

**ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ СТРУИ НА АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ**

**INFLUENCE OF SPEED JET ON ACOUSTIC CHARACTERISTICS
OF AXIALLY SYMMETRIC HYDRODYNAMIC RADIATOR**

Аннотация. Представлены результаты экспериментального исследования акустических характеристик осесимметричного прямооточного гидродинамического излучателя в зависимости от скорости истечения струи жидкости из кольцевого сопла.

Summary. The experimental research of acoustic characteristics of axially symmetric direct-flow hydrodynamic radiator as function of speed jet are presented.

В подводной связи существует проблема увеличения дальности действия гидроакустических систем (см., например, [1...4]). Теоретические и экспериментальные исследования показали, что осесимметричные гидродинамические излучатели (ГДИ) с пульсирующей кавитационной областью [2...11] имеют ряд свойств, отвечающих современным требованиям к передающей аппаратуре звукоподводной связи. Моделью излучателей такого рода могут служить затопленные струйные оболочки [5...7]. В работе [6] рассмотрена модель одного из типов осесимметричных прямооточных ГДИ – с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием. Получено выражение для частоты основной гармоники акустического сигнала, как функция геометрических параметров струйной оболочки и физических свойств рабочей жидкости. Ранее была проведена проверка соответствия предложенной математической модели для случая, когда у прямооточных излучателей изменялись геометрические параметры кольцевого сопла и ступенчатого цилиндрического препятствия [3, 4]. Однако отсутствуют экспериментальные исследования по соответствию данной математической модели реальным излучателям в случае изменения скорости струи рабочей жидкости.

Цель данной статьи – экспериментальное исследование акустических характеристик осесимметричного прямооточного гидродинамического излучателя в зависимости от скорости истечения струи жидкости из кольцевого сопла.

На рис. 1 представлены физическая модель и фотография работающего осесимметричного прямооточного ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием.

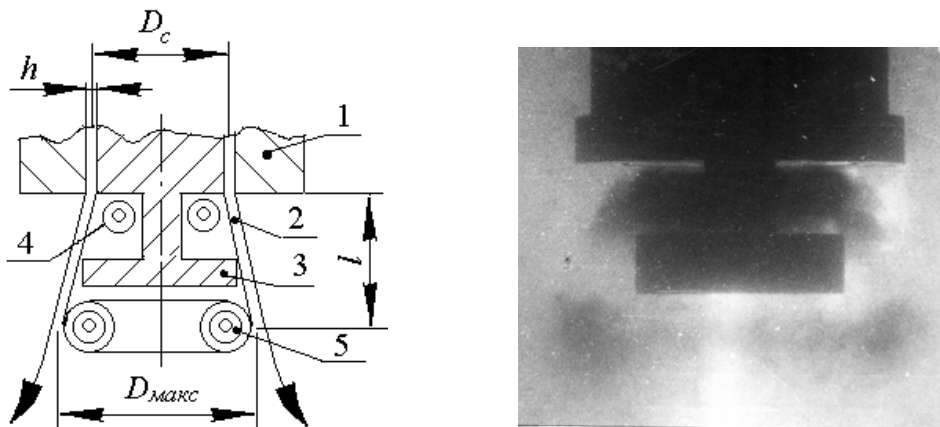


Рисунок 1 – Физическая модель и фотография работающего прямооточного гидродинамического излучателя

Механизм звукообразования связан с преобразованием части кинетической энергии затопленной струи жидкости в энергию акустических волн. Согласно рис. 1, из кругового щелевого сопла 1 вытекает с регулируемой скоростью V кольцевая струя 2. Ступенчатое препятствие 3 формирует из струи осесимметричную упругую оболочку [6, 4]. Накопителем энергии является неустойчивый первичный кавитационный вихрь 4 в форме тороида. Пульсации вихря 4 возбуждают изгибные колебания в струйной оболочке 2. Вырывающийся наружу поток с кавернами создаёт

вторичный тороидальный вихрь 5 с развитой кавитацией, он виден на фотографии в виде затемнения ниже ступенчатого препятствия. Паровые каверны внутри вторичной тороидальной области 5 синфазно схлопываются и генерируют интенсивные звуковые волны.

В процессе работы ГДИ часть потока струи уходит в окружающую среду и в колебаниях не участвует, поэтому в разработанной модели [6] длина l оболочки определяется расстоянием от щелевого сопла 1 до центра вторичного вихря 5. Таким образом, струйная оболочка характеризуется геометрическими параметрами: D_c, D_{\max}, l, h – диаметры оснований, длина и толщина оболочки, соответственно (рис. 1). Оптимизация геометрических параметров ступенчатого цилиндрического препятствия [4] подтвердила предположение о том, что оболочка имеет длину порядка радиуса ($\pi R/l \sim 1$) и угол между её образующей и высотой мал. В соответствии с этим рассматривается динамика затопленной цилиндрической струйной оболочки, жёстко заземленной на одном и свободной на другом основании [6]. С помощью методики, описанной в работе [5], аналитически получена формула для расчёта частоты основного тона (низшая собственная частота оболочки) генерируемого акустического сигнала:

$$f_0 = \frac{1}{\pi \cdot D_{\text{цил}}} \cdot \sqrt{\frac{[12 + 0,25 \cdot (1,8751/l)^4 h^2 D_{\text{цил}}^2] \cdot \Gamma \cdot (P_* + \Delta P_{\text{ст}})}{36\rho}}, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости, Γ – параметр её адиабатической сжимаемости; P_* – предел прочности жидкости на разрыв; $\Delta P_{\text{ст}}$ – избыточное, по сравнению с атмосферным, статическое давление в рабочей ёмкости. Средний диаметр эквивалентного цилиндра струйной оболочки $D_{\text{цил}} = (D_c + D_{\max})/2$, D_c – средний диаметр кольцевого сопла прямооточного ГДИ, а D_{\max} – диаметр свободного края оболочки. Параметры D_{\max} и l можно оценить по фотографиям работающего излучателя (рис. 1).

В работах [3, 4] проведена проверка соответствия предложенной математической модели [6] для случая, когда у прямооточных излучателей изменялись геометрические параметры кольцевого сопла и ступенчатого цилиндрического препятствия. Установлено не только качественное, но и количественное согласование между теоретическими и экспериментальными данными для зависимости частоты основной гармоники генерируемого акустического сигнала от среднего диаметра кольцевого сопла (и, соответственно, среднего диаметра эквивалентного цилиндра струйной оболочки), длины и толщины оболочки. В ходе экспериментальных исследований было обнаружено, что частота основного тона акустического сигнала, генерируемого прямооточным ГДИ, изменяется в широком диапазоне значений в зависимости от скорости потока жидкости на границе неустойчивого первичного вихря 4 (рис. 1). Однако в формуле для расчёта частоты основной гармоники (1) явной зависимости f_0 от скорости струи нет.

Было выдвинуто предположение, что повышение скорости струи при заданных геометрических параметрах кольцевого сопла и ступенчатого препятствия приводит к увеличению длины l и диаметра свободного края D_{\max} оболочки. Данное предположение подтверждает визуальное наблюдение и фотографии работающего излучателя (рис. 1). Поэтому представляет интерес оценить влияние скорости струи V на спектральные характеристики генерируемого излучателем акустического сигнала.

Для проведения исследований разработана и смонтирована экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 2. Оборудование установки включает в себя силовую и измерительную части. Силовая часть состоит из насосного агрегата

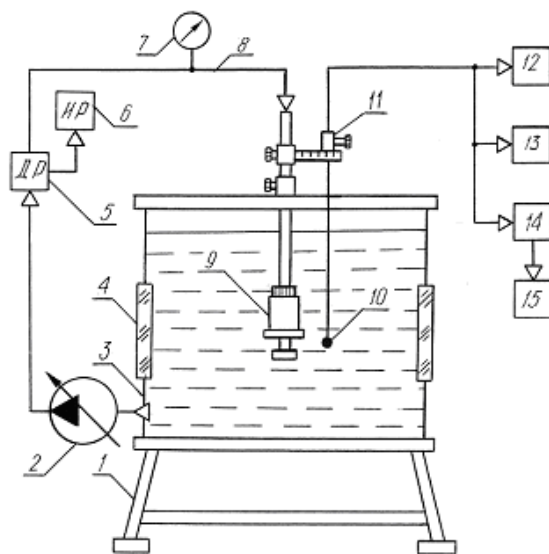


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки для исследования акустических характеристик осесимметричных прямооточных ГДИ

2, системы трубопроводов 8 и бака 3, установленного на монтажной раме 1. Насос обеспечивает номинальное давление 2 МПа при номинальном расходе рабочей жидкости 20 м³/час. Бак 3, с габаритами (1,2×1,2×1,0) м, снабжён иллюминаторами 4 для наблюдения и фотографирования на просвет исследуемых процессов. Внутри бака в затопленном состоянии размещаются гидродинамический излучатель 9 и измерительный гидрофон 10. В ходе экспериментов глубина погружения ГДИ составляла 30 см, т.е. звукообразование происходило при малом избыточном статическом давлении, приблизительно 3 кПа. Рабочей жидкостью служила водопроводная вода, которая для установления равновесия газосодержания отстаивалась в течение трёх недель. Температура воды поддерживалась в пределах (19...21)°С, что обеспечивало постоянными плотность и вязкость жидкой среды.

Гидродинамические параметры потока жидкости рассчитывались по показаниям индукционного расходомера 6 с датчиком 5 и образцового манометра 7. Для измерения акустического поля работающего ГДИ использовался гидрофон 10, который перемещался с помощью координатного устройства 11. Точность изменения координаты составляет 1 мм. Электрический сигнал с выхода гидрофона поступает на электронный вольтметр 12, осциллограф 13, анализатор спектра звуковых частот 14, с рабочим диапазоном от 44,9 Гц до 23 кГц. Более точное измерение частот гармонических составляющих спектра осуществлялось электронносчётным частотомером 15, который подключался к соответствующему полосовому фильтру спектрометра 14. Спектрограммы и осциллограммы фотографировались с помощью специальной приставки фотоаппаратом.

Как известно [3], основным типоразмером прямооточного ГДИ служит отношение a/D_c , где a – ширина щели кольцевого сопла; D_c – средний диаметр сопла. В ходе экспериментов использовался излучатель с основным типоразмером $a/D_c = 0,5/13$ (мм/мм), у которого геометрические параметры оставались постоянными и принимали оптимальные значения согласно проведенным ранее экспериментальным исследованиям [3, 4].

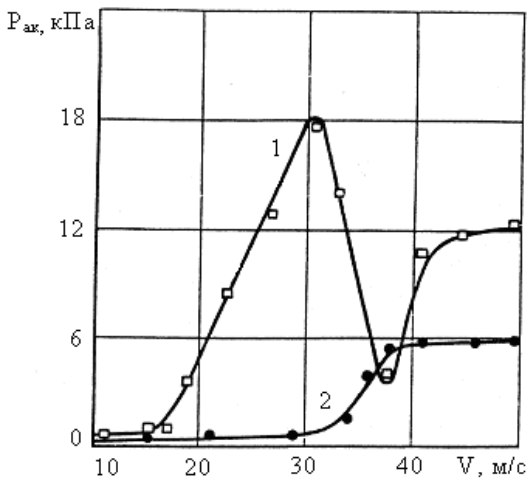


Рисунок 3 – Зависимость акустического давления от скорости истечения струи: 1 – излучатель; 2 – свободное истечение струи из кольцевого сопла

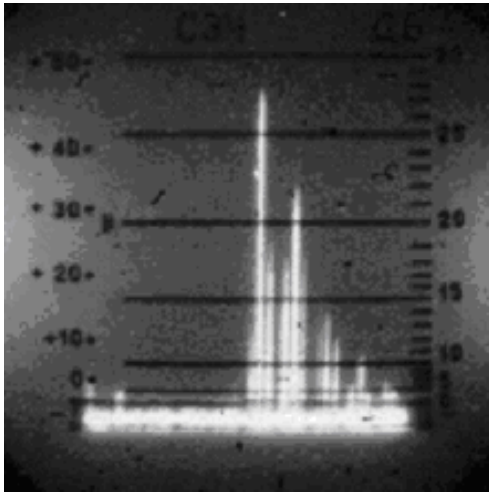
На рис. 3 представлена зависимость величины звукового давления от скорости истечения струи в интервале скоростей 10...50 м/с. Спектрограммы акустического сигнала для некоторых характерных значений скорости струи представлены на рис. 4.

Исследования показали, что с увеличением скорости истечения струи из сопла прямооточного ГДИ от 10 м/с до 17 м/с величина акустического давления $P_{ак}$ очень мала и не превышает 0,5 кПа (рис. 3, кривая 1). В кольцевой проточке ступенчатого препятствия (рис. 1) при этом можно наблюдать появление и исчезновение одиночных кавитационных пузырьков. При достижении скорости струи 19 м/с одиночные кавитационные пузырьки объединяются в тонкую кавитационную область в форме тороида, толщина поперечного сечения тора составляет примерно (1,2...1,5) мм. Под ступенчатым препятствием визуально уже можно наблюдать вторичную тороидальную область развитой кавитации. Звуковое давление резко повышается до 4 кПа. На частотном спектре генерируемых колебаний выделяются три гармонические составляющие. Амплитуда основного тона ($f_0 = 1010$ Гц) равна 27 дБ и превышает амплитуду второй гармоники на 5 дБ, амплитуду третьей гармоники

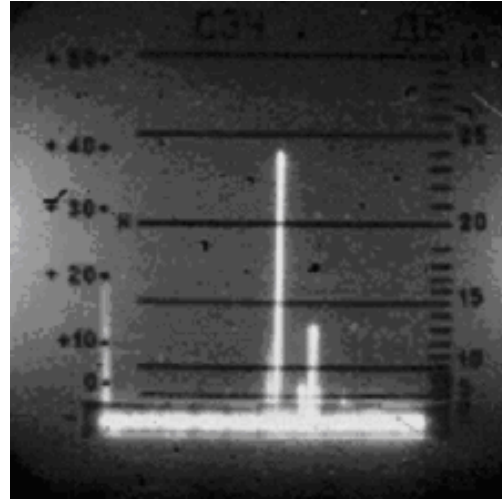
– на 13 дБ. Амплитуды остальных гармонических составляющих принимают значения в интервале (2...10) дБ (рис. 4,а).

По мере увеличения скорости истечения струи акустическое давление возрастает и при скорости $V = 31$ м/с достигает максимального значения (рис. 3, кривая 1). При оптимальном режиме работы излучателя (рис. 4,б) на спектрограмме выделяются только три максимума, соответствующие частотам 870, 1740 и 3480 Гц и амплитудам 44, 33 и 25 дБ соответственно. Первичный и вторичный кавитационные вихри увеличились в размерах и потемнели по сравнению с начальным моментом генерирования колебаний (фотография рис. 2). Частота основной гармоники генерируемых колебаний $f_0 = 870$ Гц соответствует нижней собственной частоте струйной оболочки [6].

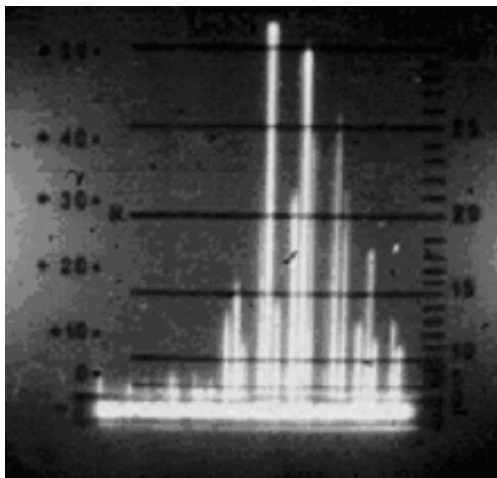
Увеличение скорости струи от 31 м/с до 37,5 м/с (рис. 3, кривая 1) приводит к резкому снижению величины звукового давления до 4,5 кПа. Частота основного тона при этом уменьшается до 705 Гц, а её амплитуда до 32 дБ. При этом амплитуда второй гармонической составляющей меньше амплитуды первой гармоники всего лишь на 2 дБ, а амплитуда третьей гармоники ниже амплитуды первой гармоники на 6...7 дБ (рис. 4,в). Наблюдается также возрастание высших гармоник и появление субгармоник по сравнению со спектром акустического сигнала при оптимальном режиме работы излучателя.



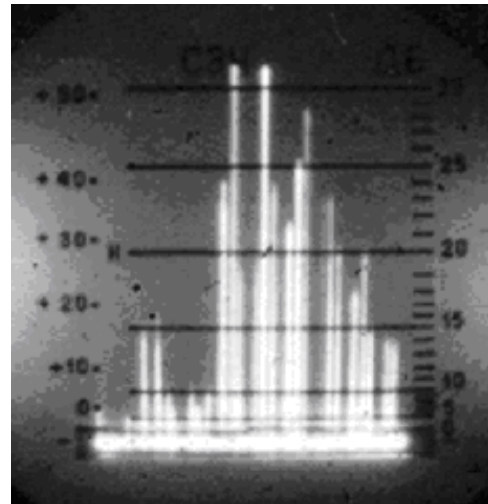
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4 – Спектрограммы акустического сигнала для некоторых характерных значений скорости истечения струи V [м/с]: а) – 19; б) – 31; в) – 37,5; г) – 50

Дальнейшее повышение скорости струи ведёт к росту акустического давления, величина которого при $V = 50$ м/с увеличивается до 12 кПа, что составляет примерно $0,66 P_{\max}$ (рис. 3, кривая 1). В спектре сигнала по-прежнему выделяются три первых гармонических составляющих, однако, по сравнению с рассмотренными ранее спектрограммами заметно возрастание высших гармоник и субгармоник (рис. 4,г). При этом амплитуды первой и второй гармоник равны по величине (32 дБ), а амплитуда третьей гармоники меньше их на 3...3,5 дБ. Частота основного тона при скорости струи 50 м/с уменьшается до $f_0 = 525$ Гц.

Для сравнения на рис. 3 (кривая 2) представлена зависимость $P_{\text{ак}}$ от V для широкополосного сигнала, генерируемого при свободном истечении струи из кольцевого сопла. При проведении этого

эксперимента использовался тот же прямооточный ГДИ ($a/D_c = 0,5/13$), в котором демонтировалось ступенчатое цилиндрическое препятствие 3 (рис. 1). Как известно [12], в этом случае у крайнего торцевого сечения сопла с ростом скорости струи создаются благоприятные условия для формирования пульсирующей кавитационной области в форме конуса. Видно, что в рабочем диапазоне скоростей ГДИ (29...33 м/с) акустический сигнал, генерируемый излучателем при оптимальном режиме, больше в 9...18 раз по величине, чем при свободном истечении струи из кольцевого сопла. Таким образом, прямооточный ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием является источником акустических колебаний высокой интенсивности.

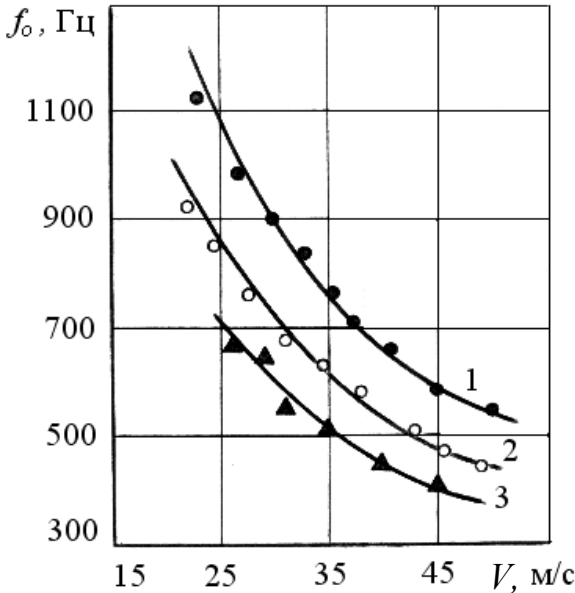


Рисунок 5 – Зависимость частоты основной гармоники звука от скорости струи для значений основного типоразмера излучателя a/D_c [мм/мм]: 1 – 0,5/13; 2 – 0,5/19,5; 3 – 0,5/26

выходе кольцевого сопла частота пульсаций первичного вихря совпадает с собственной частотой струйной оболочки (рис. 1) и наблюдается максимальный уровень тонального звука [8]. Для излучателя с основным типоразмером $a/D_c = 0,5/13$ оптимальная скорость истечения струи $V_{opt} = 31$ м/с (рис. 3). На рис. 6 представлен нормированный спектр звука ГДИ при оптимальном режиме истечения струи. В качестве единицы нормировки принята амплитуда A_{max} низшей гармоники акустического сигнала.

Видно (рис. 6), что в линейном масштабе амплитуда первой гармоники в 3,6 раза превышает амплитуду второй гармоники и в 9,1 раза больше амплитуды третьей гармонической составляющей. Что касается остальных гармоник и субгармоник, то их амплитуды не превышают $0,05A_{max}$. В работе [13] были проведены экспериментальные исследования акустических полей негармонических сигналов, генерируемых осесимметричными противоточными ГДИ. Исследования проводились в емкостях различной формы и габаритов для обнаружения зон минимальной интерференции. Анализ спектрограмм оптимального режима ГДИ

На рис. 5 представлена зависимость частоты основной гармоники звука от скорости истечения струи для трёх значений основного типоразмера излучателя a/D_c . В интервале скоростей (22...50) м/с получена эмпирическая формула для зависимости частоты основного тона f_0 от скорости струи V :

$$f_0 = c + \frac{d}{V}, \quad (2)$$

где для значений основного типоразмера излучателя $a/D_c = \{0,5/13; 0,5/19,5; 0,5/26\}$ коэффициент $c = \{19,79; 76,43; 43,21\}$ Гц, соответственно. В формуле (2) коэффициент d для тех же значений основного типоразмера ГДИ равен: $\{25902,7; 18445,1; 16290,4\}$ м²/с², соответственно.

Таким образом, экспериментально установлено, что частота основного тона акустического сигнала, генерируемого осесимметричным прямооточным ГДИ, обратно пропорциональна скорости истечения затопленной струи.

Представляет особый интерес рассмотреть режим работы прямооточного ГДИ, оптимизированный по максимуму звукового давления. При оптимальной скорости струи на

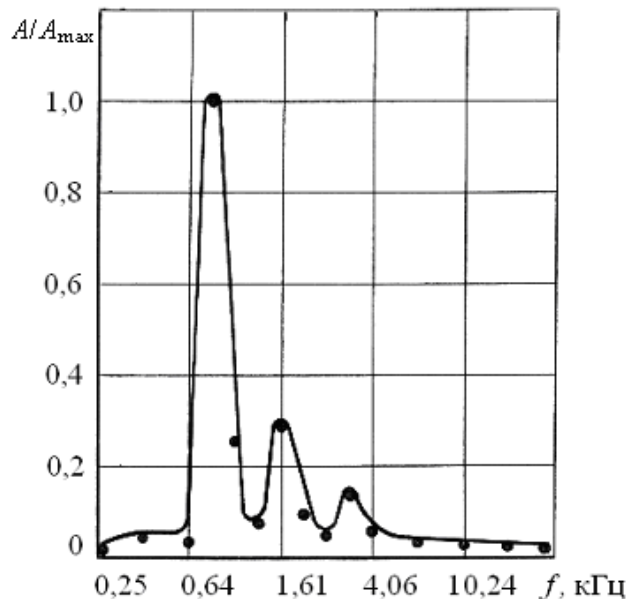


Рисунок 6 – Нормированный спектр звука излучателя при оптимальной скорости струи

показал, что в акустическом бассейне со звукопоглощающими стенками размером (4×2,5×2,5) м амплитуды второй, третьей и высших гармоник ниже амплитуды первой гармоники на 20...40 дБ. Следовательно, в линейном масштабе гармоника основного тона генерируемого сигнала превышает остальные гармонические составляющие в (10...100) раз. К этому следует добавить, что поскольку в жидкостях коэффициент поглощения звука пропорционален квадрату частоты [14], то высокочастотные спектральные составляющие сигнала затухают на расстоянии значительно сильнее. Поэтому, с учётом публикаций [9, 11], можно предположить, что в неограниченной водной среде акустический сигнал, генерируемый прямоточным ГДИ, уже на расстоянии (4...5) м становится по спектральному составу практически близким к сигналу чистого тона.

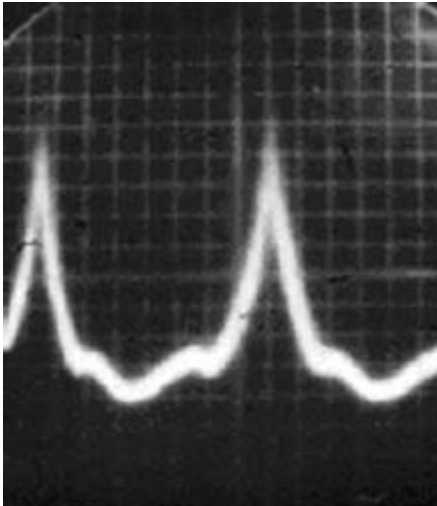


Рисунок 7 – Осциллограмма генерируемого акустического сигнала при оптимальном режиме истечения струи

На рис. 7 представлена осциллограмма акустического сигнала при оптимальном режиме истечения струи. Анализ осциллограммы показал, что форма одиночного импульса давления, излучаемого осесимметричным прямоточным ГДИ, представляет собой характерную кривую релаксационных колебаний. Относительно пологий участок кривой соответствует времени наполнения первичного кавитационного вихря 4, а крутой подъём кривой на осциллограмме – интервалу синфазного схлопывания кавитационных областей 4 и 5 (рис. 1).

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Исследовано влияние скорости струи на уровень и спектральную характеристику акустического сигнала, генерируемого осесимметричным прямоточным ГДИ с кольцевым соплом и ступенчатым препятствием.

2. Установлено, что при оптимальной скорости истечения жидкости из кольцевого сопла достигается максимальный уровень звука.

В этом случае амплитуда низшей гармонической составляющей спектра приблизительно на порядок выше амплитуд остальных гармоник.

3. Обнаружено, что при скоростях струи больше оптимальной скорости наблюдается возрастание высших гармоник, почти до уровня основной гармонической составляющей спектра, и появление субгармоник.

4. Экспериментально установлено, что частота основного тона акустического сигнала, генерируемого прямоточным ГДИ, обратно пропорциональна скорости истечения затопленной струи. Получена эмпирическая формула для зависимости частоты основной гармоники звука от скорости струи при постоянных геометрических параметрах излучателя.

5. Обнаружено, что с точки зрения генерирования акустического сигнала близкого к чистому тону, предпочтительным является оптимизированный по максимуму звукового давления режим работы осесимметричного ГДИ.

В заключение отметим, что приведенные в статье результаты экспериментальных исследований полностью соответствуют предложенной математической модели. Эксперимент показал, что, изменяя гидродинамические и геометрические параметры затопленной струйной оболочки можно существенно изменять спектральные характеристики акустического сигнала, генерируемого осесимметричным ГДИ прямоточного типа.

Литература

1. Митько В.Б., Евтютов А.П., Гуцин С.Е. Гидроакустические средства связи и наблюдения. – Л.: Судостроение, 1982. – 200 с.
2. Дудзинский Ю.М., Маничева Н.В., Назаренко О.А. Оптимизация параметров широкополосного акустического излучателя в условиях избыточных статических давлений // Акустичний вісник. – 2001. – Т. 4. – № 2. – С. 38 – 46.

3. Сухарьков О.В. Акустические характеристики осесимметричных прямооточных гидродинамических излучателей // Наукові праці ОНАЗ ім.О.С. Попова. – 2005. – №2. – С.60 – 65.
4. Сухарьков О.В. Экспериментальное исследование акустических характеристик осесимметричных прямооточных гидродинамических излучателей // Наукові праці ОНАЗ ім.О.С. Попова. – 2006. - №1. – С.74 – 79.
5. Dudzinski Yu. M., Suharkov O. V., Manicheva N. V. Axial-symmetric hydrodynamic radiators used for fluid cavitation threshold measurement // IV Int. Hutsulian Workshop on Mathematical Theories and their Application in Physics and Technology.- Austria: Timpani. – 2004.- P. 275- 284.
6. Дудзінський Ю.М., Сухарьков О.В., Манічева Н.В. Модель прямооточного гідродинамічного випромінювача з кільцевим соплом і східчастою перешкодою // Акустичний вісник. – 2004. – Т.7. – № 3. – С. 49 – 54.
7. Дащенко А.Ф., Дудзінський Ю.М. Собственные колебания струйной оболочки в условиях гидростатического давления // Прикладная механика. – 2004. – Т.40. – № 12. – С. 92 – 98.
8. Дудзінський Ю.М., Сухарьков О.В., Манічева Н.В. Энергетика прямооточного гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления // Акустичний вісник. – 2004. – Т.7. – № 1. – С. 44 – 49.
9. Дудзінський Ю.М. Ближнее поле осесимметричного гидродинамического излучателя // Акустичний вісник. – 2004. – Т.7. – № 4. – С. 48 – 51.
10. Назаренко А.А. Давление в звукообразующем элементе гидродинамической излучающей системы в течение периода колебаний // Акустичний вісник. – 2004. – Т.7. – № 4. – С. 52 – 56.
11. Дудзінський Ю. М. О нелинейном затухании экспоненциальных упругих импульсов // Акустичний вісник. – 2005.– Т.8. – №1–2.– С. 51 – 53.
12. Самойленко В.В. Исследование гидродинамических излучателей с кольцевым соплом: Дис. канд. техн. наук. – Одесса, 1975. – 180 с.
13. Бореймагорская Л.А., Воронюк В.Г., Назаренко А.Ф. Особенности оценки работы гидродинамических излучателей в ограниченных средах // Акустика и ультразвуковая техника. – 1978. – № 13. – С. 24 – 27.
14. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.