

УДК 534.232:533.6.011

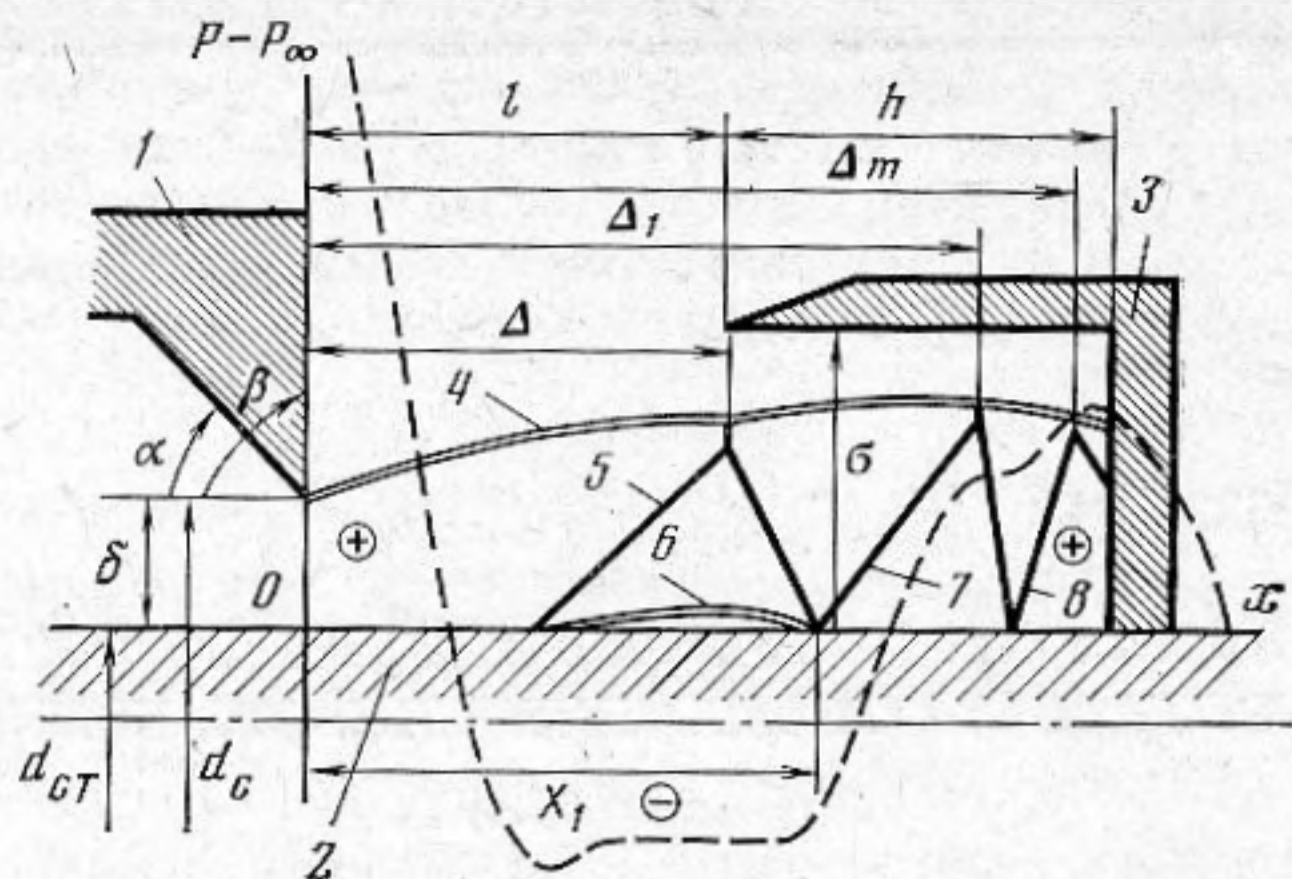
**ВЛИЯНИЕ УГЛА КОНУСНОСТИ ЗВУКОВОГО СОПЛА
НА РАБОТУ ГАЗОСТРУЙНОГО СТЕРЖНЕВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ***Борисов Ю. Я.*

В статье сообщаются результаты экспериментальных исследований частоты, акустической мощности и КПД газоструйного стержневого излучателя звука в зависимости от угла конусности сопла. Одновременно приводятся некоторые газодинамические характеристики струй, вытекающих из сопел с различными углами при одинаковом перепаде давлений.

Известно, что изменение угла конусности суживающихся (звуковых) сопел, работающих при сверхкритических перепадах давлений, не только влияет на эпюру скоростей газового потока и на его расходные характеристики, но из-за появления радиальных составляющих скорости меняет и внешние контуры «бочки» недорасширенной струи, а также конфигурацию звуковой линии [1]. Кроме того, обнаружено, что при изменении угла конусности (обозначаемого 2α) меняются и размеры «бочки»: например, длина первой «бочки» цилиндрической струи имеет максимум вблизи $\alpha \simeq 50^\circ$ [2]. Ввиду того что структура и форма «бочки» определяют продольный градиент статического давления в струе, а также положение скачков уплотнения, изменение конусности сопла должно, по-видимому, сказаться и на работе газоструйных излучателей звука, в которых используется эффект неустойчивости сверхзвуковой струи при ее торможении преградой (эффект Гартмана). Однако данные о воздействии этого фактора на генерацию звука в литературе отсутствуют, и обычно с целью повышения излучаемой мощности стремятся увеличить кинетическую энергию исходной струи, для чего используют в излучателях сопла с максимальным коэффициентом расхода ($\mu=1$), т. е. профилированные ($\alpha \simeq 0^\circ$) или же слабо сходящиеся сопла.

В данной работе приведены результаты измерений, выполненных с целью выяснения характера влияния угла конусности сопла на акустические параметры излучателя. Одновременно для определения причин обнаруженного влияния были измерены некоторые газодинамические характеристики струи.

Исследования проводились на стержневом газоструйном излучателе [3], в котором используется не цилиндрическая, как в генераторе Гартмана, а кольцевая струя, движущаяся вдоль круглого цилиндра (стержня), расположенного на оси сопла. Наши предшествующие измерения длины «бочки» такой струи, выполненные в широком интервале изменения перепадов давлений и соотношений диаметров сопла и стержня [4], показали, что для длины «бочки» экстремальные значения отсутствуют: она приблизительно линейно уменьшается с увеличением α , хотя при малых перепадах давлений $P_0/P_\infty < 4,5$ (P_0 — давление в форкамере, P_∞ — давление в окружающей среде), малой ширине сопловой щели δ (см. фиг. 1) и углах $\alpha < 10^\circ$ в результате влияния пограничного слоя, возникающего в сопле, эта зависимость может несколько искажаться. В данной работе



Фиг. 1. Схематическое расположение основных элементов стержневого излучателя и структура исходной (недеформированной) струи. 1 — сужающееся сопло, 2 — стержень, 3 — кольцевой резонатор, 4 — поверхность струи, 5 — первый косой скачок уплотнения, 6 — отошедший пограничный слой, 7 — второй скачок, 8 — третий скачок

измерения выполнялись на калиброванных соплах ($d_c=6$ мм, $\delta=1$ мм) при изменении угла α в пределах $0-90^\circ$ через 15° . В качестве системы с $\alpha=0^\circ$ использовалось сопло Витошинского с короткой цилиндрической частью на выходе. Для того чтобы исключить возможность изменения условий акустического излучения, связанных с влиянием близко расположенных отражающих поверхностей, все сопла имели одинаковые габариты, в том числе и одинаковый наружный угол $\beta=90^\circ$. Все измерения проводились при фиксированном значении давления сжатого воздуха: $P_0/P_\infty=3,9$.

Газодинамические измерения в струе, проводившиеся в отсутствие резонатора, состояли в исследовании структуры струи оптическим теневым методом и в определении продольного (направление от x на фиг. 1) распределения статического давления вдоль поверхности стержня. Длина «бочки» Δ , определяемая выходом первого косого скачка уплотнения на поверхность струи, и местоположение косых скачков (см. фиг. 1) определялись по фотографиям с точностью $\pm 5\%$. Для измерения статического давления служили три дренажных отверстия, расположенные по окружности стержня и сообщающиеся через центральный канал с мембранным датчиком давления МДД-О-1600. Сам стержень мог перемещаться во втулках в осевом направлении, причем его перемещение контролировалось линейным потенциометром. Напряжения, снимаемые с потенциометров датчиков давления и перемещения, подавались на входы двухкоординатного самописца. При движении стержня дренажные отверстия смещались относительно среза сопла и изменяющееся давление регистрировалось на бумаге самописца.

Акустические измерения включали в себя определение акустической мощности W_a , излучаемой на основной частоте f , и КПД излучателя η . Акустическая мощность оценивалась по полученным диаграммам направленности, снимавшимся в угле $\pm 160^\circ$. Запись диаграмм осуществлялась с помощью измерительного конденсаторного микрофона диаметром ~ 3 мм и гетеродинного анализатора с полосой пропускания, равной 314 Гц. При вычислении мощности струи, необходимой для определения КПД излучателя, коэффициенты расхода μ сопел с различными значениями α были взяты из графиков, приведенных в работе [1] и относящихся к соплам без центрального стержня.

Для того чтобы сравниваемые излучатели обладали сравнительно высокой эффективностью, в исследуемых системах был применен резонатор

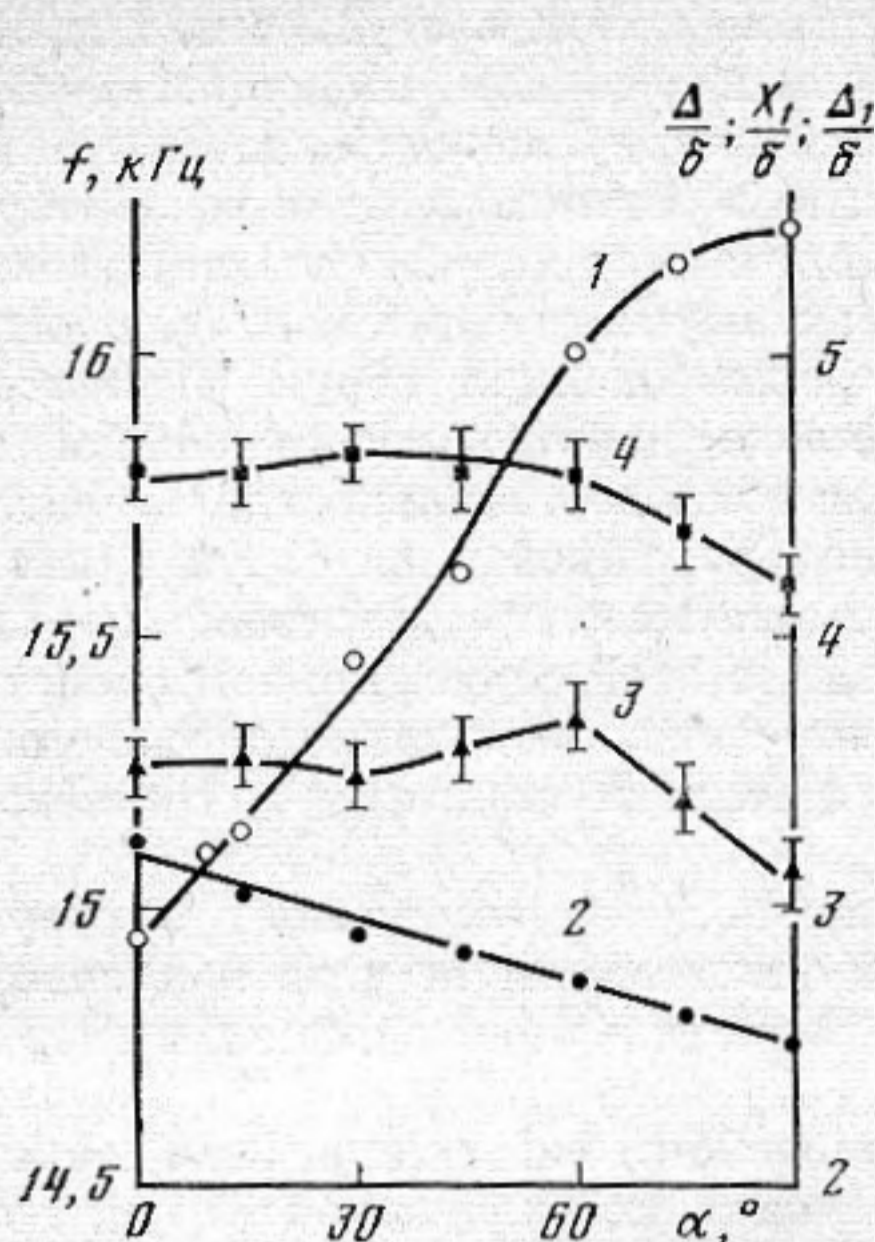
с глубиной $h=3,6$ мм и шириной кольцевой полости $\sigma=2,3$ мм, так как ранее для излучателя с таким резонатором и с соплом, имеющим $\alpha=24^\circ$, было получено значение $\eta=17\%$ [5]. Расстояние l между соплом и резонатором во всех излучателях поддерживалось равным глубине резонатора. Такой режим настройки для исходного излучателя с $\alpha=24^\circ$ соответствовал расположению дна резонатора вблизи максимума статического давления, т. е. в конце зоны неустойчивости недеформированной струи. При этом срез резонатора находился в области выхода первого косого скачка на поверхность струи, т. е. примерно в начале зоны неустойчивости. На фиг. 1 наряду с изображением конфигурации недеформированной струи пунктиром показано распределение избыточного статического давления $(P-P_\infty)$ вдоль поверхности стержня, соответствующее этой струе, причем области, обозначенные знаком «+», представляют зоны повышенного давления, а средняя часть кривой, ограничивающая зону со знаком «-», соответствует области разрежения.

Прежде чем приступить к обсуждению полученных данных о структуре исходной недорасширенной струи в зависимости от угла конусности сопла, следует кратко дать общую характеристику применяемых в стержневых излучателях кольцевых струй.

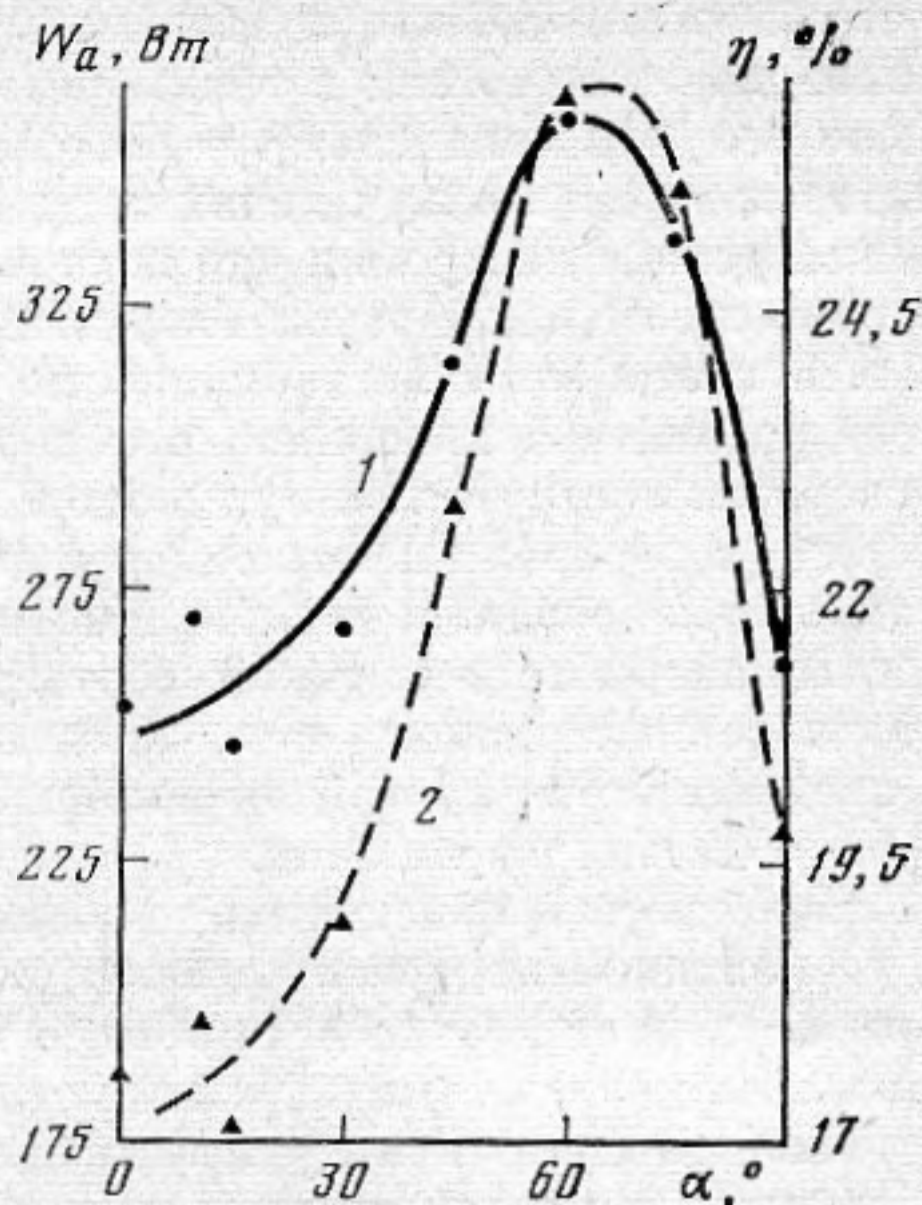
Известно, что в излучателях гартмановского типа генерация звука, связанная с пульсирующим режимом течения сверхзвуковой струи, возникает тогда, когда тормозящая преграда располагается в области повышения статического давления. В цилиндрических струях максимум статического давления находится в конце «бочки», там, где косые скачки уплотнения выходят на поверхность струи. В кольцевой струе при наличии на оси твердой поверхности — стержня — первый косой скачок возникает в зоне отрыва струи (см. фиг. 1) и выходит на границу струи на расстоянии $x=\Delta$ от сопла. Хотя это расстояние по-прежнему называют длиной «бочки», однако в этом сечении струи восстановление давления еще не произошло и максимум давления лежит ниже по течению. Поэтому для струй, движущихся вдоль твердой поверхности, следовало бы принимать за длину «бочки» расстояние до места восстановления статического давления $x=\Delta_m$.

В результате ускорения потока после выхода газа из сопла и понижения давления в струе у поверхности стержня происходит местный отрыв пограничного слоя и, как следствие, появляется зона разрежения с мало меняющимся статическим давлением (плоский участок кривой $(P-P_\infty)$ на фиг. 1). Подъем давления начинается лишь за вторым скачком на расстоянии $x=X_1$. В зависимости от толщины струи и интенсивности возникающего скачка давление либо восстанавливается в месте выхода второго скачка на поверхность, либо возникает третий скачок. Естественно, что область неустойчивости оказывается за пределами «бочки», т. е. при $x>\Delta$. Таким образом, зона неустойчивости определяется расстоянием $\Delta_m-\Delta$. Однако в рассматриваемой струе, судя по ходу кривой $(P-P_\infty)$, основное торможение потока происходит на более коротком участке непосредственно за вторым скачком и, следовательно, эффективным участком зоны неустойчивости можно считать область Δ_1-X_1 .

На фиг. 2 видно, что частота генерации излучателя растет с увеличением конусности сопла. Графики изменения величин Δ , X_1 и Δ_1 показывают, что не все размеры «бочки» меняются монотонно с ростом угла α . Так, судя по оптическим измерениям, положение точки присоединения пограничного слоя к поверхности стержня зависит от угла α нелинейно, причем величина X_1/δ имеет максимум вблизи $\alpha=60^\circ$, а параметр Δ_1-X_1 при том же угле имеет минимальное значение. Аналогичные данные были получены и при пневмоизмерениях, однако здесь была отмечена следующая особенность: хотя минимальная длина эффективной зоны неустойчивости соответствовала по-прежнему углу $\alpha=60^\circ$, максимум градиента статического давления на этом участке кривой был несколько смещен



Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Зависимость от угла конусности звукового сопла частоты генерации f (1) и нормированных к ширине сопловой щели расстояний от среза сопла до точки выхода первого косого скачка уплотнения Δ/δ (2), до точки возникновения второго скачка X_1/δ (3), до точки выхода второго скачка Δ_2/δ (4)

Фиг. 3. Зависимость акустической мощности W_a (1) и КПД излучателя η (2) от угла конусности

в сторону больших углов и находился в области $\alpha=60-75^\circ$. При этом разница в средних значениях градиента давления у сопел с $\alpha=75^\circ$ и $\alpha=30^\circ$ составляла около 20%.

В настоящее время механизм усиления колебаний в генераторе Гартмана полностью не раскрыт, поэтому однозначно судить о влиянии величины градиента давления в зоне неустойчивости на эффективность преобразования кинетической энергии струи в акустические колебания не представляется возможным. Однако наши исследования на сопловых системах с постоянным углом α , но при различных перепадах давлений показали, что такая связь между максимальными значениями КПД излучателя и градиентом давления на начальном участке зоны неустойчивости существует. Например, при изменении P_0/P_∞ от 2,45 до 4,9 для сопловой системы с $d_c=9$ мм и $\delta=2$ мм градиент давления вначале (до значений $P_0/P_\infty \geq 3,4$) растет, а затем снижается. Акустические измерения такого излучателя показали, что при неизменных параметрах настройки максимум КПД находится как раз при $P_0/P_\infty=3,4$. Поэтому обнаруженный экстремум для градиента давления в зависимости от угла конусности звукового сопла указывает на возможность достижения улучшенных характеристик газоструйных излучателей при использовании сопел с увеличенными углами α .

Приведенные на фиг. 3 зависимости акустической мощности исследованных излучателей и их КПД от угла α подтверждают существование такой области оптимальных значений углов в интервале $45-75^\circ$. Несмотря на довольно значительный разброс экспериментальных точек, связанный главным образом с недостаточной точностью определения звукового давления по диаграмме направленности (при максимальной ошибке, лежащей в пределах $\pm 0,5$ дБ, ошибка в вычислении мощности, излучаемой в данном сферическом угле, составляет около 10%), видно, что максималь-

ный полученный КПД — $\eta=26\%$ — наблюдается при $\alpha=60^\circ$, тогда как для обычно применяемых сопел с $\alpha=0-15^\circ$ ($\mu=0,95-0,91$) он составляет в среднем 18%. При фиксированном перепаде давлений кинетическая энергия струи определяется массой газа, проходящей через сопло, а последняя (в случае неизменной площади выходного отверстия) зависит только от коэффициента расхода, приблизительно линейно уменьшающегося с увеличением α [1]. Поэтому наличие экстремальной области для КПД полностью определяется существованием зоны повышенного излучения, лежащей в указанном диапазоне углов.

Причину увеличения излучаемой мощности при использовании сопловых систем с углами $\alpha=45-75^\circ$ нельзя на основании проведенных исследований считать до конца выясненной. Однако качественно полученный эффект можно объяснить повышением для указанной области углов градиента статического давления в зоне неустойчивости недорасширенной струи. Полученные результаты представляют интерес для практики, поскольку показывают, что путем изменения угла конусности звукового сопла можно существенно повысить эффективность газоструйного излучателя. С другой стороны, метод определения градиента статического давления в зоне неустойчивости, по-видимому, может быть полезен при изучении путей дальнейшего совершенствования газоструйных излучателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дейч М. Е. Техническая газодинамика. М.: Энергия, 1974, с. 285.
2. Алешин А. И., Денисов И. Н., Рогачев Н. М., Сивиркин В. Ф. Исследование влияния угла конусности и степени поджатия звукового сопла на геометрическую структуру первой бочки недорасширенной струи.— Инж. физ. ж., 1975, т. 28, № 2, с. 296—300.
3. Борисов Ю. Я. Конструктивные особенности газоструйных излучателей.— Акуст. ж., 1980, т. 26, № 1, с. 41—47.
4. 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.
5. Борисов Ю. Я. Высокочастотные газоструйные излучатели повышенной мощности.— Акуст. ж., 1978, т. 24, № 5, с. 650—654.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева АН СССР

Поступила в редакцию
8.X.1980