

УДК 533.601.1

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЯХ

ГОЛУБ В. В., НАБОКО И. М., ШУЛЬМЕЙСТЕР А. М.

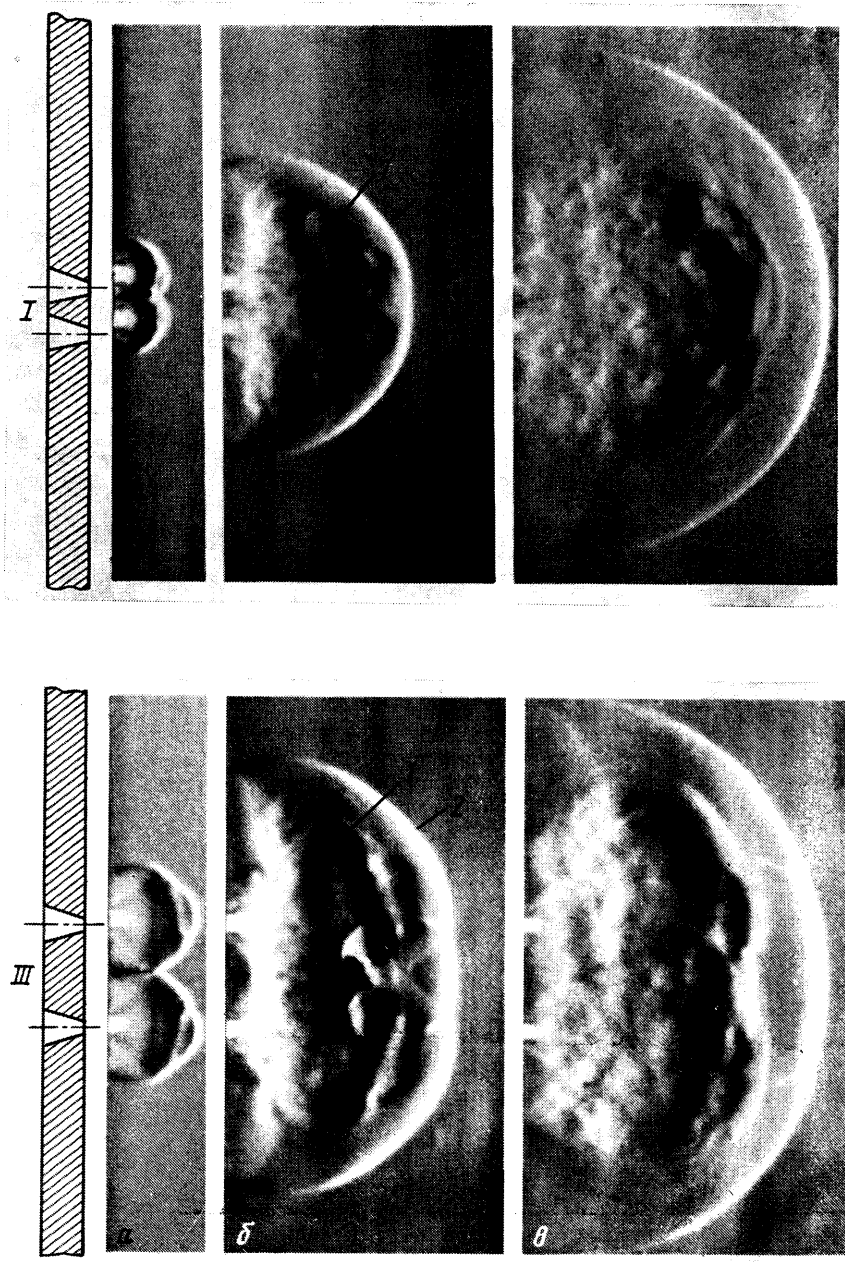
Рассматриваются особенности взаимодействия осесимметричных импульсных струй, истекающих из двухсопловых блоков. Боковые взаимодействия стационарных сверхзвуковых осесимметричных струй приводят к образованию пространственной структуры течения [1–3].

Одиночная импульсная струя отличается от стационарной наличием фронта истекающего газа, вблизи которого формируется вихревое кольцо, и существованием внешней ударной волны, распространяющейся в фоновом газе [4]. Общие вопросы взаимодействия параллельных импульсных струй, истекающих из блоков сопел, исследованы в [5]. Ниже приводится экспериментальное исследование «бокового» взаимодействия головных частей импульсных струй и первичных ударных волн при различных разносах сопел и нерасчетностях истечения. Приведена классификация различных стадий формирования составной импульсной струи за многосопловым блоком и выявлены механизмы развития течения. Показано, что ударная волна за блоком и за одиночным соплом движется с практически одинаковой скоростью, в то время как фронт струи, формирующийся за одиночным соплом, движется значительно медленнее фронта струи за блоком сопел.

Обнаружены долгоживущие боковые выбросы газа, размеры которых на порядок превышают размеры струйных выбросов газа. Длительное время их существования значительно увеличивает время установления стационарной структуры и параметров по сравнению с импульсной одиночной струей равного расхода.

1. Экспериментальное исследование выполнено с использованием ударной трубы, в торце которой устанавливались пять видов сопловых блоков, через которые происходило истечение ударно-нагретого газа в барокамеру. Картина течения визуализировалась теневым прибором ИАБ-451 с искровым источником света, а также камерой ВСК-5 проводилась высокоскоростная киносъемка развития, причем в качестве источника света использовалась лампа-вспышка ИФК-120. Камера низкого давления и барокамера наполнялись азотом до 30 мм рт. ст., число Маха падающей волны $M=2,5-4$, что обеспечивало параметры торможения $P_0=1-4$ атм, $T_0=1000-2000$ К.

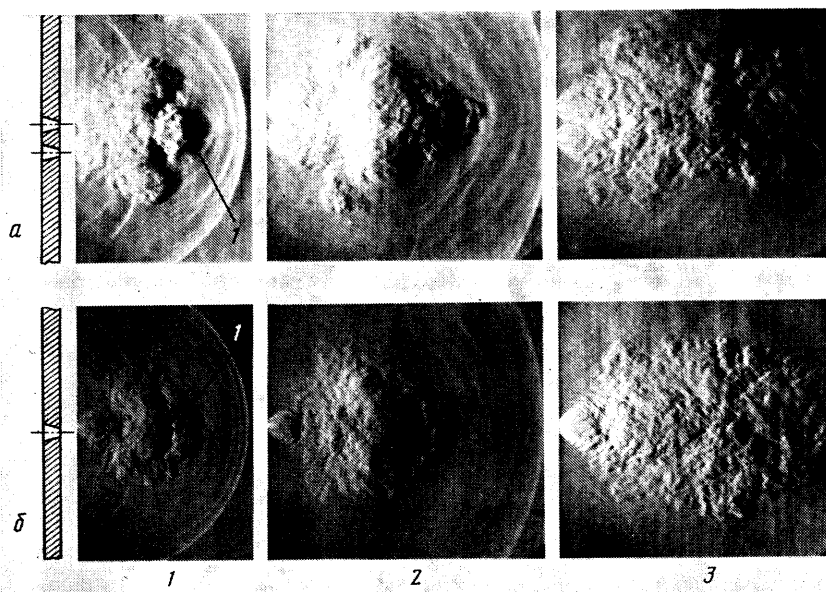
Время сохранения параметров у торца ударной трубы постоянными, по оценкам, выполненным на основании [6], составляет в наших условиях ~ 500 мкс; измерение давления у торца трубы показало его незначительное изменение в течение 1 мс. Было исследовано четыре двухсопловых блока (I–III, V) и один односопловый (IV). Все исследованные блоки звуковые, диаметр критического сечения d_c сопла в двухсопловых блоках (I–III) взят из соотношений равенства суммарного расхода с односопловым и составляет 2,75 мм. Относительный разнос, т. е. отношение расстояний между соплами к диаметру критического сечения, у блока I $L_1=2,5$, блока II $L_2=4,4$; блока III $L_3=6,2$. У блока V $d_c=5,5$ мм, а $L_5=4,4$. Условимся считать осевой плоскостью плоскость, в которой находятся оси сопел, и плоскостью взаимодействия плоскость, ей перпендикулярную и расположенную посередине между осями сопел. При исследовании нестационарной структуры струи за двухсопловым блоком было проведено две серии экспериментов. В первой серии оптическая ось теневого прибора была параллельна плоскости взаимодействия блочной струи, во второй серии —



Фиг. 1

ее осевой плоскости. Система синхронизации позволяет снять процесс в первой и во второй серии опытов в различные, но попарно равные моменты времени от начала истечения.

2. На фиг. 1 представлено развитие вихревых колец *I* от каждого сопла и возникающих перед ними ударных волн *2* в плоскости взаимодействия для сопловых блоков I и III. На фиг. 2 показаны теплерограммы развития потока за сопловым блоком III для моментов времени 200, 400, 500 мкс от начала истечения, полученные в двух плоскостях (наверху — осевая плоскость, внизу — плоскость взаимодействия). После момента времени 500 мкс до окончания наблюдения (~1200 мкс) теплерограммы про-



Фиг. 2

цесса истечения оставались практически неизменными. Анализ представленных фотографий позволяет выделить три последовательные стадии образования квазистационарной струи за многосопловым блоком.

Первая стадия начинается в момент появления за срезом сопла истекающего газа, сопровождается возникновением характерной волновой структуры и заканчивается в момент начала взаимодействия первичных ударных волн. На стадии независимого развития струй от каждого сопла закономерности движения волновой структуры описываются формулами из [4] и, естественно, не зависят от разнеса сопел. Длительность существования этой стадии пропорциональна разнесу сопел и для исследованных нами блоков изменяется от 4 мкс для блока I до 9 мкс для блока III.

На второй стадии происходит взаимодействие ударных волн и вихрей вплоть до появления результирующей первичной ударной волны для всего блока и суммарных вихрей для каждого сопла (фиг. 1, б-в). Процесс взаимодействия ударных волн в двумерной постановке изучен достаточно подробно. В рассматриваемом случае между собой взаимодействуют ударные волны, которые только в первом приближении можно рассматривать как сферические с меняющейся координатой центра. Теоретическое и экспериментальное исследование трехмерной картины такого взаимодействия осложнено изменениями в ходе взаимодействия интенсивностей ударных волн.

На фотографиях взаимодействия в осевой плоскости первичных ударных волн, возникающих в газе барокамеры перед истекающим ударно-нагретым газом за сопловым блоком III, можно выделить две фазы взаимодействия: регулярное взаимодействие (фиг. 1, а), маховское взаимодействие (фиг. 1, б) с вышоложенным участком ударной волны в осевой области, заканчивающееся образованием результирующего фронта первичной ударной волны (фиг. 1, в). Длительность фазы регулярного взаимодействия растет с увеличением разнеса сопел, но не превышает 10 мкс даже для соплового блока III. Очевидно, что маховское взаимодействие более ярко проявляется с увеличением разнеса сопел. В наших экспериментах его длительность менее 30 мкс. Рассмотрим движение первичной ударной волны S и контактной поверхности k вдоль центральной оси для разных блоков. Положение S и k в течение всего времени наблюдения было ап-

проксимировано степенной зависимостью вида $x/r_c = A(tc/r_c)^\alpha = At_1^\alpha$, где x и t — координата и время соответственно, c — скорость звука в критическом сечении, r_c — характерный размер, A и α — постоянные коэффициенты. В качестве r_c был взят эффективный критический радиус соплового блока — радиус условного одиночного сопла равного расхода. Это сделало весьма близкими законы движения первичных ударных волн, возникающих перед всеми исследованными струями. Граница струи при истечении из одиночного сопла движется медленнее. Ее положение на расстояниях $50r_c$ отличается на 30% от координаты фронта струи, формирующейся за блоком сопел. Коэффициенты A и α для всех блоков приведены в таблице. Область применимости полученных зависимостей находится в

Блок	S		k	
	A	α	A	α
I	2,41	0,71	2,18	0,67
II	2,34	0,72	2,17	0,66
III	2,31	0,72	1,61	0,73
IV	3,04	0,66	3,00	0,54
V	2,41	0,69	2,43	0,65

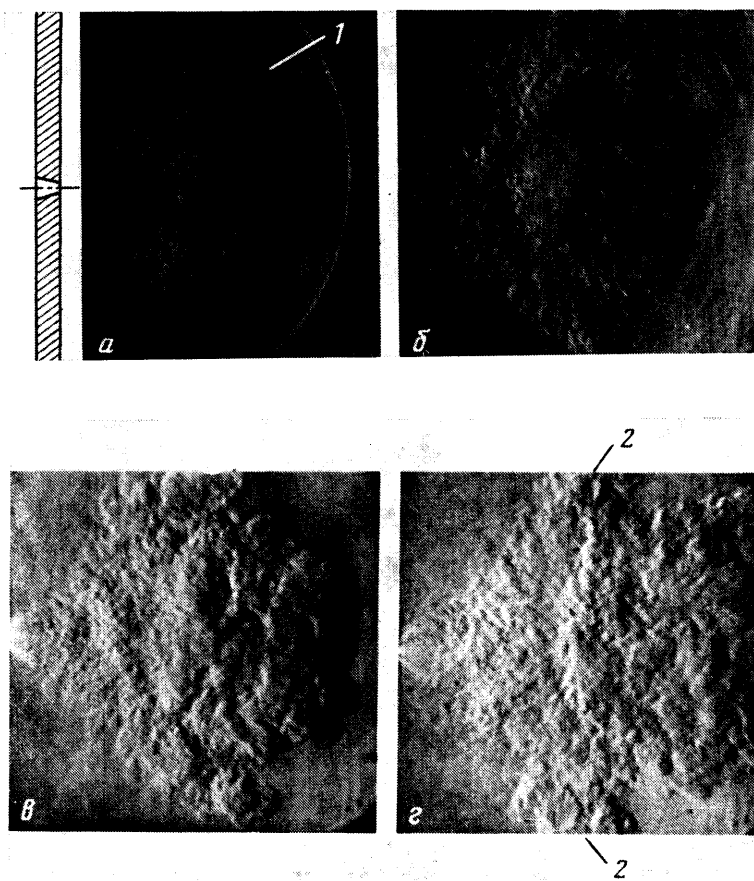
диапазоне $20r_c < x < 70r_c$ для блоков I—IV и в диапазоне $10r_c' < x < 35r_c'$ для блока V.

Вихревые кольца, возникающие при развитии импульсной струи, в значительной мере определяют ее формирование. Авторам не известны работы, в которых исследовалось развитие вихревых колец при скоростях $v > 100$ м/с, а также работы, в которых изучалось «поперечное» взаимодействие вихревых колец при таких скоростях. Даже для малых скоростей движения нам известны только работы [7, 8], посвященные поперечному взаимодействию вихревых колец.

В рассматриваемом случае скорость колец на начальной стадии формирования струи составляет ~ 500 м/с. В течение второй стадии одновременно происходит два процесса — продольное взаимодействие вихрей в каждой струе и поперечное взаимодействие вихрей соседних струй, проявляющееся в расталкивании вихревых колец и их деформации. Существенным для взаимодействия вихрей является увеличение разноса между соплами. Если при разносе сопел $L_3 = 6,2$ (блок III) вихревая структура от каждого сопла сохраняется длительное время (до 30 мкс), то для соплового блока I с $L_1 = 2,5$ взаимодействие вихрей начинается в самом начале второй стадии (фиг. 1). Обнаружено, что взаимодействие вихревых структур от каждого отдельного сопла приводит к сближению осей соседних струй в начальный (до 10 мкс) момент запуска (оси струй пересекаются под углом 10°), а через 50 мкс от начала истечения угол между осями расходящихся струй составляет $\sim 20^\circ$. Следует отметить, что первые вихревые кольца не участвуют во взаимодействии соседних струй даже для соплового блока с разносом 2,5, так как размер этих колец невелик. В результате продольного взаимодействия между вихрями формируются суммарные вихревые кольца от каждого сопла и к концу второй стадии поверхность фронта истекающего газа выравнивается (фиг. 1, а). Длительность второй стадии составляет ~ 70 мкс.

В течение третьей стадии происходит поперечное взаимодействие результирующих вихревых колец от каждого сопла. Формирование струи за блоком сопел на этой стадии состоит в образовании общей головной части, сопровождается возникновением долгоживущих боковых выбросов (фиг. 3, 2) и их диссипацией.

Рассмотрим последовательные этапы развития течения на этой стадии на примере теплерограмм потока за сопловым блоком II в плоскости

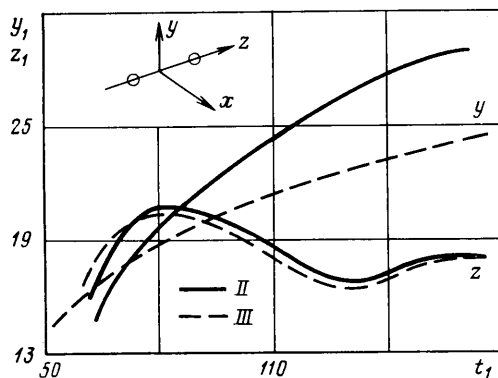


Фиг. 3

взаимодействия (фиг. 3). Форма этих выбросов в плоскости взаимодействия существенно зависит от разноса сопел. Для блоков сопел I и II преимущественным направлением являются выбросы газа 1 под углом $\sim 45^\circ$ к оси истечения (фиг. 3). У блока III выброс газа носит характер равномерного растекания 1 из области перекрытия вихрей с преимущественным направлением по оси истечения (фиг. 2).

В результате поперечного взаимодействия образуется общая головная часть составной струи, представляющая собой моновихрь с выбросами газа, возникшими при его образовании. Трансформация геометрических размеров общей головной части составной струи в плоскости взаимодействия и в осевой плоскости в приведенных выше безразмерных координатах ($y_1=y/r_c$, $z_1=z/r_c$) представлена на фиг. 4. Размеры головной части составной струи в плоскости взаимодействия начинают превышать размеры струи в осевой плоскости с момента времени $t_1=83$ для блока II и $t_1=93$ для блока III. В дальнейшем развитии течения наблюдается следующая закономерность: размер y в плоскости взаимодействия сильно зависит от разноса сопел, в то время как на размер z разнос струи практически не влияет. Для характеристики формы головной части вводим величину $K=y/z$, равную отношению максимальных размеров головной части струи в плоскости взаимодействия и осевой плоскости. Величина K достигает своего максимального значения 1,6 для блока II ($L_2=4,4$), для блока I ($L_1=2,5$) $K=1,5$ и для блока III ($L_3=6,2$) $K=1,1$ к моменту времени $t_1=150$.

В стационарных блочных струях наблюдалось растекание потока в плоскости взаимодействия [1–3]. В импульсной блочной струе образуется моновихрь с боковыми выбросами газа. В связи с ростом сопротивления скорость моновихря падает и блочная струя начинает его обтекать. В осевой плоскости препятствием для струи служит только моновихрь, а в плоскости взаимодействия — моновихрь и выбросы газа, возникшие при его образовании. Это определяет положение, размеры и время жизни долгоживущих локальных выбросов газа. Теплерограммы фиг. 3 показывают, как в плоскости взаимодействия обтекание боковых выбросов 1 приводит к появлению на фоне равномерного по оси струи растекания локальных поперечных выбросов газа 2. Процесс формирования боковых выбро-



Фиг. 4

сов начинается в начале третьей стадии (~ 70 мкс) и заканчивается к ~ 500 мкс. Для блока II к этому времени они имеют размер $\sim 15d$ и находятся на расстоянии $\sim 30d$ от среза сопла. Положение и размер боковых выбросов остаются практически постоянными до их диссипации. Время диссипации зависит от интенсивности падающей ударной волны в трубе и при изменении $M=3,4-4,2$ меняется от 1,2 до 2 мс. Характерные размеры обнаруженных боковых выбросов на порядок превышают размеры случайных выбросов газа, возникающих в слое смещения струй [9]. Длительное время существования боковых выбросов газа в импульсной блочной струе значительно увеличивает время установления стационарной структуры и распределения параметров в струе по сравнению с импульсной одиночной струей равного расхода.

На этапе практически постоянной картины течения (500–1200 мкс) были проведены измерения струи в осевой плоскости и в плоскости взаимодействия струй. Измерения показали, что для блока с разномом 4,4 и нерасчетностью ~ 35 размеры в плоскости взаимодействия в 1,5 раза больше размера в осевой плоскости на расстояниях от среза сопла $25-70d$. Наряду с этим размеры в плоскости взаимодействия составной струи при уменьшении разнота сопел от 6,2 до 2,5 увеличиваются на 20%. При увеличении нерасчетности истечения газа имеет место монотонное увеличение размеров струи в плоскости взаимодействия для всех блоков. Обнаруженные особенности заполнения газом фонового пространства на стадии формирования блочных струй требуют особого внимания при замене блочной струи одиночной, эквивалентной ей по расходу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Н. Я., Назаров В. П. Численное решение задачи о боковом взаимодействии нерасчетных сверхзвуковых струй идеального газа с плоскостью и друг с другом // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1974. Т. 14. № 1. С. 179–187.

2. *Сизов А. М.* Составные сверхзвуковые струи // Сверхзвуковые газовые струи. Новосибирск: Наука. 1983. С. 85–102.
3. *Soga T., Takanishi M., Yasuhara M.* Experimental study of interaction of underexpanded free jets // Fourteenth Inter. Symp. on Rarefied Gas Dynamics, V. 1. Japan. Tokyo: Univ. Tokyo Press, 1984. P. 485–492.
4. *Белавин В. А., Голуб В. В., Набоко И. М., Опара А. И.* Исследование нестационарной структуры потока при истечении ударно-нагретого газа // ПМТФ. 1973. № 5. С. 34–40.
5. *Golub V. V., Naboko I. M., Shulmeister A. M.* An investigation of impulse jet out flowing from multi-nozzle blocks by means of the schlieren installation // Proc. Inter. Symp. on Optical Methods in Dynamics of Fluids and Solids, Czechoslovakia, 1984. Berlin: Springer-Verlag, 1985. P. 357–363.
6. *Еремин А. В., Набоко И. М., Опара А. И.* Полное рабочее время в ударной трубе при исследовании истечения из отверстия в торце // Теплофизика высоких температур. 1973. № 4. С. 823–831.
7. *Oshima Y., Asaka S.* Interaction of two vortex rings along parallel axes in air // J. Phys. Soc. Japan. 1977. V. 42. № 2. P. 708–713.
8. *Fohl T., Turner T. S.* Colliding vortex rings // Phys. Fluids. 1975. V. 18. № 4. P. 433–436.
9. *Long M. B., Chu B. T.* Mixing mechanism and structure of an axisymmetric turbulent mixing layer // AIAA Journal. 1981. V. 19. № 9. P. 1158–1163.

Москва

Поступила в редакцию
23.VII.1986