

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ЖИДКОСТИ НА РАЗРЫВ  
С ПОМОЩЬЮ ПРЯМОТОЧНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ****METHOD OF DEFINITION OF DURABILITY OF A LIQUID ON BREAK  
WITH THE USE OF DIRECT-FLOW HYDRODYNAMIC RADIATOR**

**Аннотация.** Представлен метод определения прочности жидкости на разрыв на основе измерения частоты основного тона акустического сигнала осесимметричного прямоочного гидродинамического излучателя.

**Summary.** The method of definition of durability of a liquid on break is submitted on the basis of measurement of frequency of the basic tone of an acoustic signal of axially symmetric direct-flow hydrodynamic radiator.

Эффективность подводной связи и гидролокации зависит от характеристик подводного звукового канала и параметров акустических систем связи [1, 2]. Для обеспечения бесперебойной работы преобразователи магнитострикционного и пьезоэлектрического типа должны генерировать звуковые волны в докавитационном режиме. Поэтому важной проблемой является определение порогового значения кавитации жидкости или определение прочности жидкости на разрыв.

В настоящее время для решения этой проблемы используются различные статические и динамические методы измерения порога кавитации [3 – 8]. Измерение статическими методами требует относительно больших затрат времени [6, 8], а использование динамических методов связано с трудностью выделения начальной стадии шумового сигнала кавитации при уровне порождающего его акустического поля на 2...3 порядка больше [4, 7]. Кроме того, для реализации динамических методов необходима сложная многоканальная измерительная аппаратура, что связано со статистической обработкой акустического сигнала, имеющего недетерминированную временную зависимость. Главным недостатком известных статических и динамических методов является широкий разброс измеренных значений прочности на разрыв для данной жидкости [6].

Возникает необходимость в поиске новых, более точных методов определения прочности жидкости на разрыв, среди которых перспективным является акустический метод с использованием осесимметричных гидродинамических излучателей (ГДИ) [9]. Однако такой метод в литературе не описан.

Цель данной статьи – разработка метода для определения прочности жидкости на разрыв на основе измерения частоты основного тона акустического сигнала осесимметричного прямоочного гидродинамического излучателя.

Согласно элементарной теории возникновения кавитации, каверны образуются, когда локальное давление в жидкости падает до давления насыщенного пара. Однако в действительности это явление значительно сложнее. Экспериментальные исследования показывают, что для воды и других жидкостей известны более или менее значительные отклонения, которые противоречат упомянутой теории. Определим давление насыщенного пара как равновесное давление паров жидкости при заданной температуре над *существующей* свободной поверхностью. При образовании каверны в однородной жидкости должен произойти разрыв, поэтому необходимое напряжение определяется не давлением насыщенного пара, а *прочностью жидкости на разрыв* при данной температуре [6]. Естественно, возникает вопрос о величине напряжений, которые может выдерживать жидкость при растяжении.

Ранее была определена теоретическая прочность идеальной жидкости при отсутствии в ней зародышей кавитации. Для воды теоретическая прочность на разрыв оказалась равной близко 1600 атм. Однако экспериментальные исследования показали, что максимально достигнутый кавитационный порог при специальной обработке небольшого количества воды составляет всего 280 атм. [3]. При наблюдении кавитационного процесса в натуральных или лабораторных условиях для обычной, отстоянной на протяжении недели водопроводной воды, её прочность составляет несколько атмосфер [4, 6].

Разными авторами было высказано предположение, что на кавитационную прочность жидкости существенно влияет концентрация и размеры взвешенных в жидкости включений. В естественных водоёмах такими мелкими неоднородностями являются микроорганизмы, пузырьки газов и т.д. Особенно сильно этот эффект заметен в поверхностном слое воды, где больше всего неоднородностей. В ряде экспериментальных работ было показано, что прочность жидкости снижается с ростом концентрации в ней воздуха и твёрдых примесей. С увеличением же избыточного статического давления, порог кавитации возрастает, приближаясь асимптотически к 14 атм. Необходимо также учитывать, что с течением времени меняется состав жидкой среды и это приводит к изменению акустических характеристик жидкости, в частности, порога кавитации.

Предварительные эксперименты подтвердили предположение о возможности возникновения зародышей кавитации в результате действия космического излучения. Механизм возникновения зародышей аналогичен механизму возникновения пузырьков в водородных и пропановых камерах. При экранировке сосуда, где наблюдалась кавитация, свинцом толщиной 1,5 см кавитационный порог экспоненциально во времени понижался через несколько часов на 40 – 70% от начальной величины, а после снятия экрана спустя некоторое время возвращался к первоначальному значению. В дальнейшем ряд экспериментов был проведен для определения воздействия нейтронов на порог кавитации в различных жидкостях. Эти эксперименты однозначно показали, что под действием быстрых (4...10 Мэв) нейтронов порог кавитации в воде, пентане и ацетоне понижается, причем в последних двух жидкостях – существенно [4].

Рассмотрим метод определения прочности жидкости на разрыв с помощью осесимметричного прямооточного гидродинамического излучателя.

К достоинствам осесимметричных ГДИ следует отнести отсутствие вибрирующих элементов конструкции, что обуславливает их длительный срок службы. Можно выделить два типа осесимметричных ГДИ: прямооточные, у которых струя после встречи с препятствием удаляется от сопла, и противоточные – струя разворачивается вогнутым отражателем в виде лунки, близкой по форме к параболоиду вращения, и направляется в сторону сопла, частично замыкаясь на его наружную кромку. Для противоточных ГДИ характерна относительно низкая стабильность оптимального режима генерирования звуковых колебаний. Это связано с необходимостью в процессе работы излучателя обеспечивать высокую соосность между отражателем и конусно-цилиндрическим соплом. Преимуществом прямооточного ГДИ [10] является строго заданное формирование кольцевой осесимметричной струи, что позволяет существенно повысить стабильность режима генерирования акустических волн.

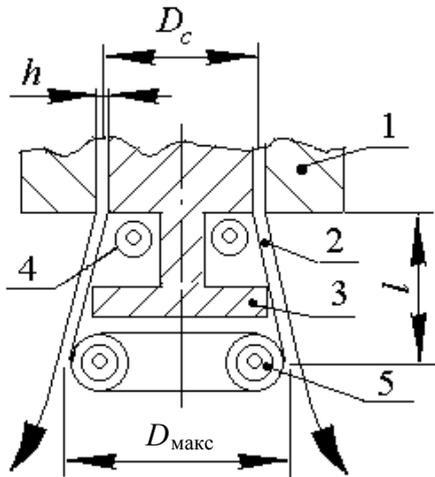


Рисунок 1 – Физическая модель осесимметричного прямооточного ГДИ

В излучателе прямооточного типа частоту основного тона акустического сигнала задаёт упругая затопленная струйная оболочка 2 (конической или цилиндрической формы), вытекающая из кольцевого сопла 1 и сформированная ступенчатым препятствием 3 (рис. 1). Источником звукообразования являются первичная 4 и вторичная 5 торидальные кавитационные области, которые периодически захлопываются и генерируют интенсивные звуковые волны.

Струйную оболочку 2 можно определить следующими геометрическими параметрами:  $D_c$ ,  $D_{\max}$ ,  $l$ ,  $h$  – диаметры оснований, длина и толщина оболочки соответственно. Экспериментальные исследования акустических характеристик прямооточных ГДИ в зависимости от геометрических параметров ступенчатого препятствия 3 подтвердили предположение о том, что струйная оболочка 2 имеет длину порядка усредненного радиуса  $R$  (т.е.  $\pi R/l \sim 1$ ) и угол между её образующей и высотой мал [11].

В соответствии с этим, в качестве базовой модели можно рассматривать динамику струйной оболочки цилиндрической формы, которая жестко закреплена на одном основании и свободна на другом [11]. Струйная оболочка деформируется под действием сил, равномерно распределенных по ее внутренней поверхности (все геометрические параметры считаются известными).

С помощью методики, описанной в работах [11, 12], аналитически получена формула для расчета частоты основной гармоники собственных колебаний, генерируемых прямооточным излучателем:

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

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $E$  – модуль упругости затопленной струйной оболочки. Средний диаметр эквивалентного цилиндра оболочки  $D_{\text{цил}} = (D_c + D_{\max})/2$ , где  $D_c$  – средний диаметр кольцевого сопла прямооточного ГДИ. Параметры  $D_{\max}$  и  $l$  можно оценить по фотографиям работающего излучателя [13].

Выразим величину  $E$  через коэффициент объемной сжимаемости жидкости [6]. Тогда, приняв за нуль коэффициент Пуассона в случае затопленной струи [11], получим:

$$E = \frac{1}{3} \cdot [\chi_1(P_k + \Delta P_{\text{ст}}) + \chi_2(P_k + \Delta P_{\text{ст}})^2 + \chi_3(P_k + \Delta P_{\text{ст}})^3], \quad (2)$$

где  $P_K$  [Па] – величина прочности жидкости на разрыв;  $\Delta P_{ст}$  [Па] – избыточное (по сравнению с атмосферным) статическое давление. Прочность жидкости на разрыв зависит от температуры, газосодержания, степени очистки жидкости и др. Коэффициент  $\chi_1$  характеризует отклонение упругих свойств жидкости от закона Гука в первом приближении и практически не изменяется в широком диапазоне температур, но зависит от концентрации включений (мелкодисперсные твёрдые частицы, микроорганизмы, пузырьки газов и т.д.). Для большинства жидкостей его значение в линейном приближении находится в диапазоне  $\chi_1 = 4 \dots 12$ . Нелинейные коэффициенты принимают значения:  $\chi_2 \gg \chi_3 \gg \chi_4 \gg \dots$ . Вопрос о нелинейных параметрах более высокого порядка эквивалентен вопросу о том, насколько реальная жидкость отвечает модели жидкости Тета [3, 6].

С учетом выражения (2), запишем формулу (1) в виде:

$$f_0^2 = \frac{12 + 0,25 \cdot (1,8751/l)^4 h^2 D_{цпл}^2}{36\pi^2 \rho D_{цпл}^2} \cdot [\chi_1 (P_K + \Delta P_{ст}) + \chi_2 (P_K + \Delta P_{ст})^2 + \chi_3 (P_K + \Delta P_{ст})^3]. \quad (3)$$

Кубическое уравнение (3) относительно  $P_K$  имеет один естественный корень и два комплексных корня, последние физического смысла не имеют. Если в выражении для естественного корня пренебречь бесконечно малыми слагаемыми, то для прямого ГДИ в общем виде получим формулу для расчета прочности жидкости на разрыв:

$$P_K = A + \Delta P_{ст} + B \cdot \sqrt{C + f_0^2}, \quad (4)$$

где  $A, B, C$  – постоянные величины.

Таким образом, для определения порогового значения кавитации необходимо принять акустический сигнал, генерируемый осесимметричным прямого ГДИ [10], работающим в оптимальном режиме, измерить наименьшую тональную частоту генерируемых волн  $f_0$ , измерить избыточное статическое давление  $\Delta P_{ст}$  на глубине зоны звукообразования излучателя и рассчитать величину  $P_K$  по формуле (4).

Для проведения экспериментальных исследований использовалась отстоянная в течение трёх недель водопроводная вода. В герметичной емкости в затопленном состоянии помещались гидродинамический излучатель и датчик звукового давления (гидрофон). Избыточное статическое давление создавалось вспомогательным насосом и регулировалось игольчатым клапаном. Температура воды в герметичной емкости поддерживалась равной 19,5 ... 20°C. За счёт регулировки скорости струи на выходе из сопла излучатель во всех измерениях настраивался на максимальный уровень акустического сигнала [14]. С помощью калиброванного гидрофона и анализатора частотного спектра измерялась частота основной гармоники  $f_0$ , уровень которой в данном случае превышал высшие гармонические составляющие спектра на 12...30 дБ. Одновременно образцовым манометром измерялось избыточное статическое давление  $\Delta P_{ст}$  на глубине зоны звукообразования излучателя. Измерения проводились многократно в течение месяца в разные дни, поэтому для каждого значения  $\Delta P_{ст}$  частота основной гармоники укладывалась в диапазоне  $f_{0\min} \dots f_{0\max}$ .

В ходе экспериментов использовался прямого ГДИ с основным типоразмером  $a/D_c = 0,5/13$  (мм/мм) [13], где  $a$  – ширина щели кольцевого сопла;  $D_c$  – средний диаметр сопла. Остальные геометрические параметры излучателя оставались постоянными и принимали оптимальные значения согласно проведенным ранее экспериментальным исследованиям [11, 13]. В этом случае геометрические размеры струйной оболочки принимают значения:  $D_{цпл} = 18 \cdot 10^{-3}$  м,  $l = 12 \cdot 10^{-3}$  м,  $h = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м, а характеристики воды:  $\rho = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $\chi_1 = 7,1$ ;  $\chi_2 = 8 \cdot 10^{-6}$ ;  $\chi_3 = 10^{-11}$  [4, 6]. Тогда, в результате решения кубического уравнения (3), для данного гидродинамического излучателя была получена следующая расчетная формула для определения прочности воды на разрыв:

$$P_K = 4,775 \cdot 10^5 + \Delta P_{ст} + 1,750 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{1,646 \cdot 10^5 + f_0^2}. \quad (5)$$

В формуле (5)  $P_K$  [Па],  $\Delta P_{ст}$  [Па],  $f_0$  [Гц], а числовые множители также имеют соответствующие размерности. Если использовать излучатель с другими параметрами струйной оболочки ( $D_{цпл}$ ,  $l$ ,  $h$ ), или другую жидкость с соответствующими гидродинамическими характеристиками ( $\rho$ ,  $\chi_i$ ), то решив уравнение (3), можно получить другие численные множители для формулы (4).

Результаты экспериментальных исследований и рассчитанные по формуле (5) значения прочности дегазированной воды на разрыв представлены в табл. 1. Здесь же для сравнения приведены экспериментальные усредненные данные Блейка, полученные им на частоте 60 кГц в фокусе сферического отражателя электроакустического излучателя [4].

Таблица 1 – Зависимость прочности жидкости на разрыв от избыточного статического давления для дегазированной воды

Избыточное статическое давление, $\Delta P_{cm}$ [МПа]	Частота основной гармоника, $f_{0min} \dots f_{0max}$ [Гц]	Рассчитанные по формуле (5) значения $P_K$ [МПа]	Экспериментальные усредненные данные Блейка значений $P_K$ [МПа]
0,003	830...880	0,488...0,523	0,525
0,010	860...900	0,502...0,531	0,540
0,020	875...1015	0,529...0,600	0,595
0,045	1030...1065	0,585...0,615	0,625
0,080	1250...1280	0,695...0,714	0,735
0,100	1343...1370	0,734...0,750	0,765
0,142	1615...1640	0,856...0,870	0,865
0,165	1738...1760	0,904...0,916	0,900
0,200	1804...1820	0,906...0,915	0,910
0,240	1995...2010	0,971...0,979	0,965
0,300	2163...2200	1,001...1,020	1,010
0,350	2380...2430	1,063...1,088	1,065
0,400	2580...2700	1,113...1,158	1,095
0,450	2700...2755	1,122...1,149	1,115
0,500	2900...3000	1,168...1,215	1,155

Как видно из табл. 1, сравнение рассчитанных по формуле (5) значений прочности воды на разрыв с экспериментальными результатами Блейка показывает, что погрешность разработанного метода не превышает 5%. С возрастанием избыточного статического давления кавитационный порог воды приближается к 1,4 МПа, что соответствует динамическим испытаниям, выполненным Дэвисом с помощью двух разных методов [6].

В заключение отметим следующее. Предложен метод определения прочности жидкости на разрыв с помощью осесимметричного прямоочного гидродинамического излучателя. Соответственно разработанной ранее математической модели собственных колебаний затопленной струйной оболочки получена расчетная формула для определения кавитационного порога воды. Сравнение числовых расчетов с результатами эксперимента позволяет сделать вывод о существенном повышении точности определения прочности воды на разрыв.

### Литература

1. Митько В.Б., Евтютов А.П., Гуцин С.Е. Гидроакустические средства связи и наблюдения. – Л.: Судостроение, 1982. – 200 с.
2. Урик Роберт Дж. Основы гидроакустики; пер. с англ. – Л.: Судостроение, 1978. – 448 с.
3. Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1951.– 200с.
4. Зарембо Л.К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику.– М.: Наука, 1966. – 520с.
5. Сиротюк М.Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации // В кн. Мощные ультразвуковые поля; под ред. Л. Д. Розенберга.– М.: Наука, 1968.– С. 167 – 220.
6. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. – М.: Мир. – 1974. – 688 с.
7. Барабанов Ю.М. та ін. Спосіб діагностики технологічних процесів в суперкавітаційних апаратах / Патент України № 3053, МПК G01N29/02, 1994 // Бюл. № 5-1.
8. Подживотов В.П. и др. Способ определения объемной прочности жидкости / Патент России № 95104654, МПК G01N11/00, 1997.
9. Дудзинский Ю.М., Сухарьков О.В. Сенсор порога кавитации жидкости // Труды пятой международной научно-практической конференции "Современные информационные и электронные технологии". – Одесса, 2004. – С. 244.
10. Кортнев А.В., Назаренко А.Ф., Сухарьков О.В. Гидродинамическая излучающая система / Авторское свидетельство СССР № 806153, МПК В06В 1/20, 1981 // Бюл. №7.
11. Сухарьков О.В. Экспериментальное исследование акустических характеристик осесимметричных прямоочных гидродинамических излучателей // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2006. – №1. – С.74 – 79.
12. 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.
13. Сухарьков О.В. Акустические характеристики осесимметричных прямоочных гидродинамических излучателей // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2005. – №2. – С.60 – 65.

14. Сухарьков О.В. Влияние скорости струи на акустические характеристики осесимметричного гидродинамического излучателя // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2006. – №2. – С. 78 – 84.