

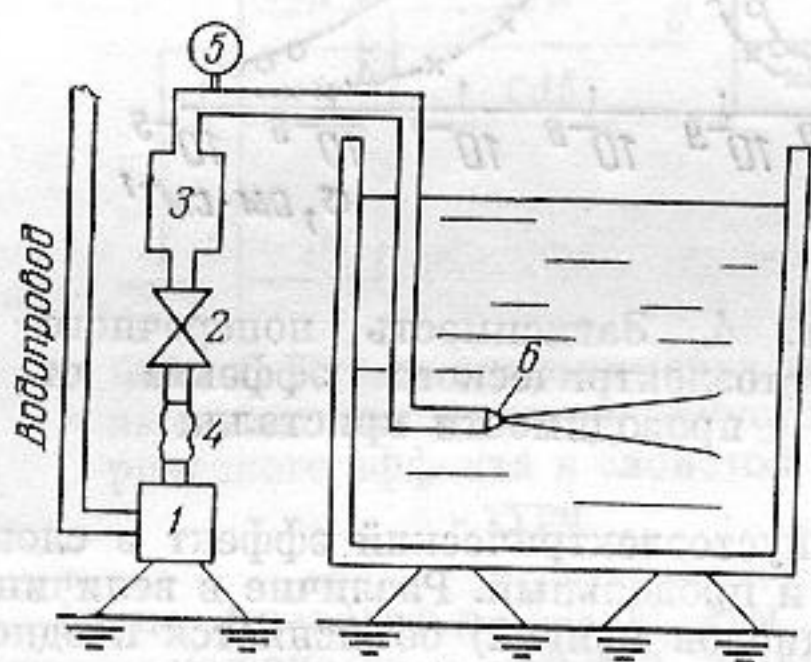
## О ШУМАХ КАВИТАЦИИ В ЗАТОПЛЕННЫХ СТРУЯХ

И. В. Есинов, К. А. Наугольных

Цель работы — экспериментальное изучение акустических характеристик шума кавитирующих затопленных струй.

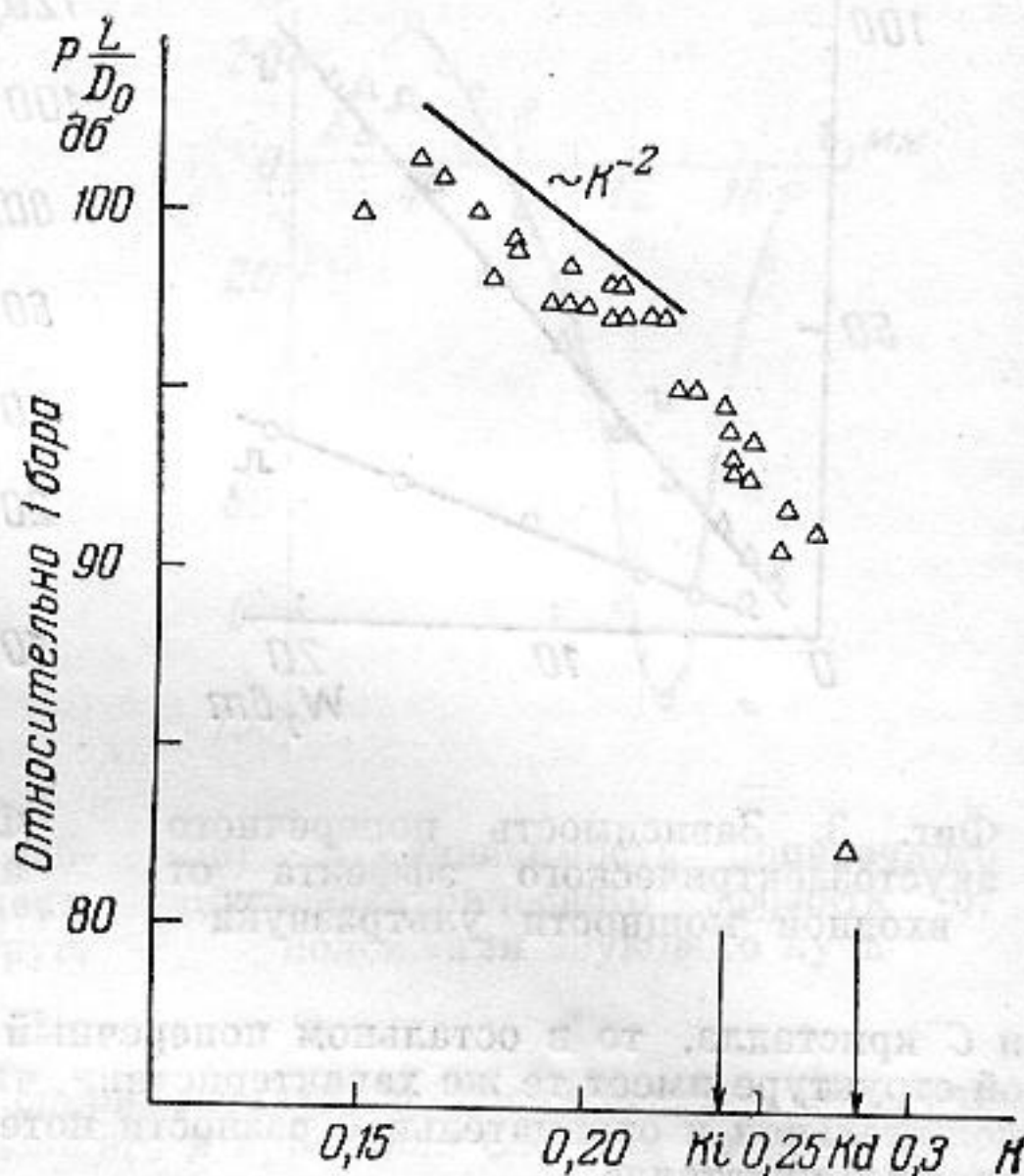
При достаточно высоких скоростях движения в турбулентных пограничных слоях или спутных следах обтекаемых тел возникает кавитация. Возникновение кавитации сопровождается интенсивным излучением шума, существенно превышающим по уровню гидродинамические шумы [1].

Акустические свойства кавитации исследовались в разных гидродинамических ситуациях [2, 3]. Однако сведения о шумах кавитации в турбулизированных потоках представляются весьма ограниченными. Так, из результатов работы [4] известно, что



Фиг. 1

Фиг. 1. Схема установки: 1 — нагнетающей насос, 2 — вентиль-регулятор давления, 3 — бак-успокоитель, 4 — трубопровод с резиновой развязкой, 5 — измерительный манометр, 6 — профилированное сопло



Фиг. 2

Фиг. 2. Зависимость нормированного уровня излучения кавитационного шума  $pL/D_0$  от числа кавитации

спектр шума кавитирующих затопленных струй имеет максимум на частоте  $\sim 1$  кгц со спадом к низким и высоким частотам вплоть до 60 кгц. Вместе с этим в других гидродинамических условиях при исследовании шума в диапазоне частот до 1 Мгц отмечалось наличие в спектре горизонтального участка [2].

Настоящая работа посвящена дальнейшему изучению интегральных и спектральных особенностей шума кавитации в турбулизированных потоках в широком диапазоне частот.

С этой целью была создана установка (фиг. 1) для получения высокоскоростных кавитирующих струй, истекающих в акустически заглушенный бассейн.

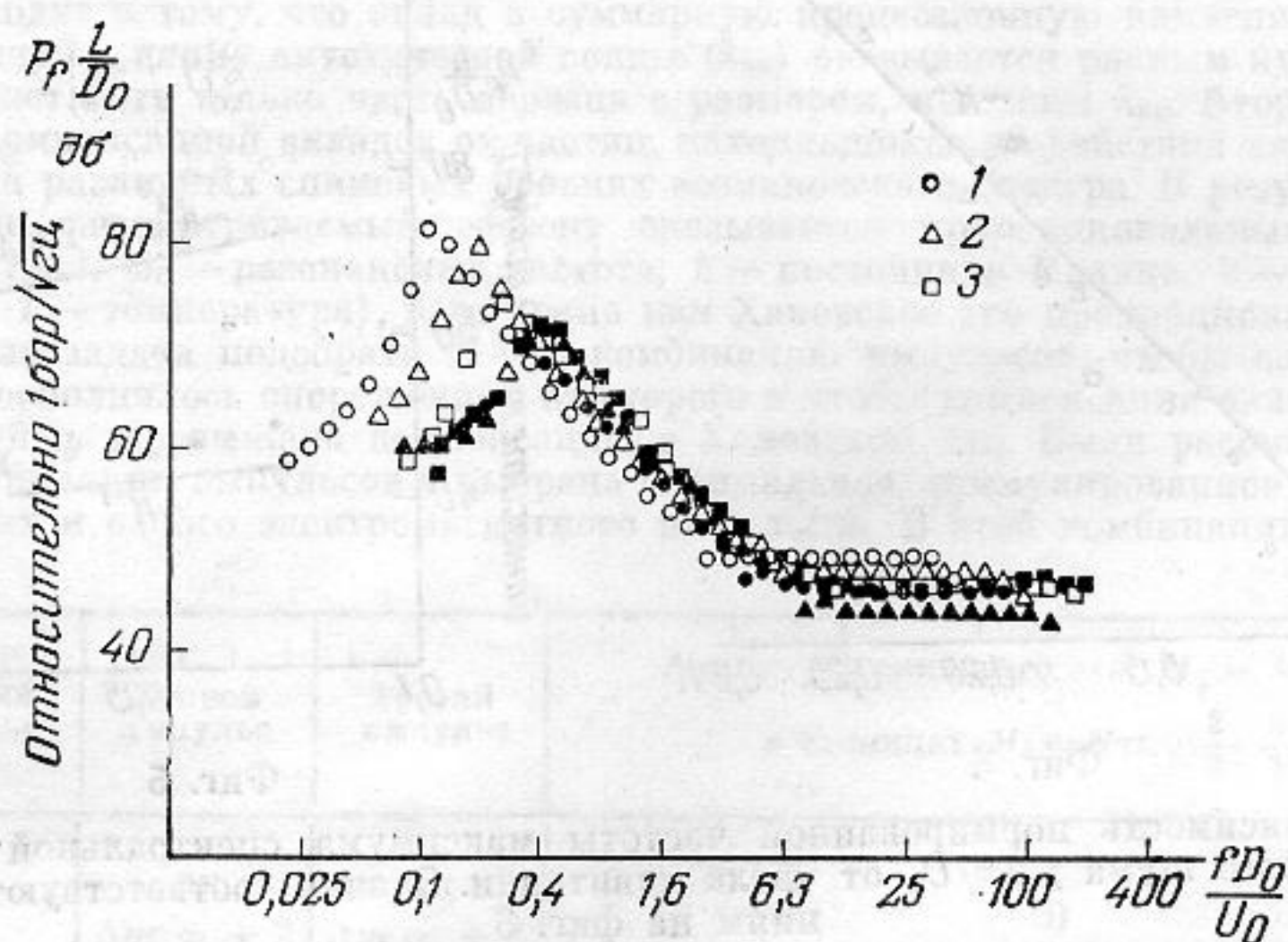
Нагнетающий насос создает давление в системе свыше 10 атм, вентиль-регулятор давления позволяет плавно изменять давление в системе, контролируемое образцовым манометром. Внутренний диаметр трубопровода  $D_1=104$  мм. Сопло выполнено из оргстекла и имеет профиль поджатия потока для снижения турбулизации истекающей струи. Профиль описывается выражением  $D/D_0=1+0,0073(2x/D_0)^3$ , где  $D/2$  — удаление стенки сопла от оси на расстоянии  $x$  от среза сопла. Опыты проводились с соплами, имеющими размер выходного отверстия  $D_0=0,5; 1; 1,5$  см. Величина поджатия потока  $D_1/D_0$  в этих случаях имела значение 20,8; 10,4; 7.

Профилированное сопло было погружено под поверхность воды в бассейне на глубину 3 м и располагалась не ближе чем в 3 м от стенок бассейна. Ось струи была направлена горизонтально. Измерения проводились при помощи звукоприемника, расположенного в плоскости среза сопла на расстоянии  $L=25 D_0$ . Так как звукопри-



емник располагался на расстоянии от струи существенно меньшем, чем расстояние до ближайшей стенки бассейна, то акустические измерения на частотах выше 500 гц можно было считать корректными, поскольку уровень шума, непосредственно создаваемый струей в точке расположения звукоприемника, был существенно выше уровня отражений от стенок бассейна. Характеристики звукоприемника позволяли проводить исследования на частотах до 500 кгц.

Результаты измерения акустических характеристик кавитационного шума представлены в зависимости от числа кавитации  $k = (P_0 - P_v) / \frac{1}{2} \rho U_0^2 \approx P_0 / \frac{1}{2} \rho U^2$ , где  $P_0$  — гидростатическое давление,  $P_v$  — давление паров насыщения,  $\rho$  и  $U_0$  — плотность и скорость истекающей воды.



Фиг. 3. Нормированный спектр кавитационного шума струй разного диаметра  $D_0$  при разных числах кавитации  $k$ : 1 —  $D_0 = 0,5$  см,  $k = 0,122$ ; 2 —  $D_0 = 1$  см,  $k = 0,137$ ; 3 —  $D_0 = 1,5$  см,  $k = 0,163$ ; зачерненные значки  $k = 0,18$

Заметим, что определяющее процесс кавитации пульсационное давление  $p'$  зависит от скорости течения и может быть определено по формуле [5]  $(\bar{p}')^{1/2} = 0,7 \rho u^2 = 0,7 \varepsilon^2 \rho U_0^2$ , где  $\varepsilon = u/U_0$  — степень турбулизации потока,  $u$  — среднеквадратичное значение пульсационной скорости. Для зоны смешения струи, где происходит кавитация величины  $\varepsilon$  принимает значения  $0,2 \div 0,25$  [6]. Поэтому число кавитации для турбулизованных потоков характеризует отношение гидростатического и пульсационного давления  $k = 1,4 \varepsilon^2 P_0 / (\bar{p}')^{1/2}$ . Число кавитации  $k$  в наших экспериментах изменялось с изменением скорости струи  $U_0$ .

Так как входное сопло имело большое поджатие, то скорости движения воды по трубопроводу были не велики и гидродинамический напор на срезе сопла определяется давлением, зарегистрированным манометром, т. е.  $P = \frac{1}{2} \rho_0 U_0^2$ . В связи с этим число кавитации было  $k = P_0 / P$ . Так, числу кавитации  $k = 0,16$  соответствовала скорость истечения струи  $U_0 = 40$  м/сек.

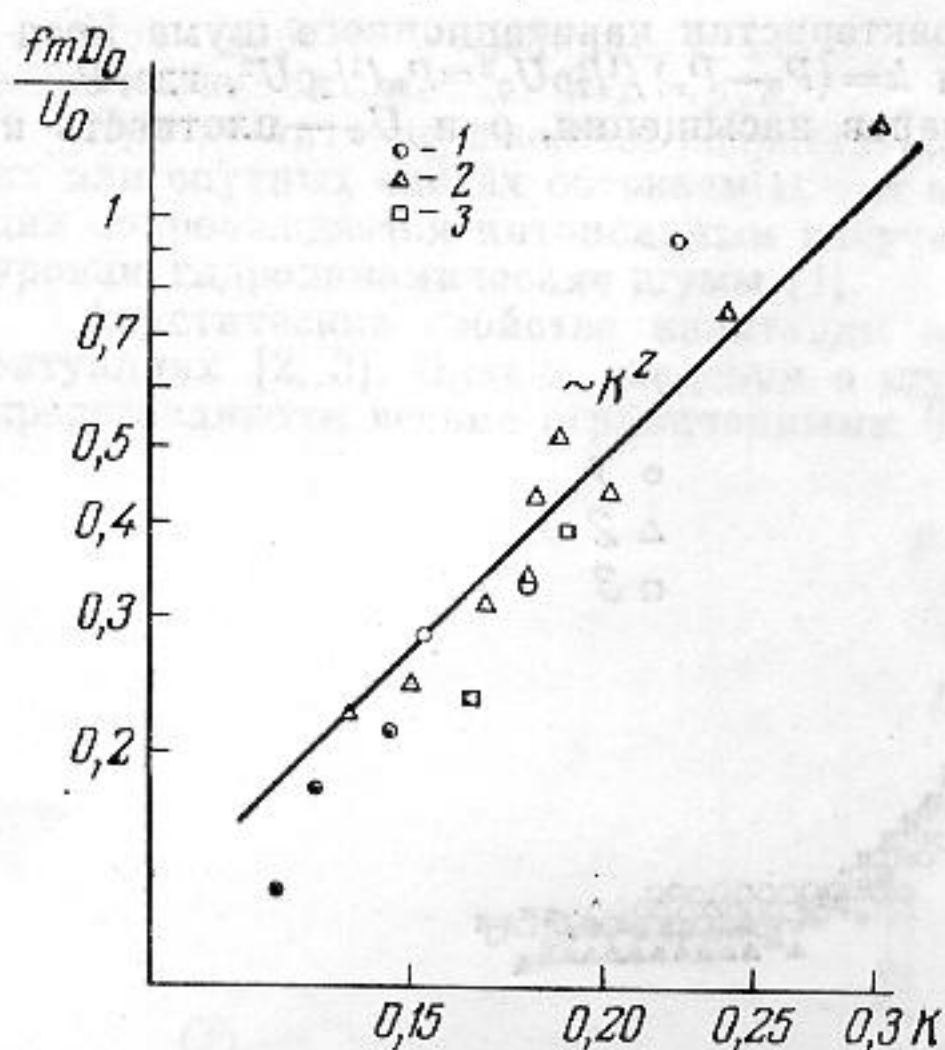
На фиг. 2 представлены результаты измерения интегрального уровня кавитационного шума  $p$  в функции  $k$ . Значения звукового давления в децибелах относительно 1 бара приведены к расстоянию  $D_0$  от оси струи. Видно, что на начальной стадии кавитации уровень шума резко возрастает, что отражает пороговый характер явления. На более развитой стадии зависимость  $p$  от числа кавитации  $k$  можно аппроксимировать соотношением  $p \sim k^{-2}$ . Стрелками ориентировочно показаны числа кавитации, соответствующие появлению ( $k_i$ ) и исчезновению ( $k_d$ ) характерного шума.

Следует отметить, что уровень кавитационного шума существенно превышает уровень шумов не кавитационного происхождения.

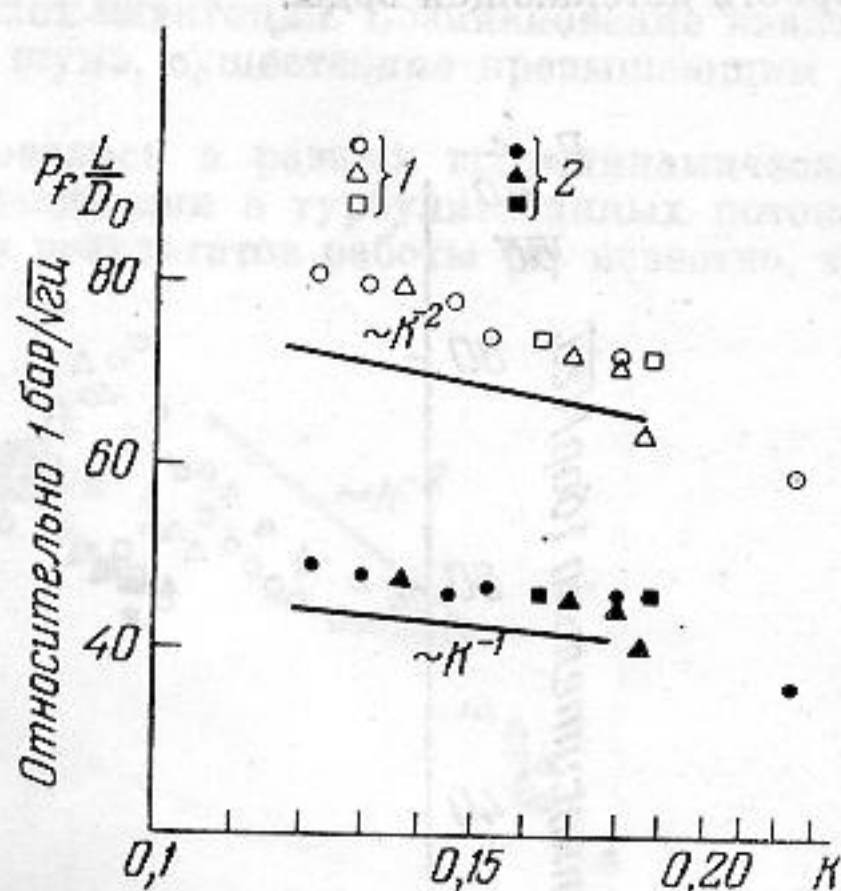
На фиг. 3 приведены результаты спектрального анализа кавитационных шумов. Можно выделить две главные особенности в спектре анализируемого шума — это характерный максимум на частоте  $f = f_m$ , лежащий в диапазоне единиц килогерц и горизонтальный участок в области высоких частот (выше 30 кгц). В переходной области спектра наклон кривой близок к зависимости  $p_f \sim f^{-1}$  и не зависит от числа кавитации. В то же время в низкочастотной части спектра ( $f < f_m$ ) наклон существенно увеличивается с уменьшением  $k$ . Для совпадающих чисел кавитации в данных координатах спектр шума представляется универсальным (черные значки). С изменением числа кавитации максимум в спектре смещается.



Изменение частоты максимума спектральной плотности звукового давления представлено на фиг. 4. Видно, что  $f_m$  быстро возрастает с ростом  $k$  ( $\sim k^2$ ). На фиг. 5 показаны зависимости уровня спектральной мощности звукового давления в области максимума и на горизонтальном участке спектра шума. Если спектральная плотность в высокочастотной части спектра меняется  $\sim k^{-1}$ , то максимум спектральной плотности меняется быстрее ( $\sim k^{-2}$ ).



Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 4. Зависимость нормированной частоты максимума спектральной плотности кавитационного шума  $f_m D_0 / U_0$  от числа кавитации. Значки соответствуют обозначениям на фиг. 3

Фиг. 5. Зависимость нормированных уровней спектральной плотности  $p_f L / D_0$  разных участков спектра кавитационного шума от числа кавитации. 1 —  $f = f_m$  — частота максимума спектральной плотности; 2 —  $f = 200$  кГц — горизонтальный участок спектра

Из приведенных результатов исследования акустических характеристик шумов кавитирующих затопленных струй следует, что интенсивность кавитационного шума быстро возрастает с развитием кавитации.

Спектральные особенности кавитационных шумов, измеренные в диапазоне частот до 500 кГц, говорят о сложном характере пульсаций полостей в зоне кавитации. Так, слабо пульсирующие полости, что соответствует, например, газовой форме кавитации, излучают сигнал с относительно узким спектром [7], чем можно объяснить характерный спектральный максимум.

Резко захлопывающиеся, заполненные преимущественно паром, полости излучают короткие импульсы, спектр которых может простирается до чрезвычайно высоких частот [8].

Анализируя результаты, приведенные на фиг. 3, 5, можно сделать заключение, что спектр шума с развитием кавитации как бы сужается, т. е. относительный вклад слабо пульсирующих пузырьков в излучение звука возрастает.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Я. Миниович, А. Д. Перник, В. С. Петровский. Гидродинамические источники звука. Л., «Судостроение», 1972.
2. R. H. Mellen. Ultrasonic Spectrum of Cavitation Noise in Water. J. Acoust. Soc. America, 1954, 26, 3, 356–360.
3. В. П. Ильин, В. П. Морозов. Экспериментальное определение отношения энергии кавитационного шума к энергии пузырьков. Акуст. ж., 1974, 20, 3, 409–413.
4. D. W. Jorgensen. Noise from Cavitating Submerged Water Jets. J. Acoust. Soc. America, 1961, 33, 10, 1334–1338.
5. И. О. Хинце. Турбулентность. М., Физматгиз, 1963.
6. Л. А. Вулс, В. П. Кашкаров. Теория струй вязкой жидкости. М., «Наука», 1965.
7. M. Strassberg. Gas Bubbles as Sources of Sound in Liquids. J. Acoust. Soc. America, 1956, 28, 1, 20–26.
8. M. Harrison. An Experimental Study of Single Bubble Cavitation. J. Acoust. Soc. America, 1952, 24, 6, 776–782.

Акустический институт  
Академии наук СССР

Поступила  
22 июля 1974 г.