

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ СПУТНЫХ ГИПЕРЗВУКОВЫХ СТРУЙ

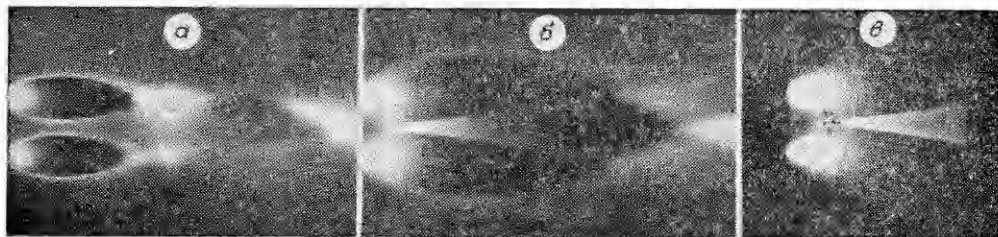
В. И. Ермолов, Ж.-К. Лангран (Франция), А. К. Ребров, Г. А. Храмов  
(Новосибирск)

Взаимодействие струй в некоторых типах вакуумных насосов в значительной мере определяет откачную способность и предельный вакуум. Однако целенаправленные исследования этого явления применительно к вакуумным насосам не проводились [1]. Исследования взаимодействия струй [2—4], проведенные при достаточно больших числах Рейнольдса, характеризующих эффекты вязкости, и малых значениях разности сопел, не относятся непосредственно к условиям работы вакуумных насосов.

Взаимодействие двух спутных струй аналогично взаимодействию одиночной струи с поверхностью, параллельной оси струи, без трения. Постановка таких исследований представляет интерес при решении задач силового воздействия струй на окружающие элементы в условиях вакуума. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию влияния эффектов вязкости на распределение плотности в плоскости симметрии двух параллельных сильно недорасширенных спутных гиперзвуковых струй в условиях, соответствующих вакуумным насосам.

Структура течения в области взаимодействия струй, истекающих в затопленное пространство, определяется числом Маха на срезе сопла  $M$ , отношением удельных теплоемкостей  $\gamma$ , параметрами торможения газа струи  $p_0$  и  $T_0$ , давлением в окружающем пространстве  $p_k$ , температурой окружающего газа  $T_k$ , числом Рейнольдса  $Re_*$ , рассчитанным по параметрам в критическом сечении сопла, и геометрическими параметрами:  $h$  — расстоянием между соплами,  $d_*$  — диаметром критического сечения. Для определения положения характерных геометрических поверхностей достаточно использовать соотношение поперечных размеров одиночной струи  $D \sim d_* \sqrt{p_0/p_k}$  и расстояния между соплами  $h$ . На фиг. 1, *a—в* представлены фотографии продольного сечения двух взаимодействующих струй, сформированных при постоянном давлении торможения  $p_0$ ; давление в окружающем пространстве в случае *a* наибольшее. Фиг. 1, *a* отвечает случаю  $D < h$ , когда струи практически не взаимодействуют и структура каждой отдельной струи не деформируется влиянием соседней. При величине  $D$ , соизмеримой с  $h$  (фиг. 1, *б*), отношение  $D/h$  существенно влияет на геометрию течения и распределение параметров в плоскости симметрии. Для  $D \gg h$  (фиг. 1, *в*) можно ожидать слабое влияние отношения  $D/h$  на распределение параметров в области взаимодействия струй с размерами  $\sim h$ . В данной работе рассматривается последний случай, когда  $D \gg h$ .

Эффекты вязкого взаимодействия струи с окружающим газом приводят к образованию слоя смешения на границе струи и могут существенно влиять на распределение параметров газа в области взаимодействия струй. Смешение струи с окружающим газом для  $M = idem$  и  $\gamma = idem$  определяется числом Рейнольдса  $Re_L \sim Re_* / \sqrt{p_0/p_k}$  [5, 6]. Здесь  $Re_*$  — число Рейнольдса, рассчитанное по параметрам в критическом сечении сопла. В случае вязкого газа при  $p_0/p_k \gg 1$  в области взаимодействия вязкость может оказать влияние в окрестности точки



Ф и г. 1

Номер режима	$p_0$ , Па	$Re_*$	$Re_h$	$Re_L$	$\frac{p_0}{p_R}$	$h \cdot 10^{+2}$ , м
1	$0,35 \cdot 10^5$	$5,3 \cdot 10^3$	92,5	5	$10^6$	5,8
2	$0,70 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^4$	182,5	10	$10^6$	5,8
3	$1,40 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^4$	365	20	$10^6$	5,8
4	$0,83 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^4$	92,5	12	$10^6$	14
5	$1,66 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^4$	182,5	24	$10^6$	14
6	$3,32 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^4$	365	48	$10^6$	14
7	$3,32 \cdot 10^5$	$5,0 \cdot 10^4$	182,5	48	$10^6$	28
8	$0,70 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^4$	182,5	42	$10^4$	5,8
9	$1,66 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^4$	92,5	24	$10^6$	28

растекания, и тем большее, чем больше разреженность. Для этой области характерное число Рейнольдса  $Re_h \sim Re_* d/h$  является аналогом критерия  $Re_L$  для свободной струи и вводилось ранее в [3].

На больших расстояниях от среза сопла в области невозмущенного потока течение можно представить как от источника. Поэтому плотность перед скачком уплотнения, возникающим при взаимодействии струй, приближенно имеет вид

$$\rho \approx (d_*/h)^2 \rho_0 \varphi(M, \gamma, x/h, y/h),$$

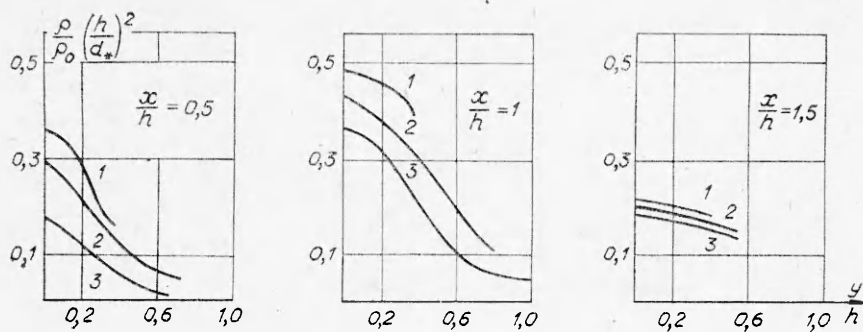
где  $x, y$  — продольная и поперечная координаты. При  $h \gg d_*$  поток в области взаимодействия является гиперзвуковым и в соответствии с принципом гиперзвуковой стабилизации параметры потока за висячей и отраженной от плоскости симметрии волнами не зависят от числа Маха в невозмущенном потоке и определяются параметрами источника:  $M, \gamma$  и расстоянием между соплами. Таким образом, указанную зависимость для плотности можно представить в виде

$$\rho \approx (d_*/h)^2 \rho_0 f(M, \gamma, x/h, y/h, Re_L, Re_h).$$

Отсюда следует форма обработки экспериментальных данных в виде зависимости безразмерной плотности от определяющих параметров.

Эксперименты проводились на вакуумной газодинамической установке, оснащенной гелиевой криогенной откачкой и электронно-пучковой диагностикой [7]. Для создания струй газа использовались два одинаковых сопла с диаметром в критическом сечении, равным 1 мм, полууглом раствора сопла  $15^\circ$  и геометрическим числом Маха на срезе сопла, равным 3. Режимы течения выбирались такими (см. таблицу), чтобы охватить условия, характерные для работы струй в вакуумных насосах, в частности, оптимальные по числам  $Re_L$  для откачной способности свободной струи [8].

С помощью электронно-пучковой методики получены фотографии плоских сечений струй (фиг. 1, а — е), а также распределение плотности в плоскости симметрии. На фиг. 2 представлены поперечные профили



Ф и г. 2

распределения плотности в плоскости симметрии. Цифрами на графиках обозначены номера режимов, приведенные в таблице.

На фиг. 3 приведены профили распределения плотности на оси симметрии для двух групп режимов с постоянными расстояниями между соплами. Видно, что с увеличением числа  $Re_*$  плотность возрастает, а положение максимума сдвигается в направлении плоскости среза сопел.

Изменение чисел  $Re_*$  для истечения взаимодействующих струй в вакуум эквивалентно изменению  $Re_h$ . Распределения плотности в общем случае подвержены также влиянию вязкости (числа  $Re_L$ ) в пограничном слое струи, другими словами, проявляется эжектирующий эффект струй. При меньших числах Рейнольдса его роль должна быть более сильной. По-видимому, совокупным влиянием вязкости внутри струи и на ее границах можно объяснить факт сдвига максимума плотности (а следовательно, и точки растекания) вниз по потоку при уменьшении расхода газа и сохранении геометрии системы.

Представление полученных результатов для всех режимов (см. таблицу) в координатах  $(\rho/\rho_0) (h/d_*)^2 = f(x/h)$  обнаруживает обобщение распределения плотности отдельных групп режимов:

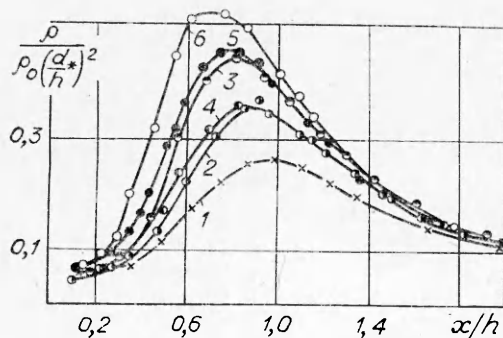
1. Хорошо обобщаются режимы 7 и 8 с одинаковыми числами  $Re_L$  и  $Re_h$  (фиг. 4).

2. Также хорошо обобщаются попарно режимы 2 и 4 и 3 и 5 (фиг. 4), которые можно отнести и к малым числам Рейнольдса  $Re_L$ . Эти режимы имеют близкие значения  $Re_L$  и существенно различные значения  $Re_h$ . Это означает, что при малых значениях  $Re_L$ , когда нет еще четко сформированного близкого к сплошному ударного слоя, определяющим критерием является  $Re_L$ , а влияние критерия  $Re_h$  вырождено, или оно не столь существенно, по-видимому, так же, как и для истечения в вакуум.

3. Режим 6 не обобщается с режимами 7 и 8. Он имеет одинаковое с последними число  $Re_L$ , но вдвое большее значение  $Re_h$ . Отсюда следует, что достаточно хорошо сформированный сжатый слой (при  $Re_L \approx 48$ ) существенно меняет геометрию течения по периферии струи, влияющую на распределение плотности в области максимума, т. е. в этом случае нет даже кинематического подобия.

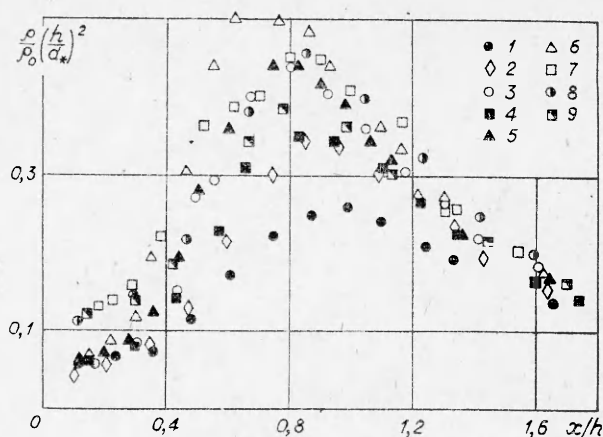
4. На больших расстояниях от источников распределения плотности можно представить одной зависимостью для всех режимов. Это означает, что влияние условий формирования периферийной области струй локализовано.

Имеются менее существенные, но заметные особенности распределения плотности для отдельных режимов на малых



Ф и г. 3

расстояниях от плоскости среза сопел. В режимах 7—9 в отличие от всех остальных на начальном участке нормированная плотность имеет завышенное значение по сравнению с обобщающей зависимостью при  $x/h \leq 0,3$ . Возможно, что это результат формирования обратного потока из начального участка области взаимодействия либо результат эжекции (поверхность струй в этих случаях наиболее развита).



Ф и г. 4

Отсутствие теоретической модели рассматриваемого явления и ограниченность в экспериментальных данных ставят вопрос о правильности их трактовки. Влияние вязкости в сопле на распределение плотности в области взаимодействия струй не учитывалось.

Оценки влияния конденсации, проведенные с использованием работы [9], показали, что конденсация начинается в гиперзвуковой области источника и слабо влияет на его параметры.

Таким образом, выводы, касающиеся качественного влияния эффектов вязкости на распределение плотности в области взаимодействия струй, а также обобщения для одинаковых чисел Рейнольдса можно считать обоснованными. Теоретически интересным и практически важным для вакуумных струйных откачных систем остается исследование области растекания — окрестности точки торможения в плоскости симметрии.

Поступила 10 V 1982

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Цейтлин А. Б. Пароструйные вакуумные насосы. М.: Энергия, 1965.
2. Авдуевский В. С., Иванов А. В. и др. Исследование закономерностей развития течения в системе вязких недорасширенных струй. — ДАН СССР, 1974, т. 216, № 5.
3. Лейтес Е. А. Исследование течения в области взаимодействия двух и четырех струй. — Труды ЦАГИ, 1974, вып. 1575.
4. Кононов Ю. И., Лейтес Е. А. Параметры течения в составных струях. — Труды ЦАГИ, 1975, вып. 1721.
5. Волчков В. В., Иванов А. В. и др. Струи низкой плотности за звуковым соплом при больших перепадах давления. — ПМТФ, 1973, № 2.
6. Авдуевский В. С., Иванов А. В. и др. Влияние вязкости на течение в начальном участке сильно недорасширенной струи. — ДАН СССР, 1971, т. 197, № 1.
7. Бочкарев А. А., Великанов Е. Г., Ребров А. К., Шарафутдинов Р. Г., Ярыгин В. И. Газодинамические установки низкой плотности. — В кн.: Экспериментальные методы в динамике разреженных газов/Под ред. С. С. Кутателадзе. Новосибирск: изд. Ин-та теплофизики, 1974.
8. Косов А. В., Ребров А. К., Шарафутдинов Р. Г. Эжектирующее действие высоконапорной струи низкой плотности. — В кн.: Неравновесные процессы потоков разреженного газа. Новосибирск: изд. Ин-та теплофизики, 1977.
9. Golomb D. and Good R. E. Dimers, clusters and condensation in free jets. — J. Chem. Phys., 1972, vol. 37, N 2.