

УДК 533.697

**ВЛИЯНИЕ ДИСКРЕТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ АКУСТИЧЕСКИХ  
КОЛЕБАНИЙ НА ТЕЧЕНИЕ В НЕРАСЧЕТНОЙ  
СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУЕ**

А. Н. АНТОНОВ, С. П. ШАЛАЕВ, М. Я. ЮДЕЛОВИЧ

(Москва)

Проведено экспериментальное исследование течения в осесимметричной нерасчетной струе воздуха, вытекающей из звукового или сверхзвукового сопла в затопленное пространство.

Показано, что отражающие щитки, расположенные во внешнем поле у среза сопла, усиливают дискретную составляющую акустического поля, уменьшают длину начального участка струи и ее дальность, характеризуемую зависимостью скоростного напора на оси струи от расстояния до среза сопла.

Определены диапазоны нерасчетностей истечения, при которых существует дискретная составляющая в струе со щитками при различных значениях числа Маха  $M$  на срезе сопла.

Показано, что длина полуволны дискретной составляющей с удовлетворительной точностью совпадает с осредненной длиной двух — четырех «бочек» начального участка струи.

Экспериментальное исследование, в ходе которого осесимметричный или разрезной щиток перемещались вдоль оси струи, подтвердило, что воздействие дискретной составляющей на газодинамическую структуру струи происходит в пределах первой бочки струи.

Показано, что длина волны зависимости  $p^o = f(z^o)$  при  $x = \text{const}$  в два раза меньше длины волны дискретной составляющей и может использоваться для ее определения. Подбирая соответствующим образом положения осесимметрического щитка или взаимное положение полуцилиндров, можно существенно влиять на дальность струи, меняя величину дискретной составляющей.

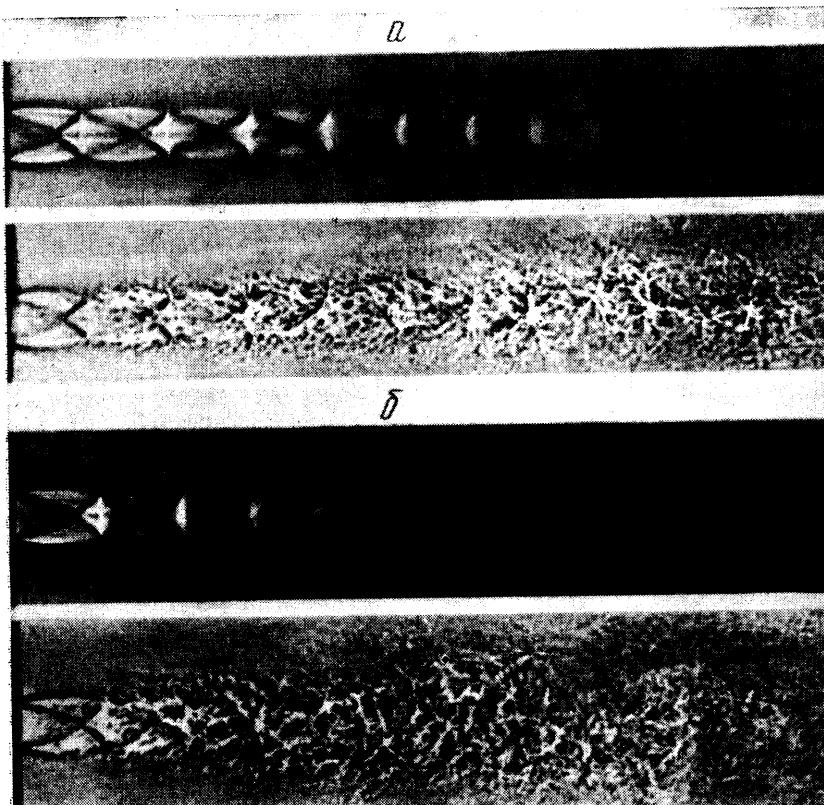
1. Эксперимент проводился на конических соплах с углом полураствором  $\theta = 0 \div 10^\circ$ . Воздух высокого давления от батареи баллонов подводился к ресиверу сферической формы объемом  $V_p = 0.14 \text{ м}^3$ . Заданное давление  $p_0$  в ресивере регулировалось дроссельным краном и измерялось образцовым манометром класса 0.35. Струя воздуха через сопло вытекала в помещение стенда объемом  $\sim 100 \text{ м}^3$ . Размеры сопл и диапазон нерасчетности, в котором они работали, приведены ниже.

$M$	1.0	2.0	2.4	3.08
$d$ , м.м.	3, 6, 8	5.5	4.75	4
$n$	1.6—16	0.4—8	0.3—4	0.1—1.65

Здесь  $d$  — диаметр сопла,  $n = p_a / p_n$  — нерасчетность,  $p_a$  — давление на срезе сопла,  $p_n$  — давление на затопленном пространстве.

Внешняя поверхность ресивера и сопл покрывалась пластиинами поролона. В соответствии с программой эксперимента для отражения акустических волн использовались металлические дисковые щитки с внешним диаметром  $D_1 = 80 \text{ мм}$  и внутренним диаметром  $D_2 = 10—30 \text{ мм}$ , перемещаемые вдоль оси струи. Щитки одевались на сопло и устанавливались перпендикулярно оси струи, при этом внутренний диаметр  $D_2$  щитка равнялся внешнему диаметру сопла. Эксперимент проводился с неподогреваемым воздухом, температура торможения которого ( $T_0 \approx 300^\circ \text{K}$ ) контролировалась термопарой, установленной в ресивере.

В струе исследовались поля полного давления  $p_{ox}'$  и  $p_{oy}'$  при помощи трубок полного давления, установленных на координатнике. Величины давления регистрировались  $U$ -образными жидкостными манометрами с погрешностью измерения, не превышающей  $\pm 1 \text{ мм}$ , или образцовыми манометрами с трубкой Бурдона класса 0.35. Акустическое поле струи при частотах  $f < 5 \text{ кгц}$  исследовалось емкостным датчиком. Спектральный анализ пульсаций велся на анализаторе С5-3. Исследование пульсаций



Фиг. 1

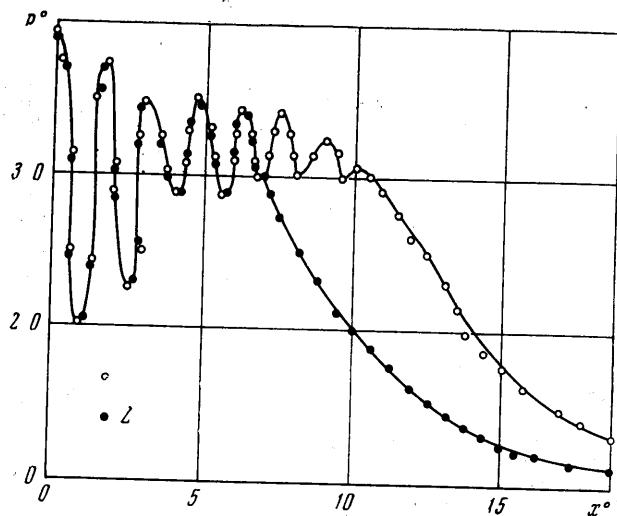
с частотами  $f > 5 \text{ кгц}$  проводилось специальным датчиком, разработанным С. П. Шалаевым. Чувствительным элементом этого датчика является алюминированная пленка диаметром 3  $\text{мм}$  и толщиной 0.01  $\text{мм}$ . Луч света точечного источника, отражаясь от поверхности датчика, освещал фотоэлемент ФД-3, изменение тока фотоэлемента регистрировалось катодным осциллографом.

В процессе эксперимента струя фотографировалась теневыми установками, позволяющими получать одновременно две фотографии с экспозициями  $10^{-4}$  и  $10^{-6} \text{ сек}$  (фиг. 1). Фотографии с большей экспозицией позволяют наблюдать осредненную во времени внутреннюю структуру струи в области, где существуют системы волн давления и разряжения, наблюдаемые в форме характерных ячеек, которые называются в дальнейшем бочками. Фотографии с экспозицией  $10^{-6} \text{ сек}$  дают возможность исследовать внешнюю турбулентную границу струи и акустическое поле в окружающем пространстве.

2. Рассмотрим влияние на течение в струе щитка — отражателя, установленного на срезе сопла.

В опыте число Маха на срезе сопла  $M = 1.0$ , а нерасчетность истечения изменялась в диапазоне  $n = 1.6—16$ . Характерные поля давлений  $p^\circ = f(x^\circ)$  и теневые фотографии струи, полученные при  $n = 2.1$ , приведены на фиг. 1, 2. Здесь  $p^\circ = p_0' / p_n$ ,  $x^\circ = x / d$ ,  $x$  отсчитывается от среза сопла вдоль оси струи.

Фотография 1, а и кривая 1 на фиг. 2 соответствуют эксперименту, в котором щиток-отражатель отсутствовал. Зависимость  $p^\circ = f(x^\circ)$  имеет



Фиг. 2

характер затухающих периодических колебаний. Среднее значение  $p^\circ$  остается практически неизменным. Этот участок течения по аналогии с терминологией, принятой при исследовании дозвуковых (или расчетных сверхзвуковых) струй, будем называть начальным. За начальным участком струи ( $x^\circ > 10$ ) расположен основной участок, в пределах которого давление  $p^\circ$  на оси струи монотонно убывает. Периодический характер зависимости  $p^\circ = f(x^\circ)$  соответствует аналогичному характеру изменения числа  $M$  на оси струи. Полное давление  $p_0'$  на оси струи в диапазоне  $x^\circ = 0—10$  изменяется мало вследствие незначительного роста энтропии в слабых волнах сжатия.

В основном участке струи убывание  $p^\circ$  соответствует росту энтропии в результате вязкой диссиляции. Если принять, что главной особенностью основного участка струи является наличие вязкой диссиляции на оси, то характерное волновое изменение  $p^\circ = f(x^\circ)$  и соответствующие бочки на теневых фотографиях могут наблюдаться не только на начальном, но и на основном участке струи (фиг. 1 и 2).

Датчики пульсаций, расположенные вблизи среза сопла в данном опыте фиксировали белый шум интенсивностью  $\sim 120$  дБ. Амплитуда дискретных составляющих датчиками не фиксировалась, по-видимому, из-за их недостаточной чувствительности.

Установка на срезе сопла щитка-отражателя существенно уменьшает длину начального участка струи (фиг. 1, б и кривая 2 на фиг. 2). На начальном участке ( $x^\circ < 6.5$ ) зависимость  $p^\circ = f(x^\circ)$  в пределах точности эксперимента полностью совпадает с полученной в опытах без отражаю-

щего щитка (фиг. 2). Теневые снимки, полученные с экспозицией  $\tau \sim 10^{-1}$  сек, также показывают, что характер бочек на рассматриваемом участке течения не изменился. По-видимому, осредненное по времени течение вдоль оси начального участка остается неизменным. Теневые фотографии, полученные с экспозицией  $\tau \sim 10^{-6}$  сек (фиг. 1, б), показывают существенную интенсификацию степени турбулентного перемешивания струи. Угол расширения струи заметно увеличился. Теневые фотографии, получаемые с малой экспозицией, позволяют увидеть внешнюю турбулентную «оболочку» начального участка струи, которая, однако, закрывает внутреннюю структуру бочек. Изменение настройки теневого прибора позволяет обнаружить эту структуру, причем оказалось, что в данном случае ось симметрии бочек искривлена.

По-видимому, имеют место колебания бочек относительно среднего положения, причем частота рассматриваемых колебаний достаточно велика. В качестве одной из причин этих колебаний можно указать колебания поверхности отражения волн в результате усиливающейся турбулентности течения в вязком слое. Пульсации угла наклона ударных волн на срезе сопла также могут быть причиной рассматриваемых колебаний. Акустические датчики показали, что установка щитка увеличила уровень белого шума на 3—5 дБ при  $n = 1.6—3.0$ . Кроме того, появились дискретные составляющие с характерными частотами 17—20 кГц при нерасчетностях истечения  $n = 1.6—5$ . Амплитуда дискретных составляющих в данных опытах не определялась. Данные исследования и работы других авторов [1] показывают, что поперечные поля течения в основном участке сверхзвуковой струи автомодельны. В этом случае турбулентную диссиацию струи можно характеризовать изменением скорости на оси. В качестве величины, характеризующей влияние внешнего акустического поля на диссиацию струи, примем

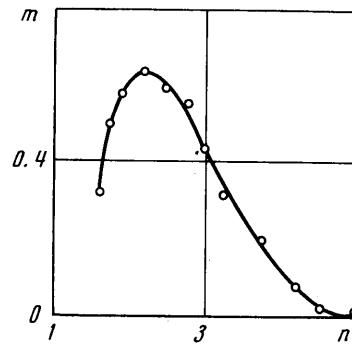
$$m = 1 - (p_0' - p_n)_1 / (p_0' - p_n)_2$$

В общем случае

$$m = f(M, n, x^\circ, A, sh_*), \quad (sh_* = f_* d/a_n)$$

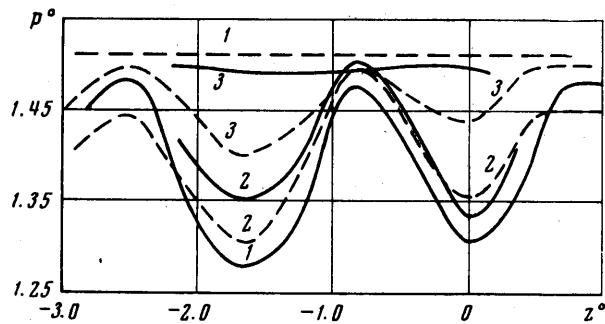
где  $sh_*$  — безразмерная частота, а  $A$  — амплитуда дискретной составляющей. Типичная зависимость  $m = f(n, sh_*)$  для  $M = 1.0$  и  $x^\circ = 20$  приведена на фиг. 3 (зависимость  $sh_* = f(n)$  см. на фиг. 5). В области режимов  $n > 5$ , где не обнаруживается дискретная составляющая,  $m = 0$ .

3. Рассмотрим, как влияет положение щитка, установленного перпендикулярно к оси струи, на параметры течения. На фиг. 4 непрерывной линией 1 показано поведение полного давления на оси струи в сечении  $x^\circ = 20$  при  $M = 1.0$ ,  $d = 6$  мм и  $n = 2.1$ . Расстояние  $z^\circ = z/d$  отсчитывается от кромки сопла до поверхности щитка. При удалении щитка от среза сопла в направлении против течения струи давление  $p^\circ$  растет и при  $z^\circ = -0.83$  достигает максимального значения, затем падает, образуя минимум при  $z^\circ = -1.67$ ; при  $z^\circ = -2.5$  — снова максимум. При  $z^\circ \geq 0.67$  величина  $p^\circ$  постоянна.



Фиг. 3

Исследование внешнего акустического поля струи показало, что уровень дискретной составляющей зависит от положения щитка  $z^\circ$ . При  $z^\circ > 0.67$  и  $z^\circ = -0.83, -2.5$  уровень ее минимален, а при  $z^\circ = 0, -1.67$  максимален. В этих режимах дискретная составляющая хорошо обнаруживается в поле теневых снимков, полученных с  $\tau \sim 10^{-6}$  сек. Частота дискретной составляющей, измеренная пленочным датчиком ( $f_* = 17.4$  кгц), совпадает с частотой, определенной по длине волны возмущений, фиксируемых на теневых фотографиях, и длиной волны колебаний  $p^\circ = f(z^\circ)$  (фиг. 4), если положить, что возмущение распространяется со скоростью звука  $a_n$  во внешнем пространстве.



Фиг. 4

4. В работах [2-5] при анализе влияния внешнего акустического поля на течение в струе вводится понятие контура с обратной связью. При этом возмущения из внешнего канала проникают в струю в сечении, расположенному вблизи среза сопла. Данные опыты подтверждают эту гипотезу, показывая, что влияние отражателя существенно только при  $z^\circ < 0.6$ .

Если положить, что во внешнем акустическом поле при наличии щитков возникает стоячая волна, то, очевидно, влияние ее на течение в струе будет наибольшим, когда пучность волны будет совпадать с областью  $z^\circ \sim 0$ , и наименьшим, когда с этим сечением совпадает узел волны. Для проверки выдвинутой гипотезы был проведен эксперимент с двумя полу щитками, расположенными таким образом, чтобы не затенять друг друга. В случае, когда вдоль оси струи перемещался один полу щиток, его влияние на величину  $p^\circ$  (при  $x^\circ = 20$ ) было аналогично влиянию перемещающегося полного щитка, однако амплитуда колебаний  $p^\circ$  уменьшалась (фиг. 4, пунктирная линия 3). Если расположить первый полу щиток в положении, соответствующем минимуму  $p^\circ$  (например, при  $z^\circ = -1.67$ ), а второй полу щиток перемещать, то колебания  $p^\circ$  возрастают (фиг. 4, пунктирная линия 2). В случае, когда первый полу щиток расположен в максимуме  $p^\circ$  ( $z^\circ = -0.83$ ), перемещения второго не влияют на значения  $p^\circ$  (фиг. 4, пунктирная линия 1). Попробуем объяснить полученные результаты. Обозначим расстояние от среза сопла до первого щитка через  $z_1$ , а до второго — через  $z_2$ . Складывая акустические колебания от источников струи, распространяющиеся во внешней среде к щитку, получим некоторую акустическую волну, которую назовем акустической волной источника струи (т. е. заменим источники струи эквивалентным источником)

$$s = A \cos(\omega_* t + \varphi)$$

Складывая набегающей и отразившейся от щитка акустической волны, у среза сопла получим

$$(4.1) \quad A_1^2 = 2A^2 + 2A^2 \cos 2kz_1$$

Здесь  $k$  — волновое число ( $k\lambda_* = 2\pi$ ),  $\lambda_*$  — длина волны дискретной составляющей.

Отметим, что при

$$(4.2) \quad z_1 = \lambda_* / 4 + n\lambda_* / 2 \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$A_1 = 0$ , обратная связь между акустическим источником струи и началом струи прерывается, что и приводит к исчезновению дискретной составляющей. При  $z_1 = n\lambda_* / 2$  воздействие акустических волн на начало струи наибольшее ( $A_1 = 2A$ ). Результатом является возникновение сильных акустических возмущений в струе, быстрое ее разрушение и большая интенсивность дискретного излучения. Расстояние  $\Delta z_1$  между двумя соседними положениями щитка, в которых  $A_1 = 0$  (или  $A_1 = 2A$ ), равно  $\lambda_* / 2$  и равно расстоянию между двумя соседними максимумами (минимумами) в зависимости  $p^\circ = f(z^\circ)$ . Из соотношения (4.1) видно также, что при  $z_1 = n\lambda_* / 2$  для случая течения струи со щитком амплитуда волны «дискретной составляющей», действующей на начало струи, в два раза больше амплитуды для случая течения без щитка, чем и объясняется эффект воздействия щитка на струю. Выражение для амплитуды колебаний при наличии двух полуплитков имеет вид

$$(4.3) \quad A_2^2 = A^2 + 8A^2 \cos kz_1 \cos kz_2 \cos k(z_1 - z_2)$$

Из соотношения (4.3) видно, что если первый щиток находится от среза сопла на расстоянии

$$(4.4) \quad z_1 = 1/4\lambda_* + 1/2n\lambda_*$$

то при любом положении второго щитка получим

$$(4.5) \quad A_2 = A$$

Таким образом, существуют положения первого щитка, при которых второй щиток не влияет на струю. Заметим, что выражения (4.2) и (4.4) совпадают. Из соотношения (4.3) также следует, что  $A_2 = A_1$ , если

$$(4.6) \quad \begin{aligned} z_1 &= 1/4\lambda_* + 1/2n\lambda_* \text{ или } z_2 = 1/4\lambda_* + 1/2n\lambda_* \text{ или} \\ z_1 - z_2 &= 1/4\lambda_* + 1/2n\lambda_* \end{aligned}$$

Таким образом, если перемещать сразу два щитка так, чтобы расстояние между ними

$$z_1 - z_2 = 1/4\lambda_* + 1/2n\lambda_* = \text{const}$$

то не должно быть влияния щитков на струю. Для экспериментальной проверки этого положения были сделаны два одинаковых полуплитка, помещенные на расстоянии  $\Delta z = z_1 - z_2 = 1/4\lambda_* = 5 \text{ мм}$  один от другого. Оба щитка передвигались одновременно и расстояние между ними сохранялось неизменным. Результаты экспериментов, представленные на фиг. 4 непрерывной линией 3, показывают, что действительно при изменении  $z^\circ$  параметр  $p^\circ$  остается практически постоянным. Очевидно, выбор расстояния между щитками существен. При  $\Delta z = 7.5 \text{ мм}$  зависимость параметра  $p^\circ$  от  $z^\circ$  проявляется очень сильно (фиг. 4, непрерывная линия 2).

Природа образования дискретной составляющей связана с передачей акустического возмущения во внешней окружающей среде в направлении, противоположном течению в струе. Наличие этой обратной связи приводит к усилению возмущений в струе. Щиток, установленный перпендикулярно

оси струи вблизи сопла, может усилить либо ослабить эту обратную связь, изменяя тем самым характеристики акустической автоколебательной системы струя — внешняя среда — струя. В этом проявляется основная роль щитка как акустического отражателя.

5. Для  $M = 1.0, 2.0, 2.4, 3.08$  были определены частоты дискретной составляющей в акустическом поле струи с помощью зеркально-пленоочного датчика, а также по зависимости  $p^o = f(z^o)$  полученной при перемещении щитка. Дискретная составляющая была обнаружена при числе  $M = 1.0$  для  $n = 0.4 - 0.79$  и  $n = 1.1 - 1.65$ , для  $n = 1.6 - 4.8$ , при числе  $M = 2.0$  для  $n = 0.4 - 0.79$  и  $n = 1.1 - 1.65$ ,

при  $M = 2.4$  для  $n = 0.28 - 0.53$  и при  $M = 3.08$  для  $n = 0.31 - 0.55$

Результаты экспериментов, представленные на фиг. 5, показывают, что с ростом нерасчетности частота дискретной составляющей уменьшается (здесь индекс 1 соответствует  $M = 1.0$ , 2 —  $M = 2.0$ , 3 —  $M = 2.4$ , 4 —  $M = 3.08$ ). Этот результат согласуется с результатами работ [3, 6, 7]. Было проведено сопоставление длины волны дискретной составляющей с продольным размером бочки струи. Для этого по теневым фотографиям измерялись продольные размеры ( $l$ ) шести бочек струи.

При этом оказалось, что длины третьей  $l_3$ , четвертой  $l_4$ , пятой  $l_5$ , и шестой  $l_6$  бочек с точностью 5—15% совпадают с длиной второй бочки. Результаты измерений также показывают (с разбросом 5%), что для всех чисел  $M = 1 - 3.08$  и нерасчетностей  $n = 0.36 - 2.1$  длина волны дискретной составляющей  $\lambda_*$  (для диапазона нерасчетностей, когда интенсивность ее значительна) равна длине двух бочек  $l_c$ . Здесь  $l_c = (l_2 + l_3 + l_4) / 3$ . Качественно аналогичные результаты были получены в работе (4).

Таким образом, если в условиях рассматриваемого течения в белом шуме струи выделяется дискретная составляющая, длина волны ее может быть найдена по определяемой в газодинамическом расчете струи длине бочки  $l^o = f(M, n, c_p / c_o, \theta)$ .

Поступила 29 III 1972

#### ЛИТЕРАТУРА

- Гласс Д. Влияние акустической обратной связи на распространение и затухание сверхзвуковых струй. Ракетная техника и космонавтика, 1968, т. 6, № 10.
- Powell A. On the noise emanation from a three-dimensional jet above the critical pressure. Aeronaut. Quart., 1953, vol. 4, pp. 103—122.
- Ануфриев В. М., Комаров В. В., Купцов В. М., Мельников Д. А., Сергиенко А. А. Дискретная составляющая в спектре шума сверхзвуковой струи. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 5.
- Hannitt A. The oscillation and noise of an overpressure sonic jet. JASS 1961, vol. 28, № 6.
- Poldervaart L., Vink A., Wijnands A. Photographic evidence of feedback loop of a three-dimensional screeching supersonic jet of air. The 6-th Internat. Congress on Acoustics. Tokyo, Japan, 21—28, 1968.
- Merle M. Emissions acoustiques associees aux jets d'air supersoniques. J. Mecanique, 1965, vol. 4, No. 3.
- Беленков В. Акустическое излучение сверхзвуковой струи в сторону среза сопла при различных режимах нерасчетности. Сб. «Газодинамика и теплообмен», ч. 2. Л., ЛГУ, 1970.