

излучателя волны накачки можно выделить два предельных случая.

1) Нелинейное взаимодействие происходит в ближней зоне излучения волны накачки (см. *Звуковое поле*), где она является плоской. Протяжённость зоны взаимодействия в направлении распространения волн в этом случае определяется длиной пробега волны накачки  $l = \alpha^{-1}$ , где  $\alpha$  — коэф. поглощения этой волны, а поперечное сечение этой зоны — площадью излучателя волны накачки (рис. 1). Амплитуда  $p_s$  НЧ-волны

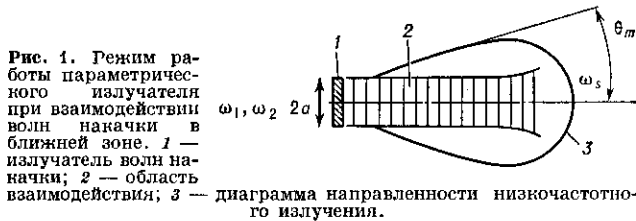


Рис. 1. Режим работы параметрического излучателя при взаимодействии волн накачки в ближней зоне. 1 — излучатель волн накачки; 2 — область взаимодействия; 3 — диаграмма направленности низкочастотного излучения.

в дальней зоне пропорц. длине  $l$  зоны взаимодействия. Для накачки в виде двух ВЧ-волн близкой частоты она выражается ф-лой

$$p_s = \frac{\epsilon p_n^2(k_s a)^2}{8\rho c^2 \alpha r} DW(\theta). \quad (1)$$

Здесь  $\epsilon$  — нелинейный параметр среды,  $p_n$  — амплитуда волн накачки,  $k_s = \omega_s / c$ ,  $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$  — частота излучаемой НЧ-волны;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — частоты компонент волн накачки;  $a$  — радиус ВЧ-пучка, определяемый размером излучателя волны накачки,  $\rho$  — плотность среды,  $c$  — скорость звука в ней,  $r$  — расстояние от излучателя волны накачки до точки наблюдения,  $DW(\theta)$  — диаграмма направленности для НЧ-волны, описываемая выражением

$$DW(\theta) = [1 + k_s^2 \alpha^{-2} \sin^4(\theta/2)]^{-1/2}. \quad (2)$$

Угол  $\theta$  отсчитывается от оси области взаимодействия; характерная ширина диаграммы направленности, согласно (2),  $\theta_m \approx (k_s \alpha^{-1})^{-1/2}$ . Ф-ла (1) описывает два эффекта: образование тона разностной частоты при взаимодействии плоских волн на длине  $l = \alpha^{-1}$  (множитель  $\epsilon p_n^2 k_s / \rho c^2 \alpha$ ) и дифракц. эффект при излучении волны низкой разностной частоты из цилиндрич. области взаимодействия с малым поперечным сечением, характеризующимся параметром  $k_s a^2 / r$ .

2) Гл. вклад в генерацию НЧ-волны даёт нелинейное взаимодействие в дальней зоне излучения волны накачки, где она становится расходящейся и область взаимодействия имеет форму рупора (рис. 2). При этом НЧ-



Рис. 2. Режим работы параметрического излучателя при взаимодействии волн накачки в дальней зоне. 1 — излучатель волн накачки; 2 — область взаимодействия; 3 — диаграмма направленности низкочастотного излучения.

излучение как бы «вписывается» в диаграмму направленности волны накачки с характерной шириной  $(ka)^{-1}$ , где  $k = \omega_1 / c$ ,  $k$ -рая и определяет направленность НЧ-излучения. Волна разностной частоты возникает как результат взаимодействия расходящихся волн. Влияние дифракц. эффектов в этом случае не проявляется, поэтому преобразование ВЧ-излучения в низкочастотное происходит более эффективно. Амплитуда НЧ-волны пропорц. первой степени волнового числа  $k_s$ , а не квадрату, как в первом предельном случае:

$$p_s = \frac{\epsilon p_n^2 R^2 k_s}{16\rho c^2 r} \ln(R\alpha)^{-1} D^2(\theta).$$

Здесь  $R = ka^2/2$  — длина ближней зоны для волны накачки, а диаграмма направленности имеет вид

$$D(\theta) = J_1(k a \sin \theta) / k a \sin \theta$$

( $J_1$  — ф-ция Бесселя 1-го рода 1-го порядка). Амплитуда  $p_s$  излучаемой НЧ-волны как в первом, так и во втором случае растёт пропорц. квадрату амплитуды волны накачки.

При больших интенсивностях волны накачки она трансформируется в пилообразную волну, возрастает её поглощение и работа параметрич. излучателя переходит в нелинейный режим. Длина пробега волны накачки определяется теперь нелинейным поглощением звука и равна  $l_n = (\epsilon k p_n / \rho c^2)^{-1}$ . Если взаимодействие пилообразных волн происходит в основном в ближней зоне (цилиндрич. антенна, рис. 1), то амплитуда излучаемой НЧ-волны в дальней зоне выражается ф-лой

$$p_s = \frac{\eta_n a^2 k_s \omega_s}{2r \omega_n},$$

а ширина диаграммы направленности определяется, как и в линейном режиме, длиной зоны взаимодействия:  $\theta \approx (k_s l_n)^{-1/2}$ . При взаимодействии в дальней зоне (рис. 2)

$$p_s = \frac{\eta_n k_s a^2}{2r}, \quad \theta_m \approx (ka)^{-1}.$$

Т. о., в нелинейном режиме работы параметрич. излучателя амплитуда  $p_s$  НЧ-волны не зависит от нелинейного параметра среды  $\epsilon$  и пропорц.  $p_n$ .

В параметрич. приёмнике гармонич. ВЧ-пучок (волна накачки) модулируется принимаемым НЧ-сигналом, в результате чего из-за нелинейных свойств среды возникают сигналы комбинац. частот, обладающие высокой направленностью, к-рые регистрируются ВЧ-

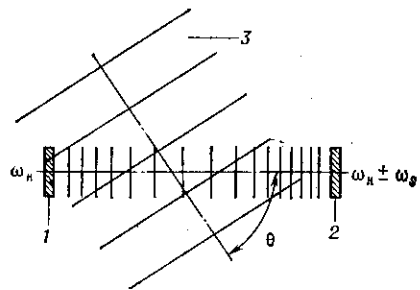


Рис. 3. Схема параметрического приёмника звука. 1 — излучатель волн накачки; 2 — приёмник звука; 3 — низкочастотный сигнал.

приёмником звука (рис. 3). Амплитуда  $p_k$  комбинационного тона частоты  $\omega_k$  равна:

$$p_k = p_n [\epsilon - 2 \sin^2(\theta/2)] \frac{p_s}{\rho c^2} k L \frac{\sin \delta}{\delta},$$

где  $\delta = k_s L \sin^2(\theta/2)$  — частота  $\omega_k = \omega_n \pm \omega_s$ ,  $p_n$  и  $\omega_n$  — амплитуда и частота волны накачки,  $p_s$  и  $\omega_s$  — амплитуда и частота НЧ-сигнала,  $k_s = \omega_s / c$ ,  $k = k_n / c$ . Ширина диаграммы направленности параметрич. приёмника  $\theta_m \approx (k_s L)^{-1/2}$ , где  $L$  — длина области взаимодействия, определяемая расстоянием между излучателем и приёмником ВЧ-волны накачки; угол  $\theta$  отсчитывается от оси волнового пучка накачки. Осн. достоинством параметрич. приёмника является возможность реализации достаточно длинных областей взаимодействия, что позволяет получить острую направленность при приёме НЧ-звука.

Параметрич. излучатели применяются в калибровочных лаб. установках, в измерит. гидроакустич. бассейнах как широкополосные излучатели для калибровки приёмников звука. Частота накачки в таких устройствах  $\sim 1$  МГц, частота излучения 1—100 кГц, амплитуда сигнала  $\sim 10$  Па·м, радиус излучателя составляет неск. см, мощность накачки — десятки Вт. Более мощные и более низкочастотные параметрич. излучатели применяются в гидроакустике для прецизионного профилирования дна, зондирования придонных областей, излучения звукорассеивающих слоёв,