АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XVII 1971 Вып. 3

УДК 534.232

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ УЛЬТРАЗВУКА В ДИССИПАТИВНЫХ СРЕДАХ

И. Н. Каневский

Получено выражение для производительности цилиндрических концентраторов ультразвуковой энергии при учете поглощения звука в облучаемой среде. Проведено сравнение производительности цилиндрических и осесимметричных излучателей при различных углах раскрытия волновых фронтов, коэффициентах усиления и коэффициентах поглощения.

В ультразвуковой технологии наряду с осесимметричными концентраторами, создающими сходящиеся сферические фронты, применяются цилиндрические концентраторы ультразвука, создающие сходящиеся волновые фронты цилиндрической формы. Несмотря на то, что цилиндрические концентраторы обладают меньшим коэффициентом усиления, чем сферические, они обладают в некоторых случаях преимуществами перед сферическими концентраторами. У цилиндрических концентраторов фокальная область имеет значительную протяженность, равную длине излучающей поверхности, тогда как размеры фокальной области сферических концентраторов ограничены, как правило, несколькими длинами волн. Поэтому цилиндрические концентраторы удобно использовать при облучении протяженных объектов, а также в случае применения концентраторов в поточных линиях, например, при непрерывном облучении жидких сред внутри цилиндрических сосудов, либо при очистке мелких деталей на конвейерной линии.

Рассмотрим производительность цилиндрических концентраторов ультразвука. Для этого воспользуемся выражением (3) работы [1], согласно которому производительность концентратора ультразвуковой энергии равна

$$\Pi = \frac{K_p^2}{S} q^2 V_к, \tag{1}$$

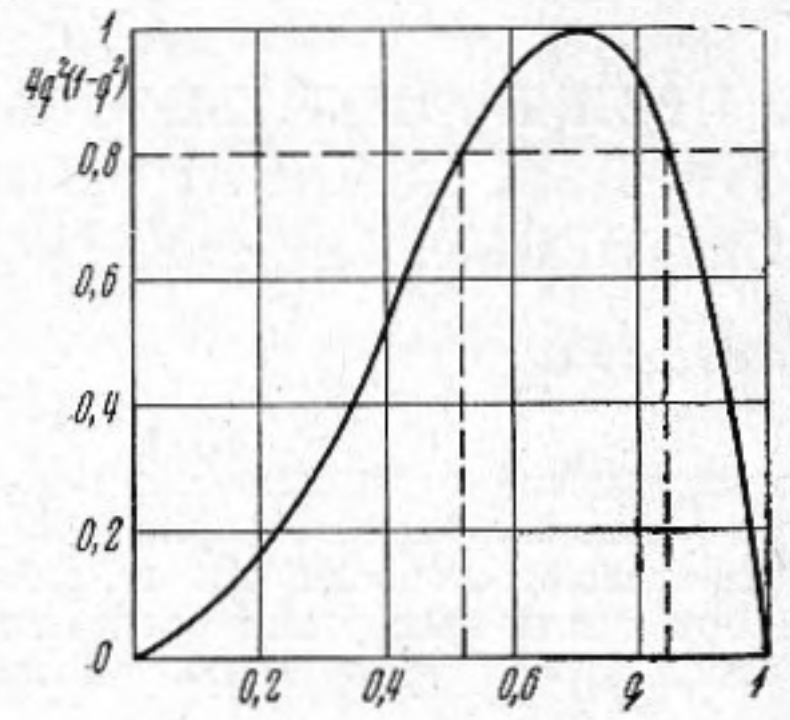
где $K_p = p_f / p_0$ — коэффициент усиления давления, $q = p_к / p_f$ — параметр концентрации давления, p_f — звуковое давление на геометрической оси концентратора (в центре фокального пятна), p_0 — звуковое давление у поверхности излучателя, $p_к$ — критическое давление, при котором начинается заданный технологический процесс, $V_к$ — критический объем, равный объему той части фокальной области, в которой давление не ниже $p_к$, S — площадь излучающей поверхности.

Поскольку для цилиндрического излучателя с направляющей длиной l и высотой h справедливы соотношения $S = lh$, $V_к = S_к h$, то формулу (1) можно представить в виде

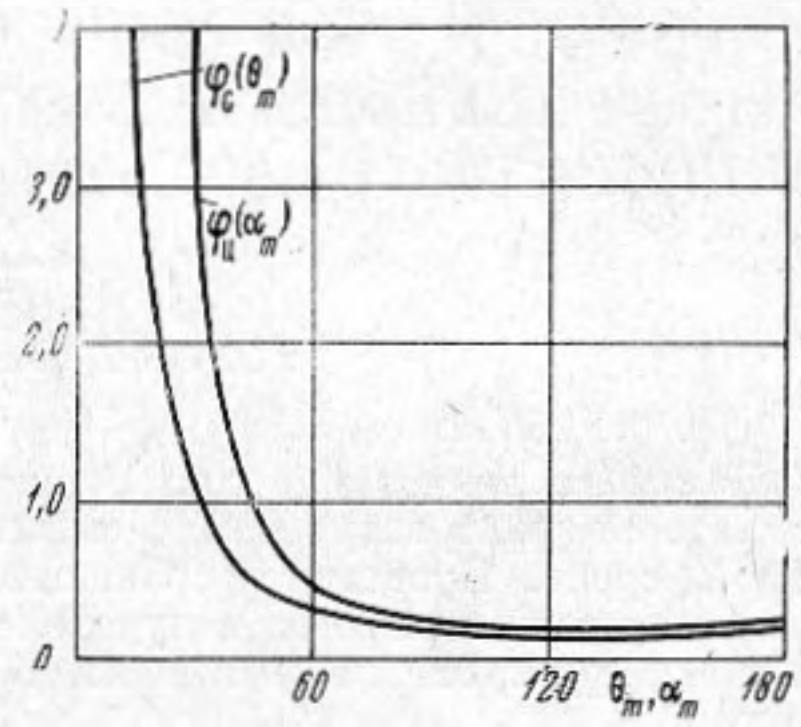
$$\Pi = \frac{S_к}{l} K_p^2 q^2. \tag{2}$$

В этом выражении $S_к$ — критическая площадь, равная площади той части фокальной области сходящегося цилиндрического фронта, в которой давление не ниже $p_к$.

Величину $q = p_к / p_f$, входящую в выражение (2), назовем параметром концентрации звукового давления. Величина этого параметра позволяет судить о целесообразности применения концентратора для проведения технологического процесса. Если заданы величины $p_к$ и p_f, характеризующие, соответственно, обрабатываемую среду и свойства концентратора, то при условии $q \ll 1$ применение концентратора нецелесообразно, так как



Фиг. 1



Фиг. 2

в этом случае следует применять либо концентратор с меньшим усилением, либо плоский излучатель. При $q \geqslant 1$ концентратор непригоден совсем из-за малого коэффициента усиления. Следовательно, область применимости концентратора характеризуется значениями параметра концентрации давления, лежащими в пределах $0 < q < 1$.

При облучении сред часть ультразвуковой энергии превращается в полезную работу технологического процесса. Следовательно, при определении производительности необходимо учитывать диссипацию энергии ультразвуковой волны в концентраторе. Это можно сделать, вычислив квадрат коэффициента усиления звукового давления, входящий в формулу (2), воспользовавшись результатами работы [2]:

$$K_p^2 = \frac{2\alpha_m^2 f}{\pi} \sqrt{k^2 + \gamma^2} e^{-2\gamma l}, \tag{3}$$

где γ — коэффициент поглощения.

Вычислим теперь критическую площадь фокальной области $S_к$, в которой звуковое давление не ниже $p_к$, так же, как вычислено распределение квадрата потенциала в фокальной области в квадратичном приближении в работе [3]. Тогда получим, что критическая область представляет эллипс площадью

$$S_к = \frac{2\pi}{k^2} \cdot \frac{1 - q^2}{F(\alpha_m)}, \tag{4}$$

где

$$F(\alpha_m) = [1 - 2f^2(\alpha_m) - f^2(2\alpha_m) + 2f^2(\alpha_m) f(2\alpha_m)]^{1/2},$$

$$f(\alpha_m) = \frac{\sin \alpha_m}{\alpha_m}.$$

Подставив выражения (3) и (4) в формулу (2), пренебрегая γ^2 в выражении для K_p^2 и учитывая, что $l = 2f\alpha_m$, получим

$$\Pi_{цил} = 4q^2(1 - q^2)\lambda \frac{\alpha_m}{4\pi F(\alpha_m)} e^{-2\gamma l}. \tag{5}$$

Зависимость производительности от величины q определяется функцией $4q^2(1-q^2)$ (фиг. 1).

Как видно из графика, производительность максимальна при $q=0{,}707$; однако кривая в области максимума настолько полога, что при изменении q от 0,53 до 0,83 величина производительности отличается от ее максимального значения не более чем на 20%. Отсюда следует, что производительность мало зависит от критического давления $p_к$, характеризующего облучаемую жидкость, и определяет, главным образом, свойства самого концентратора.

Производительность максимальна, когда давление в центре фокуса в $\sqrt{2}$ раз больше критического:

$$p_f = \sqrt{2}\, p_к.$$

Тогда выражение (5) принимает вид

$$\Pi_{цил} = \lambda \frac{\alpha_m}{4\pi F(\alpha_m)} e^{-2\gamma f}. \tag{6}$$

Таким образом, производительность цилиндрических излучателей пропорциональна длине волны λ, а ее зависимость от угла раскрытия волнового фронта α_m определяется функцией

$$\psi_{цил}(\alpha_m) = \frac{\alpha_m}{4\pi F(\alpha_m)}. \tag{7}$$

Из фиг. 2 видно, что функция неограниченно возрастает при $\alpha_m \to 0$ и равна 0,25 при $\alpha_m = 180°$, когда цилиндрический излучатель замкнут.

Экспоненциальный член в формуле (6) учитывает изменение производительности за счет поглощения ультразвуковых волн в среде.

Для сравнения приведем выражение для производительности осесимметричных концентраторов ультразвука, полученное в работе [3]:

$$\Pi_{сф} = \lambda \frac{16{,}1}{\Omega_m(6\pi - \Omega_m)} e^{-2\gamma f_{сф}}. \tag{8}$$

В этом выражении Ω_m представляет телесный угол раскрытия волнового фронта, связанный с линейным углом раскрытия θ_m соотношением $\Omega_m = 2\pi(1-\cos\theta_m)$. Экспоненциальный множитель, учитывающий поглощение ультразвуковых волн, в соответственной формуле работы [3] отсутствует, но может быть получен так же, как это сделано в настоящей работе для случая цилиндрического концентратора.

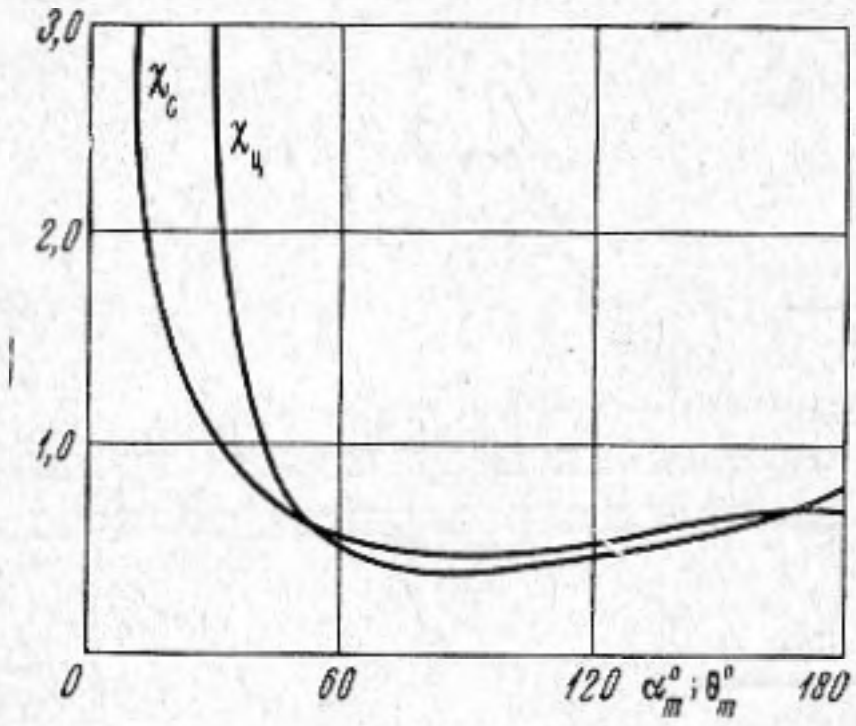
Сравнение формул (7) и (8) показывает, что как в случае цилиндрического, так и в случае осесимметричного концентратора, производительность прямо пропорциональна длине ультразвуковой волны λ в обрабатываемой среде и сравнительно сложно зависит от линейных углов раскрытия волновых фронтов. В обоих случаях поглощение учитывается экспоненциальным множителем, показывающим степень ослабления волны при ее распространении от поверхности излучателя до центра фокального пятна.

Анализ формулы (7), аналогичный анализу формулы (8), проведенному в работе [3], показывает, что при фиксированной мощности излучателя производительность цилиндрических концентраторов достигает максимальной величины при тех же условиях, что и производительность осесимметричных концентраторов, т. е. когда фокусное расстояние достигает максимальной величины или, соответственно, угол раскрытия волнового фронта минимален. Минимум угла раскрытия определяется минимально допустимым коэффициентом усиления, при котором звуковое давление в фокальной области не ниже критического.

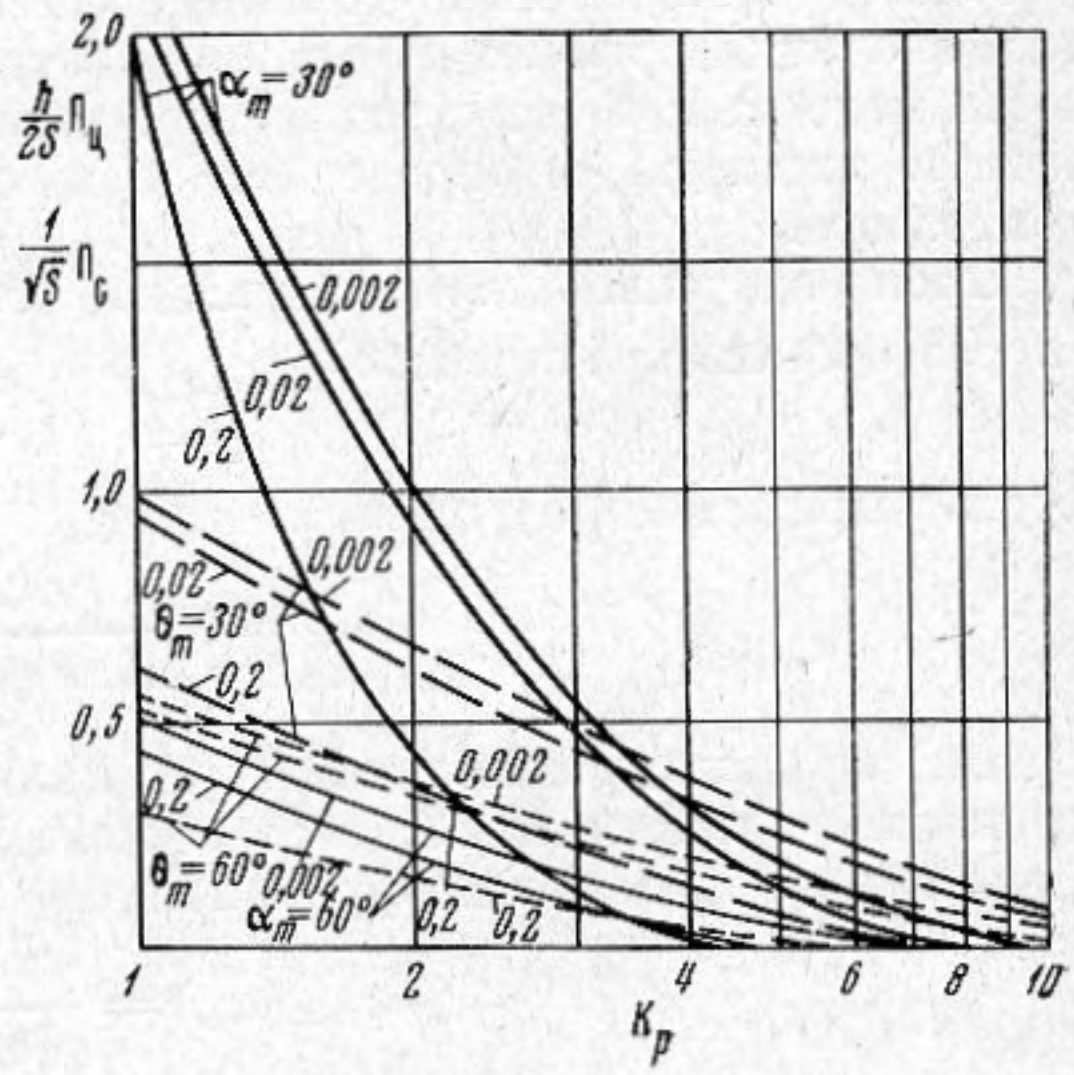
Резкое увеличение производительности при уменьшении угла раскрытия волнового фронта объясняется сильной зависимостью размеров крити-

ческой площади от угла раскрытия. Критическая площадь особенно быстро возрастает при $\alpha_m < 50°$, что видно из фиг. 2.

Сравним теперь производительность равновеликих сферического и цилиндрического излучателей одинаковой мощности, работающих в оптимальном режиме (оптимальны параметры концентрации давления q) и облучающих одинаковые среды. Для этого выразим производительность обоих излу-



Фиг. 3



Фиг. 4

чателей через площадь излучающей поверхности S, которую фиксируем. Тогда для цилиндрического излучателя

$$\Pi_{цил} = \frac{hK_p^2}{2S} \cdot \frac{\alpha_m^2}{4\pi F(\alpha_m)} \exp\{-2\beta K_{pцил}/2\alpha_m\}, \tag{9}$$

а для осесимметричного излучателя

$$\Pi_{сф} = \frac{S}{K_{pсф}} \cdot \frac{16{,}1}{\sqrt{\Omega_m}(6\pi - \Omega_m)} \exp\{-2\beta K_{pцил}/\Omega_m\}. \tag{10}$$

В формулах (9) и (10) величина $\beta = \gamma\lambda$ представляет коэффициент поглощения на длину волны.

Поскольку коэффициент усиления давления

$$K_p = \frac{p_f}{p_0} = \frac{ap_к}{p_0},$$

где $a = \sqrt{2}$ для цилиндрического фронта и $a = 1{,}53$ для сферического фронта [3], а величины $p_к$ и p_0 заданы, то значение K_p в обоих случаях фиксировано. Если диссипацией энергии можно пренебречь, то $\beta \approx 0$, и производительность определяется функциями, зависящими только от углов раскрытия волновых фронтов:

$$\chi_{цил}(\alpha_m) = \frac{\alpha_m^2}{4\pi F(\alpha_m)}, \qquad \chi_{сф}(\Omega_m) = \frac{16{,}1}{\sqrt{\Omega_m}(6\pi - \Omega_m)}.$$

На фиг. 3 приведены графики этих функций, причем по оси абсцисс отложен в градусах линейный угол раскрытия цилиндрического волнового фронта α_m или сферического волнового фронта

$$\theta_m = \arccos(1 - \Omega_m / 2\pi).$$

Из графиков видно, что при изменении угла от 50 до 180° функции отличаются друг от друга не более чем на 20%. При углах, меньших 50°, функция $\chi_{цил}(\alpha_m)$ возрастает быстрее, чем функция $\chi_{сф}(\theta_m)$.

Если диссипацией энергии нельзя пренебречь, то, как следует из выражений (9) и (10), производительность зависит от коэффициента усиления давления, угла раскрытия волнового фронта и коэффициента поглощения ультразвуковой волны. На фиг. 4 приведены графики зависимостей $(h/2S)\Pi_{цил}$ и $(1/\sqrt{S})\Pi_{сф}$ от коэффициента усиления K_p при различных углах раскрытия волновых фронтов и разных коэффициентах поглощения. Сплошные линии относятся к цилиндрическому волновому фронту, прерывистые — к сферическому. На графиках кривые построены при углах раскрытия волновых фронтов α_m и θ_m, равных 30 и 60°, и при коэффициентах поглощения $\beta = 0{,}2$; 0,02 и 0,002. Последние значения указаны непосредственно возле кривых.

Из графиков следует, что при малых коэффициентах усиления, когда $K_p < 3$, производительность цилиндрических излучателей возрастает быстрее, чем осесимметричных. При этом рост производительности тем больший, чем меньше коэффициент поглощения. При больших коэффициентах усиления, когда $K_p > 3$, производительность осесимметричных излучателей с ростом K_p падает медленнее, чем цилиндрических. Если $K_p > 10$, то производительность осесимметричных излучателей выше, чем цилиндрических при всех рассмотренных значениях β.

С увеличением угла раскрытия волнового фронта производительность цилиндрических излучателей падает сильнее, чем осесимметричных.

Рассмотренные зависимости производительности от параметров излучателей (коэффициента усиления и угла раскрытия) и свойств облучаемой среды (коэффициента поглощения) позволяют сделать следующие выводы:

1. Цилиндрические концентраторы ультразвука целесообразно применять для облучения сравнительно слабо поглощающих сред со сравнительно низкими критическими давлениями, когда коэффициенты усиления давления малы — порядка нескольких единиц.

2. При облучении сильно поглощающих сред с большими критическими давлениями, когда необходимы высокие коэффициенты усиления, надо применять осесимметричные концентраторы ультразвука.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Н. Каневский. Производительность высокочастотных концентраторов ультразвука. Акуст. ж., 1970, **16**, 1, 81—87.
2. И. Н. Каневский. Фокусировка ультразвуковых цилиндрических волн в среде с поглощением. Акуст. ж., 1964, **10**, 3, 309—312.
3. И. Н. Каневский. Некоторые особенности поведения сходящихся волновых фронтов в диссипативных средах. Акуст. ж., 1963, **9**, 3, 324—328.

Государственный н.-и.
и проектный институт
редкометаллической промышленности
Москва

Поступила в редакцию
15 октября 1969 г.