

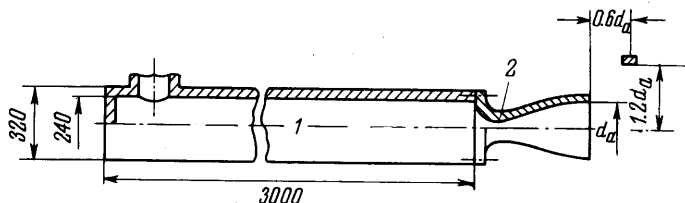
3. Гостинцев Ю. А. Расходные характеристики сопла при истечении винтового потока газа. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 4.
4. Бай Ши-и. Теория струй. М., Физматгиз, 1960.
5. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960.
6. Гинзбург И. П. Аэрогазодинамика. Краткий курс, М., «Высшая школа», 1966.
7. Lewis C. H., Carlson D. J. Normal shock location in underexpanded gas and gas — particle jets. AIAA Journal, 1964, vol. 2, No. 4.

### ДИСКРЕТНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ В СПЕКТРЕ ШУМА СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ

В. М. АНУФРИЕВ, В. В. КОМАРОВ, В. М. КУПЦОВ, Д. А. МЕЛЬНИКОВ,  
А. А. СЕРГИЕНКО

(Москва)

При исследовании шума струй, истекающих из дозвуковых осесимметричных сопел при сверхзвуковых перепадах давления, еще в начале 50-х годов [1] было обнаружено, что в спектре шума таких струй при некоторых перепадах давлений имеют место дискретные составляющие большой интенсивности. Позднейшие исследования [2-4] обнаружили дискретные составляющие в спектре шума сверхзвуковых струй, истекающих из осесимметричных сверхзвуковых сопел и сопел с прямоугольным выходным сечением. Природа образования дискретной составляющей связана с передачей акустических возмущений по внешней окружающей среде в направлении, противоположном движению потока в струе. Наличие этой обратной связи, с помощью которой акустические возмущения передаются от дальних участков струи к участкам вблизи выхода из сопла, приводит к усилению возмущений стационарного

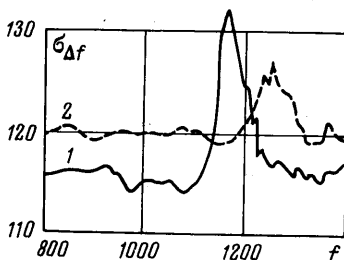


Фиг. 1

течения струи. В итоге на некотором расстоянии от выхода из сопла стационарное течение в струе теряет устойчивость и для внешней среды эта часть струи является мощным источником дискретных составляющих в спектре общего шума струи.

1. Испытания проводились на установке, схема и основные размеры которой приведены на фиг. 1. Воздух высокого давления через регулятор подавался в ресивер установки 1 и через сопло 2 вытекал в помещении стенда размером 14 000 × 7000 × 10 000 мм. Расстояние от пола до оси установки составляло 1500 мм.

Эксперименты проводились на трех осесимметричных соплах. Два сопла с диаметром выхода  $d_a = 150$  мм имели равномерное поле скоростей на выходе с числами  $M_a = 3$  и  $3.5$ . Третье сопло имело неравномерное поле скоростей на срезе. Контур сопла был получен обрезанием выравнивающего участка сопла, имеющего равномерное



Фиг. 2

поле на выходе с числом  $M_a = 3.7$ , таким образом, что поле скоростей было равномерным на срезе не на всем выходном радиусе, а на участке  $0.06 d_a$  ( $d_a = 102$  мм). Толщина выходной кромки сопел изменялась в пределах  $(0.06 \div 0.07) d_a$ .

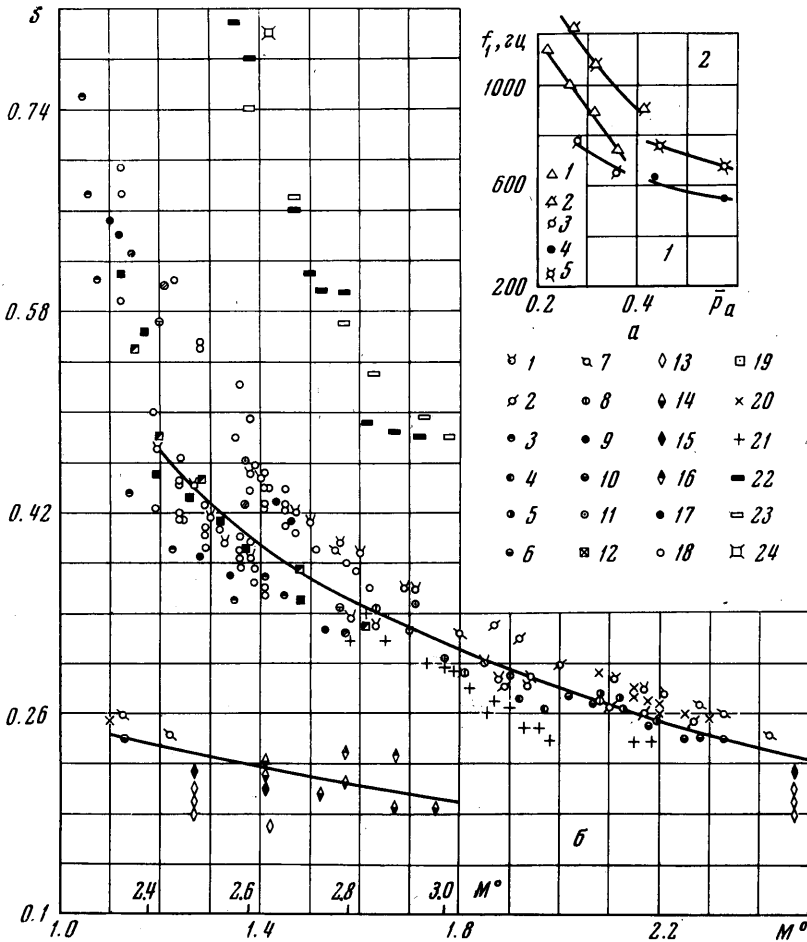
Эксперименты проводились как с подогревом воздуха в ресивере установки до  $T_0 = 700^\circ \text{K}$ , так и без подогрева  $T_0 = 288^\circ \text{K}$ .

Кроме этого, были проведены измерения шума от струи, истекающей из конического сопла  $d_a = 50$  мм и  $M_a = 3.0$  при отношении давления на срезе сопла  $p_a$  к атмосферному давлению  $p_\infty$ , равном  $0.5$ , т. е. степень нерасчетности истечения из сопла  $P_a = p_a / p_\infty = 0.5$ .

В этом опыте определялся также коэффициент корреляции между пульсациями давления в диаметрально противоположных относительно оси струи точках акустического поля. Шум струи измерялся емкостным датчиком 3, расположение которого относи-

тельно среза сопла показано на фиг. 1. Сигнал с датчика регистрировался на магнитофоне. Последующий спектральный анализ проводился на анализаторе типа С5-3 с полосой пропускания фильтра  $\Delta f = 5 \div 7$  гц. Одновременно контролировалось наличие пульсаций в ресивере установки с помощью емкостного датчика и последующей записью сигнала на осциллографе.

В результате проведенных опытов были получены спектры шума сверхзвуковых осесимметричных перерасширенных струй в трех диапазонах  $P_a = 0.4 \div 0.69$ ,  $P_a =$



Фиг. 3

$= 0.25 \div 0.41$ ,  $P_a = 0.2 \div 0.45$ , которым соответствовали следующие значения  $M_a = 3.0, 3.5, 3.7$ . На фиг. 2 приведены характерные спектры шума для холодной (кривая 1 при  $T_0 = 288^\circ \text{K}$ ) и горячей (кривая 2 при  $T_0 = 700^\circ \text{K}$ ) струй при  $d_a = 102$  мм,  $M_a = 3.7$ ,  $P_a = 0.216$  в области частот, где существует дискретная составляющая. На этой фигуре среднеквадратичное значение пульсаций давления  $\delta \Delta f$ , определенное в полосе частот  $\Delta f = 7.5$  гц, выражено в  $\delta b$ .

При определенной величине нерасчетности истечения из сопла в спектре шума появляется дискретная составляющая. Подогрев воздуха приводит к уменьшению интенсивности и некоторому увеличению частоты  $f_1$  дискретной составляющей. По мере увеличения числа  $M_a$  дискретная частота появляется при меньших величинах нерасчетности истечения на срезе сопла. Зависимость частоты дискретной составляющей от степени нерасчетности приведена на фиг. 3, а. На этой фигуре точкам 1—5 соответствуют следующие значения параметров, приведенные в табл. 1.

Контрольные эксперименты, проведенные на открытой площадке, показали, что в данном случае влияние бокса на характер частотного спектра шума было невелико.

Испытания на сопле  $d_a = 50$  мм,  $M_a = 3.0$  показали, что коэффициент корреляции пульсаций давления, определенный в полосе частот  $0.1 f_1$ , в двух диаметрально противоположных точках на частоте дискретной составляющей 1900  $\text{гц}$  равен  $-1.0$ , т. е. в данном случае колебательный процесс антисимметричен.

2. Параметром подобия для нестационарных процессов служит число Струхала  $S = fL/v$ , при этом  $L$  и  $v$  — соответственно характерный размер и характерная скорость. В механизме возбуждения дискретной составляющей время распространения акустических волн в окружающей среде от источника к основанию струи значительно больше времени распространения возмущения в струе в обратном направлении. Поэтому в качестве определяющей характерной скорости для числа  $S$  представляется целесообразным выбрать скорость звука в окружающей среде  $a_\infty$ .

При истечении из сопла поток быстро расширяется до давления, близкого к давлению в окружающей среде, при дальнейшем течении статическое давление в струе изменяется относительно слабо. В пределах первых нескольких бочек диаметр струи —  $d_1$  также изменяется мало. В качестве характерного линейного размера поэтому можно взять диаметр струи  $d_1$ .

Оценки показывают, что потери полного давления в системе косых скачков, которая существует в струе до источника излучения, слабо влияют на диаметр струи и на среднее число Маха в струе  $M_0$ . Поэтому число  $M_0$  определялось из газодинамической функции  $\pi(M_0) = p_\infty/p_0$ ; а диаметр струи  $d_1$  — из уравнения расхода

Таблица 1

Точки	1	2	3	4	5
$M_a$	3.7	3.7	3.5	3.0	3.0
$d_a$ , мм	102	102	150	150	150
$T_0$ , °К	288	700	288	288	700

$$G_s = 0,314 d_1^2 \frac{p_0 q(M_0)}{\sqrt{T_0}}$$

Здесь  $G_s$  — секундный расход через сопло (осесимметричное или плоское),  $q(M_0)$  — приведенный расход,  $p_0$  — давление в ресивере. Как показывает анализ,

для безразмерной частоты колебаний — числа Струхала — наиболее важным из определяющих критериев подобия является число Маха струи. Поэтому все известные результаты измерения дискретной частоты  $f_1$ , в том числе и результаты данных измерений, были обработаны в виде зависимости числа  $S = f_1 d_1 / a_\infty$  от числа  $M_0$  и нанесены на один график (фиг. 3, б). Здесь собраны данные для широкого класса сопел, которые различались между собой формой поперечного сечения (осесимметричные, прямоугольные, причем последние имели различные отношения высоты  $h_a$  к ширине  $b_a$  в выходном сечении), диаметром выходного сечения  $7.3 \text{ мм} \leq d_a \leq 150 \text{ мм}$ , числом Маха ( $1.0 \leq M_a \leq 3.7$ ), формой контура сверхзвуковой части сопла (некоторые сопла были конические, а другие — профилированные), наличием отражающих звуковых волн поверхностью вблизи среза сопла, а также перепадом давления  $P_a$  ( $M_0 > M_a$  при  $P_a > 1$ ,  $M_0 < M_a$  при  $P_a > 1$ ). Приведенные на фиг. 3, б данные получены в опытах, проведенных в широком диапазоне чисел Рейнольдса, определенных по параметрам струи

$$2 \cdot 10^5 < R = \frac{\rho_1 V_1 d_1}{\mu_1} < 3 \cdot 10^7$$

Параметры, при которых проводились представленные на фиг. 3, б эксперименты, даны в табл. 2 (эксперименты авторов в ней отмечены звездочкой). В таблице приведена также область значений  $\Delta P_a$ , в которой была обнаружена дискретная составляющая.

Видно, что в координатах  $S$  и  $M_0$  все экспериментальные данные (за исключением данных, полученных на плоских струях с отношением  $b_a/h_a > 12$ , для которых  $d_1$  не является характерным размером) образуют единую кривую. Это указывает на то, что при такой обработке экспериментальных данных безразмерная частота дискретной составляющей шума сверхзвуковых струй слабо зависит не только от  $d_a$  и числа  $M_a$  (о чем уже сообщалось ранее в работах [3, 8]), но также и от формы поперечного сечения сопла (пока  $b_a/h_a < 3$ ), числа Рейнольдса, формы контура сверхзвуковой части сопла, перепада давления  $P_a$  и отношения  $T_0/T_\infty$ .

Представленная на фиг. 3, б обобщенная зависимость безразмерной частоты — числа Струхала  $S$  — от числа  $M_0$  струи в диапазоне числа  $M_0$  от 1.2 до 3.0 удовлетворительно аппроксимируется формулой

$$S = \frac{0.85}{\sqrt{M_1^2 - 1} + a_\infty/a_1}$$

Следует отметить, что хотя перепад давлений  $P_a$  и не влияет на частоту дискретной составляющей, однако значения нерасчетности  $P_a$ , при которых существует дискретная составляющая, и величины амплитуд дискретной составляющей, опреде-

Таблица 2

№	$M_a$	$d_a$ ( $h_a \times b_a$ ), мм	$\Delta P_a$	$R \cdot 10^{-2}$	$T_0/T_{\infty}$	Литература
Сопла осесимметричные						
1	1.0	7.3	1.21—6.03	0.2—1.2	1.0	3
2	2.5	11.8	0.35—0.673	0.88—1.3	1.0	3
3	1.0	13.6	1.06—3.7	0.7	1.0	3
4	2.0	17.7	0.575—0.96	1.4—2.2	1.0	3
5	2.5	22.0	0.51—0.603	1.5—2.8	1.0	3
6	3.0	57.5	0.23—0.353	1.9—3.5	1.0	3
7	2.17	6.27	0.294—0.784	0.31—1.1	1.0	5
8	2.17	3.14	1.08—1.37	0.15—0.55	1.0	5
			0.294—0.784			
9	1.0	25.4	1.08—1.37		1.0	6
			1.19—2.05			
10	1.0	12.7	1.23—2.55		1.0	6
11	1.0	50.8	1.33—2.95		1.0	6
12	1.0	49.0	1.35—2.6		1.0	7
13	3.0	150.0	0.43—0.575	21—29	1.0	*
14	3.7	102.0	0.22—0.36	15—20	1.0	*
15	3.0	150.0	0.44—0.57	9—12	2.0	*
16	3.7	102.0	0.26—0.41	6—8.5	2.0	*
17	1.0	25.4	1.1—2.0		1.0	1
18	1.0	37.0	1.37—2.3		1.0	9
Сопла с прямоугольным сечением						
19	1.0	7.3·20	1.06—2.48	0.5—1.0	1.0	3
20	2.5	19.3·20	0.496—0.72	2.0—3.1	1.0	3
21	2.5	5.3·13.5	0.175—0.76	1.0—3.0	1.0	3
22	1.0	6.35·81	1.43—2.74	0.9—1.6	1.0	2
23	1.0	6.35·81	1.43—2.74	0.9—1.6	1.0	2
24	1.0	3·40	1.9		1.0	8

ленные разными авторами и в различных условиях (по числам  $R$ ,  $M$  и формам выходного сечения сопла) не совпадают друг с другом.

Авторы благодарят Г. И. Петрова за обсуждение материалов данной работы.

Поступило 1 IV 1969

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Powell Y. On the mechanism of choked jet noise Proc. Phys. Soc., 1953, vol. B 66, No. 408, p. 1039.
2. Hamitt A. G. The oscillation and noise of an overpressure sonic jet. J. Aerospace Sci., 1961, vol. 28, No. 9.
3. Merle M. Emissions acoustiques associees aux jets d'air supersoniques. J. de Mecanique, 1965, vol. 4, No. 3.
4. Борьба с шумом. М., Стройиздат, 1964.
5. Мамин В. М., Римский-Корсаков А. В. Сверхзвуковая воздушная струя как источник звука. Сб. статей «Физика аэродинамических шумов», М., «Наука», 1967.
6. Laffiter W. L., Hubbard H. H. The near noise field of static jets and some model studies of devices for noise reduction. NACA Rept, No. 1261, 1956.
7. Middelton D. The noise of ejectors. ARC R. and M., No. 3389, 1965.
8. Polderwaart L. S., Vink A. T., Wijnands A. P. J. The photographic evidence of the feedback loop of a two dimensional screeching supersonic jet of air. Rept 6-th Internat. Congr. acoustics, Tokyo, Japan, 21—28, August, 1968.
9. Davies M. G., Oldfield D. E. S. Tones from a choked axisymmetric jet. I. Cell structure eddy velocity and source location. Acustica, 1962, vol. 12, No. 4, pp. 257—267.