

ЛИТЕРАТУРА

1. Adler S. L. Phys. Rev., **177**, 2426, (1969).
2. Rosenberg L. Phys. Rev., **129**, 2786, 1963.
3. Шпилевский А. «Изв. АН ЭССР», физика, математика, **18**, № 2, 209, 1969.

Поступила в редакцию
10.4 1972 г.

Кафедра
теоретической физики

УДК 534 322.3

Р. Э. ШИХЛИНСКАЯ

О НЕКОТОРЫХ МЕХАНИЗМАХ ШУМООБРАЗОВАНИЯ ОКОЛОЗВУКОВЫХ ГАЗОВЫХ СТРУЙ

Известно, что околозвуковая струя может быть источником акустического дискретного излучения, связанного с существованием «ячеек» в струе [1—6]. В [6] было предложено эмпирическое соотношение для расчета основной частоты дискретного излучения f_d :

$$f_d = \frac{c_0}{2s}, \quad (1)$$

где c_0 — скорость звука в невозмущенной среде, s — продольный размер «ячейки». Величина s может быть рассчитана для известного избыточного давления p , противодавления и диаметра d [6]. Соотношение (1) подтверждает гипотезу о замыкании петли обратной связи на длине одной «ячейки», лежащую в основе физической модели автоколебательного механизма излучения, предложенного в [1, 2]. Эта гипотеза подтверждается также наличием частот, кратных основному тону [2, 6].

В последующих работах, посвященных исследованию дискретного излучения сверхзвуковых струй в различных режимах истечения, основная частота излучения f_d также связывается с размерами «ячеек» [7, 8]. Для сверхзвуковой струи в режиме недорасширения связь f_d с s выглядит так:

$$f_d = \frac{c_0}{s} \frac{v}{v + c_0}, \quad (2)$$

где v — скорость возмущений, распространяющихся вниз по струе. Величина v может быть рассчитана [8]. Так как «ячеистая» структура сверхзвуковой и околозвуковой струи в принципе подобны, то (2) может оказаться справедливым и для околозвуковой струи. Действительно, при $v \cong c_0$ (что допустимо для околозвуковых струй) формула (2) переходит в (1). По-видимому, автоколебательный механизм дискретного излучения подобен для всех струй, обладающих «ячеистой» структурой, независимо от их скорости. Полуэмпирические формулы (1), (2) проясняют фазовые соотношения в струе и значительно упрощают вычисления частоты дискретного излучения, так как нет необходимости вводить понятие эквивалентного источника и связанных с ним величин [1, 2], которые приходилось определять экспериментально.

Известно, что помимо дискретного излучения струя является источником шума, максимум которого лежит вблизи «пиковой» частоты $f_p \cong 0,4 \frac{u}{d}$, где u — скорость струи на срезе сопла, равная для околозвуковой воздушной струи $\sim 0,9 c_0$. В условиях эксперимента [5] в диапазоне частот $\sim (f_p \div 5 f_p)$ наблюдался значительный уровень акустической энергии под острым углом φ к направлению струи: $\varphi = (20 \div 40^\circ)$. Эта особенность характера излучения струи может быть объяснена шумовым излучением от турбулентного пограничного слоя, как и в случае дозвуковых струй [9]. Такое объяснение справедливо только для относительно низкочастотной области спектра излучения (f порядка f_p). На более высоких частотах направленное под острым углом к потоку излучение обусловлено, по-видимому, возмущениями, возникающими у основания струи и распространяющимися вдоль ее границ со скоростью $v < u$ (излучение типа волн Маха). Необходимым условием возникновения такого излучения является $\frac{v}{c_0} > 1$, что хорошо выполняется для сверхзвуковых струй [7, 8]. Покажем, что это

условие может выполняться и для околзвучковых струй. Известно (например, [10]), что струя, вытекающая из сужающегося сопла под сверхкритическим давлением, после выхода из сопла расширяется; при этом скорость ее растет и достигает максимального значения u_{\max} в середине первой «ячейки». Значение u_{\max} может быть расчитано по заданному избыточному давлению p или по степени расширения струи $\sigma = \frac{d_{\min}}{d_{\max}}$, где d_{\max} , d_{\min} — соответственно максимальный и минимальный диаметры струи [10, 11]. В условиях эксперимента [5] $p = (2 \div 11) \text{ атм}$; $\sigma_{\min} = 0,67$ (для $p = 11 \text{ атм}$).

Опуская промежуточные расчеты, получаем

$$u_{\max} = 1,3 c_0 \div 1,6 c_0. \quad (3)$$

Скорость возмущений v определяется на основе численного решения дисперсионного уравнения для цилиндрической струи [8], или из эмпирических соотношений [2, 4, 7]. В среднем получаем неравенство:

$$0,74 \leq \frac{v}{u_{\max}} \leq 0,92. \quad (4)$$

Окончательно, учитывая (3), (4), имеем неравенство:

$$c_0 \leq v \leq 1,5 c_0. \quad (5)$$

Таким образом, условие излучения волн Маха $\frac{v}{c_0} > 1$ для околзвучковой струи может выполняться. Согласно [7], волны Маха излучаются в направлении струи под углом $\varphi = \arcs \cos \frac{c_0}{v}$.

Для значений v , удовлетворяющих (5), получаем: $0 \leq \varphi \leq 48^\circ$, что удовлетворительно совпадает с экспериментом [5]. Этот тип излучения должен, согласно [7, 8], обладать равномерным спектром в широком диапазоне частот. Однако в области низких частот ($f \sim f_p$) оно, по-видимому, должно скрадываться на фоне мощного дискретного излучения (в условиях эксперимента [5] $f_a \leq f_p$) и турбулентного шума.

Подводя итог, отметим, что полумэмпирические формулы (1) и (2) подтверждают справедливость автоколебательного механизма излучения и упрощают расчет частоты дискретного тона; для околзвучковых струй может иметь место механизм шумообразования типа «волн Маха».

Автор благодарит за ценные дискуссии В. А. Красильникова и Л. С. Пыхова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Powell A. The Aero Quarterly, 4, p. 2, 103—122, 1953.
2. Powell A. Proc. Phys. Soc., B66, 1039, 1953.
3. Powell A. Proc. Phys. Soc., B67, 4, 1954.
4. Davies M. G., Oldfield D. E. S. Acustica, 12, No. 4, 257, 1962.
5. Красильников В. А., Шихлинская Р. Э. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 3, 1964.
6. Шихлинская Р. Э. «Акустический журнал», 13, вып. 2, 1967.
7. Мамин В. Реферат кандид. диссертации. М., 1969.
8. Седельников Т. Х. Автоколебательное шумообразование при истечении газовых струй, гл. I. М., «Наука», 1971.
9. Lighthill M. J. Proc. Roy. Soc., 211, 564—587, 1952, 222, 1—31, 1954.
10. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Механика сплошных сред, гл. XI, § 101. М., Гостехиздат, 1954.
11. Ферри А. Аэродинамика сверхзвуковых течений, гл. 8, 9. М., Гостехиздат, 1953.

Поступила в редакцию
10.5 1972 г.

Кафедра
акустики