

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЗОНАНСНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Заган В. И.

Гидравлические излучатели являются относительно новыми источниками мощных низкочастотных акустических сигналов.

В [1] предложен анализ и метод расчета излучателя, использующего гидравлическое накопление энергии. Полученные соотношения позволяют вести расчет энергетических параметров излучателя, применяя текущие значения параметров гидроусилителя и источника гидравлической энергии.

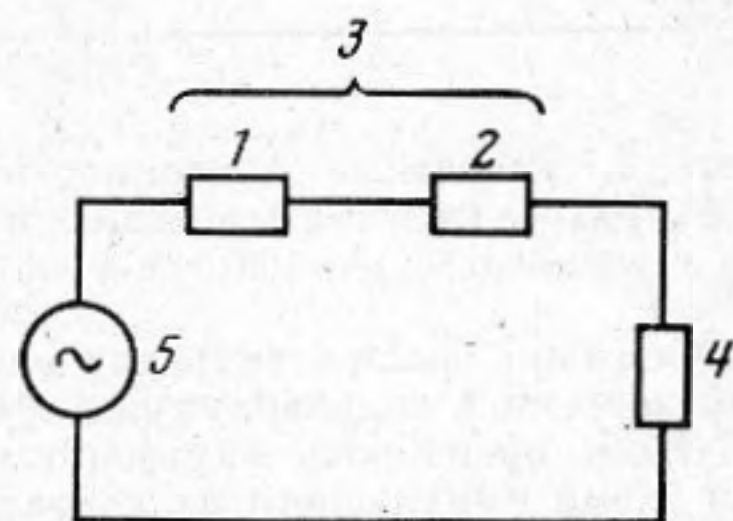
Однако в ряде случаев для инженерного расчета излучателя удобнее и проще пользоваться эффективными значениями параметров источника гидропитания, а также параметрами конкретных гидроусилителей (модулирующих устройств), серийно выпускаемых промышленностью.

В настоящей статье предлагается один из возможных методов анализа и расчета энергетических параметров резонансного гидравлического излучателя.

Эквивалентная электрическая схема гидравлического излучателя была представлена в [2]. Для случая резонансного излучателя эквивалентная схема на резонансной частоте в упрощенном виде показана на фиг. 1. В данной схеме реальные переменные сопротивления модулирующего устройства 2 и трубопроводов 1 заменены эквивалентными постоянными сопротивлениями, исходя из условия равенства рассеиваемых мощностей, а источник гидропитания представлен как источник переменного давления или переменного расхода с эффективными значениями  $p$  и  $Q$ .

Схема, показанная на фиг. 1, составлена в предположении, что потери на трение в исполнительном механизме и на сжимаемость жидкости малы, поэтому основ-

Фиг. 1. Упрощенная эквивалентная электрическая схема: 1 —  $R_{тр}$  — гидравлическое сопротивление трубопроводов излучателя, 2 —  $R_s$  — гидравлическое сопротивление гидроусилителя, 3 —  $R_{вн}$  — внутреннее гидравлическое сопротивление излучателя, 4 —  $R_s'$  — приведенное сопротивление излучения, 5 — источник гидропитания с производительностью  $Q$  и развивающий давление  $p$



ные энергетические затраты источника гидропитания определяются гидравлическими и акустическими элементами схемы. Такое предположение справедливо для не очень низких частот излучения (десятки герц и выше).

Рассмотрим два возможных режима работы гидравлического излучателя — непрерывный и импульсный.

В первом случае гидропитание излучателя осуществляется насосной станцией с постоянной производительностью  $Q$ , максимальное давление которой ограничено предохранительным клапаном, настроенным на давление перелива  $p_{пер}$ .

Таким образом, насосную станцию можно рассматривать как источник переменного тока с эффективным значением  $Q$  при рабочих давлениях  $p < p_{пер}$ .

Согласно фиг. 1, давление, развиваемое источником гидропитания, определяется соотношением

$$p = Q(R_{вн} + R_s'). \quad (1)$$

Гидравлическая мощность, развиваемая насосной станцией, определяется соотношением

$$P_{Г} = pQ = p^2 / (R_{вн} + R_s') = Q^2 (R_{вн} + R_s'). \quad (2)$$

Акустическая мощность излучателя равна

$$P_{А} = p_s^2 / R_s', \quad (3)$$

где  $p_s$  — падение давления на приведенном сопротивлении излучения  $R_s'$ .

Из эквивалентной схемы фиг. 1 с учетом (1) видно, что

$$p_s = pR_s' / (R_{вн} + R_s'). \quad (4)$$

Таким образом,

$$P_{А} = p^2 R_s' / (R_{вн} + R_s')^2 = Q^2 R_s'. \quad (5)$$

Из анализа (5) видно, что  $P_{А}$  растет по мере увеличения  $R_s'$ .

Акустико-гидравлический КПД  $\eta_{АГ}$  излучателя при этом равен

$$\eta_{АГ} = P_{А} / P_{Г} = R_s' / (R_{вн} + R_s'). \quad (6)$$

Таким образом, КПД тем выше, чем больше  $R_s'$  по сравнению с  $R_{вн}$ , т. е. условие максимума излучаемой мощности и КПД излучателя, работающего в непрерывном режиме, совпадают. Необходимо напомнить, что данный вывод справедлив лишь



в том случае, если источник гидропитания работает в режиме тока, как это было показано выше.

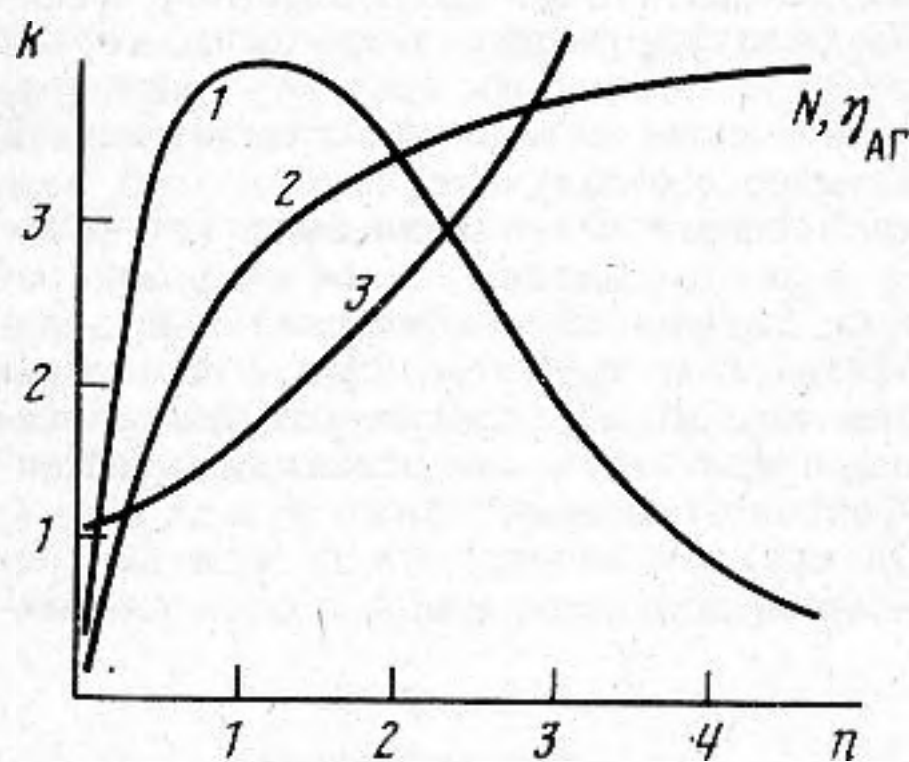
Максимальное (предельное) значение излучаемой мощности согласно (5) соответствует случаю, когда  $p \rightarrow p_{пер}$  и определяется соотношением

$$P_{A \max} = p_{пер}^2 R_s' / (R_{вн} + R_s')^2. \quad (7)$$

Необходимо отметить, что гидравлическое сопротивление  $R_{вн}$  является величиной нелинейной и зависит от расхода в виде

$$R_{вн} = \Delta p_{г} / Q = \gamma Q, \quad (8)$$

где  $\Delta p_{г}$  — падение давления на сопротивлении  $R_{вн}$ ,  $\gamma$  — коэффициент гидравлического сопротивления. Например, для отверстия площадью  $S \gamma = \rho / 2 \mu^2 S^2$ , где  $\mu$  — коэффициент расхода,  $\rho$  — плотность жидкости.



Фиг. 2. Расчетные зависимости: 1 —  $P_A/P_{A0} = N(n)$ , 2 —  $\eta_{аг}(n)$ , 3 —  $k(n)$

Гидравлическое сопротивление  $R_{вн}$  пропорционально расходу (см. (8)). В связи с этим при изменении расхода  $Q$  насосной станции пропорционально изменяется сопротивление  $R_{вн}$  и меняется соотношение сопротивлений  $R_s'$  и  $R_{вн}$ .

Гидропитание импульсного гидравлического излучателя осуществляется от гидроаккумулятора, который заряжается в паузе между импульсами до давления  $p_m$ . Во время излучения гидроаккумулятор разряжается через излучатель до начального давления заряда газовой камеры аккумулятора  $p_n$ . Для того чтобы спадание амплитуды импульса при излучении было минимальным, давление  $p_m$  и  $p_n$  должны мало отличаться по величине (практически не более чем на 10%). Объем гидравлической камеры гидроаккумулятора  $V_{гА}$  определяет длительность излучаемого импульса. Акустическая мощность импульсного излучателя может быть

значительно больше гидравлической мощности насосной станции за счет накопления энергии в гидроаккумуляторе.

Если пренебречь внутренним сопротивлением гидроаккумулятора, эквивалентная схема импульсного излучателя соответствует схеме, показанной на фиг. 1. Здесь источник гидропитания необходимо рассматривать как источник переменного напряжения с медленно меняющимся эффективным значением от  $p_m$  до  $p_n$  по мере разряда гидроаккумулятора.

Рассмотрим работу импульсного излучателя в воздухе, когда акустической нагрузкой можно пренебречь.

Расход жидкости  $Q_{н1}$  через излучатель в момент времени  $t=0$  определяется выражением

$$Q_{н1} = p_m / R_{вн1}, \quad (9)$$

где  $R_{вн1}$  — внутреннее гидравлическое сопротивление излучателя при значении расхода  $Q_{н1}$ . Используя выражение (8), можно (9) преобразовать к виду

$$Q_{н1} = (p_m / \gamma)^{1/2}. \quad (10)$$

Закон изменения расхода через излучатель по мере разряда аккумулятора определяется законом изменения сопротивления  $R_{вн}$  и емкостью гидроаккумулятора.

Можно записать  $\int_0^{t_1} Q_1(t) dt = V_{гА}$ , где  $t_1$  — время разряда аккумулятора через излу-

чатель без акустической нагрузки. Если  $p_m$  и  $p_n$  близки по величине, можно сделать допущение

$$Q_1(t) = Q_1 = V_{гА} / t_1, \quad (11)$$

где  $Q_1$  — среднее эффективное значение расхода за время разряда гидроаккумулятора.

При работе излучателя в воде, т. е. при наличии акустической нагрузки, расход жидкости  $Q_{н2}$  в начале разряда определяется соотношением

$$Q_{н2} = p_m / (R_{вн2} + R_s'), \quad (12)$$

где  $R_{вн2}$  — гидравлическое сопротивление излучателя при значении расхода  $Q_{н2}$ .

Соответственно можно записать  $\int_0^{t_2} Q_2(t) dt = V_{гА}$ , где  $t_2$  — время разряда гидроаккумулятора через излучатель в воде.



При  $p_m \approx p_n$  аналогично (11) запишем

$$Q_2(t) = Q_2 = V_{\Gamma A} / t_2. \quad (13)$$

Определим основные энергетические соотношения для средних значений расходов  $Q_1$  и  $Q_2$ .

Падение давления на сопротивлении  $R_s'$  составляет  $p_s = p_m R_s' / (R_{вн 2} + R_s')$ . Акустическая мощность определяется соотношением (5). Условие максимальной излучаемой мощности определим с учетом того, что  $R_{вн 2}$  связано с  $Q_2$  соотношением (8). В связи с этим запишем выражение для расхода  $Q_2$  с учетом (8) в виде  $Q_2 = p_m / (\gamma Q_2 + R_s')$ . Отсюда  $Q_2 = [-R_s' + (4\gamma p_m + R_s'^2)^{1/2}] / 2\gamma$ , следовательно,

$$R_{вн 2} = \gamma Q_2 = \frac{1}{2} [-R_s' + (R_s'^2 + 4\gamma p_m)^{1/2}]. \quad (14)$$

Подставив (14) в (5) и приравняв производную  $dP_A/dP_s'$  к нулю, получим условие максимума мощности в нагрузке:

$$R_{s 0}' / R_{вн 0} = 2, \quad (15)$$

где  $R_{s 0}'$  и  $R_{вн 0}$  — сопротивление излучения и внутреннее сопротивление излучателя в режиме максимальной излучаемой мощности. Назовем их оптимальными сопротивлениями.

Оптимальные сопротивления описываются следующими выражениями:

$$R_{s 0}' = 2(\gamma p_m / 3)^{1/2}, \quad R_{вн 0} = (\gamma p_m / 3)^{1/2}. \quad (16)$$

Расход жидкости через излучатель в этом случае  $Q_0 = (p_m / 3\gamma)^{1/2}$ . Максимальная акустическая мощность  $P_{A 0} = 2/3 (p_m^3 / 3\gamma)^{1/2}$ . Акустико-гидравлический КПД  $\eta_{AG 0} = 2/3$ .

Если сопротивление излучения отличается от оптимального в  $n$  раз, то выражения для  $Q$ ,  $P_A$ ,  $\eta_{AG}$  и  $R_{вн}$  имеют вид

$$Q = Q_0 [(n^2 + 3)^{1/2} - n], \quad P_A = P_{A 0} n [(n^2 + 3)^{1/2} - n]^2, \\ \eta_{AG} = \eta_{AG 0} n [(n^2 + 3)^{1/2} - n], \quad R_{вн} = R_{вн 0} [(n^2 + 3)^{1/2} - n].$$

Зависимость  $P_A/P_{A 0} = N(n)$  показана на фиг. 2. Там же показана зависимость  $\eta_{AG}(n)$ .

Соотношение расходов, внутренних сопротивлений и времен разряда нагруженного и ненагруженного излучателя связаны выражением

$$k(n) = Q_1/Q = R_{вн 1}/R_{вн} = t/t_1 = 3^{1/2} [(n^2 + 3)^{1/2} - n]. \quad (17)$$

Зависимость  $k(n)$  показана на фиг. 2.

Из анализа (17) видно, что по соотношению времен разряда нагруженного и ненагруженного излучателя, измеренному экспериментально, можно определить акустическую мощность  $P_A$ , КПД излучателя  $\eta_{AG}$  и величину сопротивления акустической нагрузки.

Приведенный анализ показывает, что акустическая мощность и акустико-гидравлический КПД гидравлического излучателя зависят от соотношений сопротивлений излучения и внутреннего гидравлического сопротивления излучателя. В непрерывном режиме максимальная акустическая мощность соответствует максимальному КПД.

В импульсном режиме при работе от накопителя гидравлической энергии из-за нелинейности гидравлического сопротивления максимум излучаемой мощности соответствует случаю, когда сопротивление излучения вдвое больше внутреннего гидравлического сопротивления. При этом КПД составляет  $2/3$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжаков С. П. Использование гидравлического накопления энергии для излучения мощных акустических сигналов. — Акуст. журн., 1985, т. 31, № 4, с. 560–562.
2. Заган В. И. Гидравлический гидроакустический излучатель. — Акуст. журн., 1982, т. 28, № 4, с. 505–509.

Поступило в редакцию  
7.IV.1986

УДК 534.26

## РАСSEЯНИЕ ЗВУКА НА ДИСКЕ В ФОКАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ АКУСТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА

Зинин П. В., Лобкис О. И., Маев Р. Г.

При анализе изображений в сканирующем акустическом микроскопе, работающем в режимах нахождение и темного поля [1], встает вопрос об эффективности рассеяния фокусированного излучения на частицах, размер которых сравним с длиной используемой акустической волны. Задача о дифракции в фокальной области