

Член-корреспондент АН СССР В. С. АВДУЕВСКИЙ, А. В. ИВАНОВ,  
И. М. КАРПМАН, В. Д. ТРАСКОВСКИЙ, М. Я. ЮДЕЛОВИЧ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ТЕЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ ВЯЗКИХ НЕДОРАСШИРЕННЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ

Рассмотрено взаимодействие вязких струй, истекающих в одном направлении из нескольких близко расположенных сопел, срезы которых находятся в одной плоскости, в режиме сильного недорасширения. Результаты проведенных экспериментов позволили заключить, что при увеличении степени нерасчетности  $n = P/P_\infty \gg 1$  ( $P$  — давление на срезе сопла,  $P_\infty$  — давление во внешнем невозмущенном пространстве) взаимодействие струй приводит к их слиянию на некотором расстоянии от срезов сопел и образованию так называемой суммарной струи. Суммарная струя, несмотря на сложную пространственную структуру скачков уплотнения и существенно неравномерное распределение параметров вблизи срезов сопел, имеет в начальном участке бочкообразную структуру, сходную со структурой струи, истекающей из одиночного сильно недорасширенного сопла (<sup>1, 2</sup>). Анализ полученных данных показал, что как при истечении в затопленное пространство, так и в спутный сверхзвуковой поток определение характерных размеров начального участка суммарной струи при  $n \gg 1$  может быть сведено к односопловому случаю введением понятия эквивалентного сопла, имеющего те же значения импульса на срезе и расхода, что и все сопла системы.

1. Развитие течения в системе струй при увеличении  $n$  можно проследить по фотографиям, представленным на рис. 1а—г, соответствующим истечению в затопленное пространство ( $M_\infty = 0$ ) из системы четырех одинаковых и симметрично расположенных звуковых сопел ( $M = 1$ ), имеющих одинаковые параметры на срезе, при степенях нерасчетности  $n = 9,5; 19,1; 50,7$  и 2000 соответственно. Теплеровские фотографии рис. 1а—г получены при турбулентном режиме течения в слое смешения (при давлении в затопленном пространстве  $P_\infty = 1$  атм) и соответствуют плоскости симметрии, проходящей через ось системы и между соседними соплами (называемой ниже плоскостью взаимодействия). Расстояние между противоположными соплами, отнесенное к диаметру одного сопла,  $h = 1,8$ . Фотография рис. 1г соответствует ламинарному режиму и получена методом электронного пучка при  $P_\infty = 0,05$  мм рт. ст. и  $h = 7$  для плоскости, проходящей через ось системы и оси двух противоположных сопел (называемой ниже центральной плоскостью).

Видно, что с увеличением  $n$  течение перестраивается от случая слабо взаимодействующих струй (рис. 1а) к случаю развитого взаимодействия, при котором образуется бочкообразный скачок уплотнения суммарной струи (рис. 1в, г). В плотности взаимодействия этот скачок образуется как висячий скачок, а в центральной плоскости — как результат взаимодействия скачков отдельных струй. Для единства терминологии будем впредь называть его висячим скачком уплотнения суммарной струи.

Аналогичная картина имеет место и для системы струй, истекающих в сверхзвуковой спутный поток. На рис. 1д представлена теплеровская фотография течения в центральной плоскости при развитом взаимодействии для симметричной системы четырех одинаковых сверхзвуковых сопел с

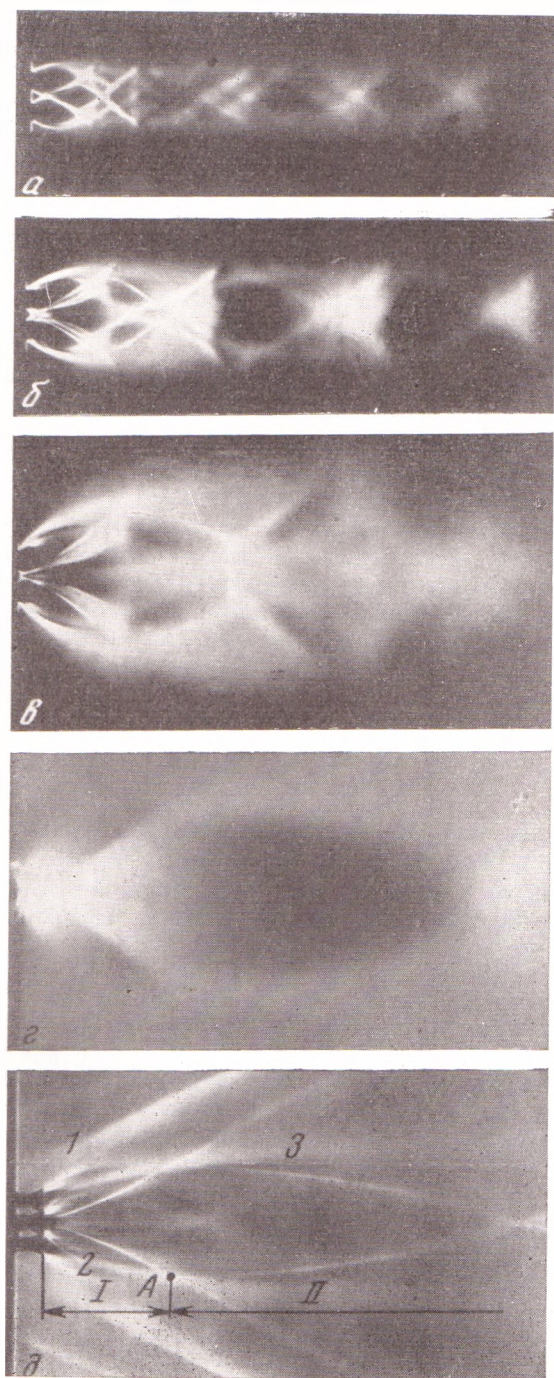


Рис. 1. Структура струи, вытекающей из системы четырех сопел

числом Маха на срезе  $M=3$ , разнесенных на относительное расстояние  $h=1,8$  и имеющих одинаковые параметры потока на срезе; здесь степень нерасчетности  $n=17$ , число Маха внешнего потока  $M_\infty=3,1$ ; режим течения турбулентный.

При развитом взаимодействии системы струй в пределах начального участка можно выделить две характерные области течения: область взаимодействия I и область суммарной струи II (см. рис. 1*б*). Первую область условно определим как участок между срезами сопла и плоскостью, перпендикулярной оси системы и проходящей через точки A пересечения следа скачка уплотнения 2 (рис. 1*б*), образующегося в центральной плоскости при взаимодействии струй от отдельных сопел, с висячим скачком 1 одиночной струи. Область, расположенную ниже по потоку от области взаимодействия и характеризующую в пределах начального участка общим бочкообразным скачком уплотнения 3, будем считать областью суммарной струи.

2. Результаты экспериментальных исследований (<sup>1,2</sup>) и анализ подобия сильно недорасширенных одиночных струй (<sup>3-5</sup>) показали, что их структура в основном определяется такими интегральными характеристиками, как величины импульса на срезе и расхода, а конкретные особенности течения в начальной стадии формирования струи не оказывают существенного влияния на ее дальнюю часть. Это привело к идее аналитически описывать данные экспериментов по характерным размерам суммарной струи многосопловой системы введением понятия «эквивалентного» сопла, т. е. такого сопла, которое на своем срезе имело бы величины импульса  $I_i$  и расхода  $G_i$ , равные соответственно сумме импульсов  $I_k$  и расходов  $G_k$  всех  $i$  сопел данной системы:

$$I_i = \sum_{k=1}^i I_k, \quad G_i = \sum_{k=1}^i G_k. \quad (1)$$

Для простейшего и практически важного случая симметрично расположенных сопел с одинаковыми параметрами эквивалентное сопло определяется как сопло, имеющее те же параметры на срезе, что и каждое из сопел системы, и диаметр которого связан с диаметром  $d$  каждого сопла соотношением

$$d_i = di^{0,5}. \quad (2)$$

В одном частном случае системы двух сопел с различными параметрами на срезе, но при одинаковых полных давлениях, температурах торможения и рабочих газах, выражения (1) при использовании изэнтропических соотношений для температуры, давления и скорости газа дают для определения характеристик эквивалентного одиночного сопла (числа Маха  $M_i$ , диаметра  $d_i$ ) следующие уравнения:

$$d_i^2 \frac{\gamma M_i^2 + 1}{(1 + \frac{1}{2}(\gamma - 1) M_i^2)^{\gamma/(\gamma - 1)}} = \sum_{k=1}^i d_k^2 \frac{\gamma M_k^2 + 1}{(1 + \frac{1}{2}(\gamma - 1) M_k^2)^{\gamma/(\gamma - 1)}}; \quad (3)$$

$$d_i^2 M_i \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_i^2 \right)^{\frac{1}{2}(\gamma + 1)/(\gamma - 1)} = \sum_{k=1}^i d_k^2 M_k \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_k^2 \right)^{\frac{1}{2}(\gamma + 1)/(\gamma - 1)}, \quad (4)$$

где  $\gamma$  — отношение удельных теплоемкостей,  $d_k$  и  $M_k$  — диаметр выходного сечения и число Маха на срезе  $k$ -го сопла. Условие равенства полных давлений дает значение некоторой эффективной степени нерасчетности суммарной струи, истекающей из эквивалентного сопла.



Для наиболее общего типа системы сопл при определении характеристик эквивалентного сопла уравнения (1) следует дополнить необходимым числом уравнений для осреднения всех определяющих параметров течения (энтальпии, отношения удельных теплоемкостей и т. д.).

3. Экспериментальная проверка гипотезы эквивалентного сопла для случая симметрично расположенных сопл с одинаковыми характеристиками была выполнена для турбулентного и ламинарного режимов течения в слое смешения в следующем диапазоне параметров:  $i=2; 4; 6$ ;  $M=1-4$ ;  $M_\infty=0-10$ ,  $n=1-10^4$ ;  $h=1,8-15$ . Анализ результатов показал, что для любой комбинации  $M$ ,  $M_\infty$ ,  $h$  существует некоторое значение степени нерасчетности струи  $n_1$ , начиная с которого применение понятия эквивалентного сопла позволяет с удовлетворительной точностью предсказывать характерные размеры начального участка струи от системы сопл. При этом для  $n \geq n_1$  область суммарной струи в начальном участке существенно больше области взаимодействия.

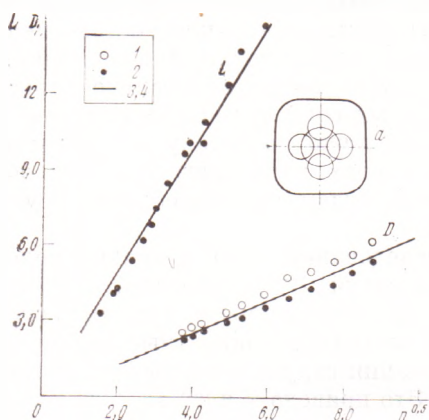


Рис. 2. Сопоставление результатов эксперимента по расстоянию  $L$  до центрального скачка уплотнения и максимальному поперечному размеру  $D$  висячего скачка уплотнения суммарной струи, определенному в плоскостях взаимодействия (1), и центральной (2) с результатами расчета для эквивалентного сопла (3, 4)

На рис. 2 представлены результаты измерений расстояния  $L$  до центрального скачка уплотнения и максимального поперечного размера  $D$  висячего скачка уплотнения суммарной струи четырехсопловой системы при  $M=3$ ;  $M_\infty=3,1$ ;  $h=1,8$  для случая турбулентного режима течения. Поперечный размер  $D$  висячего скачка определен для плоскости взаимодействия (рис. 2, 1) и центральной плоскости (рис. 2, 2). Размеры  $L$  и  $D$  здесь отнесены к диаметру эквивалентного сопла, определенному по соотношению (2). Сплошные линии 3 и 4 дают соответственно величины  $L$  и  $D$  одиночной эквивалентной струи, рассчитанные по формулам работ (1, 2).

Висячий скачок уплотнения не является осесимметричным, а имеет форму, показанную на рис. 2а. Однако его поперечные размеры в двух указанных плоскостях различаются лишь на 20%, а результаты расчета величины  $D$  для эквивалентной струи занимают при этом примерно среднее положение.

Экспериментальные результаты проверки гипотезы эквивалентного сопла для системы двух сопл с различными параметрами показаны на рис. 3. Эти результаты также относятся к турбулентному режиму. Согласно выражениям (3) и (4) число Маха и диаметр эквивалентного сопла для рис. 3а соответственно равны  $M_1=1$ ;  $d_1=(d_1^2+d_2^2)^{0,5}$ , а для рис. 3б —  $M_1=1,75$ ;  $d_1=1,6d$ .

Из рис. 3 видно, что в обоих случаях расчет расстояния до центрального скачка по методу эквивалентного сопла и при использовании соотношений работы (1) достаточно хорошо согласуется с результатами экспериментов.

4. Данный метод имеет смысл только для такой системы, отдельные сопла которой имеют сравнимые по величине расходы  $G_k$  и импульсы  $I_k$ . Если же, например, в двухсопловой системе одно из сопл имеет значения  $G_1$  и  $I_1$ , на порядок превышающие соответственно  $G_2$  и  $I_2$ , то в таком случае этот метод неприменим и здесь следует говорить просто о малом возмущении струи от первого сопла.

Выше указано, что метод эквивалентного сопла применим для такой степени нерасчетности  $n \geq n_1$ , при которой уже образовалась суммарная струя и характерный размер последней больше размера области взаимодействия. Отсюда следует, что данный метод применим и в случае систем с сильно разнесенными соплами (большие  $h$ ), но при этом нижняя граница применимости метода сдвигается в сторону больших значений степени нерасчетности. Данное утверждение подтверждено экспериментами.

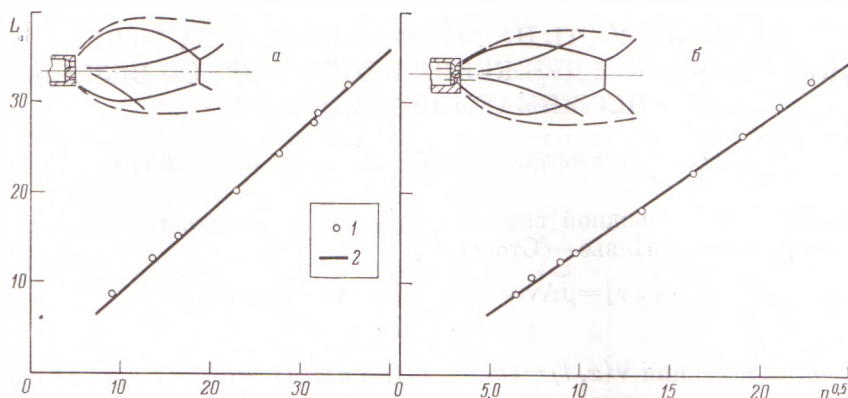


Рис. 3. Сопоставление результатов эксперимента (1) по расстоянию  $L$  до центрального скачка для системы двух сопел с  $M_1=M_2=1$  и отношением  $d_1/d_2=0,67$  (а) и с  $M_1=1$ ;  $M_2=2$  и  $d_1=d_2$  (б) с результатами расчета (2) для эквивалентного сопла

Однако наилучшее согласие расчетов по эквивалентному соплу с экспериментами имеет место для плотных систем с симметрично расположенными соплами.

Установленная возможность определения характерных размеров начального участка суммарной струи не означает полной тождественности течения от системы сопел с течением от одиночного эквивалентного сопла. В действительности взаимодействие струй от отдельных сопел системы приводит к появлению ряда особенностей, качественно отличающих многосопловую струю от односопловой. Это относится к течению в области вязкого сжатого слоя за висячим скачком, в области взаимодействия, а также в области ограниченной висячим скачком уплотнения суммарной струи, в которой необходимо учитывать потери полного давления в скачках, образующихся при взаимодействии.

Поступило  
20 IX 1973

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> В. С. Авдусевский, А. В. Иванов и др., Изв. АН СССР, мех. жидкости и газа, № 3, 63 (1970). <sup>2</sup> В. С. Авдусевский, А. В. Иванов и др., Там же, № 3 (1972). <sup>3</sup> S. P. Moran, Am. Inst. Aeronaut. and Astronomy J., № 7 (1967). <sup>4</sup> В. Н. Гусев, Т. В. Климова, Изв. АН СССР, мех. жидкости и газа, № 4 (1968). <sup>5</sup> И. Н. Мураинов, Там же, № 4 (1971).