

ГАЗОСТРУЙНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ЗВУКА С КОСЫМ СКАЧКОМ
УПЛОТНЕНИЯ

В. П. Куркин

Описан газоструйный излучатель звука, генерация звука в котором вызвана образованием осциллирующего косоугольного скачка уплотнения. Излучатель состоит из сопла, продуваемого газом, и резонатора, помещаемого в газоструйный поток. Для образования косоугольного скачка уплотнения в газоструйный поток перед соплом устанавливается стержень. Сопло и резонатор со стержнем расположены соосно в горловине экспоненциально расширяющегося рупора. Проведенное исследование позволило установить, что созданный излучатель обладает относительно высокими акустико-экономическими показателями.

Исследования по акустической коагуляции аэрозолей и интенсификации звуком других химико-технологических процессов (сушка, процессы горения и другие) показали [1], что затраты энергии на создание звукового поля в таких случаях по существу определяют экономичность всего технологического процесса. Поэтому имеет большое значение разработка эффективных и эксплуатационно надежных излучателей звука, предназначенных для технологического исследования.

Газоструйные излучатели типа статических сирен [2, 3] являются достаточно надежными и эффективными генераторами звука. Как известно [2], в этих излучателях сверхзвуковое истечение газа из сопла в резонатор вызывает появление осциллирующего прямого скачка уплотнения. Однако аэродинамические свойства прямого скачка уплотнения характеризуются большими диссипативными потерями механической энергии [4]. Это обстоятельство и обуславливает невысокую экономичность статических газоструйных сирен, к. п. д. которых не превышает 11%. Более эффективными могут быть газоструйные излучатели, в которых использовался бы так называемый косой скачок уплотнения, поскольку потери энергии в косом скачке значительно меньше, чем в прямом. В связи с этим нами был построен и подвергнут испытанию экспериментальный излучатель такого типа.

Для пояснения принципа работы газоструйного излучателя звука с косым скачком уплотнения рассмотрим известный в газовой динамике пример сверхзвукового обтекания клина. Предположим, что сверхзвуковой поток (число Маха $M > 1$) набегаем на расположенный симметрично по отношению к потоку клин с углом раствора 2θ (фиг. 1).

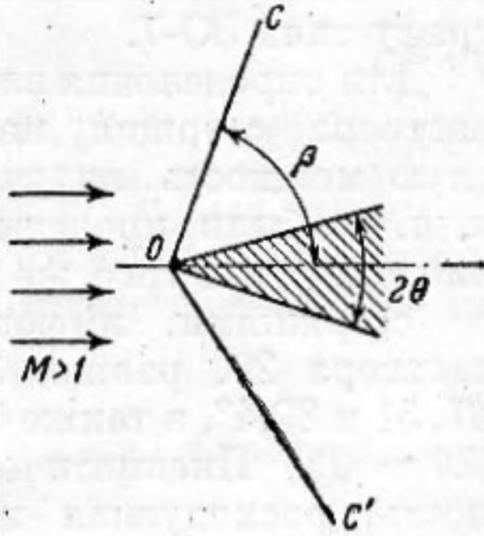
Из газовой динамики известно, что при этом неразрывное истечение невозможно. В потоке образуются линии разрыва OC и OC' в виде прямолинейных лучей, образующих с осью потока углы $\pm\beta$. Эти линии разрыва обладают свойствами, аналогичными скачку уплотнения и называются косым скачком уплотнения. При прохождении газа сквозь косой скачок уплотнения потери механической энергии значительно меньше, чем при прохождении через прямой скачок уплотнения [4].

Приведем заимствованный из работы [4] на фиг. 2 график, выражающий для воздуха общий характер зависимости β от θ и M . Как видно из графика, угол раствора клина не может быть произвольным. Чем меньше M , тем меньше область допустимых углов раскрытия клина, при которых возникает косой скачок уплотнения. Угол θ достигает предельного значения,

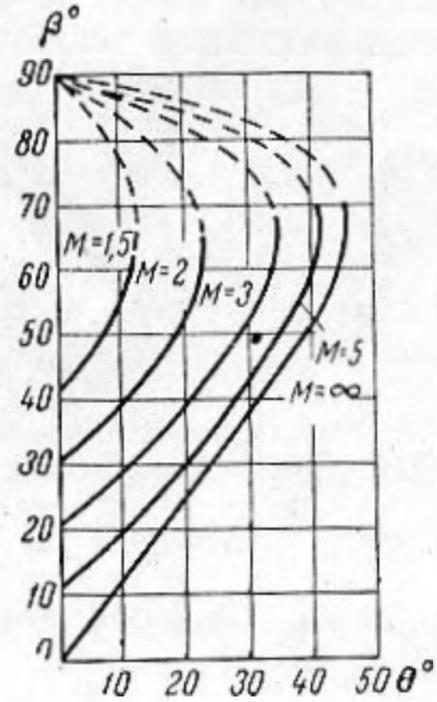
составляющего 46° при $M = \infty$. Физический смысл на этом графике имеют лишь точки на нижних ветвях кривых, показанных на фиг. 2 сплошными линиями, поскольку предельным условием существования косого скачка уплотнения является соотношение $\sin \beta \rightarrow 1/M = \sin \alpha$ при $\theta \rightarrow 0$, где α — угол Маха, равный $\alpha = \arcsin 1/M$.

Изменение давления в косом скачке уплотнения определяется формулой

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2k}{k+1} M^2 \sin^2 \beta - \frac{k-1}{k+1},$$



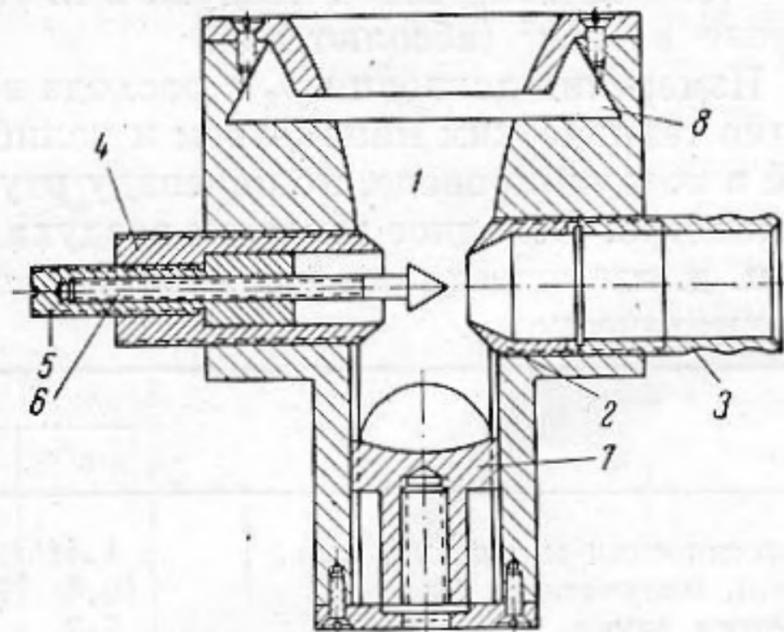
Фиг. 1



Фиг. 2

которая отличается от формулы для изменения давления в прямом скачке уплотнения только множителем $\sin^2 \beta$. Очевидно, что при одном и том же значении M в случае косого скачка уплотнения мы будем иметь меньшие перепады давления, чем при прямом скачке. Несколько схематизированный чертеж описываемого опытного излучателя приведен на фиг. 3 [5].

В горловине рупора 1 расположено сопло 2 диаметром 10 мм, которое продувается газом через патрубок 3. На пути газоструйного потока располагается резонатор 4, глубину которого можно регулировать поршнем 5. Симметрично по отношению к потоку расположен стержень 6, который может перемещаться вдоль оси сопла. В излучателе предусмотрен также подвижный поршень 7, обеспечивающий возможность настройки рупора с целью достижения максимальной отдачи [2].

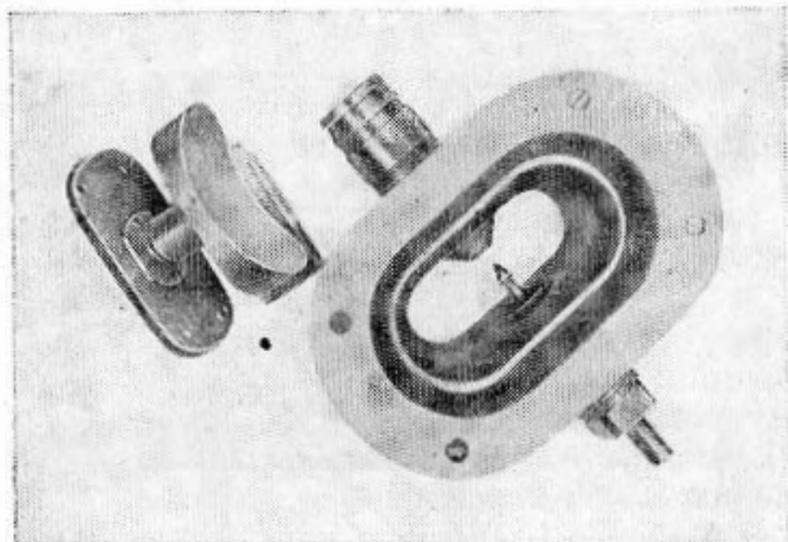


Фиг. 3

Опыты показали, что нарушение геометрии осциллирующего скачка уплотнения вследствие наличия каких-либо близко расположенных препятствий резко уменьшает интенсивность генерируемого звука. Это заставило придать рупору и поршню 7 такие формы, которые обеспечивали бы наименьшее стеснение осциллирующего скачка. На общем виде излучателя (фиг. 4) видно, что экспоненциальный рупор имеет некруговое сечение; поршень 7 имеет соответственным образом профилированную впадину. Такая конструкция рупора обеспечивает вписывание осциллирующего косого скачка уплотнения в горловине рупора без нарушения его геометрии, что приводит к значительному увеличению интенсивности излучаемого звука. Вакуумный коллектор 8 предназначен для отсоса воздуха из рупора после преобразования его кинетической энергии в акустические колебания.

Для оценки эффективности этого излучателя были проведены его испытания при работе в режиме газоструйного излучателя Гартмана (без стержня) и при работе с косым скачком уплотнения (т. е. со стержнем).

Акустическая мощность, отдаваемая излучателем, определялась по методике, описанной в работе [2]. Измерения звукового давления производились калиброванным титанат-бариевым звукоприемником, подключенным через усилитель к ламповому вольтметру типа МВЛ-2М, частотомеру типа ИЧ-2 и осциллографу типа ЭО-7.



Фиг. 4

Для определения влияния угла раствора стержня на акустическую мощность излучателя и его к. п. д. были проведены испытания одного и того же излучателя со стержнями, имеющими углы раствора 2θ , равные 20, 40, 44, 47, 51 и $80,4^\circ$, а также без стержня ($2\theta = 0$). Пневматическая мощность, расходуемая на продувание сопла излучателя воздухом, рассчитывалась по формуле политропического сжатия

$$N = \frac{k}{k-1} V_1 p_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right],$$

где N — мощность в киловаттах, k — показатель политропы, для воздуха $k = 1,3$, p_1 — первоначальное давление воздуха в кг/м^2 (абсолют.), V_1 — секундный расход воздуха в $\text{м}^3/\text{сек}$, p_2 — давление воздуха в излучателе в кг/м^2 (абсолют.).

Измерения давления p_2 и расхода воздуха V_1 производились соответственно техническим манометром и калиброванной диафрагмой, установленной в воздухопроводе, по перепаду ртутного столба на дифференциальном манометре. Исходное давление воздуха при опытах равнялось 760 мм рт.ст. К. п. д. излучателя определялся как отношение акустической мощности к пневматической.

	Значение угла раствора 2θ , градусы						
	0	20	40	44	47	51	80,4
Акустическая мощность, <i>квт</i>	1,41	1,38	0,47	1,0	0,73	0,67	0,91
К.п.д. излучателя, %	10,4	38,9	13,3	28,2	20,7	18,7	25,7
Частота звука, <i>кГц</i>	5,3	3,5	3,4	3,5	4,0	4,0	3,8

Измерения при работе излучателя в режиме газоструйного излучателя Гартмана показали, что расход воздуха на продувание сопла составил в среднем $250 \text{ м}^3/\text{час}$, при этом оптимальное подаваемое давление, соответствующее максимальной интенсивности звука, было $3,8 \text{ ат}$. При работе этого же излучателя с различными стержнями оптимальное давление воздуха и его расход практически не изменялись. Эти величины составляли соответственно 1 ат и $177 \text{ м}^3/\text{час}$. Пневматическая мощность для указанных двух режимов работы излучателя, рассчитанная по формуле, была соответственно $13,5$ и $3,5 \text{ квт}$.

Полученные данные позволили определить к. п. д. излучателя при различных углах раствора стержня. Результаты измерений приведены в таблице.

Из этой таблицы видно, что наибольшая мощность была достигнута при $2\theta = 20^\circ$, а также при работе излучателя без стержня ($2\theta = 0^\circ$). Максимальный к. п. д. был достигнут при $2\theta = 20^\circ$.

Следует отметить, что при работе излучателя без стержня стабильность частоты была недостаточной. Напротив, при наличии стержня даже существенные изменения входного давления практически не влияли на частоту генерируемого звука.

Из изложенного видно, что использование косого скачка уплотнения позволяет создать газоструйный излучатель, обладающий существенными преимуществами по сравнению с обычными видами таких излучателей. Возможно, что дальнейшее изучение свойств косого осциллирующего скачка уплотнения может привести к дальнейшему увеличению к. п. д. таких устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. M. G. V o u s h e r. Ultrasonics in processing. Chem. Eng., 1961, 68, 20, 83—100.
2. В. П. К у р к и н. К вопросу о генерации звука газоструйной сиреной. Акуст. ж., 1961, 7, 4, 442—445.
3. Р. И. Ш к о л ь н и к о в а. Разработка и исследование статических сирен. Сб. докладов конференции по ультразвуку, М., Изд-во ЦНИТИЭЛЕКТРОПРОМ, 1960.
4. Л. Г. Л о й ц а н с к и й. Механика жидкости и газа. М., Физматгиз, 1959, стр. 175.
5. В. П. К у р к и н. Газоструйный излучатель звука типа Гартмана. Бюлл. изобрет., 1961, 15.

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

Поступила в редакцию
4 сентября 1961 г.