

тере перемежаемости в следах за рассматриваемыми телами, что в свою очередь определило различный характер вовлечения жидкости в след и, в конечном счете, обсуждавшееся в работах [5, 6] непосредственное влияние формы тела на другие характеристики течения в автомоделном осесимметричном следе.

Авторы благодарят О. Ф. Васильева за полезное обсуждение работы, В. В. Зыкова за помощь в использовании измерительной аппаратуры и В. Д. Бибикова за участие в измерениях.

Поступила 5 X 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Baldwin L. V., Sandborn V. A. Intermittency of far wake turbulence. AIAA Journal, 1968, vol. 6, No. 6. (Рус. перев.: Перемежаемость дальнего турбулентного следа. Ракетная техника и космонавтика, 1968, т. 6, № 6.)
2. Freymuth P., Uberoi M. S. Temperature fluctuations in the turbulent wake behind an optically heated sphere. Phys. Fluids, 1973, vol. 16, No. 2.
3. Riddhagni P. R., Bevilacqua P. M., Lykoudis P. S. Measurements in the turbulent wake of a sphere. AIAA Journal, 1971, vol. 9, No. 7. (Рус. перев.: Измерения в турбулентном следе за сферой. Ракетная техника и космонавтика, 1971, т. 9, № 7.)
4. Demetriades A. Turbulent front structure of an axisymmetric compressible wake. J. Fluid Mech., 1968, vol. 34, pt 3.
5. Букреев В. И., Васильев О. Ф., Лыткин Ю. М. О влиянии формы тела на характеристики автомоделного осесимметричного следа. Докл. АН СССР, 1972, т. 207, № 4.
6. Букреев В. И., Костомарова В. А., Лыткин Ю. М. О балансе энергии турбулентности в осесимметричных следах за телами различной формы. ПМТФ, 1974, № 1.
7. Corrsin S., Kistler A. L. The free-stream boundaries of turbulent flows. Nat. Advis. Comm. Aeronaut., Techn. Notes, 1954, No. 3133.
8. Fiedler H., Head M. R. Intermittency measurements in the turbulent boundary layer. J. Fluid Mech., 1966, vol. 25, pt 4.

УДК 532.525.2:534.83

ОБ ИЗЛУЧЕНИИ ДИСКРЕТНОГО ТОНА СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУЕЙ, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ КОНИЧЕСКОГО СОПЛА

А. В. АНЦУНОВ, В. Г. ПИМШТЕЙН

(Москва)

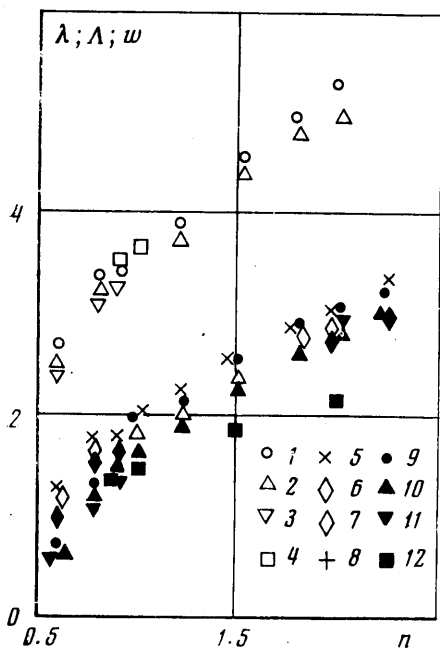
Приведены результаты экспериментального исследования излучения дискретного тона сверхзвуковыми струями, истекающими из конических сверхзвуковых сопел. Показано, что изменение угла раскрытия сопла при неизменных остальных параметрах существенно влияет на структуру течения в начальном участке струи, что приводит к изменению частоты дискретного тона и диапазона степени нерасчетности, при которой он возникает.

В спектре шума свободной сверхзвуковой струи на нерасчетных режимах истечения могут появляться дискретные составляющие, уровень которых может превышать уровень сплошного шума на 15–20 дБ. Впервые это явление наблюдалось на струях, истекающих из сходящихся сопел при сверхкритических перепадах давления [1]. С тех пор появилось много работ по исследованию механизма излучения дискретного тона, и в частности при истечении сверхзвуковых струй из конических сопел [2–5].

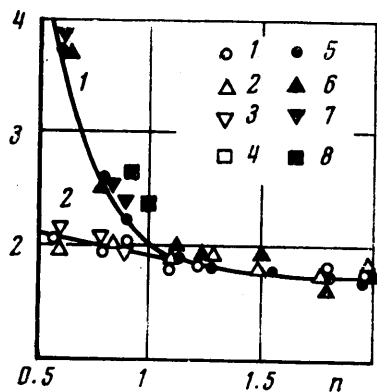
Для определения частоты дискретного тона, излучаемого сверхзвуковой струей, предложен ряд эмпирических выражений, причем в качестве характерного размера в них используется, как правило, диаметр выходного сечения сопла. В качестве характерного размера предлагается также использовать диаметр критического сечения сопла [3], длину первой ячейки периодической структуры струи, выраженную через диаметр критического сечения сопла [4] или диаметр струи, рассчитанный из уравнения расхода [5]. Однако используемые линейные размеры не отражают физической

картины процесса излучения дискретного тона, так как, исходя из существующих представлений о механизме генерации дискретного тона [1], следует ожидать, что в качестве характерного размера должен выступать некоторый продольный размер периодической структуры струи, причем, как показано ниже, длина первой ячейки в общем случае не является характерным размером при определении частоты дискретного тона, излучаемого сверхзвуковой струей.

Настоящая работа была проделана с целью сопоставления продольных размеров, характеризующих структуру скачков уплотнения в сверхзвуковой струе, с длиной волны излучаемого дискретного тона и исследования влияния угла раскрытия сопла



Фиг. 1



Фиг. 2

на диапазон степени нерасчетности, при которой он возникает. Опыты проводились со струями, истекающими из конических сопел, параметры которых приведены ниже: сопло 1— $M_a=1.98$, $d_a=14.91$, $d_*=11.57$, $\theta=12^\circ$; сопло 2— $M_a=1.97$, $d_a=15.03$, $d_*=11.73$, $\theta=24^\circ$; сопло 3— $M_a=1.98$, $d_a=15.09$, $d_*=11.62$, $\theta=36^\circ$; сопло 4— $M_a=1.98$, $d_a=15.10$, $d_*=11.69$, $\theta=48^\circ$. Здесь M_a —число Маха на срезе сопла, d_a —диаметр выходного сечения сопла, d_* —диаметр критического сечения сопла, θ —угол раскрытия сопла. Все изменения в структуре скачков уплотнения струй, истекающих из этих сопел при одинаковых перепадах давления, связаны с изменением угла раскрытия сопла, так как диаметры выходного и критического сечений сопла остаются неизменными.

Измерения геометрических размеров структуры струи производились по теневым фотографиям. Измерение давления в форкамере производилось образцовым манометром с классом точности 0.2. Акустические измерения производились комплектом электроакустической аппаратуры фирмы «Брюль и Къер» и анализировались на спектрометре типа 2107. Микрофон располагался в плоскости выходного сечения сопла на расстоянии 100 мм от оси струи.

Как известно, развитая система скачков уплотнения в сверхзвуковой струе на начальном участке течения может быть двух типов: с отражением падающего скачка уплотнения от оси струи (регулярное отражение) и с центральным скачком уплотнения (нерегулярное отражение). Как показали исследования, для заданных значений M_a и показателя адиабаты κ существует некоторый предельный угол раскрытия сопла θ^* , такой, что если $\theta > \theta^*$, то центральный скачок уплотнения присутствует в структуре струи при любых режимах истечения. Для изотермической воздушной струи ($\kappa=1.4$) этот угол определяется из соотношения

$$\theta^* = 2 \operatorname{arc} \operatorname{tg} (0.22 \sqrt{M_a - 1})$$

При углах раскрытия сопла $\theta < \theta^*$ длина первой ячейки w и размер периодической структуры струи Λ практически не зависят от угла раскрытия сопла. С увеличением угла раскрытия при $\theta > \theta^*$ продольные размеры струи уменьшаются. Зависимость длины первой ячейки, размера периодической структуры и длины волны основного дискретного тона λ , излучаемого сверхзвуковой струей, от степени нерасчетности n при различных углах раскрытия сопла приведена на фиг. 1. На фиг. 1 точки 1-4 соответствуют λ/d_a ; 5-8 - Λ/d_a ; 9-12 - w/d_a (точки 1, 5, 9 - сопло 1; 2, 6, 10 - сопло 2; 3, 7, 11 - сопло 3; 4, 8, 12 - сопло 4). Из сопоставления этих величин (фиг. 2) следует, что длина волны дискретного тона пропорциональна характерному размеру периодической структуры, так что $\lambda \approx 2\Lambda$. На фиг. 2 точки 1-4 соответствуют λ/Λ - кривая 1, а точки 5-8 - λ/w - кривая 2 (точки 1, 5 - сопло 1; 2, 6 - сопло 2; 3, 7 - сопло 3; 4, 8 - сопло 4).

Можно видеть, что длина волны дискретного тона пропорциональна длине первой ячейки на режимах истечения, близких к расчетным, и на режимах недорасширения, т. е. тогда, когда длина первой ячейки мало отличается от размера периодической структуры струи. Кроме того, из факта изменения частоты дискретного тона при изменении угла раскрытия сопла следует, что диаметр струи, определяемый из уравнения расхода, не может быть выбран в качестве характерного размера, поскольку при изменении угла раскрытия сопла и неизменных остальных геометрических размерах сопла секундный расход газа остается постоянным.

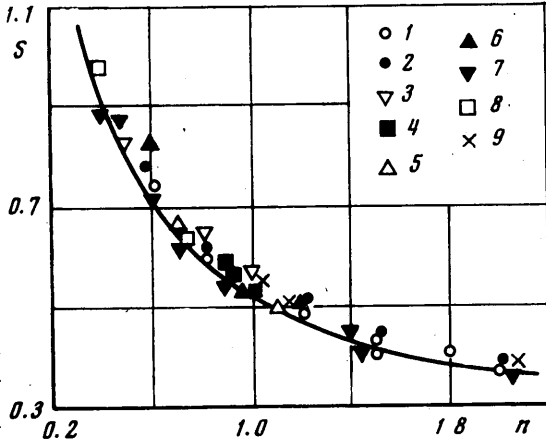
Для сверхзвуковых струй с числами $Ma > 1.4$, истекающих из конических сопел с углами раскрытия $\theta < \theta^*$, размер периодической структуры и частота основного дискретного тона могут быть представлены в виде

$$\Lambda = (1.05 \sqrt{n} - 0.1) d_a \sqrt{\chi(Ma^2 - 1)}, \quad f = \frac{c}{2(1.05 \sqrt{n} - 0.1) d_a \sqrt{\chi(Ma^2 - 1)}}$$

где c - скорость звука в окружающем пространстве. Сравнение экспериментальных данных различных авторов с расчетом по предложенной формуле дает удовлетворительное соответствие. На фиг. 3 приведена зависимость комплекса безразмерных параметров $S = Sh \sqrt{\chi(Ma^2 - 1)}$ от степени нерасчетности, где $Sh = fd_a/c$ - число Струхала (1 - сопло 1; 2 - сопло 2; 3 - сопло 3; 4 - сопло 4; 5 - $Ma = 2.16$, $d_a = 6.3$ мм [4]; 6 - $Ma = 2.32$, $d_a = 30$ мм [4]; 7 - $Ma = 1.8$, $d_a = 6$ мм [4]; 8 - $Ma = 3.0$, $d_a = 150$ мм [5]; 9 - $Ma = 2.0$, $d_a = 16$ мм [6]).

Поперечные геометрические размеры струи, максимальный диаметр первой ячейки и диаметр центрального скачка уплотнения D с увеличением угла раскрытия сопла возрастают (фиг. 4, на которой $\Lambda = D/d_a$). На режимах истечения, близких к расчетному, центральный скачок уплотнения в структуре струй, истекающих из сопел с углами раскрытия $\theta = 12^\circ$ и 24° , исчезает, в то время как при $\theta = 36^\circ$ и 48° его размеры монотонно возрастают с увеличением степени нерасчетности и он существует и на расчетном режиме истечения. Рассмотрение диапазона степени нерасчетности, при которой в спектре шума струи присутствует дискретный тон, показывает (см. фиг. 1 и фиг. 4 при θ , равном, например, 12°), что сверхзвуковая струя может излучать дискретный тон как при наличии в ее структуре центрального скачка уплотнения, так и без него. Наличие центрального скачка уплотнения, таким образом, не является необходимым условием существования дискретного тона.

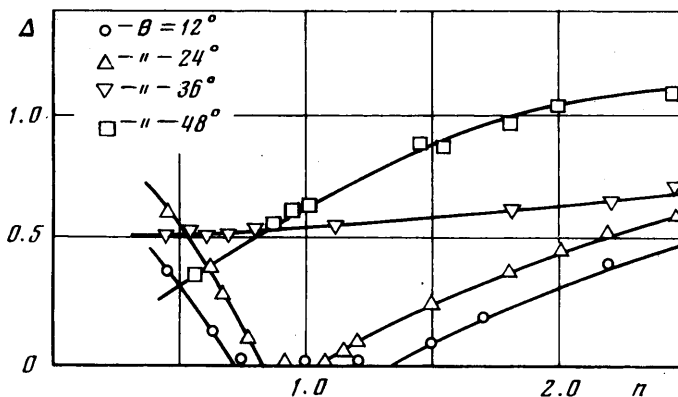
Из результатов настоящего эксперимента также следует, что диапазон степени нерасчетности, в котором сверхзвуковая струя излучает дискретный тон, существенно зависит от угла раскрытия сопла. Так, например, в спектрах шума струй, истекающих из конических сопел с углами раскрытия $\theta < \theta^*$, дискретный тон исчезает при приближении режима истечения к расчетному, при больших углах раскрытия, напротив, дискретный тон наблюдается только вблизи расчетного режима истечения.



Фиг. 3

В работе [7] была предпринята попытка связать область существования дискретного тона с параметрами струи. Предполагалось, что область существования дискретного тона соответствует области значений перепадов давления, при которых производная угла разворота потока на выходе из сопла по внешнему давлению достигает максимума. Такой подход дает объяснение существования дискретного тона только на режимах перерасширения и не объясняет его отсутствие на расчетном режиме и возникновение на режимах недорасширения. Такой подход также не может объяснить результаты настоящего эксперимента, так как производная угла разворота потока не зависит от угла раскрытия сопла.

Можно предполагать, что область степеней нерасчетности, при которых сверхзвуковая струя излучает дискретный тон, зависит не только от производной угла разво-



Фиг. 4

рота потока, но и от интенсивности скачков уплотнения в структуре струи и величины звукового давления, создаваемого дискретным тоном в плоскости выходного сечения сопла. При малых углах раскрытия сопла интенсивность скачков уплотнения в структуре струи при приближении режима истечения к расчетному уменьшается. Вследствие этого уменьшается интенсивность звука, образующегося при прохождении возмущений через скачки уплотнения и воздействующего на струю в плоскости выходного сечения сопла, — дискретный тон при этом не излучается. При больших углах раскрытия сопла, напротив, совокупность условий, необходимых для излучения дискретного тона, реализуется лишь в области режимов истечения, близких к расчетному режиму.

Поступила 17 XII 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Powell A. On the mechanism of choked jet noise. Proc. Phys. Soc., Ser. B, 1953, vol. 66, No. 408.
2. Merle M. Emissions acoustiques associées aux jets d'air supersoniques. J. Méc., 1965, vol. 4, No. 3.
3. Merle M. Sur les bruits émis par les jets gazeux supersoniques. Prepr. 5-e Congr. Internat. acoust., 1965, NL 52.
4. Мамин В. М., Римский-Корсаков А. В. Некоторые экспериментальные исследования свиста сверхзвуковой воздушной струи. Тр. Акуст. ин-та, 1969, вып. 9.
5. Ануфриев В. М., Комаров В. В., Купцов В. М., Мельников Д. А., Сергиенко А. А. Дискретная составляющая в спектре шума сверхзвуковых струй. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 5.
6. Беленков В. Д. Акустическое излучение сверхзвуковой струи в сторону среза сопла при различных режимах нерасчетности. Газодинамика и теплообмен, Сб. № 2. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1970.
7. Седельников Т. Х. Автоколебательное шумообразование при истечении газовых струй. М., «Наука», 1971.