

**ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЯМОТОЧНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ****ВПЛИВ ГІДРОСТАТИЧНОГО ТИСКУ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПРЯМОТОЧНОГО ГІДРОДИНАМІЧНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА****INFLUENCE OF HYDROSTATICAL PRESSURE ON POWER CHARACTERISTICS
OF DIRECT-FLOW HYDRODYNAMIC RADIATOR**

Аннотация. Особенности генерирования акустических волн прямооточным гидродинамическим излучателем с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием рассмотрены в расширенном диапазоне гидростатических давлений. Представлены результаты экспериментального исследования энергетических характеристик излучателей различного типоразмера в зависимости от глубины погружения.

Анотація. Особливості генерації акустичних хвиль прямооточним гідродинамічним випромінювачем з кільцевим соплом та східчастою перешкодою розглянуто в розширеному діапазоні гідростатичного тиску. Представлено результати експериментального дослідження енергетичних характеристик випромінювачів різного типорозміру залежно від глибини занурення.

Summary. The features of generation of acoustic waves of direct-flow hydrodynamic radiator with a circular nozzle and step obstacle in the extended range of hydrostatical pressure are considered. The results of experimental research of power characteristics of radiators of different sizes depending on the depth of immersion are presented.

При решении различных задач подводной связи, гидролокации, морской геологии особое внимание уделяется проблеме увеличения дальности действия генераторов акустических волн [1, 2]. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что гидродинамические излучатели (ГДИ) с пульсирующей кавитационной областью имеют ряд свойств, отвечающих современным требованиям к передающей гидроакустической аппаратуре [3 ... 10]. Ранее были проведены экспериментальные исследования энергетических характеристик противоточных ГДИ в широком диапазоне гидростатических давлений (0,1...2,5) МПа [3 ... 5]. Анализ этих исследований позволил получить для противоточного ГДИ акусто-гидродинамический КПД [3], уточнить координаты зоны звукообразования и определить интенсивность и удельную энергию вблизи вторичной кавитационной области за один период колебаний [4]. Однако для прямооточного ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием исследование энергетических характеристик было проведено в малом диапазоне избыточных статических давлений (0,003...0,2) МПа; при этом исследовался один излучатель определенного типоразмера [7].

Цель данной статьи – исследование влияния избыточного статического давления на энергетические характеристики прямооточных гидродинамических излучателей различного типоразмера в широком диапазоне гидростатических давлений.

1. Модель прямооточного гидродинамического излучателя. Рассмотрим уточненную физическую модель прямооточного ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием (рис. 1,а) [8]. При включении насоса из кругового щелевого сопла 1 с регулируемой скоростью вытекает осесимметричная кольцевая струя 2. За счет эффекта Бернулли в кольцевом пазе ступенчатого препятствия 3 создается, в форме тороида, неустойчивый первичный кавитационный вихрь 4, который является накопителем энергии рассматриваемой акустической системы. Пульсации вихря 4 возбуждают изгибные колебания в затопленной струйной оболочке 2 на ее собственной частоте. Поток с кавернами, вырывающийся периодически наружу, формирует вторичную тороидальную область 5 с развитой кавитацией. Внутри области 5 паровые каверны практически синфазно захлопываются и генерируют тональный звук в окружающей жидкой среде [8]. Таким образом, в рабочей зоне излучателя образуется своеобразная резонансная система, состоящая из внутренней упругой кавитирующей среды, струйной оболочки и присоединенной массы внешней жидкости. Эта система обеспечивает обратную акустическую связь, навязывая автоколебания струйной оболочке и обеспечивая ей стабильную частоту автоколебаний [11]. На рис. 1,б представлена фотография

излучателя на просвет в процессе генерирования интенсивных акустических волн при оптимальном режиме его работы. Видно, что зона звукообразования (зона наибольшей кавитационной активности 5) находится за пределами конструктивных элементов излучателя. Таким образом, сама конструкция ГДИ не подвергается действию кавитационной эрозии.

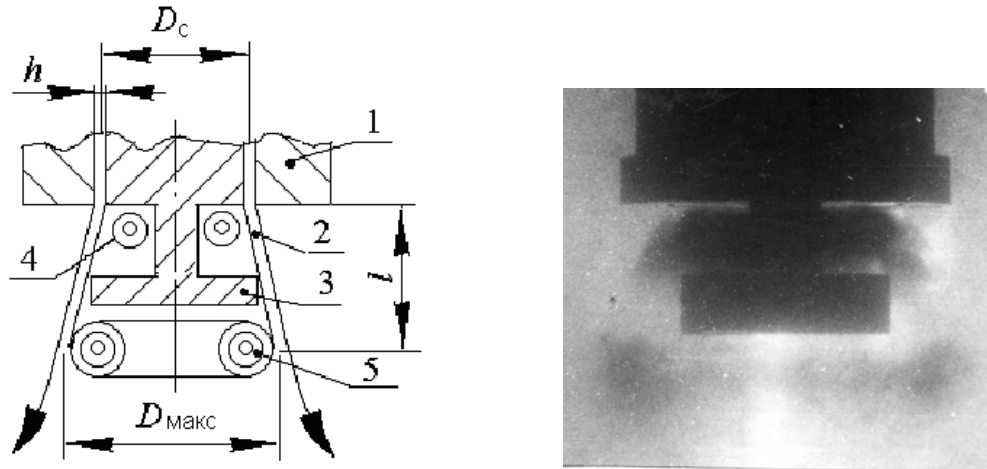


Рисунок 1 – Прямоточный ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием:
 а – физическая модель, б – фотография излучателя на просвет

В качестве геометрических параметров струйной оболочки служат: D_c , $D_{\text{макс}}$, l , h – диаметры оснований, длина и толщина оболочки. В процессе работы ГДИ часть потока струи уходит в окружающую среду и в колебаниях не участвует, поэтому в разработанной модели длину l оболочки можно определить расстоянием от щелевого сопла 1 до центра вторичной кавитационной области 5. Деформация струйной оболочки происходит под действием сил, равномерно распределенных по ее внутренней поверхности. Гидродинамическими параметрами оболочки являются: ρ , Γ , P_* , V – плотность, параметр адиабатической сжимаемости, внутреннее давление (прочность жидкости) и скорость струи на выходе из сопла. Прочность жидкости на разрыв зависит от температуры, газосодержания, степени чистоты жидкости и др. Анализ экспериментальных исследований геометрических параметров ступенчатого препятствия 3 прямоточного излучателя подтвердил предположение о том, что оболочка имеет длину порядка радиуса ($\pi R/l \sim 1$) и угол между ее образующей и осью мал [12]. Это позволило рассматривать динамику колебаний цилиндрической струйной оболочки, жестко заземленной на одном основании и свободной на другом. С помощью теоретического анализа уточненной физической модели [6, 8, 9] получена формула для расчета частоты основной гармонике собственных колебаний, генерируемых прямоточным излучателем:

$$f_0 = \frac{1}{\pi D_{\text{цил}}} \sqrt{\frac{(12 + 0,25k_0^4 h^2 D_{\text{цил}}^2) \cdot [\chi_1 (P_* + \Delta P_{\text{ст}}) + \chi_2 (P_* + \Delta P_{\text{ст}})^2 + \chi_3 (P_* + \Delta P_{\text{ст}})^3]}{36\rho}}, \quad (1)$$

где $k_0 = 1,8751/l$ – параметр оболочки, соответствующий минимальному значению ее собственной частоты; $\Delta P_{\text{ст}}$ – избыточное, по сравнению с атмосферным, статическое давление в окружающей среде; χ_1 , χ_2 , χ_3 , – коэффициенты в модели жидкости Тета [13, 14]. Средний диаметр эквивалентного цилиндра оболочки $D_{\text{цил}} = (D_c + D_{\text{макс}})/2$ можно оценить по фотографиям работающего излучателя (см. рис. 1,б). Отклонение упругих свойств жидкости от закона Гука в первом приближении характеризует коэффициент χ_1 , который практически не изменяется в широком диапазоне температур, но зависит от концентрации включений (микроорганизмы, мелкодисперсные твердые частицы, пузырьки газов и т. д.). Для большинства жидкостей его значение в линейном приближении находится в диапазоне $\chi_1 = 4 \dots 12$. Нелинейные коэффициенты более высокого порядка принимают

значения: $\chi_2 \gg \chi_3 \gg \chi_4 \gg \dots$. В статье [9] показано, что при рассмотрении динамики колебаний струйной оболочки в диапазоне звуковых частот необходимо и достаточно учитывать значения первых трех коэффициентов Тета.

2. Экспериментальный стенд и методика проведения исследований. Условия погружения прямооточного ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием моделировались на лабораторном стенде, схема которого представлена на рис. 2.

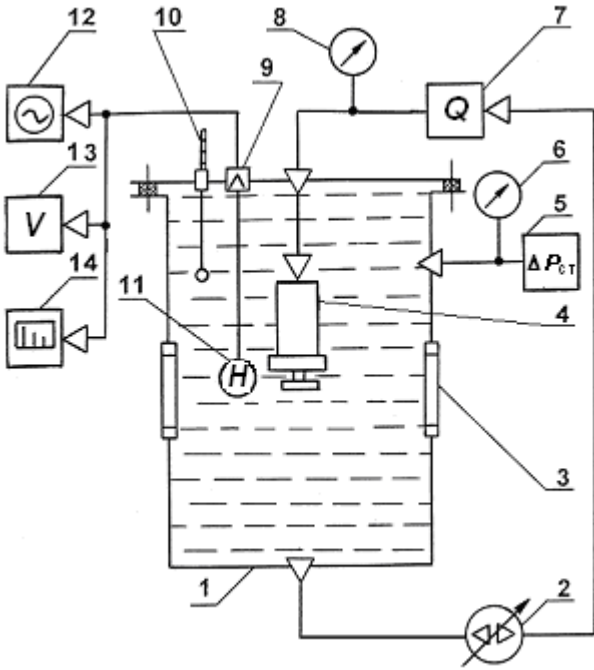


Рисунок 2 – Схема лабораторного стенда

для измерения $\Delta P_{ст}$ служит образцовый манометр 6. В качестве устройства 5 использовались дополнительный насос, регулируемый игольчатый клапан и вспомогательная емкость с рабочей жидкостью [5]. Схема стенда построена таким образом, что в емкости 1, на входе и выходе насоса 2 создавалось одинаковое давление и поддерживалось практически постоянное газосодержание во всем объеме рабочей жидкости. В ходе экспериментов рабочей жидкостью служила водопроводная вода, не подвергнутая специальной обработке [14], которая для установления равновесия газосодержания отстаивалась в течение трех недель. Температура воды поддерживалась в пределах $(19...21)^\circ\text{C}$, что обеспечивало постоянными плотность и вязкость жидкой среды. При этом в формуле (1) для расчета частоты основной гармоник, генерируемых акустических волн, были приняты следующие значения прочности жидкости и коэффициентов Тета:

$$P_* = 0,545 \text{ МПа}; \chi_1 = 7,5; \chi_2 = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}; \chi_3 = 4,7 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-2}.$$

При проведении исследований гидрофон 11 размещался вне турбулентного потока, образуемого отходящей от ГДИ прерывистой затопленной струей, в зоне линейного затухания генерируемого акустического сигнала [10]. Для регистрации и анализа акустических сигналов, поступающих от гидрофона 11, использовались герметичный электрический разъем 9, осциллограф 12, вольтметр 13, анализатор частотного спектра 14, а также комплект переключателей и соединительных проводов. Визуальное наблюдение рабочей зоны гидродинамического излучателя 4 и ее фотосъемка проводились через иллюминаторы 3. Одна из фотографий излучателя на просвет в процессе генерирования им интенсивных звуковых волн представлена на рис. 1,б.

В работе [10] исследовано распределение акустического поля для прямооточного ГДИ в замкнутых емкостях, габариты которых соизмеримы с длиной волны генерируемых колебаний. Экспериментально доказано, что прямооточный ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием является монополем, генерирующим сферически расходящиеся негармонические волны. При этом звуковое давление с удалением от зоны звукообразования убывает обратно

пропорционально расстоянию, как для общего сигнала, так и для первых трех гармоник на расстояниях (10...170) мм. С учетом этого интенсивность генерируемых излучателем акустических колебаний можно вычислить по формуле

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

где $P_{\text{ак}}$ – эффективное значение звукового давления, измеренное калиброванным гидрофоном, c – скорость звука в невозмущенной водной среде.

3. Анализ результатов экспериментальных исследований. Проведенные ранее экспериментальные исследования акустических характеристик прямооточного ГДИ позволили оптимизировать его геометрические и гидродинамические параметры при, близком к атмосферному давлению, гидростатическом давлении $P_{\text{ст}} = (0,103 \dots 0,105)$ МПа [12, 15, 16].

Известно [15], что основным типоразмером прямооточного излучателя служит отношение a/D_c , где a – ширина щели кольцевого сопла, D_c – средний диаметр сопла (рис. 3). В ходе экспериментов исследовались акустические характеристики девяти излучателей, у которых ширина щели сопла a изменялась в интервале (0,3...1,5) мм, а средние диаметры сопла D_c принимали значения от 6,5 до 32 мм. Критерием оптимизации параметров ГДИ служит максимальный уровень акустического сигнала, генерируемого излучателем. В результате исследований для всех излучателей были определены следующие оптимальные геометрические параметры: угол между конической поверхностью обтекателя 1 и цилиндрической поверхностью корпуса 2 излучателя: $\alpha = 13,5^\circ$; отношение высоты цилиндрической части обтекателя 1 к ширине щели кольцевого сопла: $b/a = 3 \dots 5$; отношение высоты малого цилиндра ступенчатого препятствия 4 к среднему диаметру сопла: $h_1/D_c = (0,25 \dots 0,35)$; оптимальное значение глубины паза, в котором происходит локализация первичной кавитационной области, по отношению к среднему диаметру сопла: $(D_c - D_1)/2D_c = 0,35 \dots 0,38$; отношение высоты большого цилиндра ступенчатого препятствия 4 к ширине щели сопла: $h_2/a = 4 \dots 6$; отношение диаметра большого цилиндра препятствия 4 к среднему диаметру сопла: $D_2/D_c = 0,8 \dots 0,9$.

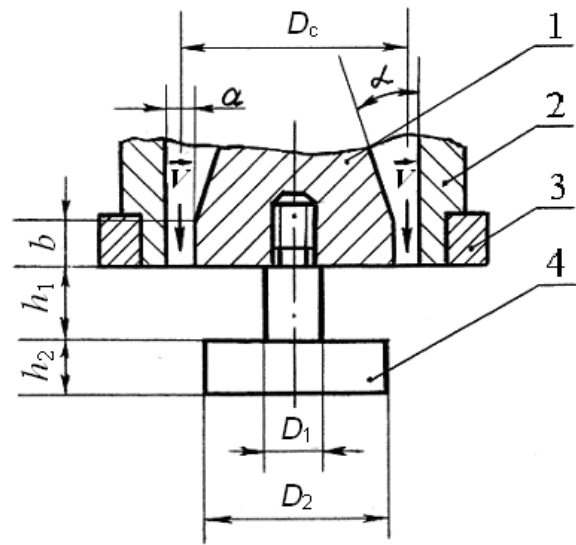


Рисунок 3 – Схема прямооточного ГДИ:
1 – обтекатель, 2 – корпус,
3 – кольцевая насадка,
4 – ступенчатое цилиндрическое препятствие

Также было проверено соответствие разработанной математической модели цилиндрической струйной оболочки частотным характеристикам акустического сигнала, генерируемого прямооточным ГДИ, при неизменном гидростатическом давлении. Для формулы (1) расчета частоты основной гармоники звуковых волн получено как качественное, так и количественное согласование между теоретическими и экспериментальными данными [12, 15, 16].

Обнаружено, что влияние ширины щели кольцевого сопла на амплитудно-частотные характеристики генерируемого ГДИ звукового сигнала незначительно [15]. Поэтому дальнейшие исследования по оптимизации параметров прямооточных ГДИ в расширенном диапазоне избыточных статических давлений $\Delta P_{\text{ст}} = (0,005 \dots 2,4)$ МПа проводились для группы излучателей с различными диаметрами сопла D_c , но с одинаковой шириной щели a .

Эксперименты подтвердили выполненный ранее анализ особенностей работы ГДИ с пульсирующей кавитационной областью [5], согласно которому с возрастанием гидростатического давления необходимо увеличивать кинетическую энергию струи на выходе сопла излучателя. Это обусловлено тем, что повышение скорости струи позволяет поддерживать приблизительно постоянными число кавитации и концентрацию каверн в тороидальном вихре.

Зависимость оптимальной скорости струи $V_{\text{опт}}$ от $\Delta P_{\text{ст}}$ для прямооточных ГДИ различного типоразмера представлена на рис. 4. Видно, что с повышением статического давления оптимальная скорость струи для каждого излучателя определенного типоразмера практически монотонно

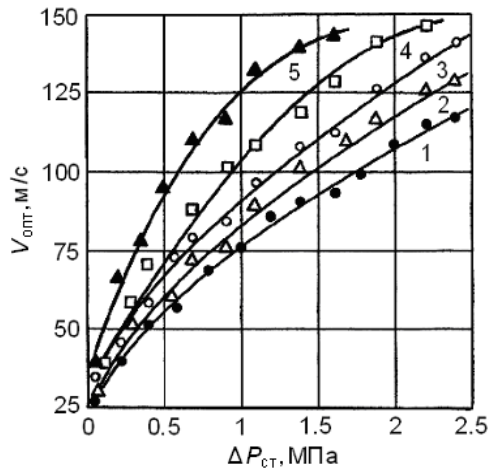


Рисунок 4 – Зависимость оптимальной скорости струи от избыточного статического давления для значений типоразмера излучателя:
 1 – $a/D_c = 0,5/6,5$; 2 – $a/D_c = 0,5/13$; 3 – $a/D_c = 0,5/19,5$;
 4 – $a/D_c = 0,5/26$; 5 – $a/D_c = 0,5/32$

максимумов кривых смещается в направлении возрастания $\Delta P_{ст}$. Полученный результат можно объяснить тем, что максимальный акустический сигнал достигается при натекании струйной оболочки на наружную кромку большого цилиндра препятствия. При повышении избыточного статического давления первичная 4 и вторичная 5 кавитационные области (см. рис. 1), представляющие собой двухфазную систему, сжимаются. Это, в свою очередь, приводит к деформации свободного края оболочки в направлении оси излучателя и, соответственно, к уменьшению геометрического параметра D_2/D_c .

Согласно методике статьи [7], проведено определение геометрии зоны звукообразования прямооточного ГДИ – вторичной кавитационной области 5 (см. рис.1). Вначале по фотографиям работающего в оптимальном режиме излучателя устанавливалось местоположение области развитой кавитации и приближенно оценивались ее габариты. Затем размеры зоны звукообразования оценивались по степени интенсивности кавитационной эрозии образцов с модельным загрязнением. В качестве образцов, подвергаемых кавитационной обработке, использовались миниатюрные металлические цилиндры, на торцевую поверхность которых наносился прочный загрязнитель, моделирующий тяжелые асфальтосмолистые отложения на деталях двигателей внутреннего сгорания [17]. Интенсивность кавитационной эрозии оценивалась по уменьшению массы модельного загрязнителя: образцы взвешивались до и после очистки на аналитических весах с ценой деления 0,01 мг. Критерием эффективности кавитации служило время полной очистки образца. Результаты исследований геометрии зоны звукообразования для ГДИ различного типоразмера сведены в табл. 1, где $D_{макс}$ – наружный диаметр вторичной тороидальной кавитационной области 5 излучателя, а ΔD – диаметр сечения ее тора.

Таблица 1 – Геометрия зоны звукообразования прямооточного ГДИ

Типоразмер ГДИ, a/D_c	0,5/6,5	0,5/13	0,5/19,5	0,5/26	0,5/32
Наружный диаметр зоны звукообразования ГДИ, $D_{макс}$ [мм]	9,5...10	21...22	33...34	45...46	55...56
Диаметр сечения тора, ΔD [мм]	2...2,5	4,5...5	7...8	10...11	13...14

На рис. 5 представлены результаты расчета по формуле (2) интенсивности генерируемых колебаний вблизи зоны звукообразования в зависимости от избыточного статического давления для излучателей различного типоразмера. При этом для всех значений $\Delta P_{ст}$ и a/D_c , согласно рис. 4, подбиралась оптимальная скорость струи V_{opt} на выходе из сопла, что соответствовало максимальному уровню звукового давления $P_{ак}$. Значительное, практически линейное, возрастание

возрастает. При этом с увеличением габаритов излучателя (его среднего диаметра сопла D_c) необходимо также повышать значение V_{opt} во всем рассматриваемом диапазоне избыточных статических давлений.

Проведенные исследования показали, что с увеличением гидростатического давления необходимо оптимизировать параметр D_2/D_c , связывающий диаметр большого цилиндра ступенчатого препятствия со средним диаметром сопла излучателя. Для этого использовался набор различных ступенчатых препятствий 4, которые устанавливались на торцевом сечении сопла (см. рис. 3). Обнаружено, что с уменьшением параметра D_2/D_c от 0,85 до 0,60 в диапазоне $\Delta P_{ст} = (0,005...2,4)$ МПа зависимость величины звукового давления $P_{ак}$ от $\Delta P_{ст}$ приобретает четко выраженный экстремальный характер, а положение

интенсивности поля вблизи области звукообразования хорошо согласуется с результатами аналогичных исследований для противоточного ГДИ [4]. Следует отметить, что с уменьшением габаритов прямооточного излучателя и, соответственно размеров его зоны звукообразования, при повышении гидростатического давления интенсивность звука возрастает существенно. Так, например, если для ГДИ с наружным диаметром зоны звукообразования $D_{\text{макс}} = (33...34)$ мм интенсивность звука с повышением $\Delta P_{\text{ст}}$ в диапазоне $(0,005...2,4)$ МПа возрастает от 1,7 до 72 Вт/см^2 , то для прямооточного ГДИ с $D_{\text{макс}} = (9,5...10)$ мм интенсивность звука в том же диапазоне значений избыточного статического давления $\Delta P_{\text{ст}}$ возрастает уже от 2,3 до 98 Вт/см^2 .

Зависимость частоты основной гармоники сигнала от избыточного статического давления для ГДИ различного типоразмера представлена семейством кривых на рис. 6.

Расчеты производились по формуле (1), здесь же (точки на рис. 6) представлены результаты экспериментальных данных. Видно, что с повышением статического давления частота основного тона звукового сигнала для каждого излучателя определенного типоразмера монотонно возрастает. Например, для низкочастотного ГДИ ($a/D_c = 0,5/32$) частота основной гармоники с повышением $\Delta P_{\text{ст}}$ в диапазоне $(0,005...1,6)$ МПа плавно возрастает от 350 до 1580 Гц, а для высокочастотного излучателя ($a/D_c = 0,5/6,5$) частота f_0 с изменением $\Delta P_{\text{ст}}$ в диапазоне $(0,005...2,4)$ МПа возрастает от 1550 до 9260 Гц.

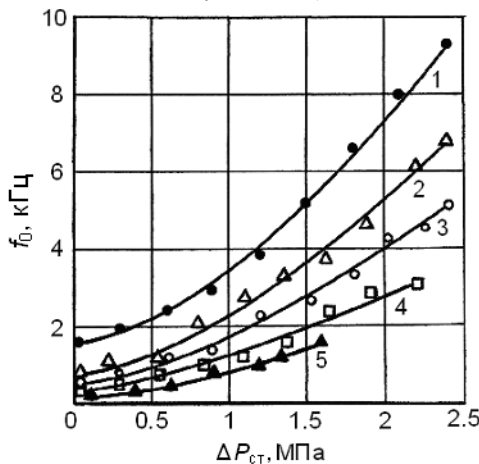


Рисунок 6 – Зависимость частоты основной гармоники акустического сигнала от избыточного статического давления для значений типоразмера излучателя:

1 – $a/D_c = 0,5/6,5$; 2 – $a/D_c = 0,5/13$;
3 – $a/D_c = 0,5/19,5$; 4 – $a/D_c = 0,5/26$; 5 – $a/D_c = 0,5/32$

давления в интервале $(0,005...1,4)$ МПа удельная мощность упругих колебаний резко возрастает. Очевидно, что в этом диапазоне изменения $\Delta P_{\text{ст}}$ возрастание интенсивности звука обусловлено двумя факторами: увеличением энергии при схлопывании паровых каверн во вторичной тороидальной области и возрастанием частоты схлопываний. При статических давлениях больших 1,4 МПа наблюдается насыщение характеристик $\Delta W(\Delta P_{\text{ст}})$, в этом случае дальнейший рост интенсивности звука зависит в основном от возрастания частоты колебаний. Известно [18], что степень сжатия кавитационного пузырька при схлопывании, характеризуемая отношением

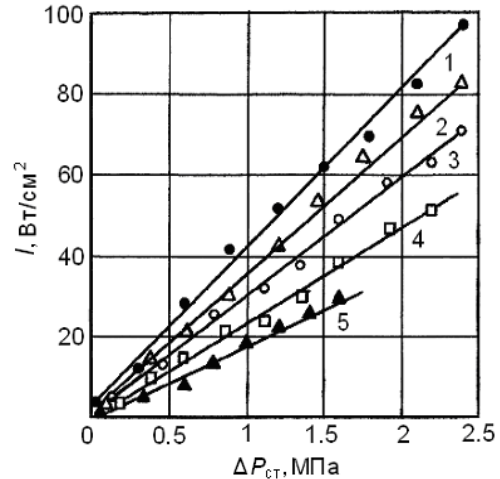


Рисунок 5 – Зависимость интенсивности звука от избыточного статического давления для значений типоразмера излучателя:
1 – $a/D_c = 0,5/6,5$; 2 – $a/D_c = 0,5/13$; 3 – $a/D_c = 0,5/19,5$;
4 – $a/D_c = 0,5/26$; 5 – $a/D_c = 0,5/32$

Представляет интерес оценить, как изменяется с увеличением гидростатического давления удельная энергия, приходящаяся на единицу площади и генерируемая за период колебаний:

$$\Delta W = \frac{I_{\text{ак}}}{f_0} = \frac{P_{\text{ак}}^2}{\rho c f_0} \quad (3)$$

Расчет соответствующих значений ΔW по формуле (3) производился согласно полученным зависимостям $I_{\text{ак}}(\Delta P_{\text{ст}})$ и $f_0(\Delta P_{\text{ст}})$. Зависимость удельной энергии акустических волн, как функция избыточного статического давления в водной среде, для ГДИ различного типоразмера представлена семейством кривых на рис. 7.

Анализ показал, что для всех значений типоразмера прямооточного ГДИ с повышением избыточного статического

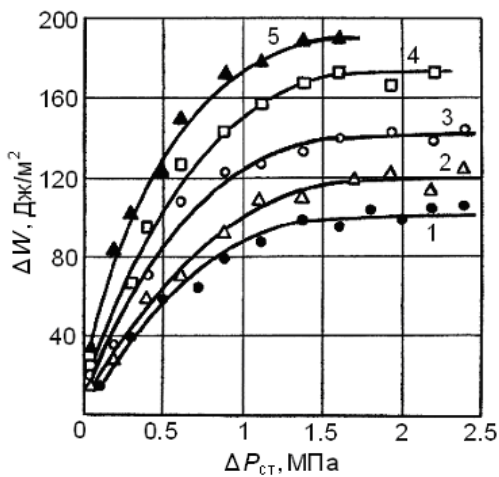


Рисунок 7 – Зависимость удельной энергии за один период колебаний от избыточного статического давления для значений

- типоразмера излучателя:
 1 – $a/D_c = 0,5/6,5$; 2 – $a/D_c = 0,5/13$;
 3 – $a/D_c = 0,5/19,5$; 4 – $a/D_c = 0,5/26$;
 5 – $a/D_c = 0,5/32$

телей различного типоразмера показала, что для достижения максимального уровня звука на заданной глубине погружения необходимо выбрать оптимальное значение диаметра большого цилиндра ступенчатого препятствия и подобрать соответствующую этой глубине скорость истечения жидкости из сопла. С увеличением гидростатического давления установлено значительное, практически линейное, возрастание интенсивности звука вблизи зоны звукообразования. При этом реализуется возможность для каждого ГДИ в широком диапазоне значений плавно изменять частоту основного тона звукового сигнала. Для формулы расчета частоты основной гармоники генерируемых волн получено не только качественное, но и количественное согласование между теоретическими и экспериментальными данными. Проведена оценка удельной энергии, генерируемой за один период колебаний, для гидродинамических излучателей различного типоразмера в зависимости от глубины их погружения.

Литература

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. *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.
4. *Дудзинский Ю. М.* Энергетические характеристики вторичной вихревой области осесимметричного гидродинамического излучателя / Ю. М. Дудзинский, А. А. Назаренко // *Акуст. вісник.* – 2000. – 3, № 1. – С. 36–41.
5. *Дудзинский Ю. М.* Оптимизация параметров широкополосного акустического излучателя в условиях избыточных статических давлений / Ю. М. Дудзинский, Н. В. Маничева, О. А. Назаренко // *Акуст. вісник.* – 2001. – 4, № 2. – С. 38–46.
6. *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.
7. *Дудзинский Ю. М.* Энергетика прямого гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления / Ю. М. Дудзинский, О. В. Сухарьков, Н. В. Маничева // *Акуст. вісник.* – 2004. – 7, № 1. – С. 44–49.

максимального радиуса R_{\max} пузырька к минимальному R_{\min} , тем больше, чем больше гидростатическое давление в жидкости и меньше газосодержание в пузырьке. Полученный результат можно объяснить тем, что вначале с увеличением гидростатического давления уменьшение радиуса каверны R_{\min} в момент схлопывания происходит быстрее, чем уменьшение радиуса R_{\max} в момент ее максимального расширения. Начиная же с некоторого значения $\Delta P_{ст}$, второй процесс становится преобладающим. При этом, например, если для высокочастотного излучателя ($a/D_c = 0,5/6,5$) с повышением $\Delta P_{ст}$ насыщение характеристики $\Delta W(\Delta P_{ст})$ приводит к значению $\Delta W = 102 \text{ Дж/м}^2$, то для низкочастотного ГДИ ($a/D_c = 0,5/32$) насыщение характеристики $\Delta W(\Delta P_{ст})$ существенно выше и составляет $\Delta W = 190 \text{ Дж/м}^2$.

В заключение отметим: экспериментально доказано, что прямоточные ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием способны эффективно работать в широком диапазоне гидростатических давлений и могут применяться в качестве мощных широкополосных источников звука в гидроакустической аппаратуре. Оптимизация рабочих параметров излуча-

8. Дудзінський Ю.М. Модель прямооточного гідродинамічного випромінювача з кільцевим соплом і східчастою перешкодою / Ю. М. Дудзінський, О. В. Сухарьков, Н. В. Манічева // Акуст. вісник. – 2004. – 7, № 3. – С. 49–54.
9. Дащенко А.Ф. Собственные колебания струйной оболочки в условиях гидростатического давления / А. Ф. Дащенко, Ю. М. Дудзинский // Прикладная механика. – 2004. – 40, № 12. – С. 92–98.
10. 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.
11. Вовк И. В. О возможном механизме автоколебаний в струйных гидродинамических излучателях с развитой кавитацией / И. В. Вовк, В. Т. Гринченко, Ю. М. Дудзинский // Акуст. вісник. – 2008. – 11, № 2. – С. 16–23.
12. 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.
13. Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей / М. Корнфельд. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1951. – 150 с.
14. Кнэпп Р. Кавитация / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. – М.: Мир, 1974. – 688 с.
15. Сухарьков О.В. Акустические характеристики осесимметричных прямооточных гидродинамических излучателей / О.В. Сухарьков // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2005. – №2. – С. 60–65.
16. 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.
17. Козлов Ю.С. Очистка изделий в машиностроении / Ю. С. Козлов. – М.: Машиностроение, 1982. – 264 с.
18. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / [науч. ред. Голямина И. П. и др.]. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.