## УДК 534.2

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ВБЛИЗИ СИСТЕМЫ ИСТОЧНИКОВ

### А. Н. Иванников, Д. И. Кравченко

#### (кафедра акустики)

Проведено исследование энергетической структуры участка ближнего поля источников звука. Детально исследованы особые точки линий тока активной и реактивной компонент плотности потока энергии.

Цель настоящей работы — исследовать особенности тонкой структуры акустического поля вблизи системы источников звука (в ближней зоне), когда длина волны сравнима с характерными размерами системы и интерференционные эффекты приводят к очень сложной структуре поля. Поскольку при традиционных методах изучения сложных звуковых полей теряется определенная часть информации, представляется целесообразным использовать в данном классе исследований качественно новую методику, основанную на энергетическом подходе.

В настоящем сообщении излагаются основные принципы используемого подхода, дается описание методики проведенных измерений структуры поля, осуществленных в заглушенной камере кафедры акустики физического факультета МГУ, и обсуждаются полученные результаты, в частности структура области, где поток энергии образует замкнутые линии.

Для определения вектора плотности потока энергии необходимо измерить два параметра звукового поля: звуковое давление p и колебательную скорость v [1]. Измерение звукового давления не вызывает затруднений. Скорость частиц v прямо пропорциональна градиенту звукового давления, и на этом основан наиболее распространенный в настоящее время градиентный способ измерения колебательной скорости, который реализуется при помощи двухмикрофонного зонда и двухканальной системы обработки сигнала [2].

В случае стационарных звуковых полей, которые можно создать в лабораторных условиях, комплексный вектор плотности потока энергии (интенсивности)  $I=I_a+iI_i$  определяется при использовании одного микрофона. Если известны значения звукового давления  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ , измеренные микрофоном в трех точках, лежащих на оси  $x: x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , а также их фазы  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ , измеренные относительно некоторого опорного сигнала, то, пользуясь формулами для активной  $I_a = = (1/2) \operatorname{Re}(pv^*)$  и реактивной  $I_i = (1/2) \operatorname{Im}(pv^*)$  частей вектора плотности потока энергии [3], получим

$$I_{ax} = \frac{p_2}{\Delta x \omega \rho} \left[ p_1 \sin \left( \varphi_2 - \varphi_1 \right) - p_3 \sin \left( \varphi_2 - \varphi_3 \right) \right],$$
  
$$I_{ix} = \frac{p_2}{\Delta x \omega \rho} \left[ p_1 \cos \left( \varphi_2 - \varphi_1 \right) - p_3 \cos \left( \varphi_2 - \varphi_3 \right) \right],$$

где  $\Delta x=2|x_2-x_1|=2|x_2-x_3|$ ,  $\omega$  — частота,  $\rho$  — плотность среды. Аналогично получаем выражения для *y*- и *z*-компонент вектора плотности потока энергии.

37

(1)

Основным преимуществом векторной акустики является наглядность изображения звукового поля. Если измерить звуковое давление и его фазу в исследуемой области на равномерной кубической сетке размерностью  $M \times N \times K$ , а затем по формулам (1) вычислить значения компонент вектора плотности потока энергии в  $(M-2) \times (N-2) \times (K-2)$  в точках этой сетки, то мы получим полное представление о распространении энергии и о характере движения частиц среды [4].

С целью исследования энергетической структуры поля в заглушенной камере МГУ собрана экспериментальная установка, блоксхема которой представлена на рис. 1. Излучающий тракт состоит из



Рис. 1

генератора 1, усилителя мощности 2 трех ненаправленных источников И звука 3, которые расположены на расстоянии длины волны друг от друга. Средний источник работает в противофазе с крайними. Микрофон 4 перемещается шаговым двигателем 5 дистанционно управляющим устройством 6 с заданным шагом  $\Delta x \sim 0.01\lambda$ . Электрический сигнал с микрофона поступает на усилитель 7, фильтр 8, вольтметр 9. Фаза давления определяется относительно выходного сигнала генератора фазометром 10. контроль частоты осуществляется частотомером 11. Установка позволяет автоматизировать процесс измерений.

Экспериментальная установка использована для изучения энергетической структуры различных участков ближнего поля источников

звука. На рис. 2 представлены результаты исследования энергетической структуры звукового поля в плоскости, проходящей через центры источников звука.

Результат численного расчета вектора активной  $I_a$  интенсивности в исследуемой области звукового поля представлен на рис. 2, а. Вектор  $I_a$  имеет вихревую природу, т. е. rot  $I_a \neq 0$ . Экспериментальные результаты измерения вектора активной интенсивности в области вихря (рис. 2, в) достаточно хорошо соответствуют рассчитанной векторной структуре активной интенсивности. Некоторое отличие в рис. 2, а и в объясняется наличием отраженных волн от элементов экспериментальной установки.

На рис. 2, б представлено пространственное распределение вектора реактивной интенсивности I<sub>i</sub> в той же области ЗВУКОВОГО поля (численный расчет). Из рис. 2,6 видно, как реактивная интенсивность «стекает» из всей области в центральную точку, в «узел», который совпадает в пространстве с центром вихря активной интенсивности. Представляется вероятным, что в сравнительно небольшой области пространства, которую занимает зона вихря активной интенсивности, происходит преобразование «взвешенной» реактивной энергии звукового поля, поток которой направлен в центр со всех сторон, в активный поток акустической энергии Ia. Центр вихря активной интенсивявляется стоком для реактивной интенсивности, ности что подтверждает физическую интерпретацию реактивной интенсивности как меру запасенной в ближнем поле энергии [5]. На рис. 2, г приведены

результаты экспериментального исследования пространственного распределения вектора реактивной интенсивности в области стока. Получено хорошее соответствие измеренных и рассчитанных величин,



Рис. 2

При низких частотах линейные пространственные размеры области «вихря» активной интенсивности могут достигать нескольких десятков метров, и взаимодействие такого поля с другими объектами представляет определенный научный интерес.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Иванников А. Н., Исаев В. В., Нюнин Б. Н., Тонаканов О. С. Датчик для акустических измерений: А. с. № 1014154//Бюл. № 15 от 23.04.83 г. [2] Gade S. B & K Technical Review. 1982. N 3: Sound Intensity (Theory). P. 4. [3] Иванников А. Н., Рожин Ф. В., Тонаканов О. С.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1983. 24, № 1. С. 47. [4] Жуков А. Н., Иванников А. Н., Нюнин Б. Н., Тонаканов О. С.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1985. 26, № 2. С. 69. [5] Тісһу Ј.//Ргос. 2nd Intern. Congr. on Acoustic Intensity. CETIM. Senlis (France), 1985.

Поступила в редакцию 07.06.88