

УДК 534.232:533.6.011

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОСТРУЙНОГО ДИСКОВОГО
ИЗЛУЧАТЕЛЯ ЗВУКА СО СХОДЯЩЕЙСЯ СТРУЕЙ*Борисов Ю. Я., Степанов Ю. Н.*

Найдена зависимость длины ячейки плоской сходящейся недорасширенной струи воздуха от перепада давлений, ширины сопловой щели и кривизны сопла. Проведены акустические испытания дисковых излучателей при расположении резонатора в пределах первой ячейки струи. Найдены оптимальные параметры резонатора и его местоположения по отношению к соплу при невысоких перепадах давлений.

Дисковые излучатели представляют собой одну из разновидностей [1] пневмоакустических преобразователей, работающих по принципу генератора Гартмана, т. е. использующих для возбуждения акустических колебаний в газовой среде пульсационный режим течения недорасширенной газовой струи, осуществляемый путем ее торможения препятствием в виде полого резонатора. Так как акустические характеристики газоструйных излучателей во многом зависят от структуры используемой струи, дисковые конструкции, в которых применяются плоские кольцевые струи, должны обладать характерными особенностями, а параметры оптимальной настройки отличаться от таковых у сравнительно хорошо исследованных стержневых излучателей [2]. Однако никаких данных о работе дисковых излучателей, обычно применяемых в качестве одного из основных элементов пневмоакустических распылителей [3], в литературе не приводится. В то же время излучатели этого типа обладают рядом достоинств, в том числе возможность размещения по оси топливного канала с центробежным завихрителем, что позволяет реализовать в акустическом распылителе принципиальную схему типовой паромеханической форсунки. Поэтому при разработке излучателя, предназначенного для распыления тяжелого топлива, был проведен большой объем акустических и гидродинамических исследований, результаты которых и представлены в данной работе.

В качестве объекта изучения был взят излучатель со сходящейся струей, т. е. (в соответствии с классификацией, предложенной в работе [1]) имеющий угол выхода струи из сопла по отношению к оси симметрии $\theta=270^\circ$. Такой выбор был связан с рядом обстоятельств, в том числе и с возможностью уменьшения размера форсунки, так как габариты такого излучателя при одинаковом диаметре D_c газового сопла (см. фиг. 1), определяющем расход воздуха (пара), подаваемого в форсунку для генерации акустических колебаний и распыления топлива, оказываются меньше, чем в конструкции с расходящейся струей ($\theta=90^\circ$). Это связано с тем, что у излучателя со сходящейся струей резонатор, выполняемый в виде кольцевой канавки (с глубиной h и шириной σ) на стенках топливного канала, располагается внутри сопла, а не вне его. Последнее обстоятельство приводит к уменьшению размеров пульсирующего кольцевого элемента струи, излучающего звуковые волны, что, по-видимому, и сказывается на увеличении эффективности такого излучателя, полученном в работе [4], особенно при пониженных перепадах давлений.

При изучении работы газоструйного излучателя обычно выбирают диапазон изменения параметров настройки (глубины резонатора и расстояния l между соплом и резонатором) таким образом, чтобы иметь возможность проверить разные варианты расположения дна резонатора и его входной кромки по отношению к длине ячейки (бочки) Δ недеформированной струи. Поэтому целесообразно осуществлять проверку в пределах измене-

ния параметра $A=l+h=(0,6\div 2)\Delta$. Ввиду отсутствия данных о длине ячейки плоской сходящейся струи, движущейся вдоль твердой поверхности, были проведены оптические измерения ряда сопловых систем (в отсутствие резонатора) с целью определения указанного параметра. Исследования проводились при размерах сопел, реально используемых в распылительных устройствах: $D_c=15-40$ мм, ширина сопловой щели δ изменялась в пределах $0,4-1,2$ мм, что позволяло получать генерацию в диапазоне частот $16-40$ кГц. Угол конусности применявшихся сопел (по отношению к плоскости, вдоль которой движется воздух) в большинстве опытов сохранялся постоянным ($\alpha_1 = 30^\circ$).

В цилиндрических и расходящихся струях длину ячейки легко определять по теневым фотографиям струи при ее боковом освещении (перпендикулярно оси симметрии излучателя). Однако в сходящихся струях подобный метод съемки неприменим, так как интересующая нас начальная область потока находится внутри сопла.

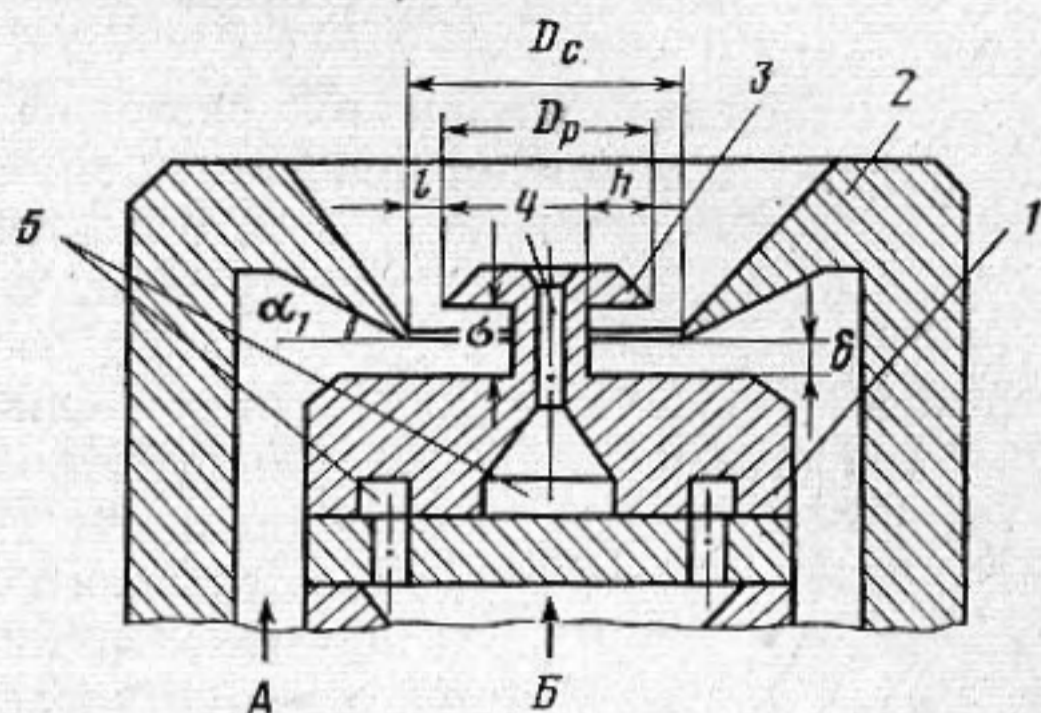
Поэтому для определения длины ячейки освещение струи производилось не сбоку, а сверху (в плане), в связи с чем поверхность, образующая плоскую границу кольцевого сопла, выполнялась из оптического стекла. Измерения проводились как на полном кольцевом сопле (с азимутальным углом $\varphi=360^\circ$), так и на секторных соплах ($\varphi=90$ и 120°).

Найдено, что длина ячейки плоской кольцевой струи зависит не только от ширины сопловой щели δ и перепада давлений $\bar{P}=P_0/P_\infty$ (P_0 — давление торможения, P_∞ — давление в окружающей среде), но и от параметра, характеризующего кривизну сопла $G=\delta/D_c$, отражающего изменение ширины трубки тока при сжатии потока по мере удаления его от среза сопла. Выражение для длины ячейки сходящейся струи, движущейся вдоль плоской преграды, при угле конусности сопла $\alpha_1=30^\circ$ имеет вид

$$\bar{\Lambda}=\Delta/\delta=6,3G^{0,226}(\bar{P}-1).$$

Формула справедлива для давлений, при которых сохраняется безотрывное течение ($\bar{P}=2-6$) и которые наиболее часто используются при работе газоструйных излучателей, а также при таких диаметрах сопла, чтобы первая ячейка не деформировалась встречной струей ($D_c \geq 3\Delta$). Измерения, проведенные с соплами, имевшими угол конусности $\alpha_1=45$ и 75° , показали, что увеличение α_1 приводит к укорочению ячейки примерно в той же пропорции, как и в случае кольцевой цилиндрической струи [5].

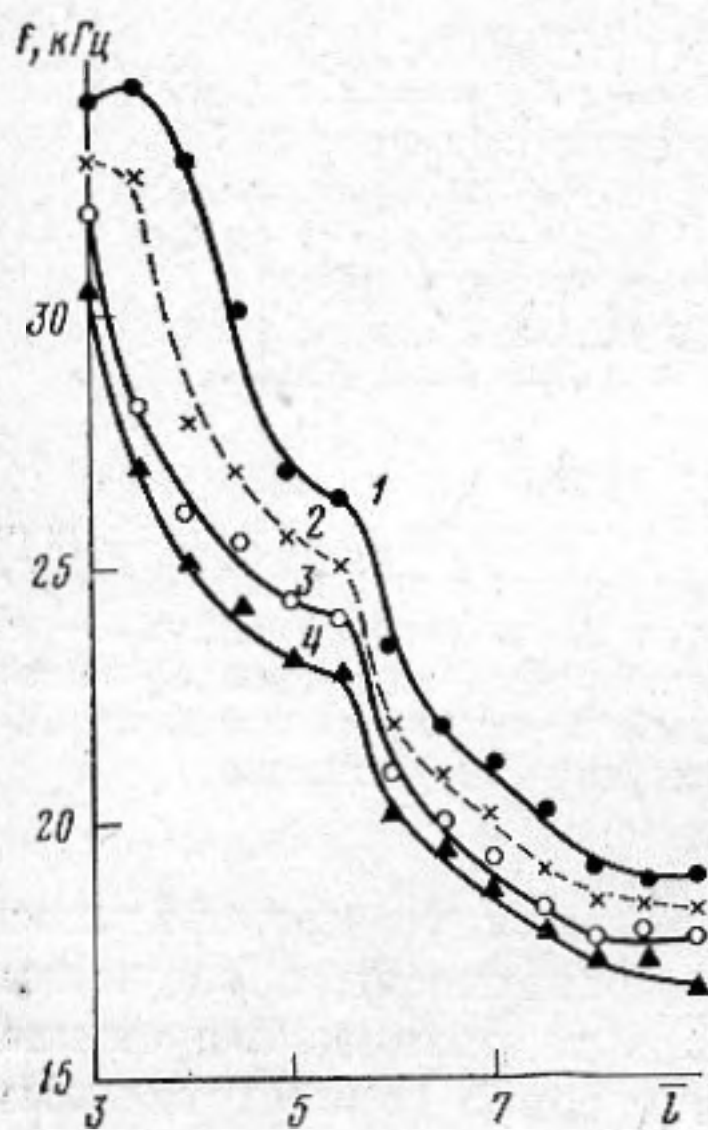
Выбор оптимальных режимов настройки дискового излучателя проводился в диапазоне рабочих давлений форсунки, при трех фиксированных значениях: $\bar{P}=3,9$; $4,4$ и $4,9$. При исследованиях был использован излучатель с постоянным диаметром резонаторного «грибка» (см. фиг. 1) — $D_p=15$ мм и неизменной шириной сопловой щели ($\delta=0,5$ мм), при которой основные частоты генерации лежат в нижней части ультразвукового диапазона. Для перекрытия всей ожидаемой области генерации параметры настройки изменялись в таких пределах, чтобы иметь возможность располагать дно резонатора на расстояниях $(0,6\div 2,5)\Delta$ от кромки сопла. В соответствии с этим глубина резонатора h с помощью насадочных втулок изменялась в пределах $1,5-4,5$ мм через $0,25$ мм, а его ширина o регулировалась выдвиганием «грибка» от $0,7$ до $1,75$ мм через $0,35$ мм. Расстояние между соплом и резонатором варьировалось в интервале $1,5-4,5$ мм через $0,25$ мм с помощью сменных сопел.



Фиг. 1. Принципиальная конструкция паромеханической форсунки с дисковым излучателем. 1 — корпус, 2 — кольцевое сопло, 3 — резонаторный «грибок», 4 — топливный канал, 5 — центробежный завихритель топлива, А — воздух (пар), Б — топливо

Большая часть акустических измерений была выполнена с соплами, имевшими плоский внутренний торец ($\alpha_1=0^\circ$) и выходной конический диффузор с полным углом 70° , предназначенный для формирования определенного угла раскрытия воздушного факела, что диктовалось требованиями горелочного устройства. Однако проверка показала, что указанный диффузор, длина образующей которого была одного порядка с длинами излучаемых волн, практически не изменял акустические характеристики излучателя.

Акустические измерения состояли в определении основной частоты генерации f и в снятии диаграмм направленности излучения на этой частоте в интервале углов $\pm 90^\circ$ или $\pm 160^\circ$.



Фиг. 2. Частотные характеристики дискового излучателя при $\bar{h}=4,5$, $\bar{P}=4,9$. 1 — $\bar{\sigma}=1,4$; 2 — 2,1; 3 — 2,8; 4 — $\bar{\sigma}=3,5$

Ввиду того, что в форсунках волновое воздействие на распыляемую жидкость осуществляется в ближнем поле излучателя и основным параметром, определяющим характер этого влияния (кроме частоты), является уровень звукового давления, оценка качества работы газоструйного излучателя проводилась не по акустической мощности или КПД, а по максимальной величине звукового давления P_m , измеренной на расстоянии 100 мм от источника. Такой метод, будучи достаточно обоснованным, существенно упрощает обработку получаемых диаграмм. К тому же последние, снятые при частотах генерации 16–30 кГц, по форме мало отличались друг от друга: они имели два слабо выраженных максимума, лежащие под углами $\pm 35-45^\circ$ к оси. Только у излучателей с малыми значениями параметра $\bar{l}=l/\delta \leq 4$ и при $\bar{\sigma}=\sigma/\delta > 2,1$, когда отработанный воздух имеет не центральное, а периферийное истечение, максимум звукового давления совпадает с осью излучения.

Частотные характеристики дискового излучателя мало чем отличаются от характеристик стержневого: при генерации, осуществляемой резонатором, перемещаемым в пределах одной ячейки струи, частота монотонно падает с увеличением расстояния между соплом и резонатором (фиг. 2) и с увеличением размеров поперечного сечения последнего.

Правда, в дисковом варианте относительно большее влияние на частоту оказывает величина \bar{l} , а не глубина резонатора, как в стержневом излучателе. Так, например, при двукратном изменении параметра \bar{l} (от 4 до 8), но постоянных значениях $\bar{\sigma}$ и \bar{h} частота изменяется на 50–80%, в то время как аналогичное изменение параметра \bar{h} изменяет частоту в среднем на 25%. Еще более слабое влияние оказывает изменение ширины резонансной полости: при увеличении $\bar{\sigma}$ от 1,4 до 3,5 частота уменьшается примерно на 15%. К особенностям частотных характеристик дисковых излучателей следует также отнести нарушение плавного изменения частоты при некоторых значениях \bar{l} (на фиг. 2 при $\bar{l}=5,5$). Этим искажениям частотных характеристик, связанным с определенными соотношениями между длиной излучаемой волны и размером излучающего элемента струи, соответствуют провалы на амплитудных характеристиках или даже срывы генерации, о чем будет сказано ниже. Если исключить указанные особые точки на частотных характеристиках, частота генерации дискового излучателя может быть определена (с ошибкой, не превышающей $\pm 4\%$) по формуле

$$f = \frac{0,072c_0(\bar{P}-1)^{0,16}}{\delta \bar{l}^{0,65} \bar{h}^{0,4} \bar{\sigma}^{0,1} G^{0,226}}$$

где c_0 — скорость звука в среде.

Диапазон безразмерных частот, в котором работают дисковые излучатели, лежит в пределах $Sh = \Delta/\lambda = 0,2-0,5$ (λ — длина волны), т. е. для них характерны более низкие частоты, чем для аналогичных стержневых, хотя у них при одинаковом поперечном сечении резонаторов объем резонатора может быть существенно меньше. Так, например, в работе [4] для двух подобных конструкций при одинаковых параметрах сопловой системы (сохранялись постоянными величины D_c , δ и α_1) и резонатора (h , σ и l), а также одинаковом перепаде давлений для дискового излучателя, имеющего резонатор вдвое меньшего объема, получены частоты на 15—22% ниже, чем у стержневого. Это указывает на то, что в автоколебательной системе струя — резонатор частота, определяемая временем замыкания петли обратной связи, зависит в основном от скоростных характеристик используемого потока.

Как уже указывалось, ширина резонансной полости $\bar{\sigma}$ слабо влияет на частоту генерации, однако этот параметр оказывает существенное воздействие на амплитуду возникающих колебаний. Есть основания полагать, что существует определенная связь между оптимальным значением параметра $\bar{\sigma}$ и толщиной исходной газовой струи. Например, для стержневых излучателей, работающих при перепадах давлений $\bar{P} = 3,9-4,9$, наилучшие показатели по КПД и излучаемой мощности имеют конструкции, у которых ширина резонансной полости в 2,1—2,5 раза превышает ширину сопловой щели. Из-за того, что в сходящейся струе происходит непрерывное сжатие потока, а ее толщина увеличивается по сравнению с толщиной аналогичной цилиндрической струи, можно было предполагать, что для рассматриваемых дисковых излучателей оптимальные значения параметра $\bar{\sigma}$ должны возрасти. Полученные данные полностью подтвердили эти предположения.

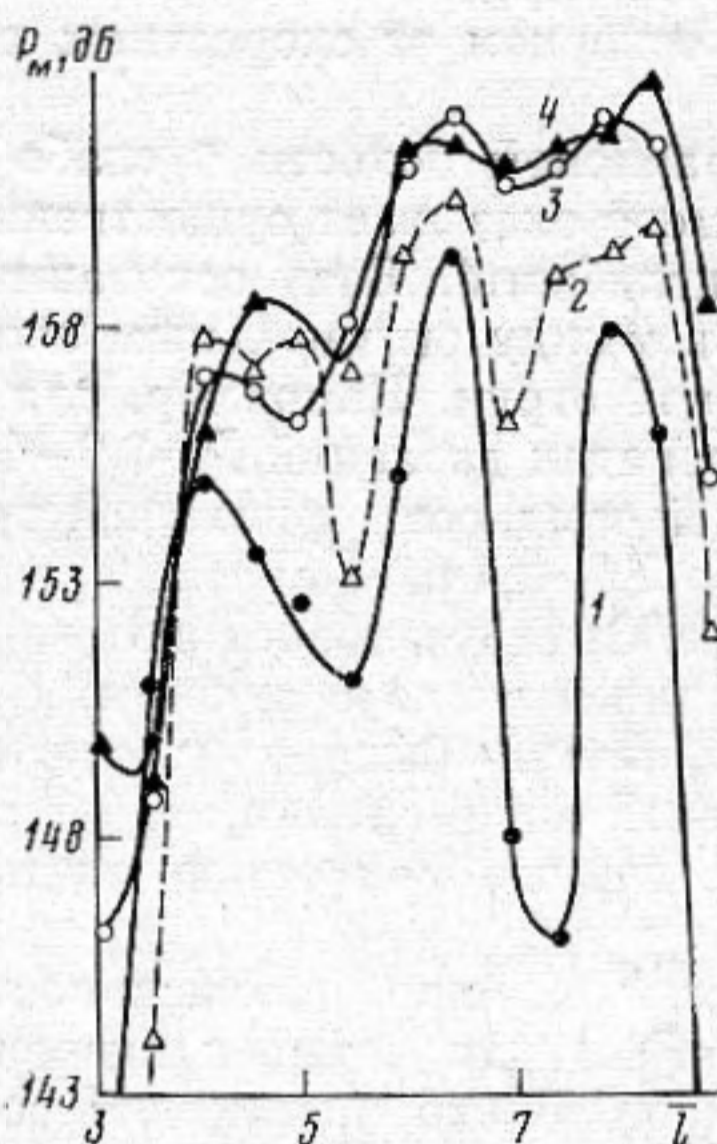
Влияние ширины резонансной полости хорошо прослеживается на фиг. 3, где приведены зависимости $P_m = F(\bar{l})$ для четырех значений параметра $\bar{\sigma}$. Видно, что с увеличением $\bar{\sigma}$ не только происходит рост звукового давления, но и повышается стабильность работы излучателя при изменении \bar{l} . Однако увеличение P_m , весьма значительное при переходе от $\bar{\sigma} = 1,4$ к $\bar{\sigma} = 2,1$ и заметное для $\bar{\sigma} = 2,8$, почти прекращается при дальнейшем расширении резонатора. Более того, если характеристики, полученные при $\bar{P} = 4,9$ и $\bar{\sigma} = 3,5$, мало чем отличаются от таковых для $\bar{\sigma} = 2,8$ (фиг. 3), то с понижением давления (толщина струи уменьшается!) излучатель, имеющий резонатор с $\bar{\sigma} = 3,5$, работает хуже: уровень звукового давления начинает падать. Поэтому для дисковых излучателей со сходящейся струей, работающих при невысоких перепадах давлений, следует использовать резонаторы с $\bar{\sigma} = 2,7-3,3$. Разумеется, это оптимальное значение должно зависеть от параметра G применяемой сопловой системы.

Что касается рекомендаций в отношении оптимальных параметров настройки \bar{l} и \bar{h} , то они в настоящее время не могут быть столь же определенными. Это связано с тем, что на амплитуду возникающих колебаний влияет множество факторов, главные из которых — длина излучаемой волны, размер излучающего газового кольца и расположение резонатора в зоне неустойчивости недеформированной струи — зависят от указанных параметров по-разному. Поэтому остановимся лишь на наиболее определенных закономерностях, полученных на основании измерений. Прежде всего можно ограничить диапазон расстояний между соплом и резонатором, при которых существует генерация. Для верхнего из исследованных перепадов давлений этот интервал соответствует $3,25 \leq \bar{l} \leq 8,75$. С понижением давления ($\bar{P} = 3,9$) зона генерации сокращается и перемещается в область меньших значений \bar{l} : $2,5 \leq \bar{l} \leq 7,5$.

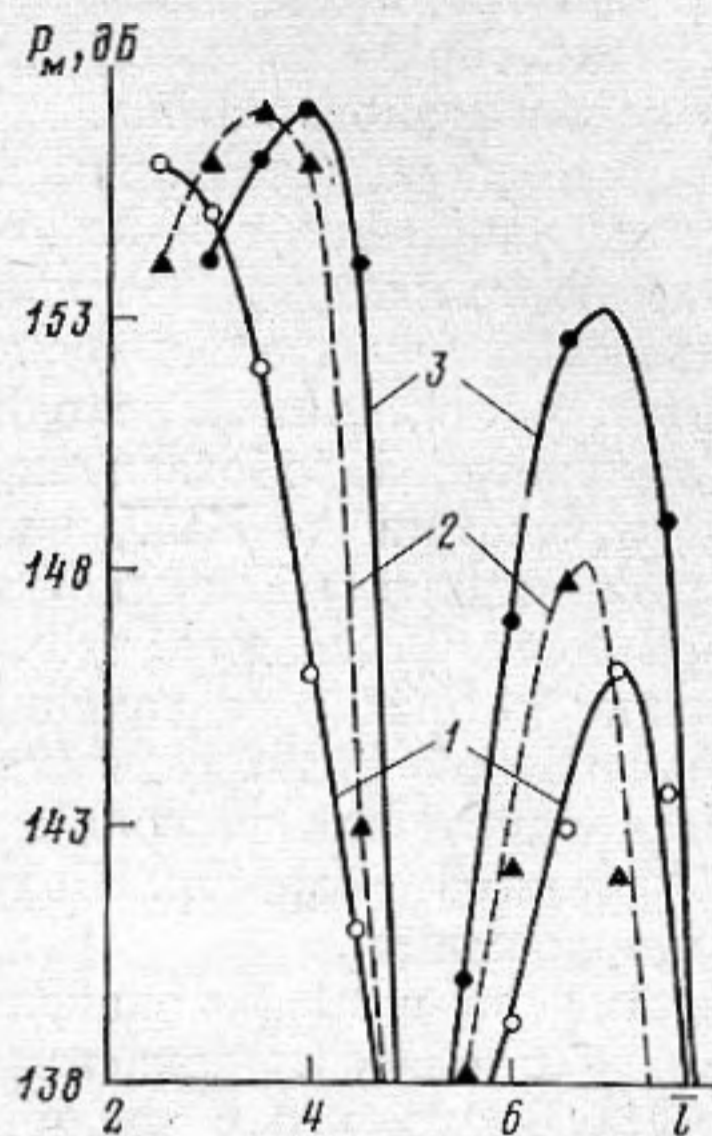
Следует указать, что при использовании резонатора с оптимальным значением параметра $\bar{\sigma}$ при работе на повышенном давлении ($\bar{P} = 4,9$) величина P_m мало изменяется, если изменять параметры \bar{l} и \bar{h} , однако при небольшой глубине резонатора ($\bar{h} = 3-4,5$) предпочтительнее использовать излучатели с $\bar{l} = 6-8,5$ (см. фиг. 3), а при увеличении глубины резонатора до $\bar{h} = 6,5-8$ лучшие результаты могут быть получены при $\bar{l} = 5,5-7$. Поэтому целесообразно располагать дно резонатора по отноше-

нию к кромке сопла на расстоянии $(l+h) = (11,5 \div 14)\delta$. Если же проводить сравнение этого параметра с длиной используемой ячейки, то можно считать оптимальной зависимость $(l+h) = (1,1 \div 1,3)\Delta$.

При работе на пониженном давлении ($\bar{P}=4,4$) в связи с укорочением ячейки генерация возможна и при малых глубинах резонатора ($\bar{h} \geq 2,5$), однако высокие уровни звука ($P_m \geq 160$ дБ) здесь удается получить уже не во всем интервале изменения \bar{l} . Для излучателей с большой глубиной резонатора при установке параметра \bar{l} в пределах 4,5–5,5 излучение существенно ослаблено ($P_m = 145-148$ дБ). При дальнейшем снижении давления ($\bar{P}=3,9$) высокие уровни P_m сохраняются лишь для резонаторов с



Фиг. 3



Фиг. 4

Фиг. 3. Амплитудные характеристики дискового излучателя при $\bar{h}=4,5$, $\bar{P}=4,9$. Обозначения те же, что и на фиг. 2

Фиг. 4. Амплитудные характеристики дискового излучателя при $\bar{h}=8$, $\bar{P}=3,9$. 1 – $\bar{\sigma}=2,1$; 2 – 2,8; 3 – 3,5

малой глубиной; при $\bar{h} > 6,5$ P_m не превышает 155 дБ, а в области вблизи $\bar{l}=5$ наблюдается срыв генерации (фиг. 4). Интересно отметить, что для режимов, сопровождающихся срывом генерации в указанной области, существует различный характер излучения по обе стороны от зоны срыва. Так, при $\bar{l} < 5$ характеристика направленности имеет один максимум, расположенный по оси, а отработанный газ движется по поверхности конического диффузора. Такая настройка, в частности, применена в акустической форсунке, так как периферийное истечение воздуха позволяет формировать требуемый угол раскрытия топливного факела; некоторое снижение P_m на основной частоте здесь компенсируется увеличением уровня второй гармоники. При $\bar{l} > 5$ наблюдаются двухлепестковые характеристики направленности, имеющие провал на оси (на 6–10 дБ); при таких настройках отработанный воздух, выходя из резонатора, движется по оси излучателя.

Хотя причины срыва генерации при расположении кромки резонатора в середине зоны неустойчивости ($\bar{l} \approx 4-5,5$) окончательно не выяснены, есть основания полагать, что наблюдаемое явление аналогично явлению перескока частоты генерации у стержневого излучателя при $kr=1$ [2]. Измерения показали, что при некоторых соотношениях между диаметром кольцевого излучающего элемента и длиной излучаемой волны при неизменной настройке можно добиться максимального излучения путем простого изменения диаметра сопла. И наоборот, при других соотношениях генерация на данной частоте оказывается невозможной, вследствие чего излучение либо полностью прекращается, либо происходит на другой,

нехарактерной для данной настройки частоте. Поэтому при проектировании дисковых излучателей необходимо учитывать указанное явление и, в частности, избегать таких соотношений размеров, при которых реализуется отношение $D_n/\lambda=1$, где $D_n=D_c-l$ — диаметр гипотетического излучающего кольца.

Для нескольких вариантов дискового излучателя, у которых максимальный уровень звукового давления достигал 160—162 дБ, диаграммы направленности были обработаны с целью определения величин акустической мощности и КПД. Расчеты показали, что КПД не превышает 10—11%, что заметно ниже эффективности, полученной на аналогичных излучателях, но имеющих $D_c/\lambda < 1$ [4]. Сопоставление этих результатов показывает, что, как и для стержневых излучателей [2], с целью увеличения эффективности излучения следует применять конструкции, у которых $D_c/\lambda < 1$. При работе излучателя в качестве распылителя (воздействие колебаний на струю в ближнем поле), по-видимому, последнее требование может не приниматься в расчет.

На основании проведенных исследований была разработана серия дисковых излучателей, предназначенная для создания типоразмерного ряда паромеханических форсунок с акустической ступенью, производительностью по топливу 200—1800 кг/ч. Опытные образцы форсунки были испытаны на вновь осваиваемой серии котлов типа ДЕ(Е) паропроизводительностью 4—25 т/ч [6]. Испытания показали, что использование дисковых излучателей в котлах промышленной энергетики позволяет при низком удельном расходе распыливающего газа (пара), составляющего 0,03—0,05 кг/кг, вследствие повышения дисперсности распыляемого топлива и снижения коэффициента избытка воздуха с 1,1—1,5 (при работе типовой форсунки) до 1,03—1,05 (при работе форсунки с дисковым излучателем) уменьшить потери тепла с уходящими газами, что равноценно повышению КПД котельной установки на номинальном режиме работы до 0,5% и на долевых нагрузках до 2%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов Ю. Я. Конструктивные особенности газоструйных излучателей. — Акуст. ж., 1980, т. 26, № 1, с. 41—48.
2. Борисов Ю. Я. Высокочастотные газоструйные излучатели повышенной мощности. — Акуст. ж., 1978, т. 24, № 5, с. 650—654.
3. Дитякин Ю. Ф., Фролов А. С., Ягодкин В. И. Форсунка для распыливания жидкости. А.с. СССР № 306270. — Оpubл. в БИ, 1971, № 19.
4. Борисов Ю. Я. Влияние формы недорасширенной струи на эффективность работы газоструйного излучателя звука. — Тр. II Всес. симпозиума по физике акустико-гидродинамич. явлений и оптоакустике. М.: Наука, 1981.
5. Борисов Ю. Я., Подольский С. Л. Длина бочки кольцевой недорасширенной струи, истекающей из звукового сопла, имеющего на оси цилиндрический стержень. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1980, № 4, с. 167—171.
6. Степанов Ю. Н., Сидоров М. И., Борисов Ю. Я. Перспективы использования акустических форсунок для сжигания жидких топлив в промышленно-отопительных котлах. — Тр. ЦКТИ. Л.: 1980, вып. 175, с. 52—57.

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

Поступила в редакцию
30.XII.1980