

Графическая зависимость  $\omega_r$  от  $h_a$  показана на рис. 2 кривой 2. Она также имеет максимум при  $h_a = h_a^*$ , следовательно, при выборе расстройки  $h_a$ , равной  $h_a^*$ , повышается стабильность как частоты, так и амплитуды автоколебаний.

**Эксперимент.** Для проверки вывода теоретической части были произведены измерения при работе струнного генератора на третьей гармонике струны (частота 1070 Гц). Струна длиной 390 мм была изготовлена из стальной проволоки круглого сечения диаметром 0,6 мм. Добротность струны оказалась равной  $3350 \pm 150$ , добротность дополнительного колебательного контура  $34 \pm 2$ .

Результаты экспериментальной проверки зависимости амплитуды колебаний струны и частоты генерации от расстройки  $h_a$  подтвердили теоретический расчет.

Относительная нестабильность частоты генерации  $\frac{|\Delta f|}{f_r}$  и нестабильность амплитуды колебаний струнного генератора измерялись при расстройках  $h_{a1} = h_a^* = -0,8 \cdot 10^{-2}$  и двух значениях  $h_a \neq h_a^*$ .

Результаты эксперимента приведены в таблице, а также представлены на рис. 3, где  $\frac{\Delta f_{\max}}{f_r}$  — максимальный относительный уход частоты,  $D$  — дисперсия,  $\frac{\Delta U}{U}$  — относительное отклонение амплитуды колебаний.

$h_a$	$\frac{ \Delta f }{f_r}$	$\frac{\Delta f_{\max}}{f_r}$	$D$
$-0,8 \cdot 10^{-2}$	$0,42 \cdot 10^{-4}$	$0,93 \cdot 10^{-4}$	0,0116
$-0,05 \cdot 10^{-2}$	$0,61 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-4}$	0,0129
$+0,55 \cdot 10^{-2}$	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	0,0267

Из данных таблицы и рис. 3 можно сделать вывод, что относительная нестабильность частоты и амплитуды колебаний струнного генератора минимальна, если генерация осуществляется при расстройках, соответствующих максимуму частоты генерации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлов В. П., Карагюз О. В., Кочерян Э. Г. «ВНИИОФИ. Научные труды», сер. Б, вып. 1, стр. 53, 1971.
2. Брызжев Л. Д. «Измерительная техника», № 6, 21, 1955.
3. Пивоваров Ю. И., Цодиков Ю. М. «Автоматика и телемеханика», 22, № 4, 539, 1961.
4. Оман Д. Цифровое телеизмерительное устройство с вибротронами. В сб.: «Управление и измерение на расстоянии». М., 1959.
5. Солин Н. Н. «Изв. вузов», радиофизика, 14, 100, 1971.
6. Малахов А. Н. Флуктуации в автоколебательных системах. М., 1968.

Поступила в редакцию  
29.5 1974 г.

Кафедра  
общей физики для мехмата  
УДК 534.231 : 532.528

И. Б. ЕСИПОВ, Е. Ф. КОЗЯЕВ

### О СПЕКТРЕ ШУМА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ В ПРИСУТСТВИИ ГАРМОНИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО ПОЛЯ

В настоящей работе проведен эксперимент по выявлению влияния гармонического звукового поля на спектр шума кавитирующей затопленной струи. Исследования были проведены в бассейне на установке «Кавитирующая затопленная струя» (КЗС). Блок-схема установки представлена на рис. 1. 1 — нагнетающий насос, 2 — вентилятор регулятора давления, 3 — бак-успокоитель, 4 — трубопровод с резиновой развязкой, 5 — измерительный манометр, 6 — профилированное сопло, 7 — излучатель звука

цилиндрической формы, 8 — звуковой генератор, 9 — широкополосный гидрофон, 10 — широкополосный усилитель; 11 — анализатор спектра, 12 — самописец уровней.

Резиновая развязка служит для снижения механических колебаний системы, вызванных работающим насосом. Вентиль регулятора давления позволяет плавно менять давление в системе, которое контролируется образцовым манометром (5). Турбулизованная вентилем (2) вода успокаивается в баке (3). Размер бака  $50 \times 100 \text{ см}^2$ . Внутренний диаметр соединительных труб 104 мм. Сопло выполнено из оргстекла и имеет профиль поджатия, описываемый выражением  $d/d_0 = 1 + 0,0073 (2x/d_0)^3$ ;  $d$  — удаление стенки сопла от оси на расстоянии  $x$  от среза сопла. Профилированное сопло погружено под поверхность воды в бассейне на глубину 3 м и расположено не ближе, чем в трех метрах от ближайшей поверхности бассейна. Ось струи направлена горизонтально. Выходной диаметр сопла  $d_0 = 2,5 \text{ см}$ . Стенки бассейна покрыты звукопоглощающим материалом. Излучатель звука цилиндрической формы размерами  $20 \times 15 \text{ см}^2$  был насажен на подводящую трубу так, что ось струи и ось излучателя совпадали.

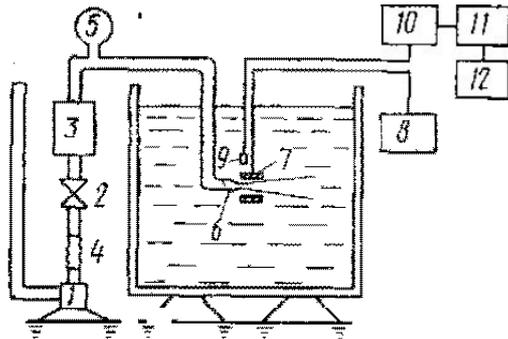


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

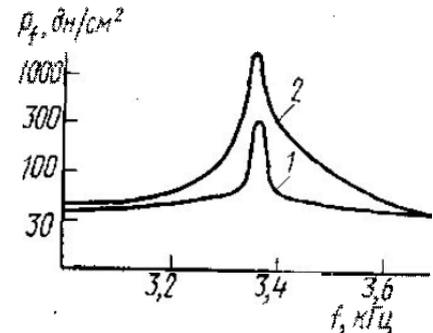


Рис. 2. Спектр кавитационного шума для различных уровней звукового поля: 1 —  $p_0 = 330$  и 2 —  $p_0 = 2 \cdot 10^3 \text{ дн/см}^2$

Известно, что по достижении определенной скорости истечения струи возникает гидродинамическая кавитация. В спектре кавитационного шума имеется заметный максимум [1]. Частота, на которую приходится максимум в спектре шума, зависит от скорости истечения струи, с увеличением скорости максимум смещается в область более низких частот. Наличие корпуса излучателя приводило к незначительным изменениям в спектре шума, влиянием которых в условиях данного эксперимента можно было пренебречь. Спектральный уровень помех был приблизительно на 30—40 дБ ниже спектрального уровня кавитационного шума.

На рис. 2 приведены результаты спектрального анализа кавитационного шума в полосе  $\Delta f = 6 \text{ Гц}$  в присутствии гармонического звукового поля частоты  $f_0 = 3,36 \text{ кГц}$ . Полученные результаты соответствуют измеренным на расстоянии 25 см от оси струи значениям уровня звукового поля. В условиях эксперимента значение уровня кавитационного шума в полосе  $\Delta f = 6 \text{ Гц}$  в окрестности частоты в отсутствие гармонического звукового поля было приблизительно постоянным и равно  $p_f = 30 \text{ дн/см}^2$ . Интересно отметить, что уровень гармонического звукового поля приблизительно на 3 дБ ниже при кавитационном течении струи, чем при некавитационном при одном и том же напряжении на излучателе. Скорость кавитационного течения струи была равна  $v = 20 \text{ м/с}$ .

Как видно из рис. 2, спектр кавитационного шума не является простой суперпозицией спектра шума струи и спектра звукового поля.

Отличие заключается в том, что в окрестности частоты  $f_0$  спектральный уровень кавитационного шума увеличивается с увеличением уровня звукового поля. Вместе с этим увеличивается и расстройка, т. е. диапазон частот, в котором спектральный уровень превышает заданную величину.

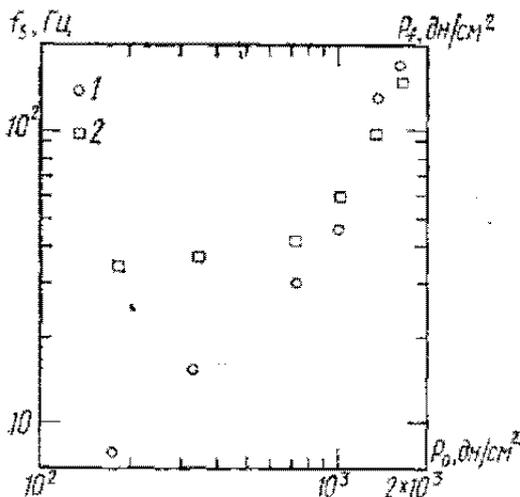


Рис. 3. 1 — зависимость  $f_s$  от уровня звукового поля  $p_0$  при постоянном  $p_f = 100 \text{ дн/см}^2$ , 2 — зависимость  $p_f$  от уровня звукового поля  $p_0$  при постоянном значении  $f_s = 100 \text{ Гц}$

На рис. 3 представлена зависимость частоты расстройки  $t_s = |f_0 - f|$  от  $p_0$  (уровня гармонического звукового поля  $p_0$ ) для постоянного значения  $p_f = 100$  дн/см<sup>2</sup>. Как следует из рис. 3, при достаточно умеренных уровнях звукового поля  $p_0 \leq 1000$  дн/см<sup>2</sup>  $f_s \sim p_0$ , при больших уровнях звукового поля намечается тенденция к более сильной зависимости  $f_s$  от  $p_0$ . На рис. 3 приведены также результаты измерений  $p_f$  в зависимости от  $p_0$  для постоянного значения расстройки  $f_s = 100$  Гц. Из рис. 3 видно, что  $p_f$  так же быстро возрастает с увеличением  $p_0$  при  $p_0 \geq 1000$  дн/см<sup>2</sup>. Эффект изменения спектрального уровня кавитационного шума в присутствии гармонического звукового поля можно объяснить исходя из следующих представлений.

В кавитирующей затопленной струе имеется множество пузырьков различного размера. Спектральные и интегральные характеристики кавитационного шума определяются излучением звука этими пузырьками, совершающими объемные пульсации. С включением внешнего гармонического звукового поля пузырьки помимо колебаний, вызванных гидродинамическими силами, начинают совершать вынужденные пульсации на частоте  $f_0$ . Однако в силу сноса пузырьков потоком жидкости мимо излучателя возбуждение пузырьков является процессом нестационарным, что приводит к возбуждению затухающих пульсаций на собственной частоте. Спектр таких пульсаций описывается выражением [2]

$$|p_f|^2 = |p_m|^2 \frac{f^2 + \eta^2 f_0^2 / 4}{[(1 + \eta^2 / 4) f_0^2 - f^2]^2 + \eta^2 f_0^2 f^2},$$

где  $\eta$  — коэффициент затухания,  $p_m$  — максимальная амплитуда пульсаций. Величина  $p_m$  определяется резонансной характеристикой пульсаций пузыря.

Из выражения видно, что с включением гармонического поля спектральная плотность кавитационного шума будет увеличиваться на собственных частотах пузырьков. В силу указанного замечания относительно величины  $p_m$ , это увеличение будет тем выше, чем ближе собственная частота колебаний пузырьков соответствует частоте вынуждающего поля.

Таким образом, в данной интерпретации эффект увеличения спектральной плотности кавитационного шума можно наблюдать в присутствии внешнего гармонического поля частоты  $f_0$ , если эта частота совпадает с собственной частотой имеющихся в потоке пузырьков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Есипов И. Б., Наугольных К. А. «Акустический журнал», (в печати).
2. Strassberg M. JASA, 28, No. 1, 1956.

Поступила в редакцию  
17.11 1975 г.

Кафедра  
акустики

УДК 551.465

Н. К. ШЕЛКОВНИКОВ

## О ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЕ ТЕРМОКЛИНА В ПРИБРЕЖНОЙ ЧАСТИ МОРЯ

Наличие температурной стратификации оказывает существенное влияние на многие физические, химические и биологические процессы, происходящие в деятельном слое моря. Поэтому очень важно знать толщину верхнего изотермического слоя, нижняя граница которого совпадает с верхней границей «слоя скачка» или термоклина. Исследованию нижней границы изотермического слоя или положению термоклина посвящено большое число работ (см., например, [1]).

Насколько можно судить, в большей степени исследована вертикальная структура термоклина в фиксированной точке моря [2, 3]. В результате этих исследований уже установлены некоторые закономерности в его суточном и сезонном ходе.

Однако для более полного понимания закономерностей зарождения и развития термоклина необходимо знать не только его временную изменчивость в фиксированной точке, но и пространственную. Некоторые данные о пространственной изменчивости положения термоклина приведены в [4]. Здесь по данным одного из океанологических разрезов американской экспедиции NORPAC рассчитано широтное изменение толщины однородного слоя скачка. Согласно [4] широтное изменение толщины верхнего изотермического слоя и глубина ядра слоя скачка часто соответствуют друг другу. При изменении широты с  $\sim 24$  до  $\sim 45^\circ$  толщина однородного слоя уменьши-