

УДК 534.232

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ШИРОКОПОЛОСНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ИЗБЫТОЧНЫХ СТАТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ

Ю. М. ДУДЗИНСКИЙ\* Н. В. МАНИЧЕВА\*, О. А. НАЗАРЕНКО\*\*

\* Одесский государственный политехнический университет

\*\* Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова

Получено 10.12.2000

Рассмотрены особенности работы осесимметричных гидродинамических излучающих систем в условиях гидростатического давления. Оптимизированы геометрические и гидродинамические параметры излучателя в зависимости от глубины погружения. Данный тип преобразователя можно использовать как мощный широкополосный акустический источник для глубоководных морских исследований.

Розглянуті особливості роботи осесиметричних гідродинамічних випромінювальних систем в умовах гідростатичного тиску. Оптимізовані геометричні та гідродинамічні параметри випромінювача в залежності від глибини занурення. Даний тип перетворювача можна використовувати як потужне акустичне джерело з широкою частотною смугою для потреб глибоководних морських досліджень.

Operation features of the axial-symmetric radial systems under the hydrostatic pressure conditions are presented. Geometric and hydrodynamic parameters of the sound radiator are optimized depending on the submersion depth. This type of transducers can be used as a broad-band powerfull acoustic source for the deep-sea researches.

### ВВЕДЕНИЕ

Гидроакустические методы и средства находят широкое применение при решении различных задач океанографии, морских сейсмических исследований, морской геологии пр. В задачах первого типа (определение рельефа и структуры морского дна, исследование подводных звуковых каналов, измерение акустических характеристик водной среды, ледовых покрытий, скорости течений и т.д.) возможно применение магнитострикционных и пьезоэлектрических преобразователей, работающих на относительно высоких частотах (до 100 кГц). В задачах двух других типов (изучение строения Земли, поиск нефтяных и газовых месторождений или минеральных ресурсов, обеспечение подводных буровых работ, функционирование подводной аппаратуры промыслов и т.п.) акустический сигнал излучается и распространяется в воде, отражается или преломляется на границах илистых слоев дна и нижележащих твердых пород, а затем возвращается к приемникам звука. Экспериментальные и теоретические исследования показывают, что во всех представляющих практический интерес случаях скорость звука в осадках не зависит от частоты. Поглощение же меняется с частотой [1]: большинство измерений указывает на почти линейный его рост с увеличением частоты. Поэтому при исследовании илистых отложений толщиной в несколько сотен метров применя-

ются акустические сигналы с частотами от 300 Гц до 5 кГц. Исследования месторождений нефти и газа требуют проникновения сигнала в грунт на несколько тысяч метров, а необходимые для решения таких задач частоты лежат в интервале от 5 до 200 Гц.

Еще одна акустическая задача связана с исследованием газосодержания донных отложений на мелководье (вплоть до 70 м). С одной стороны, это связано с поиском газогидратов и проблемой добычи из них энергоносителей. С другой – необходима оценка геологической опасности присутствия газа для сооружений и установок, находящихся в открытом море. Это связано с миграцией пузырьков газа в илистых отложениях, что может привести к образованию пустот и выделению со дна газа в виде каверн.

Так как резонансные частоты пузырьков и крупных полостей газа имеют широкий диапазон значений, то к акустическим излучателям предъявляется также требование широкополосности (2÷3 октавы). Кроме того, для решения некоторых актуальных вопросов необходимы большая разрешающая способность и трехмерные исследования. Увеличение частоты приводит к лучшему разрешению, но из-за роста поглощения акустических волн в донных отложениях уменьшается глубина проникновения сигнала в грунт. Поэтому при исследовании тонкой структуры слоев дна длина волн обычно задана и проблема состоит в повы-

Таблица. Рабочие параметры подводных излучателей звука

Тип источника	Принцип действия	Источник энергии	Накопленная энергия, кДж	Диапазон частот, Гц	Лит.
Взрывной источник	Сжатие	Динамит (1 г)	4	1 ÷ 1000	[2]
Пневмопушка	Сжатие	Сжатый воздух	4 ÷ 1000	5 ÷ 300	[3]
Водяная пушка	Кавитация	Сжатый воздух	~ 20	10 ÷ 300	[5]
Флексичок	Кавитация	Сжатое масло	~ 20	10 ÷ 300	[4]
Газовый эксплодер	Сжатие	Газ (пропан)	40 ÷ 300	20 ÷ 300	[2]
Спаркер	Сжатие	Электрический заряд	1 ÷ 100	20 ÷ 5000	[2, 6]
Бумер	Сжатие	Электрический заряд	~ 1	500 ÷ 10000	[2, 6]

шении мощности акустических излучателей при ограничении их массы и габаритов. Следовательно, для морских исследований необходимы мощные, надежные, простые в эксплуатации низкочастотные источники звука, способные работать на глубине, т. е. в условиях избыточного статического давления.

## 1. ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВУКА НА ГЛУБИНЕ

Наиболее эффективными источниками с точки зрения мощности и ширины спектра излучаемых сигналов до сих пор являлись взрывы. Разработка взрывных источников была направлена на совершенствование безопасности, повышение эффективности путем использования больших или меньших зарядов и специальные применения цепочек динамитных зарядов в мелком море. Однако трудности с обеспечением и обслуживанием подобных мероприятий привели к поиску новых, более удобных источников упругих волн. Целью поисков было создание мощных низкочастотных источников, потребляющих в процессе работы вещества, всегда имеющиеся на судне, либо находящиеся в непосредственной близости от него (дизельное топливо, пропан, воздух, вода).

Для генерации импульсных сигналов используется либо сжатие, либо кавитация в воде (см. таблицу). Для менее глубокого проникновения акустических сигналов в грунт и получения большего разрешения используются антенны с искровыми разрядниками (спаркеры), питающиеся от батарей конденсаторов, накапливающих до 100 кДж энергии. При этом интервал следования импульсов составляет несколько секунд. Общие недостатки указанных акустических излучающих систем – неповторяемость спектра следующих друг за другом импульсов, а также примерно равномерное распределение энергии по всему спектру (розовый шум). Это неприемлемо для задач, использующих

мощные гармонические сигналы или узкую полосу рабочих частот.

Электроакустические излучатели магнито-стрикционного и пьезоэлектрического типа весьма эффективны лишь на высоких частотах (свыше 20 кГц). На низких частотах (5 ÷ 6 кГц) они обладают малым КПД, а из-за больших габаритов и массы их использование на частотах менее 1 кГц нецелесообразно. Кроме того, для таких излучателей характерна резонансная амплитудно-частотная характеристика, а увеличение полосы рабочих частот приводит к значительному уменьшению интенсивности звука. Вместе с тем, антенные решетки, набранные из электроакустических преобразователей, благодаря малой длине волны и узкой диаграмме направленности, обладают высокой разрешающей способностью. Этим обусловлено успешное применение устройств данного типа в морской археологии, где глубина проникновения сигнала в грунт ограничена 10 ÷ 20 м.

Параметрические излучатели, использующие нелинейное взаимодействие первичных волн накачки в воде, обладают сверхразрешением и широкополосностью: нижний диапазон вторичных волн у них составляет порядка 100 Гц. Однако низкий КПД (3 ÷ 5 %) в морской воде существенно снижает глубину проникновения акустических импульсов в грунт.

Отдельный тип преобразователей составляют осесимметричные гидродинамические излучающие системы (ГДИ), в которых для генерирования акустических волн используется явление кавитации [7]. Существенное отличие их от всех перечисленных устройств заключается в синфазном схлопывании каверн, что позволяет получить тональные акустические сигналы, спектры которых содержат ряд дискретных гармоник. При этом могут создаваться акустические поля высокой интенсивности с частотами по основной гармонике

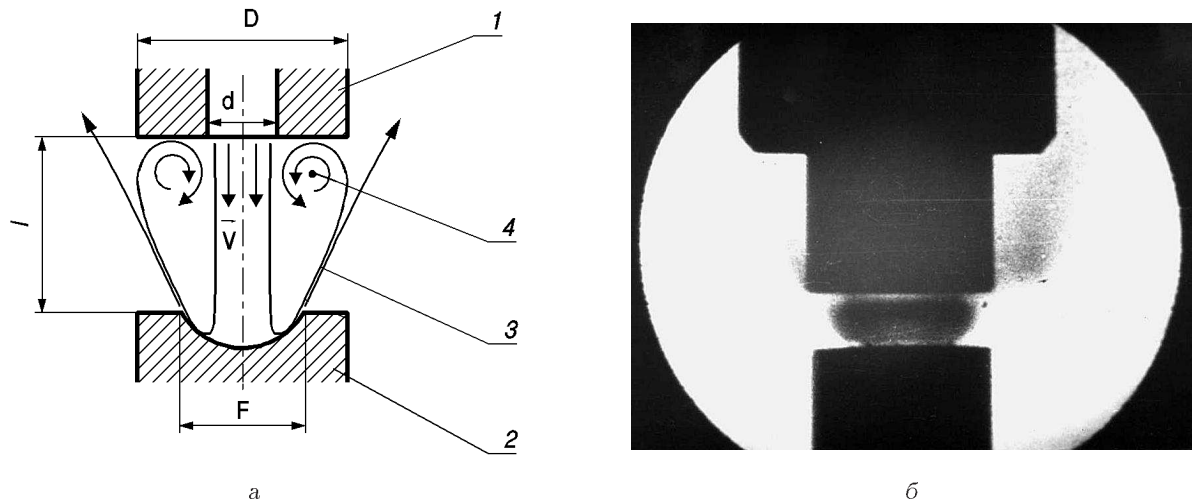


Рис. 1. Осесимметричный гидродинамический излучатель:  
а – модель, б – теньевая фотография тороидальной кавитационной области

от 300 Гц до 1 кГц, в зависимости от геометрических и гидродинамических параметров ГДИ. Можно утверждать, что осесимметричные излучатели объединяют в себе полезные свойства традиционных (низкие частоты, большая мощность, простота в эксплуатации) и электроакустических преобразователей (дискретный спектр).

## 2. АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

### 2.1. Механизм звукообразования в осесимметричных излучателях

В осесимметричных ГДИ часть кинетической энергии затопленной струи преобразуется в энергию акустических волн, а рабочая жидкость является одновременно как источником колебаний, так и объектом озвучивания [9]. Основные конструктивные элементы такой излучающей системы – сопло 1 и отражатель 2 с лункой на торце (рис. 1). После натекания на лунку струя разворачивается, формируя осесимметричную струю-оболочку 3, которую можно считать жестко заземленной на торце отражателя и свободно опирающейся на торец сопла. При натекании на наружную кромку сопла наблюдается раздвоение струи-оболочки: часть потока жидкости уходит в окружающее пространство, а часть за счет эффекта Бернулли отклоняется к оси, образуя вихрь 4, имеющий тороидальную форму. Внутри вихря со-

здается развитая кавитационная область. По мере увеличения концентрации кавитационных пузырьков в зоне 4 растет давление, деформирующее свободный край упругой струи-оболочки. В результате содержимое кавитационной области периодически выбрасывается наружу, а синфазное схлопывание кавитационных пузырьков порождает тональные акустические волны высокой интенсивности. При этом “упругая” жидкостная оболочка выполняет роль модулятора, задающего тон основной гармонике звука. В качестве рабочей жидкости может быть использована, например, забортная вода, а в качестве нагнетающей системы – насос, обеспечивающий необходимые для работы расход и скорость истечения жидкости.

Отметим, что наряду с неоспоримыми преимуществами (отсутствие у осесимметричных излучателей жестких вибрирующих элементов, надежность и долговечность конструкции, простота в эксплуатации, возможность работы в агрессивных жидких средах, высокая интенсивность звука) этому типу преобразователей свойственны и недостатки. Изменять в широком диапазоне частоту основного тона акустических колебаний можно лишь за счет замены пары сопло-отражатель, что не всегда допустимо в конкретных задачах. Верхний предел частоты ограничен диаметром проходного отверстия сопла и, соответственно, габаритами остальных элементов излучающей системы. Уровень акустического сигнала при чрезмерно малых диаметрах существенно снижается. Кроме того, при значениях

$d \leq 1$  мм увеличивается гидравлическое сопротивление, уменьшается КПД системы и возможно засорение сопла, в результате чего происходит срыв тонального сигнала. В достаточно узком диапазоне значений ( $\pm 10\%$ ) частоту основного тона звука можно регулировать путем изменения скорости струи, однако при этом существенно уменьшается уровень акустического сигнала.

В морских исследованиях приходится использовать акустическую аппаратуру на различных глубинах, т.е. в условиях избыточного статического давления. В работе [8] теоретически и экспериментально доказана принципиальная возможность генерирования осесимметричными ГДИ акустических волн при наличии гидростатического давления. Выявлен ряд преимуществ работы таких излучателей при избыточных давлениях.

Во-первых, есть возможность плавно регулировать в широком диапазоне частоту основного тона генерируемых колебаний:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_0^4 h^2 r^2 + 12}{12\rho r^2}} E, \quad (1)$$

где  $r \approx D/2$  и  $h$  – среднее значение радиуса и толщина струи-оболочки соответственно (см. рис. 1);  $K_0$  – корень соответствующего трансцендентного уравнения [10];  $\rho$  – плотность жидкости;  $E(\Delta P_{ст})$  – “модуль упругости” струи-оболочки, являющийся функцией избыточного статического давления  $\Delta P_{ст}$  [8]. В диапазоне  $\Delta P_{ст} = 0 \div 2.4$  МПа можно плавно (без замены сопла и отражателя) регулировать частоту основной гармоники в интервале  $f_0 = 0.95 \div 7.8$  кГц. При этом для достижения максимального уровня звука необходимо подбирать оптимальную скорость истечения жидкости из сопла  $v$  для конкретных значений  $\Delta P_{ст}$  и вязкости жидкости [8]. Во-вторых, можно увеличить уровень акустического сигнала, что весьма существенно в случае высокого коэффициента поглощения упругих волн в среде. В-третьих, подбором параметров ГДИ и соответствующего значения избыточного статического давления можно существенно (в 1.5 раза) увеличить КПД излучающей системы [11]. В связи с этим представляет интерес оптимизация геометрических и гидродинамических параметров осесимметричной излучающей системы в условиях избыточного статического давления.

## 2.2. Особенности работы осесимметричных излучателей при избыточных статических давлениях

В работе [12] были оптимизированы наружный диаметр сопла  $D$ , расстояние между соплом и отражателем  $l$ , диаметр  $F$  и форма лунки на торце отражателя, скорость струи на выходе сопла при атмосферном давлении ( $\Delta P_{ст} = 0$ ). Согласно приведенным результатам вначале с ростом  $\Delta P_{ст}$  наблюдалось увеличение уровня акустического давления  $P$  до некоторого максимума, а при дальнейшем возрастании статического давления – уменьшение (скорость струи оставалась фиксированной). Дальнейшие исследования [8, 10, 11] показали, что осесимметричный ГДИ при выборе оптимальной скорости струи на выходе сопла способен эффективно генерировать акустические волны в диапазоне статических давлений  $\Delta P_{ст} = 0 \div 2.4$  МПа. При этом наблюдалось увеличение уровня звука почти на порядок.

Так как в начальный момент схлопывания кавитационного пузырька процесс можно считать практически изотермическим, то, согласно модели Рэлея, мгновенное давление, действующее на твердую стенку, можно выразить формулой [13]:

$$P = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_0 P_\infty \left( \frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right)} = \sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon_0 (P_0 + \Delta P_{ст}) \left( \frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right)}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$  – модуль объемной упругости жидкости;  $P_\infty = (P_0 + \Delta P_{ст})$  – давление в жидкости вдали от кавитационной зоны,  $P_0$  – атмосферное давление;  $\Delta P_{ст}$  – избыточное статическое давление;  $R_0$  и  $R$  – радиусы пузырька в начальный и в данный момент времени. Поскольку изменение объема каверны ( $\sim R_0^3/R^3$ ) пропорционально полному давлению в водной среде  $P_\infty$ , то следует ожидать, что амплитуда ударной волны, генерируемой при схлопывании пузырька, прямо пропорциональна  $P_\infty$  (и, соответственно, избыточному статическому давлению). Однако на последних стадиях сжатия необходимо учитывать сжимаемость жидкости и газосодержание в каверне. В этом случае процесс схлопывания можно считать адиабатическим [14], а степень сжатия кавитационного пузырька, характеризуемая отношением максимального радиуса пузырька  $R_{max}$  к его минимальному значению  $R_{min}$ , тем больше, чем выше  $P_\infty$  – давление в ра-

бочей емкости:

$$\frac{R_{\max}}{R_{\min}} = \left[ \frac{(P_0 + \Delta P_{\text{ст}})(\gamma - 1)}{P_{\Gamma}} \right]^{(\gamma-1)/3}, \quad (3)$$

где  $\gamma = C_p/C_v$  – отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и объеме;  $P_{\Gamma}$  – давление, характеризующее газосодержание в каверне. При этом достигается давление, соответствующее минимальному радиусу пузырька [14]:

$$P = P_{\Gamma} \left[ \frac{(P_0 + \Delta P_{\text{ст}})(\gamma - 1)}{P_{\Gamma}} \right]^{\gamma/(\gamma-1)}. \quad (4)$$

Анализ выражений (2) – (4) показывает, что повышая избыточное давление  $\Delta P_{\text{ст}}$  в рабочей емкости (иначе – глубину погружения излучателя), можно в широком интервале значений увеличивать уровень акустического сигнала, генерируемого осесимметричным ГДИ. Ограничение роста уровня звука и, в дальнейшем, его убывание с увеличением  $\Delta P_{\text{ст}}$ , для осесимметричных [12], магнитострикционных или пьезоэлектрических излучателей [14], объясняется возрастанием числа кавитации

$$\chi = \frac{P_{\infty} - P_{\text{н}}}{P} = \frac{(P_0 + \Delta P_{\text{ст}}) - P_{\text{н}}}{P}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{н}}$  – давление насыщенного пара в кавитационном пузырьке;  $P$  – амплитуда звукового давления (магнитострикционный или пьезоэлектрический излучатель) или понижение давления в центре вихря (ГДИ). Это приводит к уменьшению числа пузырьков в центре тороидального вихря (см. рис. 1, б) и, как следствие, к ограничению уровня звука, хотя при схлопывании одиночного пузырька растет давление микроударной волны, см. формулу (4). В случае осесимметричного ГДИ чрезмерное увеличение избыточного статического давления в окружающей среде приводит к исчезновению кавитации в тороидальной вихревой зоне и срыву процесса звукообразования.

Вместе с тем, согласно литературным источникам [14], при использовании электроакустических излучателей кавитационная эрозия возрастает с увеличением избыточного статического давления до тех пор, пока выполняется условие  $P/\Delta P_{\text{ст}} = 0.4$  (для воды). Иначе говоря, число кавитации  $\chi$  не должно быть больше некоторого критического значения, так как с увеличением статического давления необходимо подводить к излучателю большую мощность. Однако в магнитострикционных материалах существует режим магнитного, а в пьезоэлектрических – электрического на-

сыщения, что ограничивает излучаемую акустическую мощность. Кроме того, при высоких энергиях возбуждения возможно механическое разрушение, прожигание, плавление электроакустических преобразователей. Поэтому приходится ограничивать удельную мощность, увеличивая габариты преобразователей, или применять несколько электроакустических излучателей с идентичными амплитудно-частотными характеристиками, или использовать фокусирующие конструкции и концентраторы [13, 14]. В осесимметричных ГДИ вышеперечисленные ограничения для излучаемой акустической мощности при высоких статических давлениях в окружающей среде отсутствуют.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 3.1. Методика и результаты измерений

Условия погружения осесимметричного излучателя моделировались с помощью регулируемого статического давления. Излучающая система 1 была помещена в герметичную рабочую емкость 2, снабженную иллюминаторами 3 (рис. 2). Поток жидкости из сопла излучателя 1 создавался реверсивным насосом 4 аксиально-поршневого типа с регулируемым расходом. Давление нагнетания фиксировалось образцовым манометром 5. С помощью устройства 6 в рабочей емкости 2 создавалось избыточное статическое давление, измеряемое с помощью образцового манометра 7. Схема была построена таким образом, что в емкости 2, на входе и выходе насоса 4 создавалось одинаковое давление  $\Delta P_{\text{ст}}$ , поддерживалось постоянное газосодержание во всем объеме рабочей жидкости, т.е. при заданном статическом давлении число кавитации (5) зависело только от  $v$  – скорости струи на выходе сопла осесимметричного ГДИ (см. рис. 1). В качестве устройства 6 можно использовать, например, дополнительный насос, регулируемый игольчатый клапан и вспомогательную емкость с рабочей жидкостью [11]. Для этих же целей можно использовать сжатый газ, редуктор давления и эластичную мембрану, установленную внутри рабочей емкости [10]. Визуальное наблюдение работы осесимметричной излучающей системы 1, фото- и киносъемка проводились через иллюминаторы 3. Полученная при этом типичная фотография тороидальной кавитационной зоны представлена на рис. 1, б. Акустическое давление фиксировалось гидрофоном 8, сигнал с которого через герметичный разъем 9 поступал на спектроанализатор 10, электронный вольтметр 11

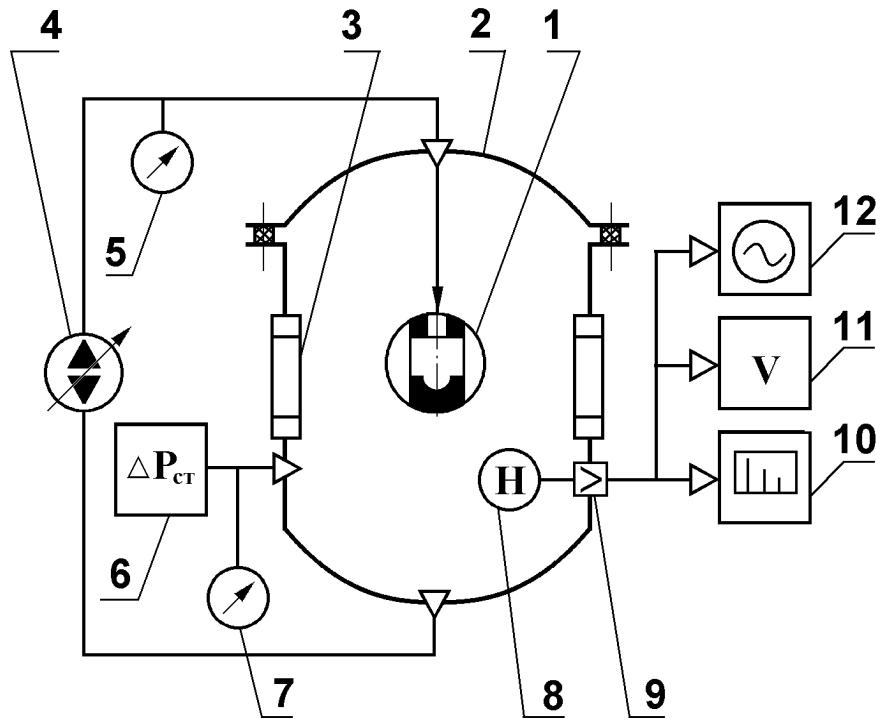


Рис. 2. Функциональная схема эксперимента

и осциллограф 12.

В соответствии с выполненным выше анализом, одновременно с увеличением избыточного статического давления необходимо повышать скорость струи  $v$  на выходе сопла, т.е. подводить большую кинетическую энергию, поддерживая приблизительно постоянными число кавитации и концентрацию каверн в торoidalном вихре. Как указывалось выше, высокая интенсивность акустического сигнала достигается при натекании струи-оболочки на наружную кромку сопла.

Торoidalная кавитационная область представляет собой пористое тело, которое при наличии избыточного давления может сжиматься. Это, в свою очередь, приводит к деформации свободного края струи-оболочки в направлении оси сопла-отражатель. Поэтому при использовании осесимметричного ГДИ на глубине необходимо оптимизировать отношение наружного диаметра сопла  $D$  к диаметру его проходного отверстия  $d$  (см. рис. 1, а).

В экспериментах параметр  $D/d$  находился в диапазоне  $1.8 \div 4.6$  ( $d=3.5$  мм и  $D=[6.6; 9.0; 11.2; 12.0; 13.5; 16.0]$  мм соответственно). При этом излучающая система

настраивалась на максимальное звучание за счет соответствующего выбора скорости струи. Зависимость оптимальной скорости струи от избыточного статического давления представлена семейством кривых на рис. 3. Видно, что функции  $v_{\text{опт}}(\Delta P_{\text{ст}})$  для разных  $D/d$  существенно различаются в области небольших значений статических давлений, но практически одинаковы, начиная с  $\Delta P_{\text{ст}}=1.5$  МПа.

Зависимости акустического давления от избыточного статического  $P(\Delta P_{\text{ст}})$  для разных наружных диаметров  $D$  и постоянного внутреннего диаметра  $d$  сопел представлены на рис. 4. Для отношений  $D/d=3.4$  (кривая 3) и  $D/d=3.2$  (кривая 4) с увеличением  $\Delta P_{\text{ст}}$  от 0 до 2.4 МПа уровень звука монотонно растет. Существенно иной характер имеют зависимости для больших соотношений диаметров сопла. Если для  $D/d=3.85$  (кривая 2) наблюдается вначале рост, а затем спад звукового давления (максимум при  $\Delta P_{\text{ст}}=1$  МПа), то для отношения диаметров  $D/d=4.57$  (кривая 1) характерен незначительный монотонный спад уровня сигнала с ростом статического давления. При уменьшении же  $D/d$  до 2.57 и далее, до 1.89 (кривые 5 и 6, рис. 4), наблюдается быстрый рост звуково-

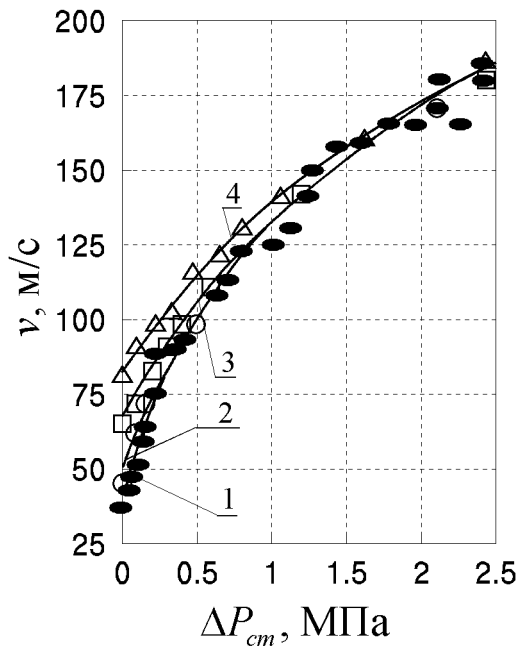


Рис. 3. Зависимость оптимальной скорости струи от статического давления при соотношении диаметров сопла:  
 1 -  $D/d = 3.4$ ; 3.86, 2 -  $D/d = 3.2$ ,  
 3 -  $D/d = 2.57$ , 4 -  $D/d = 1.89$

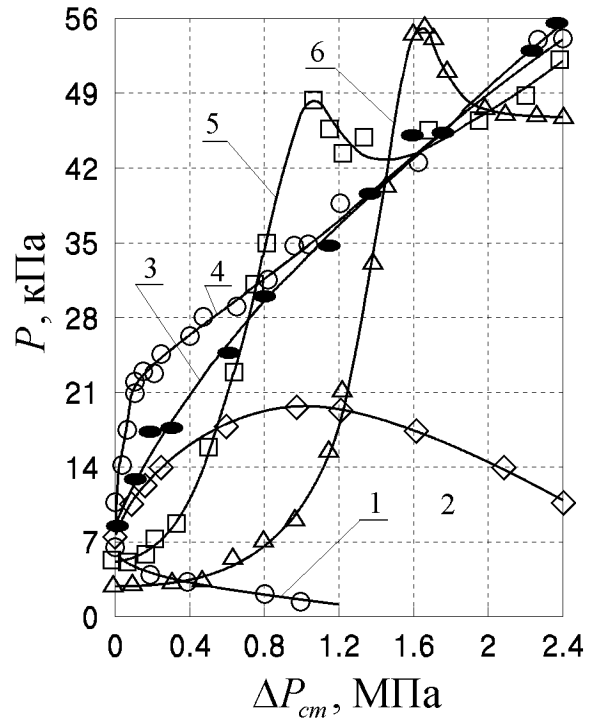


Рис. 4. Зависимость уровня акустического сигнала от статического давления при соотношении диаметров сопла:  
 1 -  $D/d = 4.57$ , 2 -  $D/d = 3.86$ , 3 -  $D/d = 3.4$ ,  
 4 -  $D/d = 3.2$ , 5 -  $D/d = 2.57$ , 6 -  $D/d = 1.89$

го давления, а зависимости  $P(\Delta P_{ст})$  приобретают экстремальный характер.

Полученные экспериментальные результаты удобно представить в виде зависимостей  $P(D/d)$  при фиксированных статических давлениях в рабочей емкости (рис. 5). Отметим, что каждая из кривых характеризуется наличием экстремума. С ростом  $D/d$  уровень акустического сигнала вначале возрастает до некоторого максимума, а затем убывает. Для  $D/d \approx 1.75$  уровень звукового давления для всех исследованных режимов ( $\Delta P_{ст} = 0 \div 1.6$  МПа) примерно одинаков. При этом установлено, что положение максимумов зависимостей  $P(D/d)$  при увеличении избыточного статического давления смещаются в сторону уменьшения параметра  $D/d$ . Следовательно, при использовании осесимметричного ГДИ на определенной глубине для генерирования максимального акустического сигнала необходимо выбрать оптимальное значение соотношения наружного и внутреннего диаметров сопла.

Зависимость оптимального геометрического параметра  $(D/d)_{опт}$  от статического давления представлена на рис. 6. Ее анализ показал, что при избыточных давлениях  $\Delta P_{ст} > 2.0$  МПа  $(D/d)_{опт} \rightarrow 1.57$ .

### 3.2. Анализ результатов измерений

Как видно из вышеизложенного, работа осесимметричных излучающих систем на глубине имеет ряд особенностей. В частности:

- 1) с возрастанием статического давления необходимо увеличивать скорость струи на выходе сопла во избежание срыва генерирования акустического сигнала;
- 2) во-вторых, для достижения максимального уровня звука на заданной глубине погружения излучателя необходимо выбрать оптимальные значения соотношения наружного и внутреннего диаметров сопла и скорости струи жидкости.

Вместе с тем, изменение статического давления в рабочей емкости позволяет целенаправленно изменять амплитудно-частотные характеристики осесимметричного излучателя. Во-первых, возможно плавно (без замены сопла и отражателя) менять частоту основного тона акустического сигнала в широком диапазоне значений. Во-вторых, одновременно варьируя избыточное статическое давление и скорость струи на выходе сопла, можно

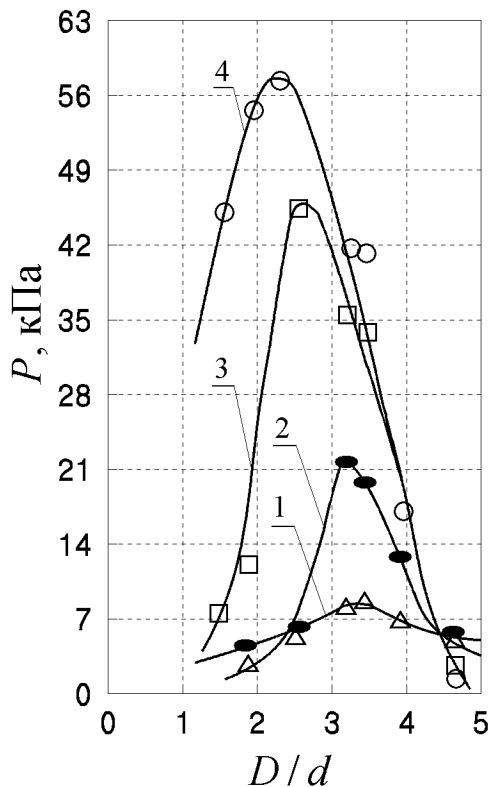


Рис. 5. Зависимость уровня акустического сигнала от соотношения наружного диаметра  $D$  к диаметру выходного отверстия  $d$  при статическом давлении:

1 -  $\Delta P_{ст} = 0$ , 2 -  $\Delta P_{ст} = 0.12$  МПа,  
3 -  $\Delta P_{ст} = 1.04$  МПа, 4 -  $\Delta P_{ст} = 1.6$  МПа

добиться необходимого уровня звука. При этом в качестве рабочей жидкости, питающей излучатель, можно использовать забортную воду или минеральное масло с малой вязкостью (например, трансформаторное). Во втором случае осесимметричную излучающую систему помещают в герметичную емкость, снабженную звукопрозрачными окнами и устройством регулировки избыточного статического давления. При этом рабочая емкость, насос, трубопроводы образуют замкнутый контур, по которому циркулирует рабочая жидкость.

Проведенные исследования по оптимизации геометрических и гидродинамических параметров осесимметричных ГДИ показали, что конструировать единый универсальный источник акустических волн нецелесообразно. В зависимости от условий морских исследований, можно дать следующие рекомендации по выбору параметров излучателя.

1. При исследовании донных отложений с высоким коэффициентом затухания звуковых волн

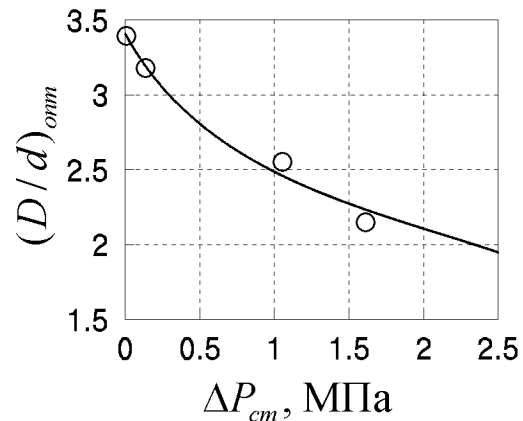


Рис. 6. Зависимость оптимального соотношения диаметров сопла от статического давления

или в задачах, связанных с проникновением акустического сигнала на большие глубины, необходимо добиться определенного уровня звукового давления  $P$ . В этом случае следует поместить осесимметричную излучающую систему в герметичную емкость со звукопрозрачными окнами, в которой создается необходимое статическое давление  $\Delta P_{ст}$  (см. рис. 4, 5), выбрать оптимальное отношение диаметров сопла  $(D/d)_{opt}$  (см. рис. 6) и обеспечить с помощью насоса необходимое значение скорости  $v_{opt}$  струи на выходе сопла (см. рис. 3).

2. Для гидроакустической аппаратуры, использующей широкую полосу плавно изменяемых рабочих частот, целесообразно выбрать соотношение диаметров сопла  $D/d = 3.4$ . Регулировка частоты основного тона генерируемых колебаний  $\omega_0$  (1) осуществляется путем плавного изменения избыточного статического давления  $\Delta P_{ст}$  в герметичной рабочей емкости со звукопрозрачными окнами, в которую помещен осесимметричный ГДИ. При этом максимальному уровню звука  $P$  соответствует оптимальное значение скорости струи на выходе сопла  $v_{opt}$  (рис. 3).
3. В некоторых задачах океанографических исследований акустические преобразователи используются в широком диапазоне глубин погружения ( $\Delta P_{ст}$ ). В этом случае следует выбрать отношение наружного и внутреннего диаметров сопла из интервала значений  $D/d = 3.2 \div 3.4$  и регулировать уровень акустического сигнала  $P(v)$  за счет изменения скорости струи жидкости на выходе сопла.



## 4. ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что оптимизация уровня акустического сигнала  $P(\Delta P_{ст}; v; D/d)$ , генерируемого осесимметричной излучающей системой, представляет собой многопараметрическую задачу, зависящую от глубины погружения излучателя, скорости струи на выходе сопла, геометрических параметров рабочих элементов, газосодержания рабочей жидкости и, по всей вероятности, других параметров, не рассматриваемых в данной работе. При этом осесимметричные гидродинамические излучатели способны эффективно работать на глубине и могут применяться в гидроакустической аппаратуре в качестве мощных широкополосных источников звука. При решении же конкретной задачи морских исследований основным будет один из параметров акустического преобразователя (частотный диапазон, глубина погружения, уровень звукового давления и пр.), а остальные могут быть подобраны по результатам исследований, представленным в разделе 3 настоящей статьи.

1. *McCann C.* Compressional wave attenuation in concentrated clay suspensions // *Acustica*.– **22**.– 1969–1970.– P. 352–356.
2. *Kramer F. S., Peterson R. A., Walter W. C.* Seismic Energy Sources. Handbook.– *Bendix: United Geophysical Corporation*, 1968.
3. *Edelman H. A. K.* Applications of Air Gun Energy Source for Offshore Seismic Work.– *OTC 2513:937*, 1976.
4. *Flexihoc N. N.* A High Resolution Implosion Seismic Source.– *Rueil, France: Brochures from Geomecanique*, 1976.
5. *French W. S., Henson C. G.* Signature Measurements on the Water Gun Marine Seismic Source.– *OTC 3124:631*, 1978.
6. *Flexihoc N. N.* Fundamentals of High Resolution Seismic Profiling.– *Waltham, Mass.: The Environmental Equipment Div. EG&G*, 1977.
7. *Назаренко А. Ф.* Гидродинамические излучатели // *Ультразвук. Маленькая энциклопедия*.– М.: Сов. энцикл., 1977.– С. 79–81.
8. *Дудзинский Ю. М.* Осесимметричные гидродинамические излучатели в условиях статического давления.– *Одесса: Дисс. канд. техн. наук*, 1997.– 170 с.
9. *Дудзинский Ю. М., Назаренко А. А.* Энергетические характеристики вторичной вихревой области осесимметричного гидродинамического излучателя // *Акуст. вісн.*– 2000.– **3**, N 1.– С. 36–41.
10. *Дудзинский Ю. М., Назаренко А. Ф., Попов Г. Я., Тихоненко Л. Я.* Об одной модели гидродинамической излучающей системы // *Акуст. и ультразвук. техн.*– 1989.– Вып. 24.– С. 7–11.
11. *Дудзинский Ю. М., Назаренко А. Ф.* Эффективность работы осесимметричных гидродинамических излучателей в условиях избыточного статического давления // *Акуст. ж.*– 1996.– **42**, N 4.– С. 569–572.
12. *Назаренко А. Ф.* Гидродинамические излучающие системы и проблема интенсификации некоторых технологических процессов.– *Одесса: Дисс. докт. техн. наук*, 1980.– 380 с.
13. *Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф.* Кавитация.– М.: Мир, 1974.– С. 124–130.
14. *Агранат Б. А., Башкиров В. И., Китайгородский Ю. И.* Ультразвуковая очистка // *Физические основы ультразвуковой технологии*.– М.: Наука, 1970.– С. 165–252.