

УДК 534.22

РАСПРОСТРАНЕНИЕ МОЩНОГО ЗВУКОВОГО ПУЧКА
НА КОРОТКОЙ ТРАССЕ В АТМОСФЕРЕ:
ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТ

© 1996 г. Н. Н. Бочкарев

Институт оптики атмосферы СО РАН

634055 Томск, пр. Академический, 1

Поступила в редакцию 07.04.95 г.

Распространение мощного звукового пучка в атмосфере можно описать известным, например, из работы [1] уравнением Хохлова–Заболотской–Кузнецова (ХЗК), позволяющем учесть нелинейность среды распространения, дифракцию и диссипацию звуковой волны. Разработке численного алгоритма решения этого уравнения, а также сравнению результатов численного моделирования с данными эксперимента посвящена настоящая работа.

Одним из эффективных подходов в решении уравнения ХЗК является применение преобразования Фурье к этому уравнению, в результате чего оно трансформируется в бесконечную систему уравнений для гармоник. При решении такой системы можно использовать модифицированный метод расщепления, предложенный в работе [2]. К каждому из уравнений указанной системы применялась процедура расщепления, которая заключалась в разбиении переменной z ($z = x/ka^2$, где x – продольная координата, k – волновое число, a – эффективная ширина пучка) на отрезки Δz и в замене на каждом шаге Δz исходной системы уравнений на эквивалентную систему:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_m}{\partial z} = -i \frac{B}{m} \Delta \rho_m, & \rho_m(0) = \rho_m, \\ \frac{\partial \rho'_m}{\partial z} = imN[\rho^2]_m - Mm^2 \rho'_m, & \rho'_m(0) = \rho_m \left(\frac{\Delta z}{2} \right), \\ \frac{\partial \rho''_m}{\partial z} = -i \frac{B}{m} \Delta \rho''_m, & \rho''_m(0) = \rho'_m(\Delta z), \end{cases}$$

где $\rho = \rho^*/A$, ρ^* – возмущение плотности, A – амплитудное возмущение плотности на оси пучка при $z = 0$, $m = \pm 1, \dots$ – номер гармоники, B, N, M – коэффициенты, соответственно, дифракции, нелинейности и диссипации в уравнении ХЗК [1], Δ – оператор Лапласа в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Такая схема расщепления в отличие от известной одноциклической схемы имеет второй поряд-

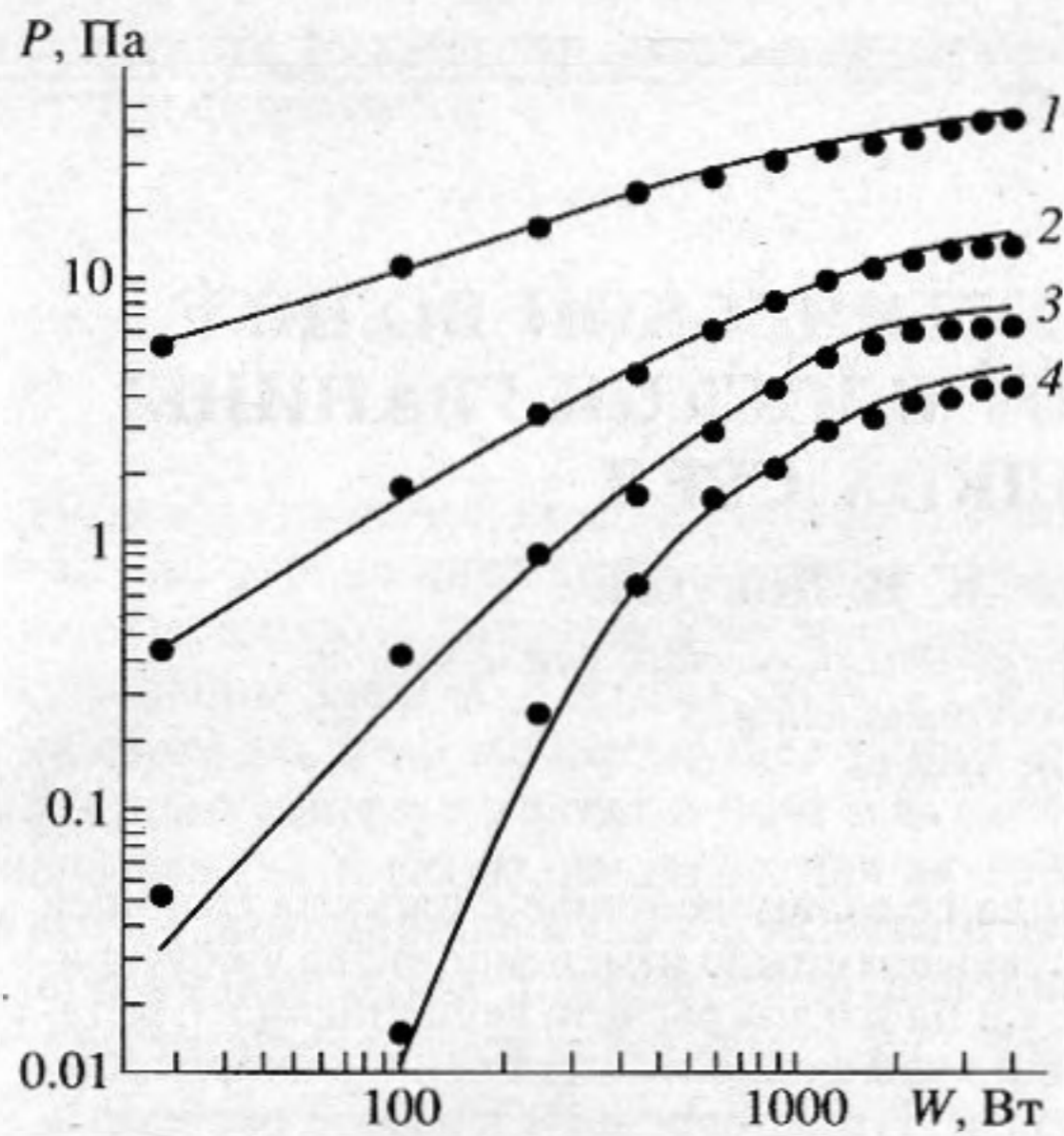
ок точности по z , не приводит к существенному усложнению алгоритма вычислений, но повышает скорость сходимости метода на порядок.

Для решения первого уравнения полученной системы использовался модифицированный метод быстрого преобразования Фурье (БПФ). Модификация состоит в разделении переменных в операторе Лапласа и последующем применении одномерных алгоритмов БПФ для решения расщепленных однородных уравнений. При этом фильтрующая функция становится одномерной $H(\epsilon) = \exp(-iB\epsilon^2 \Delta z/m)$, что снижает требования к памяти ЭВМ, а также позволяет контролировать краевые эффекты в случае сильной дифракции пучка.

Для расчета дифракции в зоне Фраунгофера использовалось преобразование координат. Адаптивный алгоритм расчета растягивал координатную сетку со скоростью геометрической расходимости пучка.

Апробация эффективности описанной выше методики проводилась путем сопоставления результатов расчета с результатами измерений, проведенных на следующей установке. Излучающая система (плоская антенная решетка из 6×8 рупорных головок) с апертурой 984×1312 мм и электрической мощностью 4.5 кВт, возбуждалась тональным сигналом 3.5 кГц. Микрофон с полосой пропускания 100 кГц размещался по оси на удалении 30 м от системы. Сигнал с микрофона обрабатывался на цифровом спектроанализаторе. Излучающая система и микрофон размещались в открытом пространстве на высоте более 5 м над ровным участком рыхлой почвы. Во время измерений контролировалась температура, давление и влажность воздуха.

На раскрытие отдельной рупорной головки ($z = 0$) по амплитудам первых пяти гармоник был измерен коэффициент нелинейных искажений, который изменялся от 2.5 до 21% при увеличении электрической мощности W , подводимой к излучателю, с 25 до 3600 Вт. С учетом этого, начальные условия для решения системы уравнений за-



Зависимость пикового звукового давления P от параметра нелинейности N . 1-4 – номер гармоники. Сплошные кривые – расчет, точки – эксперимент.

давались в виде пучка с платообразным распределением амплитуды по сечению: $\rho_{1...5}(z=0) = K_{1...5} \exp(-R^n) \cos(\omega_{1...5}\tau)$, где $n = 16$, $K_{1...5}$ – коэффициенты, определенные по результатам измерений. Диссипация звуковой энергии при чис-

ленном решении системы уравнений была учтена путем замены произведения Mm^2 на текущие значения $M_{1...10} = 0.17-3.13$, рассчитанные по формулам работы [3].

Сравнение результатов расчета и эксперимента (см. рисунок) свидетельствует об их хорошем соответствии. Расчетные кривые получены при следующих значениях исходных параметров: $B = 0.5$, $N = 0.125-1.5$ (пиковое звуковое давление P , создаваемое излучателем на расстоянии 30 м при $W = 100$ Вт, составляло 11.2 Па), $z = 1.1$. Для достижения точности расчетов не хуже 4% было достаточно учета десяти гармоник и $\Delta z = z/6$. Эффект “насыщения”, показанный на рисунке и обусловленный усилением поглощения за счет нелинейной перекачки энергии вверх по спектру, можно выбрать в качестве критерия оптимизации мощности излучателя звука.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахвалов Н.С., Жилейкин Я.М., Заболотская Е.А. Нелинейная теория звуковых пучков. М.: Наука, 1982. 174 с.
2. Коняев П.А., Лукин В.П. Тепловые искажения фокусированных лазерных пучков в атмосфере // Изв. вузов СССР. Сер. Физика. 1983. № 2. С. 79.
3. Bass H.E. Absorption of sound by the atmosphere // Physical Acoustics. V. 17. P. 145-232.