы, парогазовые каверны и др.). Для большинства жидкостей значение линейного коэффициента находится в диапазоне $\chi_1 = (3 \dots 10)$ [17, 18]. Вопрос о нелинейных параметрах более высокого порядка эквивалентен вопросу о том, насколько реальная жидкость соответствует модели жидкости Тэта. В большинстве задач гидромеханики нелинейными коэффициентами $\chi_2, \chi_3, \chi_4, \dots$ пренебрегают в связи с их малостью. Однако, как было доказано в работе [19], в случае затопленных струй на звуковых частотах нагружения необходимо учитывать нелинейные параметры жидкости первого и второго порядка малости. Тогда при нулевом коэффициенте Пуассона μ [13] модуль упругости кольцевой струйной пластинки примет вид:

$$E = \frac{K_{ад}}{3(1-2\mu)} = \frac{1}{3} \sum_{n=1}^3 \chi_n (P^* + \Delta P_{ст})^n. \quad (3)$$

С учетом (3), выражение (1) для частоты основной гармоники затопленной плоской осесимметричной струи принимает окончательный вид:

$$f_0 = \frac{\beta_0^2}{2\pi(s)^2} \sqrt{\frac{h^2}{36\rho} \cdot \left(1 - \frac{r_c}{R}\right) \sum_{n=1}^3 \chi_n (P^* + \Delta P_{ст})^n}, \quad (4)$$

Отметим, что для гидродинамических излучателей, работающих в условиях развитой кавитации, в качестве внутреннего давления P^* в выражении (4) предлагается использовать порог кавитации жидкости [7].

3. Исследование ближнего акустического поля жидкоструйного преобразователя

Первый этап экспериментальных исследований был посвящен оптимизации рабочих параметров модифицированного преобразователя и определению его энергетических характеристик на глубине, соответствующей малому избыточному статическому давлению $\Delta P_{ст} = 5$ кПа [6, 10]. Исследования проводились в гидроакустическом бассейне со звукопоглощающими стенками, где также экспериментально было исследовано ближнее акустическое

поле жидкоструйного излучателя. Рабочей жидкостью служила дегазированная водопроводная вода. Для акустических измерений использовался пьезокерамический сферический гидрофон диаметром 10 мм. Калибровка гидрофона в акустическом бассейне показала, что он имеет постоянную чувствительность $M = 22$ мкВ/Па в диапазоне частот от 0,2 до 12 кГц. С повышением частоты от 12 кГц до 25 кГц чувствительность гидрофона падает примерно на 7%. Первая резонансная частота гидрофона находится в пределах $2 \cdot 10^5$ Гц. Координатное устройство обеспечивало перемещение гидрофона с шагом 5 мм вдоль и поперек бассейна, вверх, вниз, а также вращение вокруг геометрической оси преобразователя. В каждой точке поля регистрировались уровень звукового давления сигнала, его осциллограмма, спектр и частота основной гармоники.

В качестве основного типоразмера модифицированного жидкоструйного преобразователя принималось отношение ширины кольцевой проточки s к радиусу сопла r_c (рис. 1, а). Использовались пять излучателей различного типоразмера s/r_c , у которых радиус сопла (радиус внутреннего края струйной пластинки) принимал значения: $r_c = 8,0; 10,0; 13,0$ мм. При этом толщина затопленной струи оставалась неизменной и равной: $h = 0,5$ мм. Для того чтобы варьировать размер s кольцевой струйной пластинки в интервале (3,5...8,0) мм, был изготовлен набор корпусов излучателя с различны-

ми по ширине кольцевыми проточками. В табл. 1 представлены акустические параметры излучателей при оптимальном режиме их работы. Размер зоны звукообразования излучателей оценивался по их фотографиям на просвет [6].

Видно, что для модифицированного преобразователя (см. табл. 1), подобно ранее исследованным прямооточным и противоточным гидродинамическим излучателям, отношение размера его зоны звукообразования к длине волны основной гармоники сигнала дает величину значительно меньшую единицы ($2r_{\max} / \lambda_0 = 0,009...0,022$). Известно, что для источников звука малых размеров монополюсное излучение играет доминирующую роль в тех случаях, когда звук генерируется посредством периодического изменения объема. В работе [14] для гидродинамических излучателей прямооточного и противоточного типов предложена и экспериментально подтверждена простейшая акустическая модель пульсирующей сферической струйной оболочки с двухфазной средой во внутренней области. С достаточной степенью точности модифицированный гидродинамический излучатель также можно аппроксимировать источником звука нулевого порядка (монополем), создающим сферические расходящиеся волны. В этом случае уровень звукового давления сигнала зависит только от расстояния до источника звука и не зависит от углов θ и φ . Результаты экспериментальной проверки этой гипотезы в сравнении с идеальной сферической волной отражены на рис. 2.

Таблица 1 Акустические параметры модифицированного преобразователя

Основной типоразмер преобразователя s/r_c	3,5/8,0	4/10	5/13	6/13	8/13
Оптимальная скорость затопленной струи $V_{\text{опт}}$, м/с	28	30,5	34,5	37,5	43
Площадь поверхности колеблющейся кольцевой струйной пластинки F , мм ²	214,3	301,4	486,7	603,0	854,0
Размер зоны звукообразования преобразователя $2r_{\max}$, м	0,034	0,040	0,052	0,056	0,064
Длина волны основной гармоники звука λ_0 , м	1,52	1,92	3,26	4,05	6,82
$2r_{\max} / \lambda_0$	0,022	0,021	0,016	0,014	0,009

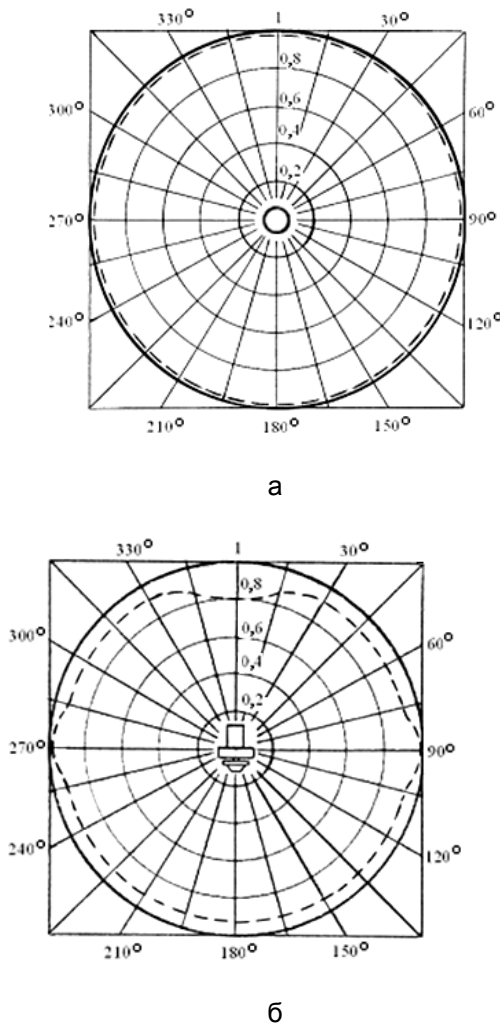


Рис. 2. Теоретические (—) и экспериментальные (---) диаграммы направленности жидкоструйного преобразователя: а – в горизонтальной плоскости; б – в вертикальной плоскости

Представленные здесь в двух ортогональных плоскостях диаграммы направленности зарегистрированы на расстоянии 50 мм от зоны звукообразования модифицированного преобразователя ($s/r_c = 3,5/8,0$). Из диаграмм направленности видно, что разработанный жидкоструйный излучатель является источником сферически расходящихся волн. При этом, следует отметить незначительное отклонение экспериментальной диаграммы направленности от теоретической диаграммы направленности в вертикальной плоскости. Увеличение величины звукового давления в направлении $\theta = 90^\circ$ связано с расположением гидрофона в области турбулентного потока, создаваемого отходящей от излучателя осесимметричной затопленной струей. В этом случае обтекаемый потоком гидрофон, наряду с пульсациями давления акустического типа, регистрирует также пульсации давления гидро-

динамического типа (псевдозвук) [20]. Уменьшение же уровня звукового сигнала в направлении $\theta = 0^\circ$ можно объяснить тем, что при моделировании не учитывалось частичное экранирование звука корпусом преобразователя.

На рис. 3. приведены фонограмма и спектрограмма типичных акустических сигналов, генерируемых модифицированным преобразователем с оптимальными геометрическими параметрами при оптимальном режиме истечения струи.

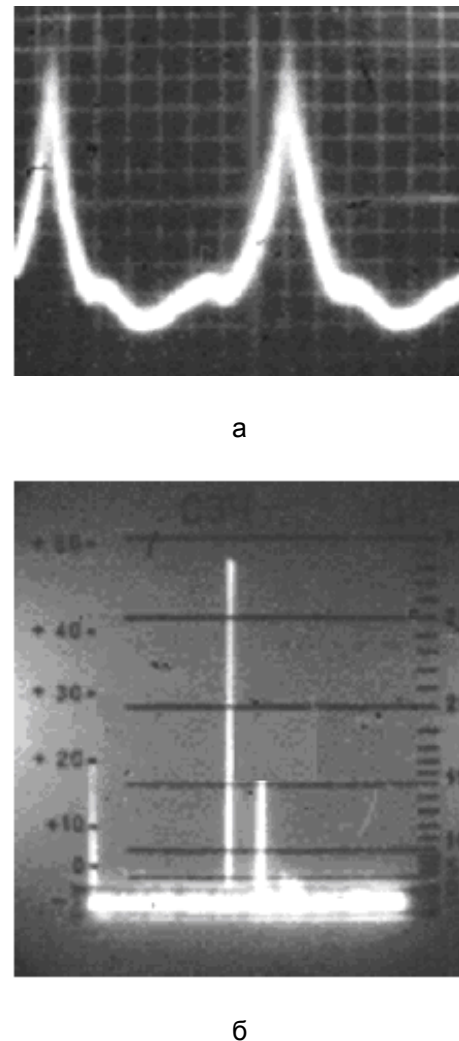


Рис. 3. Типичная фонограмма (а) и соответствующая ей спектрограмма (б) акустического сигнала жидкоструйного преобразователя при оптимальном режиме его работы

Видно (рис. 3, а), что в этом случае излучатель генерирует негармонические акустические сигналы в виде коротких экспоненциальных импульсов [21, 22]. Спектр генерируемых колебаний занимает широкую полосу частот, примерно от 0,3 до 25 кГц. При этом значительная доля звуковой энергии, излучаемой преобразовате-

лем, приходится на основную частоту f_0 . Так, например, для излучателя с типоразмером $s/r_c = 5/13 \rightarrow f_0 = 460$ Гц, амплитуда основной гармоники превышает амплитуду первой гармоники на 13,5 дБ и более чем на 23 дБ уровень остальных гармоник (рис. 3, б). Этот факт указывает на то, что модифицированный жидкоструйный преобразователь генерирует практически тональный звук.

На рис. 4 для трех излучателей представлены нормированные зависимости уровня звукового давления сигнала $P/P_0(r/\lambda)$ от безразмерного расстояния до границы звукообразования, выраженного в длинах волн основной гармоники.

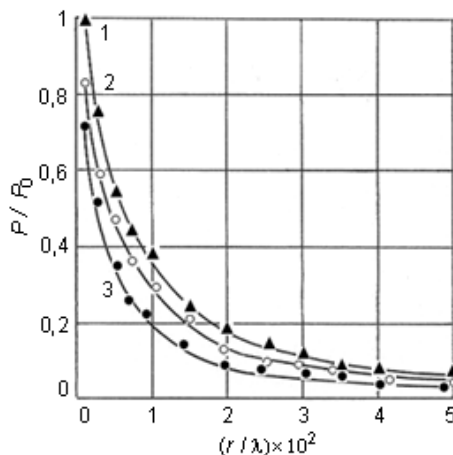


Рис. 4. Зависимость уровня генерируемого сигнала от безразмерного расстояния до границы звукообразования преобразователя:

- 1 – $s/r_c = 5/13 \rightarrow f_0 = 460$ Гц;
- 2 – $s/r_c = 4/10 \rightarrow f_0 = 781$ Гц;
- 3 – $s/r_c = 3,5/8 \rightarrow f_0 = 987$ Гц

Здесь сплошными линиями изображены теоретические зависимости уменьшения амплитуды сигнала с расстоянием, подчиняющиеся закону $1/r$ для сферической волны. Маркерами для каждого излучателя отражены экспериментальные зависимости. Все зависимости нормированы относительно уровня акустического сигнала, измеренного на расстоянии $r/\lambda = 0,001$ от границы зоны звукообразования, для преобразователя с типоразмером $s/r_c = 5/13$.

Анализ зависимости $P/P_0(r/\lambda)$ позволяет сделать вывод, что вблизи зоны звукообразования наблюдается нелинейное затухание экспоненциальных импульсов конечной амплитуды [21, 22]. При расширении фронта волны уровень звукового давления сигнала уменьшается и, начиная с расстояния $r/\lambda = 0,005$, наблюдается линейное затухание сферических волн вида

$P \sim \exp(-\alpha r)/r$ (где α – коэффициент поглощения звука).

4. Исследование влияния гидростатического давления на работу жидкоструйного преобразователя

Проведение экспериментальных исследований акустических свойств жидкоструйных преобразователей в натуральных условиях (на различной глубине моря) связано с большими материальными затратами и организационными мероприятиями. Поэтому условия погружения модифицированного преобразователя на глубину до 240 м моделировались на лабораторном стенде, схема которого представлена на рис. 5.

Он состоит из стальной герметичной емкости 1, в центре которой в затопленном состоянии размещены жидкоструйный преобразователь 4 и калиброванный гидрофон 10, в крышке емкости установлен термометр 11. Конструктивно емкость 1 представляет разборной цилиндр внутренним диаметром 600 мм, высотой 1200 мм и толщиной стенки 14 мм. Силовая часть стенда включает в себя насос 2 с плавно регулируемым расходом рабочей жидкости и систему трубопроводов. Насос обеспечивает номинальное давление 11,5 МПа при номинальном расходе жидкости $25 \text{ м}^3/\text{час}$. Давление нагнетания рабочей жидкости контролируется образцовым манометром 8, а ее расход измеряется с помощью индукционного расходомера 7. Скорость V истечения жидкости из щелевого сопла преобразователя рассчитывалась по измеренному расходу и известной площади сечения сопла.

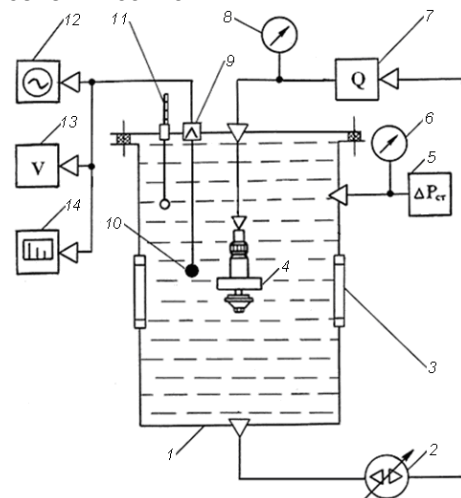


Рис. 5. Схема лабораторного стенда

Устройство 5 регулирует в рабочей емкости 1 избыточное статическое давление в диапазоне $\Delta P_{ст} = (0,005...2,4)$ МПа, для его измерения служит образцовый манометр 6. В качестве устройства 5 в разработанном стенде использовались дополнительный насос, регулируемый игольчатый клапан и вспомогательная емкость с рабочей жидкостью [5]. Визуальное наблюдение работы жидкоструйного преобразователя 4 и фотосъемка проводились через иллюминаторы 3. Рабочей жидкостью служила дегазированная водопроводная вода. При этом в формуле (4) для расчета частоты основной гармоники кольцевой струйной пластинки были приняты следующие значения прочности жидкости и коэффициентов Тэта: $P^* = 0,545$ МПа; $\chi_1 = 7,5$; $\chi_2 = 1,6 \cdot 10^{-6}$ Па⁻¹; $\chi_3 = 4,7 \cdot 10^{-12}$ Па⁻². Аппаратура регистрации и анализа акустических сигналов, поступающих от калиброванного гидрофона 10, включает в себя герметичный электрический разъем 9, осциллограф 12, вольтметр 13, анализатор частотного спектра 14, комплект переключателей и соединительных проводов.

Поскольку стальная емкость лабораторного стенда не позволяет реализовать режим бегущей волны, то правомерен вопрос об объективной оценке работы жидкоструйных преобразователей в данной емкости. Ранее, в связи с применением гидродинамических излучателей в промышленных условиях для интенсификации различных технологических процессов (например, эмульгирования, очистки поверхностей деталей), возникла проблема оценки акустических свойств излучателей в малых емкостях. Чтобы свести к минимуму интерференционные явления, обусловленные отражениями стенок емкости, необходимо определить критерий минимального расстояния r между излучателем и гидрофоном [20]. С этой целью было проведено экспериментальное исследование акустических полей по сложным сигналам, генерируемым гидродинамическим излучателем в различных по габаритам и форме емкостях [23]. Частотный диапазон работы излучателя по первой гармонике составлял примерно 0,7 - 1,6 кГц. В результате исследований были установлены участки, в пределах которых уменьшение с расстоянием r суммарного звукового давления и давления, соответствующего основным составляющим спектра, подчиняются закону $1/r$. Такие зависимости для первых трех гармоник и для интегрального сигнала генерируемого в цилиндрической емкости, близкой по размерам к

емкости лабораторного стенда, представлены в публикациях [23, 24]. При этом было установлено, что в широком интервале частот 0,7 - 4,8 кГц расхождение между экспериментальными и теоретическими данными по уменьшению звукового давления не превышает 2 дБ на участках изменения r примерно от 20 до 70 мм.

На основании полученных данных был сделан вывод, что во всех емкостях существуют примерно одинаковые участки, в пределах которых интерференционными явлениями можно пренебречь [23]. Тем не менее, для высокочастотных составляющих спектра наблюдается некоторое сужение области действия прямого звука. Однако поскольку амплитуды этих составляющих намного меньше амплитуд первых гармоник спектра (см. рис. 4), то их вкладом в энергетическую характеристику общего сигнала с достаточной степенью точности можно пренебречь.

Таким образом, в процессе исследования работы модифицированного преобразователя в условиях значительного гидростатического давления, гидрофон устанавливался в зоне прямого звука генерируемого акустического сигнала [23, 24]. При этом ошибка в измерении эффективного значения звукового давления $P_{ак}$ не превышала 2 дБ. Подбором оптимальной скорости струи $V_{опт}$ на выходе из сопла излучатель во всех измерениях настраивался на максимальный уровень звукового сигнала [10].

Ранее было установлено, что для струйных гидродинамических излучателей чрезмерное увеличение избыточного статического давления в окружающей среде (скорость струи оставалась фиксированной) приводит к исчезновению кавитации в тороидальной вихревой зоне и срыву процесса звукообразования. Поэтому с увеличением гидростатического давления необходимо повышать скорость струи на выходе сопла, т. е. подводить большую кинетическую энергию, что позволяет поддерживать приблизительно постоянными число кавитации и концентрацию каверн в тороидальном вихре [5, 19]. Результаты экспериментов, подтверждающих данный факт, для модифицированных преобразователей различного типоразмера отражены на рис. 6,а. Здесь также видно, что увеличение ширины s струйной пластинки в интервале (3,5...8,0) мм требует повышения оптимальной скорости $V_{опт}$ во всем диапазоне статических давлений $\Delta P_{ст} = (0,005...2,4)$ МПа.

На рис. 6,б для исследуемых излучателей семейством кривых представлена зависимость частоты основной гармоники f_0 акустического сигнала от $\Delta P_{ст}$. Расчеты производились по формуле (4), здесь же маркерами представлены результаты экспериментальных данных. Видно, что с повышением статического давления частота основного тона звукового сигнала

для каждого излучателя определенного типа-размера монотонно возрастает, а между теоретическими и экспериментальными данными наблюдается хорошая корреляция. При этом с увеличением площади поверхности F колеблющейся струйной пластинки частота f_0 уменьшается.

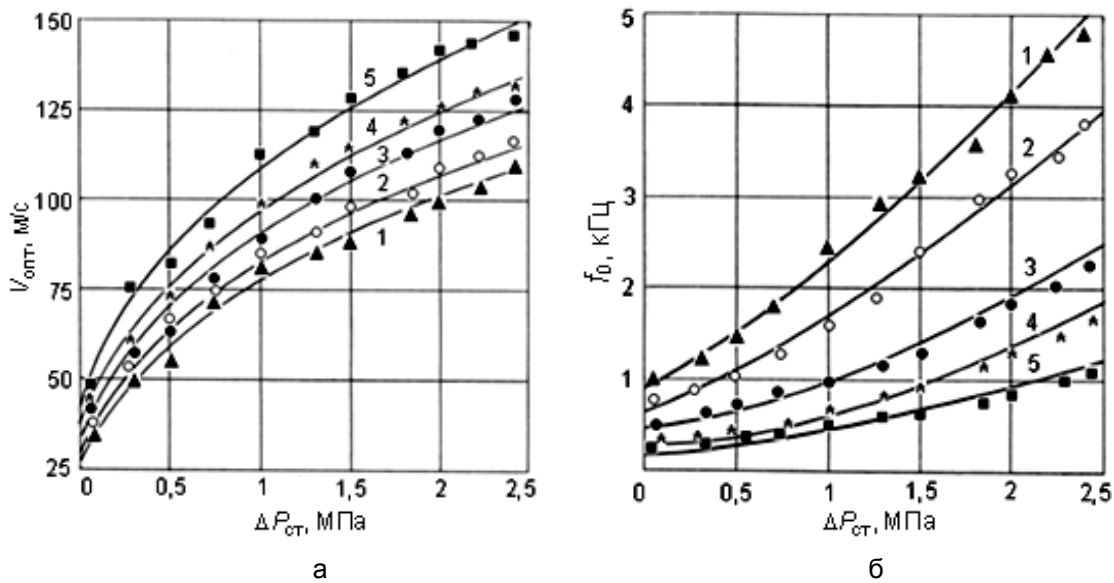


Рис. 6. Зависимости оптимальной скорости струи (а) и частоты основного тона звука (б) жидкоструйных преобразователей от избыточного статического давления: 1 – $s/r_c = 3,5/8,0$; 2 – $s/r_c = 4/10$; 3 – $s/r_c = 5/13$; 4 – $s/r_c = 6/13$; 5 – $s/r_c = 8/13$

Следует отметить, что площадь поверхности F кольцевой пластинки может возрастать как с увеличением ширины s , так и с увеличением радиуса внутреннего контура r_c . Сравнение показывает, что для преобразователя с параметром $s/r_c = 3,5/8,0$ ($F = 214 \text{ мм}^2$) в диапазоне $\Delta P_{ст} = (0,005...2,4)$ МПа частота основного тона звука возрастает от 987 Гц до 4850 Гц. В то же время, для излучателя с типоразмером $s/r_c = 8/13$ ($F = 854 \text{ мм}^2$) в рассматриваемом диапазоне статических давлений частота сигнала f_0 увеличивается от 220 Гц до 1065 Гц.

Проведенные исследования подтверждают тот факт, что увеличение габаритов колеблющейся пластинки или оболочки приводит к уменьшению низшей из ее собственных частот [15]. Представленные на рис. 6,б результаты

теории и эксперимента хорошо согласуются с этой закономерностью. Отметим также, что если для прямоточных жидкоструйных преобразователей в рассматриваемом интервале морских глубин (0,5 м...240 м) частота основного тона звука может принимать значение в диапазоне (0,35...9,26) кГц [9], то для модифицированного жидкоструйного преобразователя рабочий диапазон частот f_0 ниже и составляет (0,22...4,85) кГц.

Динамика кольцевой струйной пластинки определяет характеристики акустического поля, в частности, интегральный уровень сигнала. Чем больше амплитуда динамического изгиба наружного края колеблющейся пластинки, тем выше будет уровень регистрируемого гидрофоном акустического сигнала. Этому соответствует оптимальная скорость струи (см. рис. 6, а), при которой собственная частота затопленной

струйной пластинки совпадает с частотой пульсаций неустойчивого тороидального вихря [5]. На рис. 7 для группы излучателей представлены результаты экспериментального исследования функциональной зависимости $P_{ак}(\Delta P_{ст})$.

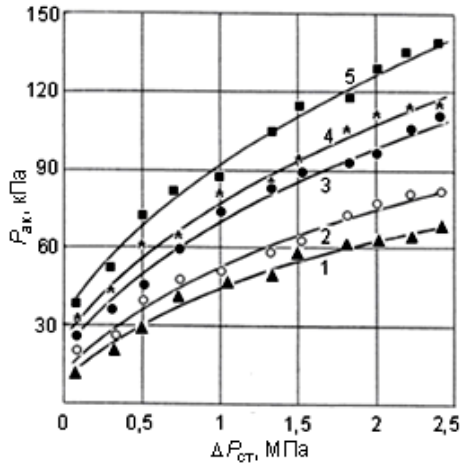


Рис. 7. Зависимость уровня акустического сигнала жидкоструйных преобразователей от избыточного статического давления: 1 – $s/r_c = 3,5/8,0$; 2 – $s/r_c = 4/10$; 3 – $s/r_c = 5/13$; 4 – $s/r_c = 6/13$; 5 – $s/r_c = 8/13$

Видно, что в рассматриваемом интервале морских глубин (0,5 м...240 м) наблюдается значительное повышение уровня звукового давления (примерно в 5 раз). При этом с увеличением площади поверхности F колеблющейся струйной пластинки для фиксированного значения $\Delta P_{ст}$ также регистрируется существенное повышение уровня акустического сигнала. Так, например, если для преобразователя с параметром $s/r_c = 3,5/8,0$ ($F = 214 \text{ мм}^2$) при значении $\Delta P_{ст} = 2,4 \text{ МПа}$ величина звукового давления составляет $P_{ак} = 46 \text{ кПа}$, то для излучателя с типоразмером $s/r_c = 8/13$ ($F = 854 \text{ мм}^2$) при том же значении $\Delta P_{ст}$ уровень сигнала возрастает уже до $P_{ак} = 173,5 \text{ кПа}$.

5. Выводы и перспективы дальнейших работ

Для жидкоструйного преобразователя со ступенчатым препятствием и круговым щелевым соплом в виде соосных дисков предложена модель на основе автоколебаний затопленной

плоской осесимметричной струи. Получена аналитическая зависимость частоты основной гармоники акустического сигнала от геометрических параметров преобразователя и физических характеристик рабочей жидкости, в том числе, зависимость от избыточного статического давления. Предложен критерий соответствия разработанной модели и расчетных соотношений для рассмотренного типа гидродинамических излучателей. Для формулы расчета частоты основной гармоники генерируемого сигнала получено не только качественное, но и количественное согласование между теоретическими и экспериментальными данными в широком диапазоне гидростатических давлений. Экспериментально доказано, что модифицированные жидкоструйные преобразователи способны эффективно работать в широком интервале морских глубин. Установлено, что для достижения максимального уровня акустического сигнала на заданной глубине погружения необходимо выбрать соответствующую этой глубине скорость истечения жидкости из сопла излучателя.

Экспериментальное исследование ближнего поля модифицированного преобразователя показало, что он является ненаправленным источником звука нулевого порядка (монополем), создающим сферически расходящиеся волны в неограниченной водной среде. Поэтому, с целью увеличения дальности действия связи между подводными объектами, представляет интерес обеспечить пространственную избирательность излучения жидкоструйным преобразователем низкочастотного акустического сигнала, а также повысить уровень генерируемого сигнала в заданном направлении.

В настоящее время разработана гидроакустическая излучающая рупорная антенна, в которой в качестве источника низкочастотных звуковых волн используется прямоточный жидкоструйный преобразователь, а в качестве рупора служит катеноидальный рупор [25]. При достижении оптимального режима работы преобразователя в цилиндрической предрупорной камере антенны генерируются сферически расходящиеся звуковые волны. Однако геометрия камеры и расположение преобразователя на расстоянии, равном четверти длины волны основной гармоники звукового сигнала от фланца камеры, позволяет сформировать в осевом направлении рупорной антенны мощную плоскую волну. Эксперименты продемонстрировали высокую эффективность рупорной антенны. Продольный резонанс, возникающий в предрупорной камере на частоте первой гармоники, спо-

способствует повышению в несколько раз уровня звукового сигнала в горле антенны. В результате рупорная антенна, по сравнению с работой преобразователя в свободной среде, обеспечивает значительное повышение выходной мощности акустического сигнала и формирование характеристики направленности сигнала в заданном направлении. На основе разработанной антенны предложен новый способ передачи информации в гидроакустический канал связи. Причем передача дискретной информации в условиях частотно-импульсной модуляции способствует повышению помехоустойчивости связи между подводными объектами [12]. Все это, за счет использования низких частот, обеспечивает увеличение дальности действия передающей гидроакустической аппаратуры.

Модифицированные жидкоструйные преобразователи также перспективно использовать при конструировании заборных устройств, в частности, в качестве основных элементов низкочастотных гидроакустических излучающих антенн.

Литература

1. Митько В.Б. Гидроакустические средства связи и наблюдения / В.Б. Митько, А.П. Евтютов, С.Е. Гуцин. – Л.: Судостроение, 1982. – 200 с.
2. 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.
3. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П. Голяминой и др. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
4. Wallen A. E. An acoustic projector pressure relief equalization system – APPRES / A. E. Wallen, P. L. Whitthead // *Western Electronic Engineer*. – 1972. – Т. 16, № 3. – Р. 17 – 21.
5. Сухарьков О.В. Оптимизация параметров прямооточного гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления / О.В. Сухарьков // *Акустичний вісник*. – 2008. – Т. 11, № 4. – С. 54 – 63.
6. Сухарьков О.В. Жидкоструйный излучатель со ступенчатым препятствием и круговым щелевым соплом в виде соосных дисков / О.В. Сухарьков // *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. – 2010. – № 1. – С. 102 – 108.
7. Dudzinski Yu.M. Axial-symmetric hydrodynamic radiators used for fluid cavitation threshold measurement / Yu.M. Dudzinski, O.V. Suharkov, N.V. Manicheva // *The IVth International Hutsulian Workshop on Mathematical Theories and their Application in Physics and Technology*, 28 October — 02 November 2002: The materials of Workshop. – Austria: Timpani, 2004. – P. 275 – 284.
8. Дудзінський Ю.М. Модель прямооточного гідродинамічного випромінювача з кільцевим соплом і східчастою перешкодою / Ю.М. Дудзінський, О.В. Сухарьков, Н.В. Манічева // *Акустичний вісник*. – 2004. – Т. 7, № 3. – С. 49 – 54.
9. Сухарьков О.В. Влияние гидростатического давления на энергетические характеристики прямооточного гидродинамического излучателя // *Наук. праці ОНАЗ ім. О. Попова*. – 2009. – №1. – С. 70 – 77.
10. Сухарьков О.В. Энергетические характеристики затопленной кольцевой струйной пластинки при наличии развитой кавитации / О.В. Сухарьков // *Акустичний вісник*. – 2010. – Т. 13, № 2. – С. 45 – 52.
11. Сухарьков О.В. Амплитудно-частотные характеристики прямооточных жидкоструйных преобразователей / О.В. Сухарьков // *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. – 2011. – № 1. – С. 95 – 101.
12. Сухарьков О.В. Передача дискретной информации в гидроакустический канал связи с использованием жидкоструйных преобразователей / О.В. Сухарьков // *Цифрові технології*. – 2011. – № 9. – С. 100 – 110.
13. Сухарьков О.В. Модель жидкоструйного излучателя с круговым щелевым соплом в виде соосных дисков / О.В. Сухарьков // *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. – 2011. – № 2. – С. 107–113.
14. 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. – Т. 11, № 2. – С. 16 – 23.
15. Перцев А.К. Динамика оболочек и пластин / А.К. Перцев, Э.Г. Платонов. – Л.: “Судостроение”, 1987. – 400 с.
16. Янке Е. Специальные функции (Формулы, графики, таблицы) / Е. Янке, Ф. Эмде, Ф. Лёш. – М.: Наука, 1964. – 344 с.
17. Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей / М. Корнфельд. – М.: ГТТИ, 1951. – 200 с.
18. Зарембо Л.К. Введение в нелинейную акустику / Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. – М.: Наука, 1966. – 520 с.
19. Дащенко А.Ф. Собственные колебания струйной оболочки в условиях гидростатического давления / А.Ф. Дащенко,

- Ю.М. Дудзинский // Прикладная механика. – 2004. – Т. 40, № 12. – С. 92 – 98.
20. Колесников А.Е. Акустические измерения / А.Е. Колесников. – Л.: Судостроение, 1983. – 255 с.
21. Сухарьков О.В. Экспериментальное исследование акустического поля прямого гидродинамического излучателя / О.В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2007. – №1. – С. 39 – 44.
22. Дудзинский Ю.М. Ближнее поле осесимметричного гидродинамического излучателя / Ю.М. Дудзинский // Акустичний вісник. – 2004. – Т. 7, № 4. – С. 48 – 51.
23. Бореймагорская Л.А. Особенности оценки работы гидродинамических излучателей в ограниченных средах / Л.А. Бореймагорская, В.Г. Воронюк, А.Ф. Назаренко // Акустика и ультразвуковая техника. – 1978. – № 13. – С. 24 – 27.
24. Назаренко А.Ф. Об одном механизме гидродинамического звукообразования / А.Ф. Назаренко // Акустический журнал. – 1978. – Т. 24, №4. – С. 573 – 576.
25. Сухарьков О.В. Гидроакустическая излучающая рупорная антенна на основе жидкоструйного преобразователя / О.В. Сухарьков // Акустичний вісник. – 2011. – Т. 14, № 1. – С. 56 – 63.