АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 36 1990 Вып. 5

УДК 534.222

© 1990 г.

Д. А. Дудкин, О. В. Руденко, К. Л. Хирных

СИГНАЛ РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ В РЕЗОНАНСНЫХ ЗВУКОПОГЛОТИТЕЛЯХ

Обнаружено явление генерации сигнала разностной частоты, обусловленной квадратичной нелинейностью и возникающей при воздействии на резонансный звукопоглотитель интенсивной бигармонической волны. Предложено качественное объяснение, построена теория явления, проведена оценка нелинейного параметра по данным измерений.

Резонансные звукопоглотители (РЗП) [1] широко используются для снижения уровня шума. В последние годы наибольший интерес привлекают режимы работы РЗП при больших интенсивностях звука, когда существенны нелинейные эффекты. Было замечено (см., например, [2–4]), что активная часть R импеданса возрастает с увеличением звукового давления; мнимая часть Y, напротив, начинает снижаться. Эти явления приводят к амплитудной зависимости коэффициента звукопоглощения K и резонансной частоты ω_0 РЗП. Ясно, что понимание физики нелинейных процессов в РЗП, а также измерения их нелинейных характеристик необходимы для успешного использования РЗП на практике.

В работе [5] построена нелинейная модель резонатора Гельмгольца, работающего как поглотитель звука. Отмечено, что наряду с кубично-нелинейными эффектами, приводящими к амплитудной зависимости импедансов и генерации нечетных гармоник, в реальных системах должны проявляться квадратично-нелинейные эффекты. Такие явления, как генерация второй гармоники или разностной частоты, связаны с несимметрией гидродинамических характеристик потока в горле резонатора (в отверстии). Впервые на возможность генерации второй гармоники в РЗП указано в работе [2].

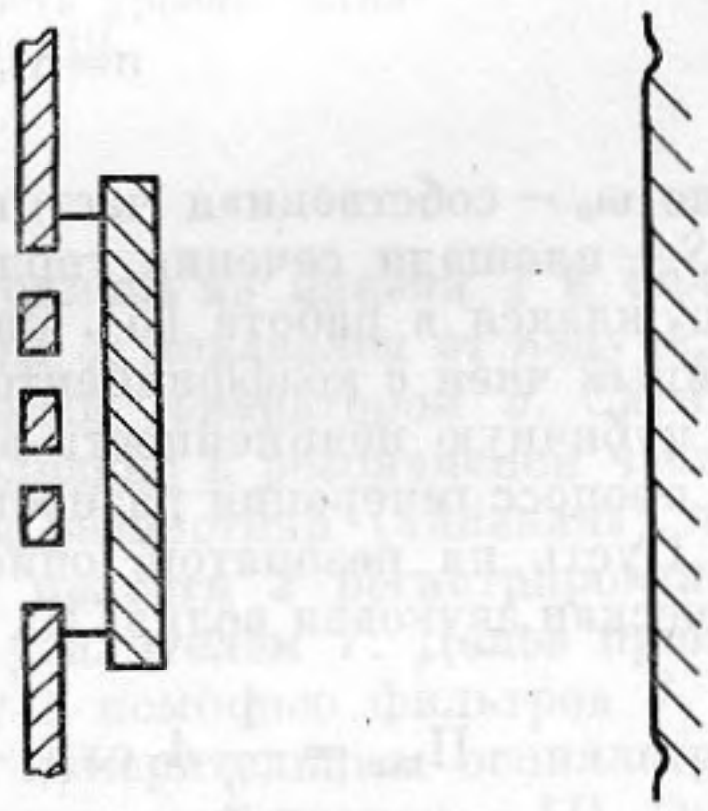

Рис. 1. Схематический чертеж одной ячейки зонального РЗП с дифракционным экраном

Ниже приведен расчет и результаты измерений сигнала разностной частоты, рождающегося на квадратичной нелинейности РЗП с дифракционным экраном. Схема одной ячейки такого РЗП, описанного в работе [6], представлена на рис. 1.

Наличие экрана позволяет увеличить присоединенную массу (за счет колеблющегося вблизи экрана воздуха) и тем самым снизить ω_0 при заданном расстоянии между передней панелью и задней стенкой РЗП. В данной конструкции можно ожидать проявления квадратично-нелинейных эффектов в связи с выраженной несимметричностью присоединенной массы и сопротивления относительно направления потока в отверстии. Так, в работе [7] замечено, что при высоких уровнях звука прохождение его через отверстие приводит к формированию гидродинамической струи. В исследуемом РЗП струя взаимодействует с препятствием лишь когда поток направлен к экрану; это приводит к указанной асимметрии и появлению связанной с ней квадратичной нелинейности.

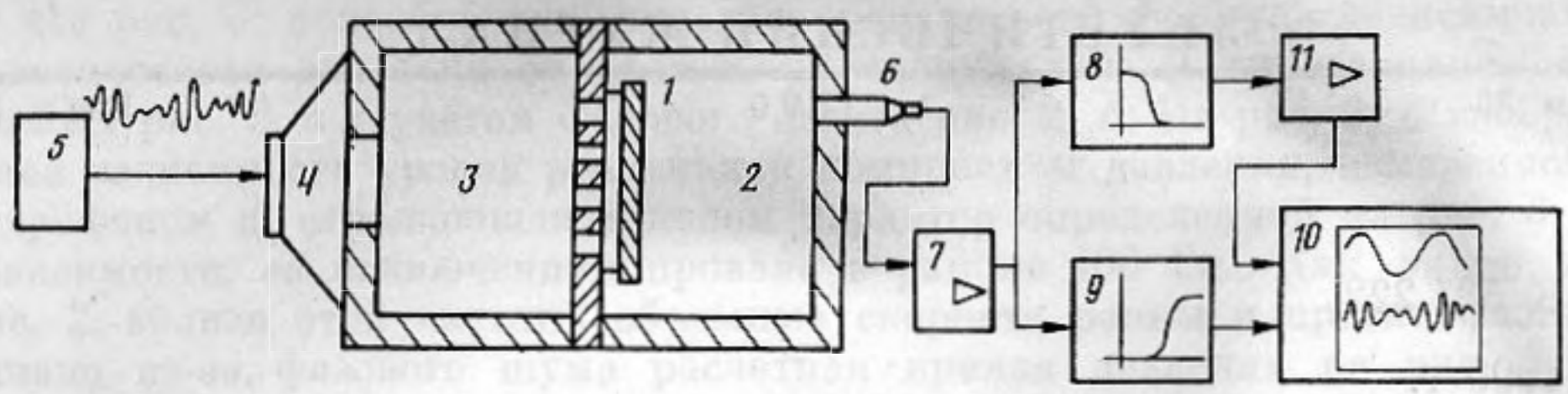

Рис. 2. Схема экспериментальной установки. *1* – передняя панель РЗП (вместе с экраном), *2* – полость РЗП, *3* – рабочая камера, *4* – излучатель, *5* – генератор бигармонического сигнала, *6* – микрофон, *7* и *11* – усилители, *8* – фильтр НЧ, *9* – фильтр ВЧ, *10* – двухканальный осциллограф

Для расчета воспользуемся нелинейной моделью [5]

$$\frac{d^2\Pi}{dt^2}+\Omega_0^2\Pi+2(\sigma+\alpha)\frac{d\Pi}{dT}+2\beta\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{d}{dT}\int\limits_{-\infty}^{T}\frac{d\Pi}{dT'}\frac{dT'}{\sqrt{T-T'}}+$$

$$+\Gamma_1\Pi\frac{d\Pi}{dT}=4\frac{d}{dT}\Pi_{\text{пад}}. \qquad (1)$$

Здесь введена переменная $\Pi=U/c_0$, где U – средняя скорость течения в горле, c_0 – скорость звука. Смысл остальных обозначений:

$$\Omega_0=\omega_0\tau,\quad \tau=\frac{2L}{c_0},\quad \alpha=\nu a_2 n\frac{L}{c_0},\quad \beta^2=\frac{\nu\tau}{8a_1^2},$$

$$\sigma=S_{\text{отв}}/S,\quad \Gamma_1=c_0\tau\gamma_1,\quad T=t/\tau$$

(где ω_0 – собственная частота, L – эквивалентная длина горла РЗП, $S_{\text{отв}}$ и S – площади сечения горла и передней панели, t – время) подробно обсуждался в работе [5]. Заметим, что в уравнении (1) сохранен нелинейный член с коэффициентом γ_1. Член с коэффициентом γ_2, отвечающий за кубичную нелинейность в модели [5], здесь отброшен – он не влияет на процесс генерации разностной частоты.

Пусть на резонатор, описываемый уравнением (1), падает бигармоническая звуковая волна. На входе РЗП

$$\Pi_{\text{пад}}=\frac{1}{2}A_1\exp(-i\Omega_1T)+\frac{1}{2}A_2\exp(-i\Omega_2T)+\text{к. с.} \qquad (2)$$

Решаем (1) методом последовательных приближений, полагая $\Pi=\Pi^{(1)}+\Pi^{(2)}+\ldots$, где $\Pi^{(1)}$ – решение линейной задачи ($\Gamma_1=0$), а $\Pi^{(2)}$ – нелинейная добавка, отвечающая колебаниям с частотой $\Omega_3=\Omega_1-\Omega_2$. После соответствующих преобразований получаем выражения:

$$\Pi^{(1)}=-\frac{2i\Omega_1}{\Phi(\Omega_1)}A_1\exp(-i\Omega_1T)-\frac{2i\Omega_2}{\Phi(\Omega_2)}A_2\exp(-i\Omega_2T), \qquad (3)$$

$$\Pi^{(2)}=\frac{4i\Omega_3}{\Phi(\Omega_3)}\frac{\Omega_1\Omega_2}{\Phi(\Omega_1)\Phi(\Omega_2)}\Gamma_1A_1A_2\exp(-i\Omega_3T). \qquad (4)$$

Здесь обозначено

$$\Phi(\Omega_n)=\Omega_0^2-\Omega_n^2-i2\Omega_n(\sigma+\alpha)-2\beta(1+i)\Omega_n^{3/2},\quad n=1,2,3.$$

Таким образом, при воздействии на РЗП сигнала (2) в полости резонатора формируются колебания на разностной частоте, амплитуда которых описывается формулой (4).

Экспериментальная проверка преследовала две цели: обнаружение эффекта и количественную оценку нелинейного параметра Γ_1. Схема уста-

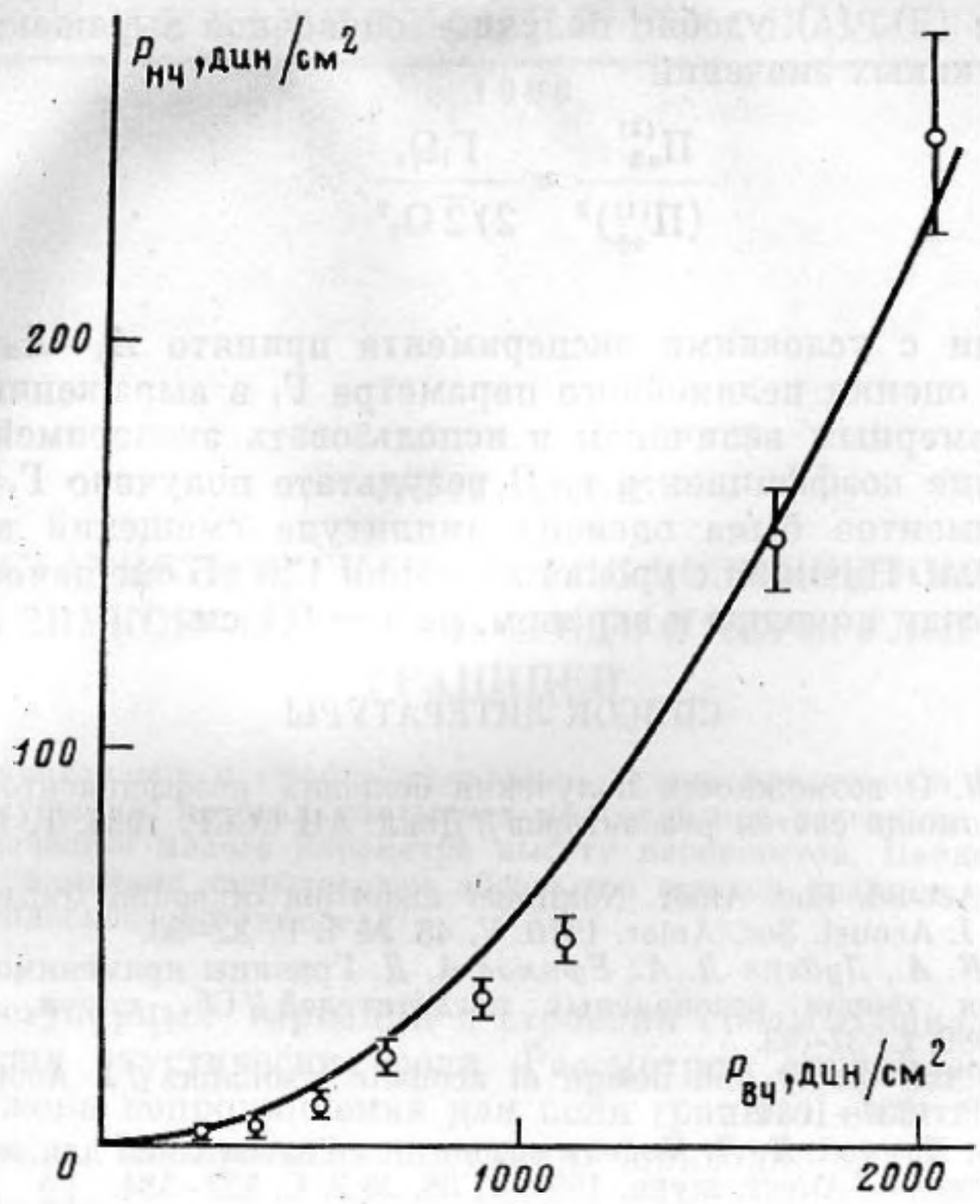

Рис. 3. Экспериментальная зависимость уровня сигнала НЧ от уровня сигнала ВЧ

новки изображена на рис. 2. На РЗП (состоящий из панели *1* и полости *2*), установленный в торце рабочей камеры *3*, подавался от излучателя *4* бигармонический сигнал, вырабатываемый генератором *5*. Сигнал содержал «высокие» частоты 200 и 210 Гц, близкие к резонансной частоте 205 Гц исследуемого РЗП. Образующаяся разностная («низкая») частота равнялась 10 Гц. Сигнал давления в полости *2* регистрировался микрофоном *6* и усиливался микрофонным усилителем *7*. Далее происходило разделение низкой и высокой частот с помощью фильтров *8*, *9*. Отфильтрованные сигналы регистрировались измерительным осциллографом *10* (сигнал на низкой частоте предварительно усиливался — *11*). Оценивался уровень паразитного низкочастотного сигнала, возникающего из-за нелинейности излучателя, микрофона и усилителей; для этого проводились измерения со снятой передней панелью РЗП. Был также проделан следующий эксперимент: при перевороте передней панели РЗП (так, чтобы экран был вне полости РЗП) сигнал на разностной частоте изменял свою фазу примерно на π, что подтверждает связь эффекта детектирования с несимметрией свойств РЗП.

В экспериментах использовался РЗП [6] с размерами: сечение поглотителя 8×8 см, глубина полости 6 см, размер экрана 6×6 см; 25 отверстий радиуса 0,125 см располагались на площади зоны 3×3 см; расстояние между передней панелью и экраном равнялось 0,1 см.

На рис. 3 представлена измеренная зависимость уровня сигнала низкой частоты от уровня высокочастотного сигнала. В качестве доверительного интервала на графике отложены значения уровней в отсутствие передней панели РЗП. Экспериментальная зависимость на рис. 3 была аппроксимирована по методу наименьших квадратов:

$$P_{нч}=\eta P_{вч}^2, \quad \eta\approx 5{,}5\cdot 10^{-5}\ \text{дин/см}^2.$$

Из формул (3), (4) удобно получить оценочное выражение для отношения эффективных значений

$$\frac{\Pi_{эф}^{(2)}}{(\Pi_{эф}^{(1)})^2} \approx \frac{\Gamma_1 \Omega_3}{2\sqrt{2}\,\Omega_0^2}. \tag{5}$$

В соответствии с условиями эксперимента принято $A_1=A_2=A$, $\Omega\approx\Omega_1\approx\approx\Omega_2\gg\Omega_3$. Для оценки нелинейного параметра Γ_1 в выражении (5) нужно перейти к размерным величинам и использовать экспериментально найденное значение коэффициента η. В результате получено $\Gamma_1\approx3{,}5$. В процессе экспериментов была оценена амплитуда смещений в отверстиях передней панели. Начиная с уровня давления 120 дБ смещение превышало расстояние между панелью и экраном, равное 0,1 см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ржевкин С. Н.* О возможности получения больших коэффициентов поглощения звука при помощи систем резонаторов // Докл. АН СССР. 1938. Т. 18. № 1. С. 25–30.
2. *Ingard U.* J. Acoust. Soc. Amer. Nonlinear distortion of sound transmitted through an orifices // J. Acoust. Soc. Amer. 1970. V. 48. № 1. P. 32–33.
3. *Велижанина К. А., Дудкин Д. А., Ефимов А. Д.* Границы применимости линейного приближения теории резонансных поглотителей // Сб. научн. тр. НИКФИ. Вып. 126. 1986. С. 37–43.
4. *Ingard U.* On the theory and design of acoustic resonators // J. Acoust. Soc. Amer. 1953. V. 25. P. 1037–1061.
5. *Руденко О. В., Хирных К. Л.* Модель резонатора Гельмгольца для поглощения интенсивного звука // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 3. С. 527–534.
6. *Велижанина К. А., Дудкин Д. А.* Новая конструкция резонансного звукопоглотителя для глушения низкочастотных шумов // Акуст. журн. 1989. Т. 35. № 1. С. 151–154.
7. *Ingard U., Labate S.* Acoustic circulation effects and nonlinear impendence of orifices // J. Acoust. Soc. Amer. 1950. V. 22. № 2. P. 211–218.

Московский государственный
университет им. М. В. Ломоносова,
физический факультет

Поступила в редакцию
13.11.89

D. A. Dudkin, O. V. Rudenko, K. L. Khirnykh

A DIFFERENCE FREQUENCY SIGNAL IN RESONANCE SOUND ABSORBERS

An effect of a difference frequency signal generation on a quadratic nonlinearity in a resonance sound absorber under an action of an intensive biharmonic wave is observed. A qualitative explanation and a theory of the effect are proposed. A nonlinear parameter is evaluated on the basis of experimental data.