

ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВНУТРЕННЕЙ ОБЛАСТИ СТРУЙНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Ю. М. ДУДЗИНСКИЙ, А. В. ЖУКОВА

Одесский национальный политехнический университет

Проведены исследования акустических свойств струйных ГДИ в условиях избыточного статического давления в жидкости. Представлены количественные оценки зависимости величин упругости, плотности, скорости звука во внутренней кавитирующей области ГДИ и ее волнового размера от статического давления.

Проведено дослідження акустичних властивостей струминних ГДВ в умовах надлишкового статичного тиску в рідині. Представлено кількісні оцінки залежності величин пружності, густини, швидкості звуку у внутрішній кавітуючій області ГДВ і її хвильового розміру від статичного тиску.

Researches of acoustic properties of jets HDR are conducted in the conditions of surplus static pressure in a liquid. The quantitative estimations of dependence of sizes of resiliency, closeness's, speeds of sound in the internal cavitations area of HDR and its wave size on static pressure are presented.

ВВЕДЕНИЕ

В струйных гидродинамических излучателях (ГДИ) часть кинетической энергии поступательного движения частиц затопленной струи жидкости преобразуется в колебательное движение струи, которое собственно и возбуждает мощные акустические волны, способные вызвать развитую кавитацию в жидкости. В свое время А. Ф. Назаренко высказывалась идея о возможном механизме генерирования звука – за счет пульсации кавитационной области, образующейся между соплом и препятствием [1]. Однако детали этого механизма не были разработаны и объяснение парадоксального, на первый взгляд, факта понижения частоты основного тона (низшая гармоника в спектре звука) с увеличением скорости струи на выходе сопла дано не было.

Ранее автором доклада в работе [2] была предложена акустическая модель струйной оболочки гидродинамического излучателя и решена граничная задача об излучении звука этой оболочкой. Анализ полученного решения позволил установить, что в рабочей зоне излучателя образуется своеобразная резонансная система, состоящая из внутренней упругой кавитирующей среды, самой струйной оболочки и внешней присоединенной массы жидкости. Эта резонансная система и обеспечивает обратную акустическую связь, навязывая автоколебания струйной оболочке и обеспечивая ей стабильную частоту колебаний. Было показано, что наблюдаемое экспериментально парадоксальное снижение частоты излучаемого звука с ростом скорости струи в сопле связано с увеличением податливости внутренней двухфазной среды (жидкость с кавитационными пузырьками) за счет увеличения в ней доли парогазовых микропузырьков. Были проведены количественные оценки величин податливости, плотности и скорости звука во внутренней кавитирующей области. В частности установлено, что здесь скорость звука существенно (в 50...70 раз) ниже скорости звука в жидкости, окружающей струйную оболочку с внешней стороны. Ранее проведенные исследования показали высокую эффективность струйных ГДИ при генерировании звука в условиях гидростатического давления [3, 4]. Поэтому представляет интерес исследовать влияние избыточного статического давления

(по отношению к атмосфере) в рабочей емкости на акустические характеристики этих источников звука и на механические свойства двухфазной среды с развитой кавитацией внутри струйной оболочки.

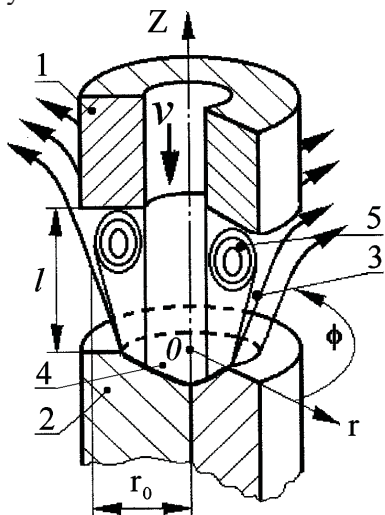


Рис. 1

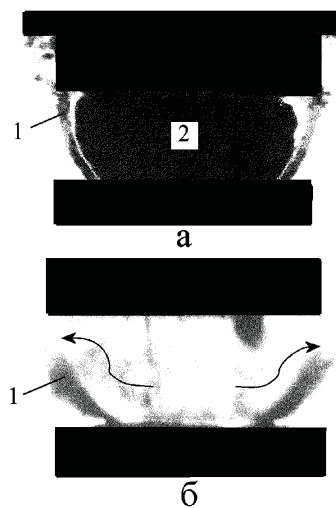


Рис. 2

1. КОНСТРУКТИВНАЯ СХЕМА СТРУЙНОГО ГДИ И ЕГО АКУСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим конструктивную схему ГДИ противоточного типа (рис. 1). Он состоит из двух соосных частей: круглого сопла 1 и отражателя 2, имеющего на торце параболлическую лунку. Затопленная струя жидкости круглого сечения, которая вытекает из сопла 1 со скоростью v , достигает отражателя 2 и отражается в обратную сторону, формируясь в струйную оболочку 3 за счет наличия в торце отражателя параболлической лунки. Струйная оболочка натекает на нижний внешний край сопла (рис. 2а), в результате чего может приобретать некоторую поперечную неустойчивость (т. е. совершать поперечные колебания). Действительно, несимметрично натекая на край сопла (прямоугольный клин), струя может раздваиваться. Одна часть струи уходит во внешнюю (относительно ГДИ) область, а другая во внутреннюю область, сворачиваясь в тороидальный вихрь [5, 6]. Благодаря этому, во внутренней области накапливается излишек среды, который оказывает давление на внутреннюю поверхность струйной оболочки, заставляя ее отклониться во внешнюю сторону и выпустить этот излишек среды во внешнюю область. На рис. 2б зафиксирован момент отклонения струйной оболочки 1 во внешнюю сторону. На рис. 2а также хорошо видно, что во внутренней области 2 имеет место развитая кавитация. Именно наличие облака парогазовых микропузырьков затрудняет прохождение световых лучей, из-за чего внутренняя область выглядит темной. Таким образом, во внутренней области 2 существует двухфазная среда (жидкость и парогазовые микропузырьки.) Второй причиной поперечной неустойчивости струйной оболочки может быть непостоянство скорости v жидкости, вытекающей из сопла, что на практике почти всегда имеет место. Таким образом, имеются предпосылки для появления поперечных колебаний струйной оболочки в ГДИ и, следовательно, возникновения звуковых колебаний.

В работе [2] была рассмотрена простейшая акустическая модель данного источника звука в виде сферической тонкой оболочки, совершающей радиальные колебания с

некоторой колебательной скоростью. Принималось, что внешняя сторона оболочки контактирует с жидкостью, имеющей волновое сопротивление $\rho_{ж} c_{ж}$, а ее внутренняя поверхность – с некоторой средой, имеющей сопротивление ρc . Решение граничной задачи излучения такой оболочки позволило получить выражение для объемной упругости E и, соответственно, сжимаемости $K = 1/E$ двухфазной внутренней области:

$$E = \frac{(2\pi r_0)^2 \rho_{ж} f_0^2}{3}; \quad K = \frac{3}{(\pi d)^2 \rho_{ж} f_0^2}, \quad (1)$$

где r_0, d – средний радиус и диаметр оболочки, f_0 – экспериментальное значение частоты основного тона генерируемого звука. Если известны сжимаемости жидкости $K_{ж}$ и газа $K_г$, то можно оценить долю содержащейся в пульсирующей сфере жидкости:

$$h = \frac{K_г - K}{K_г - K_{ж}} \quad (2)$$

и газа $(1-h)$, соответственно. Теперь можно воспользоваться выражениями для плотности и сжимаемости двухфазной среды [7], условно приняв ее как некоторую однородную:

$$\rho = (1-h)\rho_г + h\rho_{ж}, \quad (3)$$

$$K = (1-h)K_г + hK_{ж}, \quad (4)$$

где $\rho_г, \rho_{ж}$ – плотности газа и жидкости, соответственно. Зная долю жидкости, плотности газа и жидкости, можно по формуле (3) оценить плотность двухфазной среды. А с учетом ее сжимаемости (4) можно оценить скорость звука во внутренней области с развитой кавитацией.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\rho K}}. \quad (5)$$

2. АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для экспериментальных исследований влияния избыточного статического давления на акустические свойства струйного ГДИ последний размещался в герметичной емкости, заполненной рабочей жидкостью. Излучатель питается от насоса с плавно регулируемым расходом жидкости. Избыточное статическое давление $\Delta P_{ст}$ создается вспомогательным насосом и регулируемым клапаном. Сигнал с выхода гидрофона поступает на вольтметр, осциллограф и спектроанализатор. Герметичная емкость снабжена иллюминаторами для визуализации процесса, фото и скоростной видеосъемки.

Изменяя расход насоса, можно задать скорость жидкости на выходе сопла излучателя. Затем плавно повышалось статическое давление, измерялась частота следования генерируемых звуковых импульсов (основной тон). Семейство зависимостей $f_0(\Delta P_{ст})$ частоты сигнала от избыточного статического давления в рабочей емкости представлено на рис. 3. Скорость v затопленной струи составляла: 36 м/с (кривая 1), 48 м/с (кривая 2), 85 м/с (кривая 3), 99 м/с (кривая 4), 125 м/с (кривая 5), 152 м/с (кривая 6), 166 м/с (кривая 7), 177 м/с (кривая 8). Следует отметить две особенности данных источников звука. Во-первых, при фиксированной скорости струи в сопле процесс звукообразования имеет

место в ограниченном диапазоне статических давлений. При слишком низких значениях ΔP_{cm} кавитация развивается внутри сопла ГДИ, разрушается струйная оболочка (рис. 2) и вместо тонального сигнала генерируется широкополосный шум. При слишком высоких значениях ΔP_{cm} исчезает кавитация, во внутреннем объеме оболочки устанавливается однофазная среда со слишком малой сжимаемостью [2] и уровень генерируемого сигнала настолько низкий, что не фиксируется на фоне шумов. Во-вторых, при неизменной скорости струи с увеличением статического давления в жидкости частота f_0 вначале повышается и достигает насыщения. В дальнейшем с увеличением ΔP_{cm} генерирование звука рекрещается.

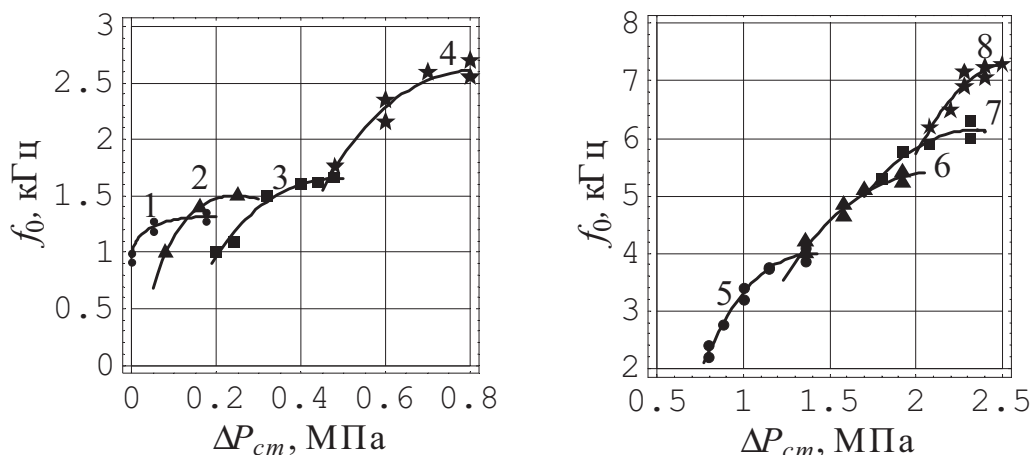


Рис. 3

По экспериментальным зависимостям $f_0(\Delta P_{cm})$ можно рассчитать по формуле (1) зависимости упругости двухфазной среды от избыточного статического давления в жидкости $E(\Delta P_{cm})$ (рис. 4). Как видно, с ростом ΔP_{cm} имеет место вначале почти линейный рост упругости, что непосредственно указывает на уменьшение количества газа во внутренней области струйной оболочки за счет понижения концентрации микропузырьков или (и) уменьшения их среднего радиуса. При неизменной скорости струи в сопле ГДИ дальнейшее повышение статического давления сопровождается замедлением и прекращением роста зависимости $E(\Delta P_{cm})$, что означает в дальнейшем постоянство доли газа во внутренней области струйной оболочки (рис. 5) и неизменность плотности этой двухфазной среды.

Поскольку известны плотность воздуха $\rho_2 = 1.14 \text{ кг/м}^3$ и жидкости (трансформаторное масло) $\rho_{жс} = 940 \text{ кг/м}^3$, сжимаемости $K_2 = 8.0 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$, $K_{жс} = 6.0 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, то по формулам (3), (4), (5) можно оценить плотность двухфазной области развитой кавитации, скорость звука в ней и d/λ – ее волновые размеры. Как видно на рис. 6, при неизменной скорости струи в сопле с увеличением избыточного статического давления в жидкости вначале параметр d/λ возрастает, достигая насыщения. Однако, начиная со значения $\Delta P_{cm} > 1 \text{ МПа}$, волновой размер пульсирующей двухфазной среды внутри струйного ГДИ практически не изменяется, вплоть до избыточного давления $\Delta P_{cm} = 2.5 \text{ МПа}$.

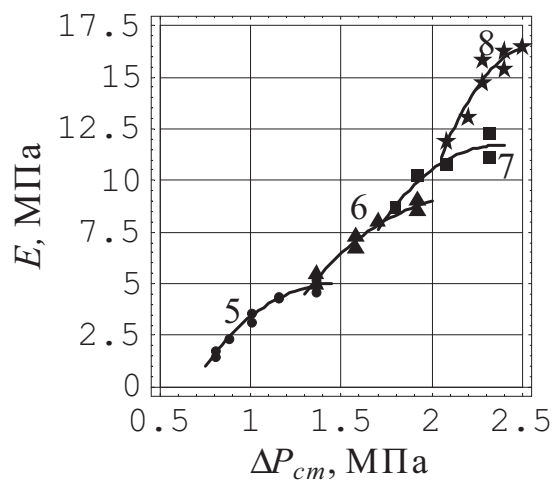
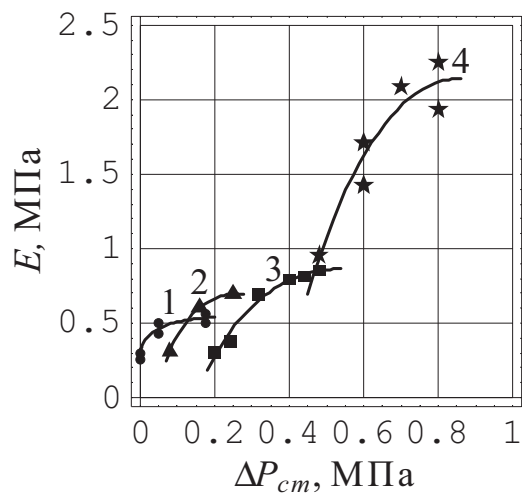


Рис. 4

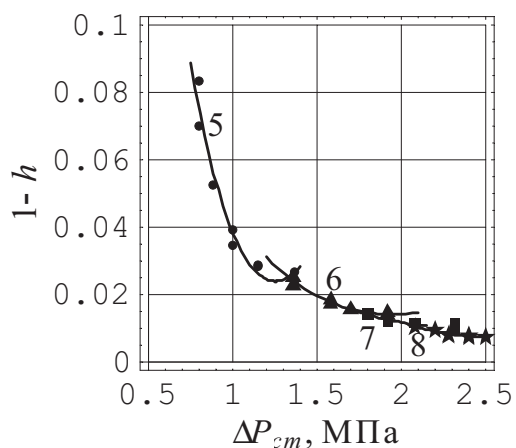
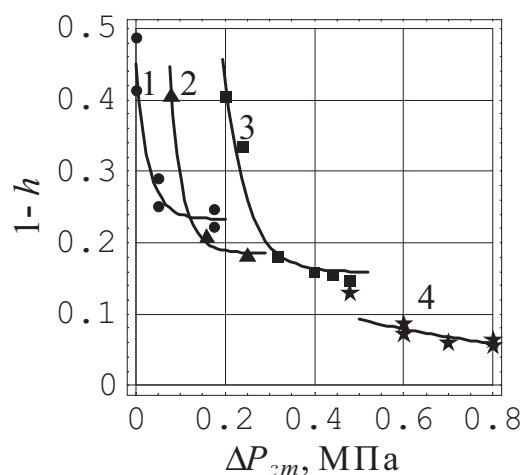


Рис. 5

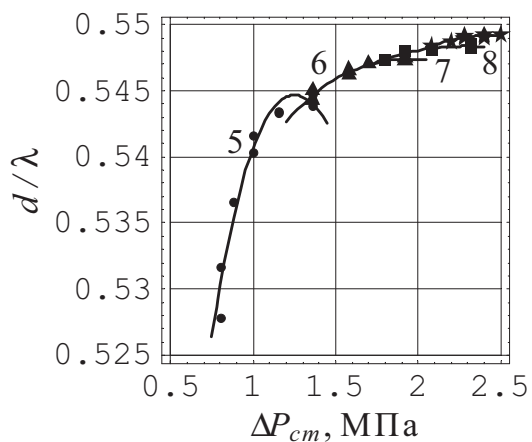
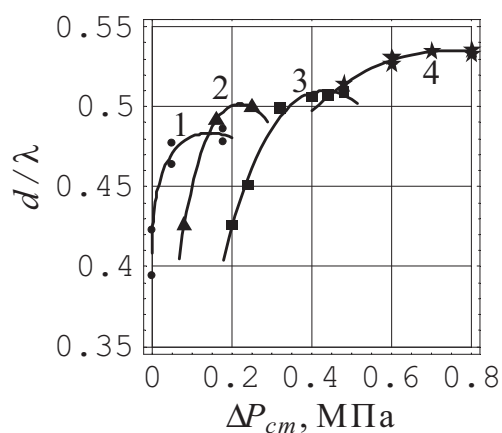


Рис. 6

ВЫВОДЫ

1. Проведены исследования акустических характеристик струйных ГДИ в условиях избыточного статического давления в жидкости. Обнаружено, что при неизменной скорости струи в сопле частота основного тона вначале растет с увеличением давления, затем достигает режима насыщения.
2. При фиксированной скорости струи в сопле, данные излучатели имеют ограниченный диапазон избыточного статического давления, ниже и выше которого прекращается процесс гидродинамического звукообразования.
3. Проведены количественные оценки зависимости величин упругости, плотности, скорости звука во внутренней кавитирующей области струйного ГДИ и ее волнового размера от избыточного статического давления. В частности установлено, что при статическом давлении свыше 1МПа значения этих величин практически не изменяются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаренко А. Ф. Гидродинамические излучатели // Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой.– М.: "Советская энциклопедия", 1979.– С. 79–81.
2. Вовк И. В., Гринченко В. Т., Дудзинский Ю. М. О возможном механизме автоколебаний в струйных гидродинамических излучателях с развитой кавитацией // Акуст. вісник.– 2008.– **11**, №2. – С. 16–23.
3. Дудзинский Ю. М., Сухарьков А. О., Маничева Н. В. Энергетика прямого гидродинамического излучателя в условиях гидростатического давления // Акуст. вісник.– 2004.– **7**, №1. – С. 44–49.
4. Дудзинский Ю. М. Кавитационная эрозия в условиях гидростатического давления // Акуст. вісник.– 2006.– **9**, №4. – С. 56–62.
5. Дудзинский Ю. М., Сухарьков А. О., Маничева Н. В. Автоколебания пружного зануреного осесимметричного струменя-оболочки // Акуст. вісник.– 2003.– **6**, №3. – С. 29–33.
6. Дудзинский Ю. М., Попов В. Г. Вынужденные колебания осесимметричной затопленной струйной оболочки // Прикл. механика.– 2005.– **41**, №4. – С. 60–65.
7. Wodicka G. R., Stevens K. N., Golub H. L., Cravalho E. G., Shannon D. C. A Model of Transmission in the Respiratory System // IEE Transactions on Biomedical Engineering.– 1989.– vol. **36**, No. 9.– P. 925–933.