АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXVIII 1982 Вып. 6

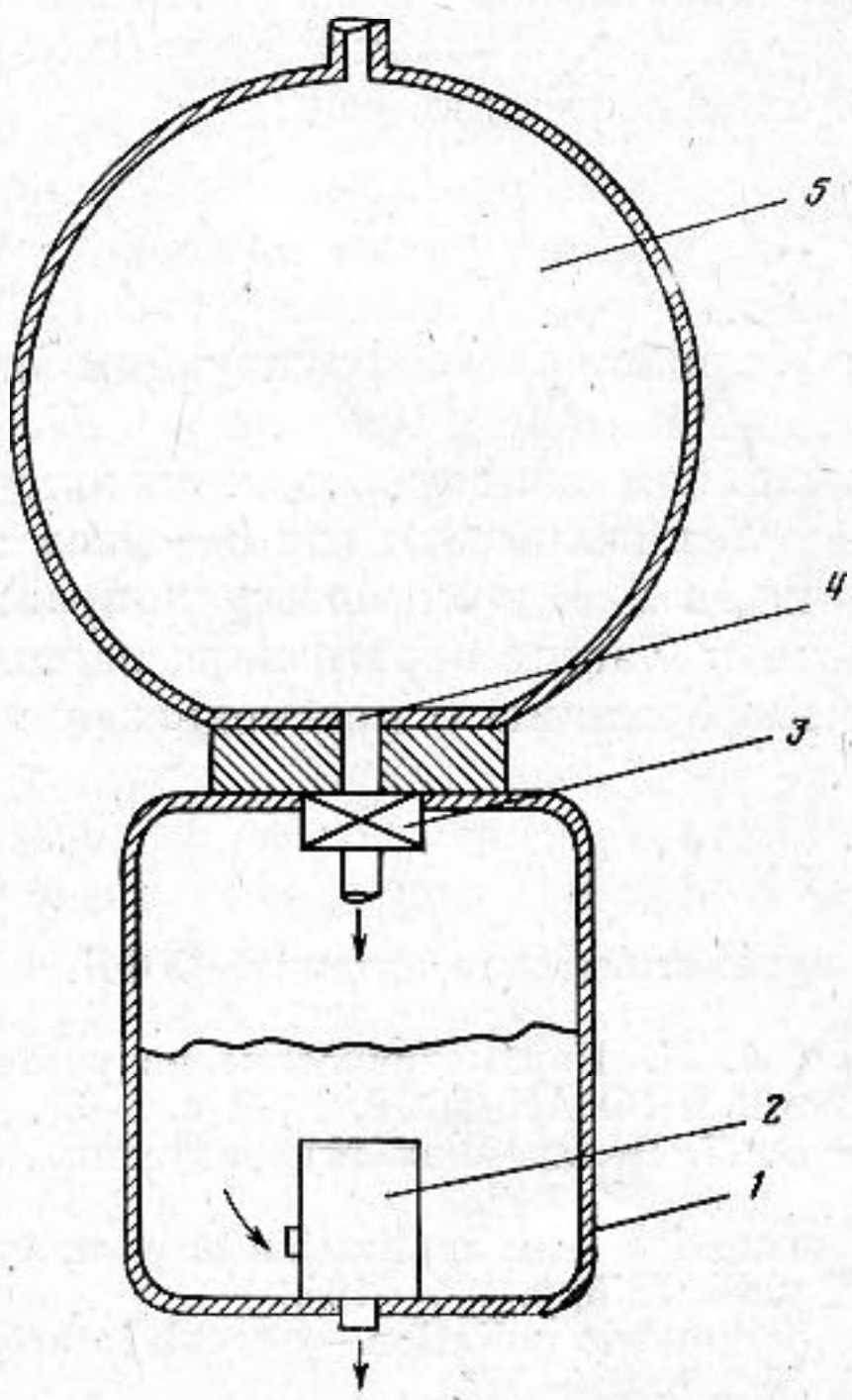
УДК 534.232

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИРЕНА, НАГРУЖЕННАЯ НА РЕЗОНАТОР ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Жулин В. И., Римский-Корсаков А. В., Рыжаков С. П.

Дан анализ работы подводной сирены, нагруженной резонатором Гельмгольца. Получены выражения для излучаемой мощности, коэффициента полезного действия сирены и для площади открытия отверстия модулятора, которая обеспечивает синусоидальный поток жидкости, возбуждающей резонатор.

Для интенсификации ряда технологических процессов, протекающих в жидких средах, используется акустическая энергия, поэтому создание простого по конструкции мощного низкочастотного (100—1000 Гц) генератора акустических колебаний, работающего в жидкости, представляет интерес для ряда отраслей народного хозяйства. Решение данной проблемы может быть найдено, в частности, путем использования гидравлической сирены, нагруженной на резонатор Гельмгольца.



Фиг. 1. Схема подводной гидравлической сирены, нагруженной на резонатор Гельмгольца. *1* – резервуар, *2* – насос, *3* – модулятор, *4* – патрубок, *5* – резонатор Гельмгольца

Резонатор Гельмгольца повышает сопротивление нагрузки подводной сирены и соответственно увеличивает ее коэффициент полезного действия, что важно для низкочастотных излучателей, эффективность которых мала из-за несоответствия геометрических размеров излучающей поверхности и длины излучаемой волны.

На фиг. 1 представлен схематический чертеж подводной гидравлической сирены, состоящей из резервуара *1*, гидронасоса *2*, который откачивает из резервуара *1* воду, модулятора *3*, соединенного патрубком *4* с резонатором *5*. При работе модулятора открывается и закрывается сечение патрубка *4* и вследствие разности давлений между давлением окружающей среды и давлением в резервуаре *1* возникает переменный поток жидкости, возбуждающий колебания в резонаторе *5*, которые обуславливают излучение звука в окружающую среду.

Заметим, что объемная скорость V_0 жидкости, протекающей через горло резонатора, равна сумме объемной скорости V_1, определяющей сжатие жидкости в резонаторе, и объемной скорости V_2 жидкости, проходящей через модулятор.

Кроме того, давление в резонаторе $P_р$ равно разности давлений между окружающей сирену средой P_0 и перепадом давления $P_г$ на горле резонатора: $P_р = P_0 - P_г = P_0 - L_0 \frac{dV_0}{dt} - R_0 V_0 = \frac{1}{C} \int V_1 \, dt$, здесь L_0 – инертность

горла резонатора плюс приведенная присоединенная масса окружающей среды; $R_0=(r_п+r_н)/S_г^2$, где $r_п$ — активное сопротивление потерь в горле резонатора; C — гибкость объема жидкости в резонаторе; $r_н$ — сопротивление излучения, $S_г$ — площадь горла резонатора.

С другой стороны, давление в резонаторе определяется давлением в резервуаре P_1 и падением давления на патрубке и модуляторе $P_м$ и может быть представлено в виде $P_р=P_1+P_м=P_1+R_2(t)V_2+R_1V_2+L_1\frac{dV_2}{dt}+$ $+L_2(t)\frac{dV_2}{dt}$, где $L_2(t)$ — инертность отверстий модулятора; R_1 — активное сопротивление потерь в патрубке; L_1 — инертность патрубка; $R_2(t)$ — сопротивление потерь в отверстии модулятора [1]: $R_2(t)=\frac{\sqrt{|P|\rho/2}}{\mu S(t)}$, где P — перепад давления на модуляторе; ρ — плотность жидкости; μ — коэффициент расхода; $S(t)$ — площадь открытия отверстия модулятора.

При анализе работы сирены будем считать инертность отверстий модулятора много меньшей инертности патрубка, что имеет место в практике.

На основании ранее полученных выражений нетрудно получить уравнение, описывающее работу сирены:

$$V_2=L_0C\frac{d^2V_0}{dt^2}+R_0C\frac{dV_0}{dt}+V_0=\frac{\mu(P_0-P_1)}{\sqrt{(P_0-P_1)\rho/2}}\sqrt{\frac{|P|}{P_0-P_1}}S(t), \tag{1}$$

где

$$P=P_0-P_1-L_0LC\frac{d^3V_0}{dt^3}-(L_1R_0+L_0R_1)C\frac{d^2V_0}{dt^2}-$$
$$-(L+L_0+CR_0R_1)\frac{dV_0}{dt}-(R_0+R_1)V_0.$$

Будем искать решение уравнения (1) при таком законе открытия отверстий модулятора, для которого скорость переменного потока жидкости $V_{2\infty}$ в модуляторе будет синусоидальной:

$$V_2=V_{20}+V_{2\infty}\sin\omega t=\frac{\mu(P_0-P_1)}{\sqrt{(P_0-P_1)\rho/2}}\sqrt{\frac{|P|}{P_0-P_1}}\cdot S(t),$$

откуда

$$S(t)=\frac{V_{20}+V_{2\infty}\sin\omega t}{\sqrt{|P|/(P_0-P_1)}}\frac{\sqrt{(P_0-P_1)\rho/2}}{\mu(P_0-P_1)}. \tag{2}$$

Тогда решение уравнения (1) на частоте собственных колебаний резонатора $\omega_р=(L_0C)^{-1/2}$ принимает вид $V_0=V_{20}-V_{2\infty}Q\cos\omega t$, где $Q=\omega L_0/R_0$ — добротность резонатора.

Из выражения (2) видно, что для получения синусоидальной формы скорости V_2 переменного потока жидкости через модулятор необходимо соблюдение двух условий: амплитуда переменной скорости потока жидкости $V_{2\infty}$ должна быть равной или меньше средней объемной скорости потока жидкости V_{20}, а падение давления P на модуляторе не должно быть равным нулю или менять свой знак на обратный. Кроме того, для достижения максимального коэффициента полезного действия сирены следует величину постоянной составляющей объемной скорости потока жидкости V_{20} уменьшать, однако это уменьшение не должно приводить к тому, чтобы амплитуда переменной скорости $V_{2\infty}$ была больше постоянной составляющей скорости потока жидкости V_{20}. Поэтому зададимся $V_{2\infty}=V_{20}$. Тогда, выражая перепад давления жидкости P на модуляторе через пере-

менную скорость $V_{2\infty}$, получим условие

$$V_{2\infty} \leqslant \frac{P_0 - P_1}{R_1 + z + r_н/S_г^2} = V_м, \tag{3}$$

при котором скорость V_0 переменного потока жидкости будет синусоидальной.

В условии (3) величина z, равная

$$z = R_0 Q^2 \sqrt{\left(1 + \frac{L_1}{L_0}\frac{R_1}{Q^2 R_0}\right)^2 + \frac{1}{Q^2}\left(1 - \frac{L_1}{L_0}\right)^2}, \tag{4}$$

является входным сопротивлением резонатора; $V_м$ — максимальная средняя объемная скорость жидкости, проходящей через отверстия модулятора, когда форма скорости еще синусоидальная.

Записывая $V_{2\infty} = \beta V_м$, где $0 < \beta < 1$, получаем выражение для производительности V сирены в виде $V = V_{2\infty} Q = \beta Q \dfrac{P_0 - P_1}{R_1 + z + r_н/S_г^2}$.

В этом случае площадь открытия отверстия модулятора $S(t)$ должна задаваться формулой

$$S(t) = \frac{\beta}{z + R_1 + r_н/S_г^2} \cdot \frac{1 + \sin \omega t}{\sqrt{1 - \beta \dfrac{R_1 + r_н/S_г^2 + z \sin(\omega t + \varphi)}{R_1 + r_н/S_г^2 + z}}} \times$$

$$\times \frac{\sqrt{(P_0 - P_1)\rho/2}}{\mu},$$

где $\varphi = \operatorname{arctg}\left[Q\left(1 + \dfrac{R_1}{Q^2 R_0}\dfrac{L_1}{L_0}\right) \Big/ \left(1 - \dfrac{L_1}{L_0}\right)\right] - \dfrac{\pi}{2}$. Если площадь $S(t)$ открытия отверстий модулятора будет изменяться по иному закону, то форма объемной скорости переменного потока жидкости в патрубке (модуляторе) может быть несинусоидальной, однако форма акустического сигнала из-за резонансных свойств резонатора будет практически синусоидальной. При этом в патрубке и перед модулятором будут возникать выбросы давления (гидравлические удары), которые могут снизить надежность работы сирены.

При определении коэффициента полезного действия сирены заметим, что потребляемая насосом мощность $W_п$ складывается из мощности $W_н$, идущей на создание необходимой разности давлений между резервуаром и окружающей средой, и мощности $W_к$, затрачиваемой на сообщение жидкости объемной скорости (кинетической энергии).

В случае непрерывного режима работы сирены мощность $W_н$ определяется произведением разности давлений $(P_0 - P_1)$ и среднего значения объемной скорости $V_{20} = \beta V_м$, а мощность $W_к$ определяется величиной кинетической энергии жидкости, поступающей в резервуар за один период:

$$W_к = \frac{1}{2\pi/\omega}\int_0^{2\pi/\omega} dE_к = \frac{1}{2\pi/\omega}\int_0^{2\pi/\omega} \frac{1}{2}\rho V_1 \left[\frac{V_1}{S(t)}\right]^2 dt =$$

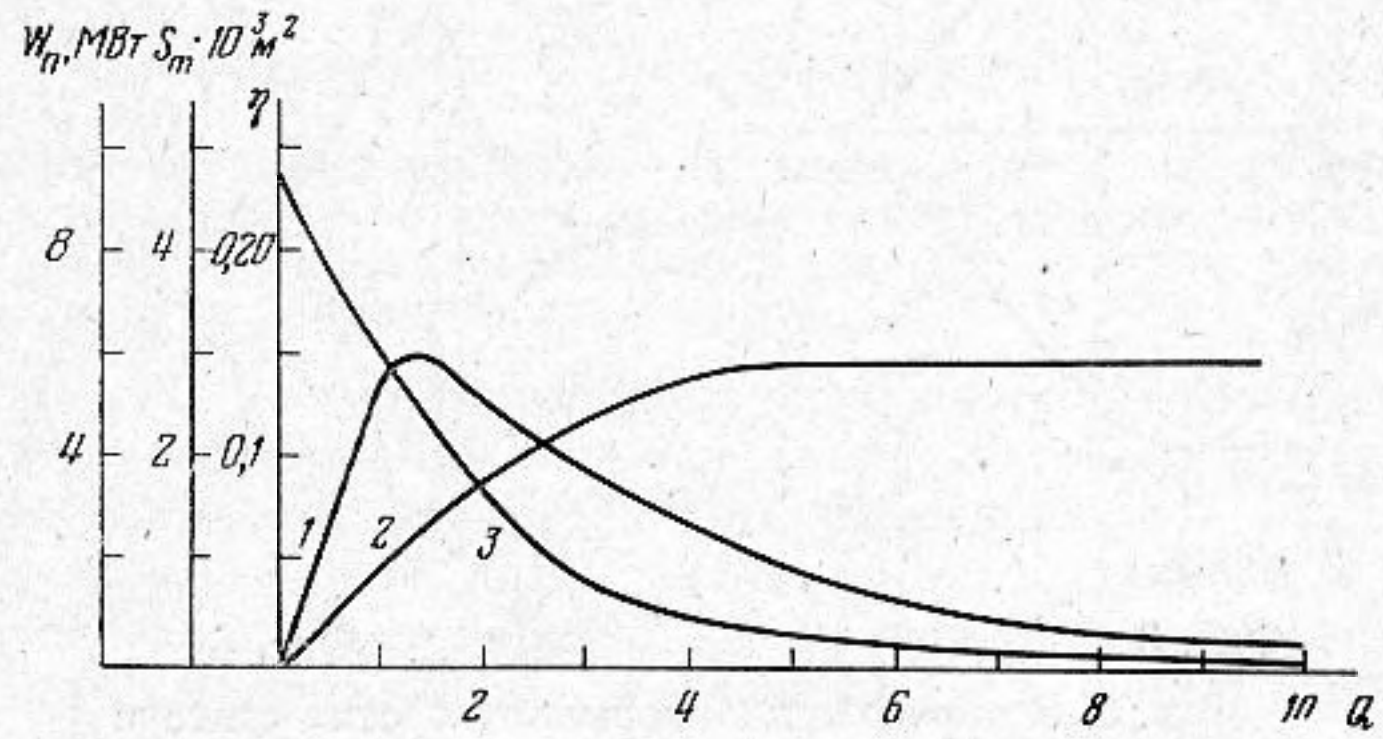
$$= \mu^2 W_н - \mu^2 \beta^2 (P_0 - P_1)^2 \frac{R_1 + r_н/S_г^2 + \dfrac{1}{2} z \cos\varphi}{(R_1 + r_н/S_г^2 + z)^2}.$$

Тогда выражения для излучаемой мощности $W_н$ и гидравлико-акустического коэффициента полезного действия η примут вид

$$W_н = \beta^2 Q^2 \frac{(P_0 - P_1)^2}{(R_1 + r_н/S_г^2 + z)^2} \frac{r_н}{2S_г^2}, \tag{5}$$

$$(6)\qquad \eta=\beta Q^2\frac{r_н/2S_г^2}{R_1+r_п/S_г^2+z}\cdot\frac{1}{1+\mu^2\left(1-\beta\dfrac{R_1+r_п/S_г^2+\frac{1}{2}z\cos\varphi}{R_1+r_п/S_г^2+z}\right)}.$$

На фиг. 2 представлен график изменения излучаемой мощности $W_н$ (кривая *1*), коэффициента полезного действия η (кривая *2*) и оптимальной площади отверстия модулятора S_m (кривая *3*) в зависимости от изменения добротности Q резонатора (при расчете было принято: $P_0=10^7$ Па;



Фиг. 2. Зависимость площади отверстий модулятора, излучаемой мощности и КПД сирены от добротности: *1* – $W_н$, *2* – η, *3* – S_m

$\beta=0{,}9$; $R_1=r_п/S_г^2=4\cdot10^5$ кг/м$^4\cdot$с; $r_н/S_г^2=3\cdot10^5$ кг/м$^4\cdot$с; $L_1=L_0$). Из графиков видно, что с увеличением добротности резонатора коэффициент полезного действия сирены растет и при $Q>5$ практически не изменяется; оптимальная площадь открытия отверстия модулятора S_m уменьшается; излучаемая мощность сначала растет, а, достигнув максимума, падает.

Из выражений (5) и (6) видно, что максимумы излучаемой мощности и коэффициента полезного действия имеют место при минимуме входного сопротивления резонатора, равному, как следует из выражения (4), активному сопротивлению горла, умноженному на квадрат добротности резонатора ($z=R_0Q^2$), т. е. когда инертность L_1 патрубка равна инертности L_0 горла и активные потери R_1 в патрубке много меньше активных потерь R_0 в горле, умноженных на квадрат добротности резонатора ($R_1\ll R_0Q^2$).

Используемые в практике резонаторы Гельмгольца имеют добротность больше единицы, тогда выражения для средней объемной скорости V_{20} жидкости в модуляторе, площади $S(t)$ открытия отверстия модулятора, излучаемой мощности $W_н$ и коэффициента полезного действия η сирены примут вид

$$(7)\qquad S(t)=\frac{\sqrt{(P_0-P_1)\rho/2}}{\mu Q^2R_0}\beta\frac{1+\sin\omega t}{\sqrt{1-\beta\sin\omega t}},$$

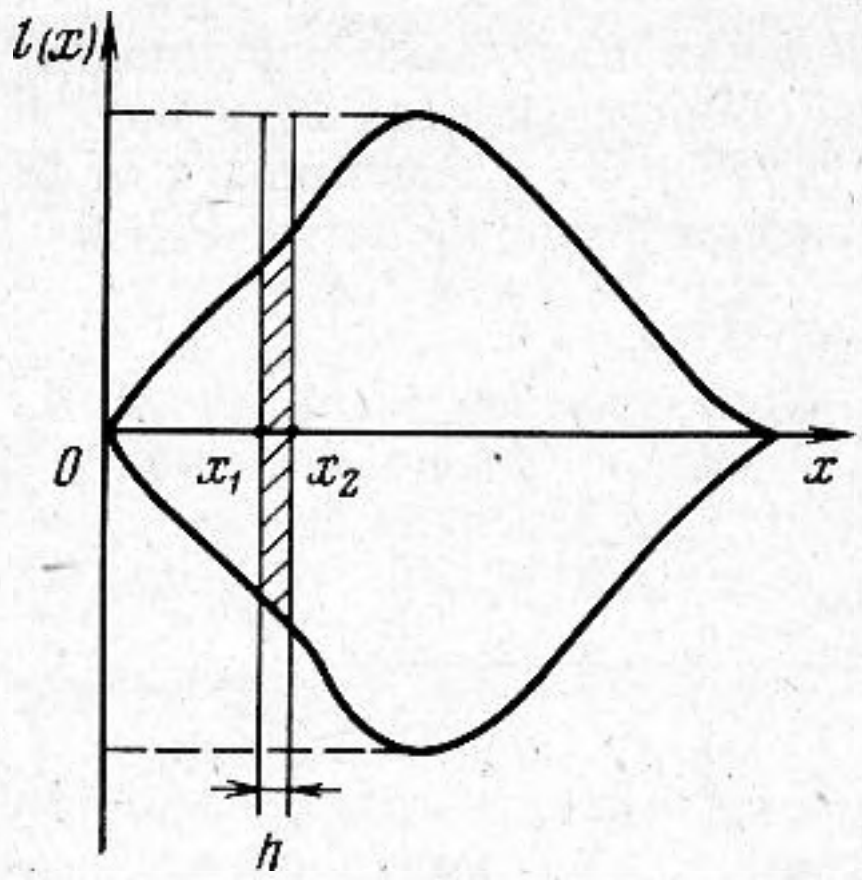
$$V_{20}=V_{2\infty}=\beta\frac{P_0-P_1}{QR_0};\qquad W_н=\frac{\beta^2}{2}\frac{(P_0-P_1)^2}{Q^2R_0}\frac{r_н}{r_н+r_п}=$$

$$=\beta^2\frac{\pi^2(P_0-P_1)^2S_г}{32\left(1+\dfrac{\pi l}{2R}\right)^2\rho c};\qquad \eta=\frac{\beta}{2}\frac{r_н}{r_н+r_п}\frac{1}{1+\mu^2(1-\beta/2)},$$

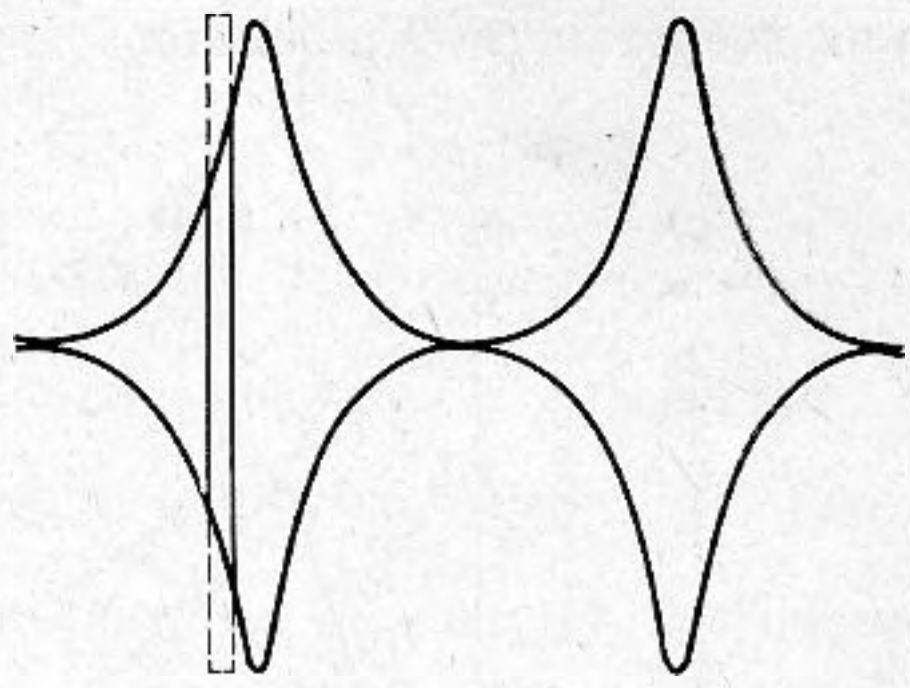
где l – длина горла резонатора; R – радиус горла, c – скорость звука.

Синусоидальность скорости потока жидкости через модулятор определяется площадью и формой отверстий статора и ротора сирены. Пусть форма отверстий статора описывается кривой $l(x)$ (фиг. 3). Примем форму отверстий ротора в виде прямоугольной щели шириной $h=x_2-x_1$. Тогда

в случае узкой щели кривизной $l(x)$ при $x_1<x<x_2$ можно пренебречь, при этом площадь открытия отверстий модулятора определяется как $S(x)=2h\cdot l[(x_1+x_2)/2]$. При движении щели с постоянной скоростью $c_1(x=c_1t)$, используя формулу (7), получаем выражение для кривой $l(x)$, обеспечивающей синусоидальное изменение объемной скорости жидкости,



Фиг. 3



Фиг. 4

Фиг. 3. К определению формы отверстия статора

Фиг. 4. Форма отверстий статора, обеспечивающая синусоидальное возбуждение резонатора Гельмгольца

протекающей через модулятор:

$$l(x)=\frac{S(x/c_1)}{2h}=\frac{\beta\sqrt{(P_0-P_1)\rho/2}}{2h\mu Q^2R_0}\,\frac{1+\sin(\omega x/c_1)}{\sqrt{1-\beta\sin(\omega x/c_1)}}. \tag{8}$$

На фиг. 4 представлена конфигурация отверстия статора, рассчитанная по выражению (8), при $\beta=0{,}9$.

Проведенные расчеты показали, что сирена, нагруженная на резонатор Гельмгольца, может излучать сигнал мощностью $10\div500$ кВт (при $P_0=10^6\div10^7$ Па) с коэффициентом полезного действия $2\div25\%$.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
24.VIII.1981