АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том VII 1961 Вып. 4

К ВОПРОСУ О ГЕНЕРАЦИИ ЗВУКА ГАЗОСТРУЙНОЙ СИРЕНОЙ

В. П. Куркин

Описана газоструйная статическая сирена с подвижным отражателем, обеспечивающим настройку излучателя на максимум излучения. Газоструйная статическая сирена представляет собой комбинацию газоструйных излучателей Гартмана в виде сопел, продуваемых со сверхзвуковой скоростью газом, и резонаторов, помещаемых в газоструйный поток. Сопла и резонаторы расположены радиально в горловине кольцеобразного экспоненциально расширяющегося рупора.

Проведенное исследование, а также анализ механизма звукообразования в газоструйных излучателях, позволили установить основные закономерности, необходимые для конструирования газоструйных статических сирен.

В установках для акустической коагуляции аэрозолей в последние годы стали все большее применение находить так называемые статические сирены. Толчком к созданию статических сирен на основе газоструйных излучателей Гартмана послужила работа Буше [1], где была показана возможность создания газоструйных сирен сравнительно большой мощности. Сирена Буше генерировала уровни звуковых давлений, недостаточные для промышленной коагуляции аэрозолей. Тем не менее, с точки зрения возможного промышленного применения, газоструйная сирена является более перспективной, чем динамические сирены, так как газоструйная сирена обладает значительными конструктивными и эксплуатационными преимуществами. Это связано главным образом с тем, что в статических сиренах отсутствуют вращающиеся части.

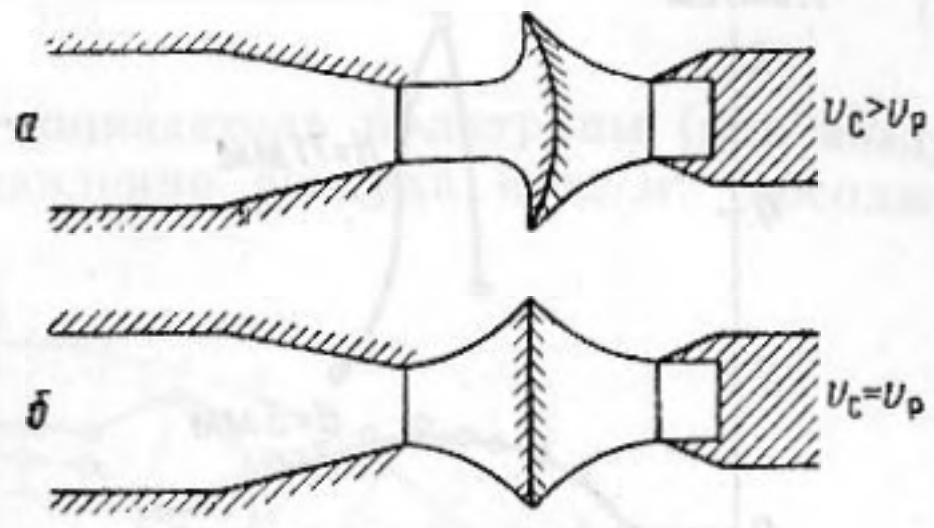
В газоструйных излучателях генерация звука происходит при сверхзвуковом истечении газа из сопла в резонатор, обуславливающем процесс периодического наполнения полости резонатора газом, который можно проследить на схеме сверхзвукового истечения газа из сопла в резонатор, приведенной на фиг. 1. Этот процесс распадается на следующие фазы: 1) газ струи заполняет резонатор, расположенный на фигуре справа, при этом $v_c > v_p$. Здесь v_c и v_p соответственно скорости газа в сопле и резонаторе. Форма струи показана на фиг. 1, *а*. 2) $v_c = v_p$, устанавливается мгновенное динамическое равновесие потока. Струя образует форму (фиг. 1, *б*). Так как давление газа в резонаторе не может быть больше давления газа в сопле, то процесс заполнения резонатора газом повторяется.

Перемещающееся утолщение струи, образующееся фактически на границе стыка двух струй со скоростями v_c и v_p, есть не что иное, как осциллирующий скачок уплотнения, который и обуславливает генерацию звука газоструйным излучателем.

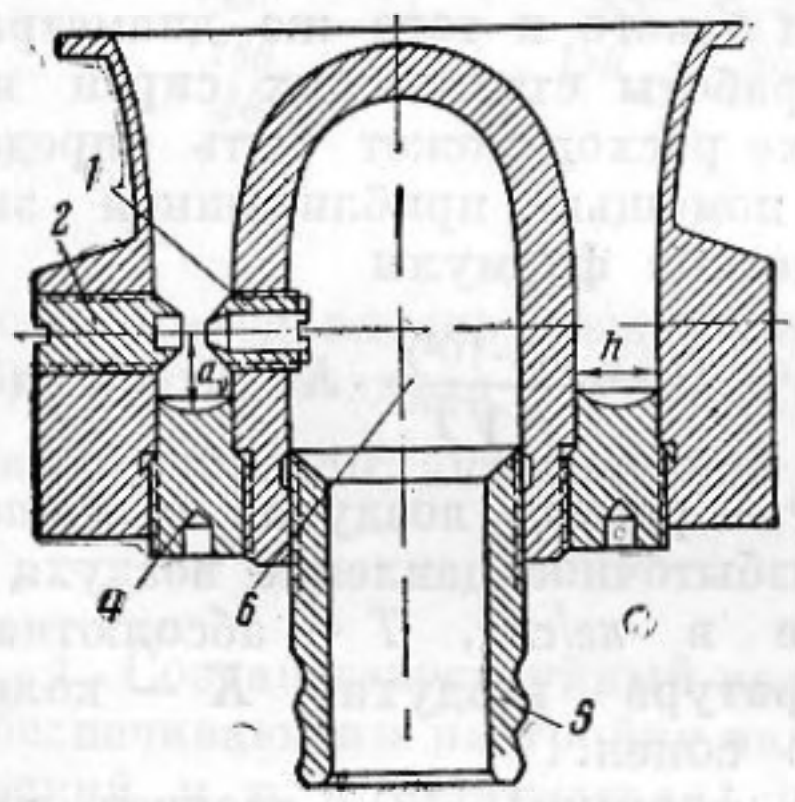
В данной работе рассматриваются некоторые свойства осциллирующего скачка уплотнения. Их изучение позволило не только улучшить акустико-экономические параметры статической сирены, но и создать метод их расчета.

Исследование проводилось на сирене [2], показанной на фиг. 2, и представляющей собой комбинацию газоструйных излучателей Гартмана в виде сопел *1* и резонаторов *2*, расположенных радиально в горловине экспоненциально расширяющегося кольцеобразного рупора. Кон-

струкция сирены позволяет регулировать не только расстояние между соплами и резонаторами, но, в отличие от сирены Буше, также и расстояние между осью сопло—резонатор и отражателем *4*. При установке отражетеля на определенном расстоянии от оси сопло — резонатор удается получить резонанс и резко увеличить интенсивность генерируемого звука. При продувании сопел сирены газом со сверхзвуковой скоростью (через патрубок *5* и диффузор *6*) генерируются акустические колебания определенный частоты, зависящей от диаметра сопла. При глубине резонатора, равной диаметру сопла, максимальная интенсивность звука *I* получается при отношении расстояния сопло — резонатор *l* к диаметру сопла *d* около 1,4 (фиг. 3). Получаемая при этом зависимость частоты излучаемого звука *f* от диаметра сопла *d* приведена на фиг. 4. Эта зависимость построена по данным Гартмана [3] (*1*), по измерениям автора (*2*) и по данным Гартмана и автора (*3*). Точки *2* и *3* определены путем последовательной замены в сирене комплектов сопел и резонаторов различных диаметров. Эмпирическое выражение этой зависимости может быть представлено в виде уравнения



Фиг. 1



Фиг. 2

$$f \approx \frac{\xi c}{\pi d} \cdot 10^{-3}, \qquad (1)$$

где *f* — частота звука в килогерцах, *d* — диаметр сопла в сантиметрах, ξ — постоянный коэффициент, равный 0,5 при скорости звука в воздухе $c = 331 \cdot 10^2$ *см/сек*.

При расстояниях *l* между соплом и резонатором, отличных от 1,4 *d*, наблюдаются отклонение частоты от значения определяемого уравнения (1), при этом частота становится очень нестабильной и интенсивность звука падает. При ширине кольцевого отражателя *h* (фиг. 2) меньшей 0,6 *d* интенсивность излучаемого звука также резко уменьшается.

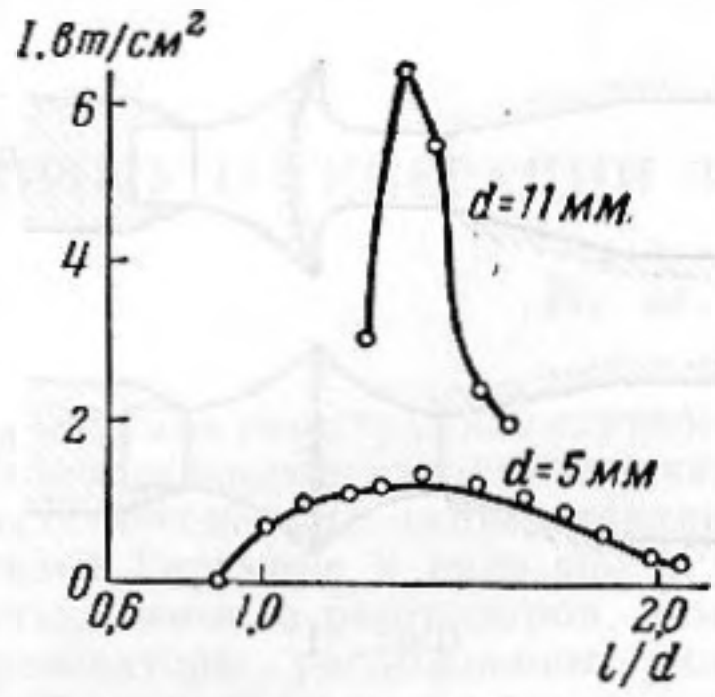
На фиг. 5 показана зависимость интенсивности звука для сирены с пятью соплами диаметром 5 *мм*, от расстояния d_ν между осью сопло — резонатор и отражателем, полученная для различных расстояний *l* между соплом и резонатором. Максимальные значения интенсивности звука получились при расстоянии отражателя от оси сопло — резонатор соответственно около 1,3 и 2,8 *см*. Эти максимумы соответствуют расстояниям d_ν, определяемым формулой

$$\alpha_\nu = \frac{1}{2} \frac{\gamma_\nu c}{\pi f} \cdot 10^{-3} \text{ см}, \qquad (2)$$

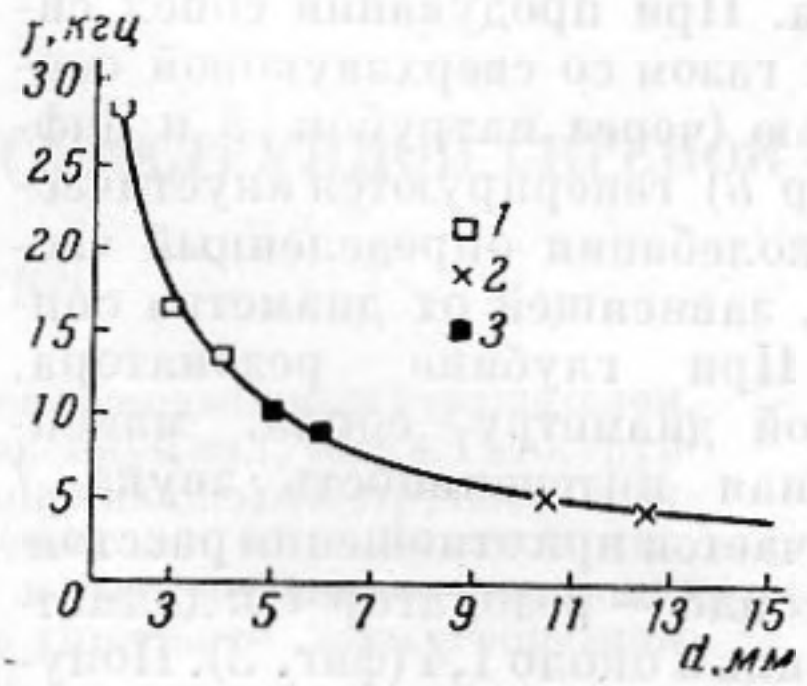
где γ_ν — корни функции Бесселя нулевого порядка, *c* — скорость звука.

Из формулы (2) следует, что для данной частоты излучаемого звука в сирене существует целый ряд расстояний d_ν, при которых интенсивность излучаемого звука имеет максимальные значения. Заметим, что сходна с формулой (2) формула, определяющая так называемые допустимые радиусы закрепления колеблющейся диафрагмы.

Расход воздуха в газоструйных излучателях звука, зависит как показали наши наблюдения, не только от его давления и температуры — эта зависимость имеет место при истечений газа из сопла, — но и от частоты излучаемого звука. Согласно приведенному выше описанию механизма

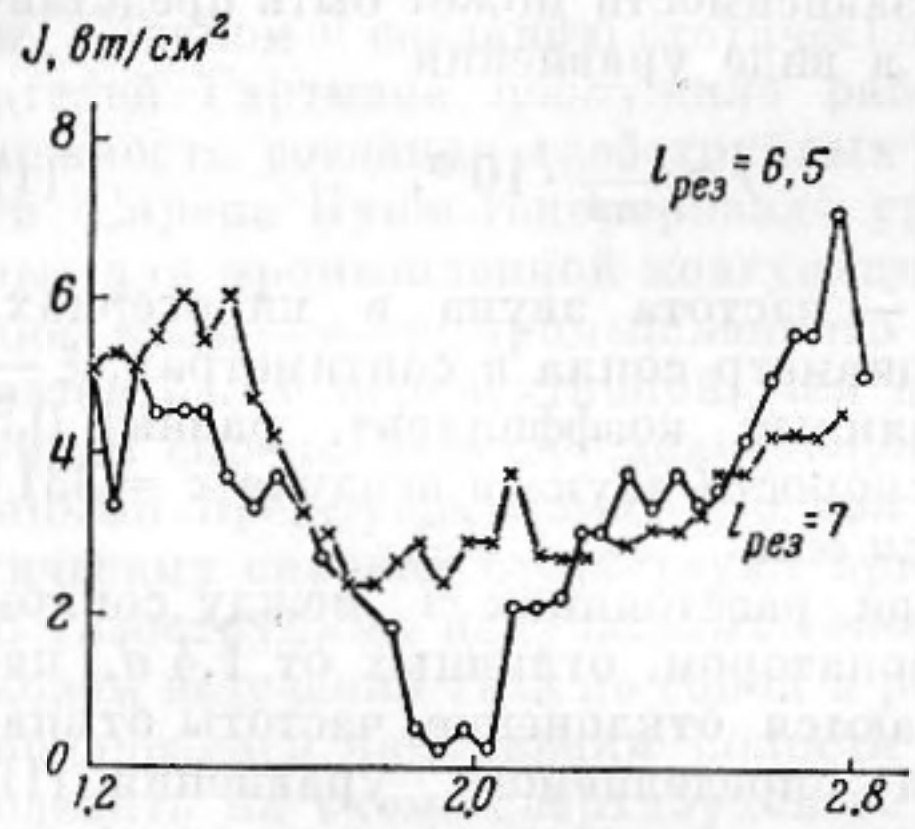


Фиг. 3



Фиг. 4

звукообразования, при сверхзвуковых истечений газа из сопла в резонатор моменты динамического равновесия потока при $v_c = v_p$ обуславливают частоту излучаемого звука. Чем выше частота звука, генерируемого газоструйным излучателем, тем меньшее количество газа расходуется при соплах одного и того же диаметра. Для работы статических сирен на воздухе расход может быть определен с помощью приближенной эмпирической формулы



Фиг. 5

$$Q = \frac{3{,}2 \cdot 10^4 p}{f^2 \sqrt{T}} \cdot K, \qquad (3)$$

где Q — расход воздуха в $м^3/час$, p — избыточное давление воздуха в сирене в $кг/см^2$, T — абсолютная температура воздуха, K — количество сопел.

Из формулы (3) следует, что более экономичной является работа сирены на высоких частотах. Надо отметить, что для каждого диаметра сопла газоструйного излучателя существует оптимальное значение давления газа. Так для воздуха в работе [3] приводится следующая таблица:

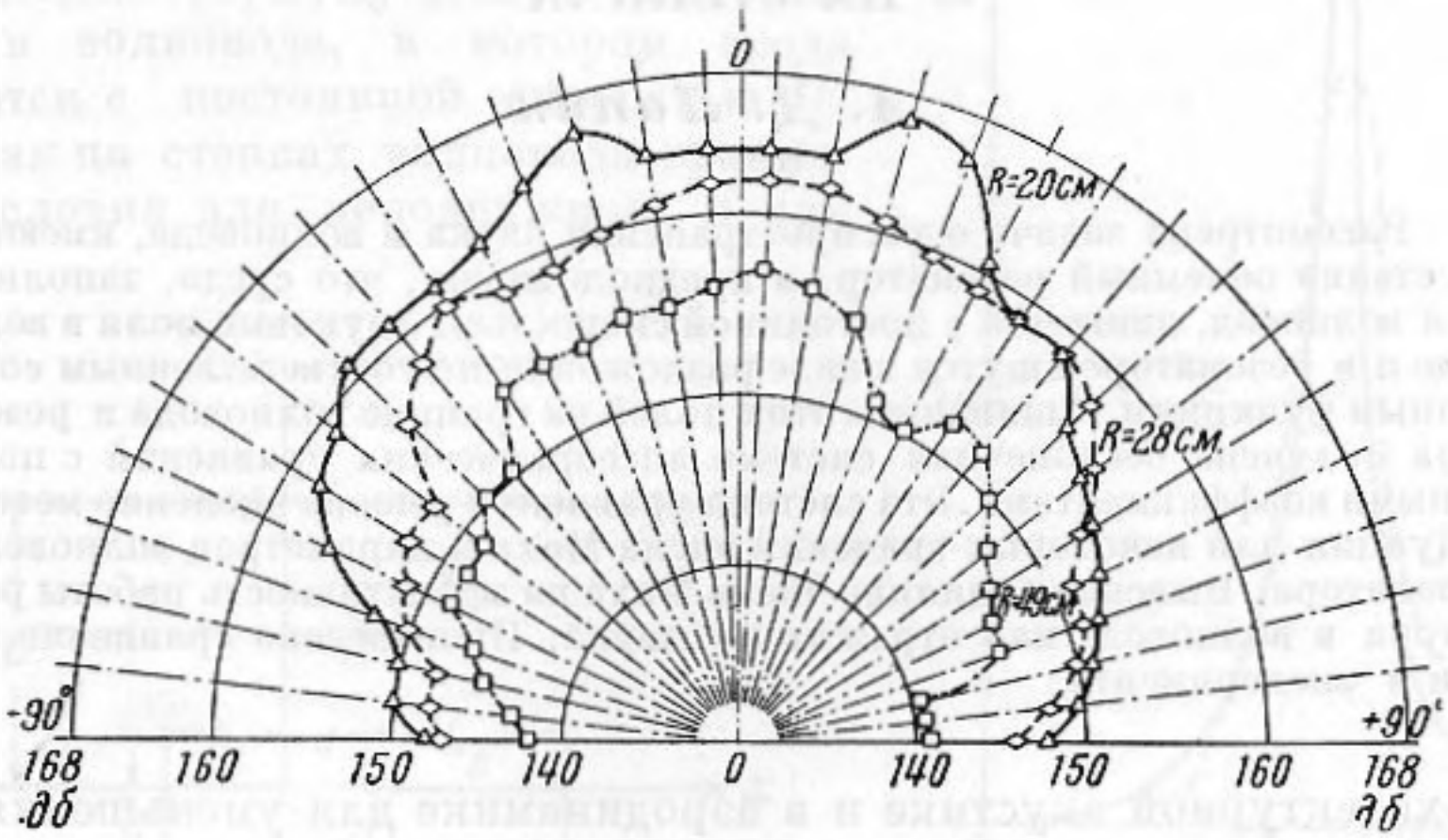
d,	*мм*	2	3	4	5	6
p,	*атм*	2,61	2,61	2,74	3,44	3,16

Для определения эффективности сирены (диаметр сопел сирены 5 *мм*, количество сопел $K = 5$) была получена ее диаграмма направленности и вычислены акустическая мощность и к. п. д. На фиг. 6 приведены диаграммы направленности сирены, представляющие собой усредненное значение уровней звукового давления, снятые в направлении излучения на сферической поверхности, ограниченной телесным углом 2π. Диаграммы направленности были получены при различных радиусах поверхности, на которой предполагалось осуществить интегрирование потока энергии. Как видно из фигуры, диаграммы, снятые на поверхности радиуса 28 и 49 *см*, по форме почти не различаются. Поток звуковой энергии, проходящий через эти поверхности, равен около 1,55 *квт*. Расход воздуха для этой сирены, определенный по формуле (3) при $T = 288°$ К, состав-

ляет около 292 *м*³/*час*. Мощность, необходимая для компримирования этого количества воздуха до давления 3,44 *ати*, может быть определена по формуле политропического сжатия

$$N = \frac{\frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left| \frac{p_2}{p_1} \right|^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]}{102}, \tag{4}$$

где N — мощность в киловаттах, n — показатель политропы (для воздуха $n = 1{,}3$), p_1 — первоначальное давление воздуха в *кг*/*м*² (абсолютное), p_2 — давление воздуха в сирене в *кг*/*м*² (абсолютное), v_1 — секундный расход воздуха в *м*³/*сек*. Расчетное значение мощности равно 14 *квт*. Таким образом, акустический к. п. д. составляет $\frac{1{,}55}{14} \cdot 100\% \simeq 11\%$.



Фиг. 6

Выводы

1. Создан газоструйный излучатель звука с подвижным отражателем, обеспечивающим настройку излучателя на максимум излучения. Акустический к. п. д. излучателя составляет 11%.

2. Определены основные закономерности, позволяющие рассчитать главные параметры излучателя.

В заключение автор выражает благодарность Б. Д. Тартаковскому за обсуждение некоторых разделов этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. M. G. Boucher. La coagulation des aerosols industies par ultrasons. Cénie Chim., 1957, 77, 6, 163—173; 1957, 78, 1, 14—28.
2. В. П. Куркин. Статистическая сирена. Бюлл. изобрет., 1960, 18, Стандартгиз.
3. Л. Бергман. Ультразвук и его применение в науке и технике. М. ИЛ., 1957.

Государственный н.-и. институт.
по промышленной и санитарной очистке газов
Москва

Поступила в редакцию
25 мая 1960 г.