

УДК 533.6:532.517.4

Особенности формирования трехмерной структуры течения в высокоскоростной струе, истекающей из модельного двухконтурного сопла*

В.И. Запрягаев, Н.П. Киселев, А.А. Пивоваров

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: nkiselev@itam.nsc.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию высокоскоростной струи, истекающей из модельного двухконтурного сопла, с использованием бесконтактных (теневая визуализация) и зондовых (пневмомоноприемник полного давления) методов измерения газодинамических параметров. Выявлена азимутальная неравномерность распределения давления, величина которой во внешнем контуре существенно выше, чем во внутреннем. Причина возникновения пространственной структуры течения связана с поддерживающими пилонами внутри контуров сопла и формированием трансзвукового режима течения во внешнем канале.

Ключевые слова: двухконтурное сопло, высокоскоростная двухконтурная струя, азимутальная неоднородность давления.

Введение

Исследование структуры высокоскоростных газовых струй, истекающих из сопел реактивных двигателей, необходимо для решения проблем уменьшения уровня акустического излучения струй и минимизации их воздействия на элементы летательного аппарата. Газодинамические параметры струи существенным образом зависят от конструкции сопел, формирующих струйное течение. В настоящее время существенно увеличился объем исследований структуры высокоскоростных струй, истекающих из одно- и двухконтурных сопел, проводимых с применением численных методов. При этом используются программные пакеты собственной разработки, например, Zeus в ЦАГИ, а также коммерческие программные пакеты типа ANSYS, FlowVision и др. [1].

Верификация результатов расчетов, полученных с использованием численных методов, основана на сравнении расчетных и экспериментальных данных. Создание модельного сопла при моделировании струйного течения требует воспроизведения основных особенностей течения в реальном сопле двигательной установки. Как правило, при моделировании течения используется упрощенная конфигурация сопла, задаются газодинамические параметры потока (давление, температура, химические свойства газа) и уровень турбулентности для определения стационарной структуры течения.

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы (проект АААА-А17-117030610137-0) при использовании оборудования ЦКП “Механика”.

В работе [2] описывались расчеты и эксперименты по двухконтурному соплу при наличии внутри контуров лопаток, расположенных под разными углами к набегающему потоку. С помощью численных методов решения уравнений Навье–Стокса и с использованием уравнений, осредненных по Рейнольдсу, а также экспериментально, путем измерения полей скорости и измерения акустических характеристик, исследовались течения холодных и горячих струй, истекающих из сопла. Двухконтурные сопла с различными конструкциями вихрегенераторов типа шевронов и табов, расположенных на выходе сопел, исследовались экспериментально с целью поиска способа снижения уровня шума с минимальными потерями тяги сопла [3].

В реальном эксперименте модель, как правило, обладает несовершенством конструкции, заключающимся в неточности изготовления, например, в некруглости или несоосности в случае осесимметричного тела, неконтролируемой шероховатости внутренней поверхности и т.д. Точность измерения газодинамических параметров струи также имеет свои погрешности, зависящие от точности измерительных приборов, в качестве которых в настоящей работе использовались трубка Пито и пьезорезистивные датчики давления, электронное оборудование (его точность зависит от разрядности АЦП). Кроме того, необходимо учитывать погрешность позиционирования зонда при перемещении с использованием координатного устройства. Реальный уровень турбулентности в аэродинамической трубе также может влиять на параметры исследуемого течения. Значение неоднородности поля течения в выходном сечении сопла влияет на тяговые характеристики. Этот вопрос обсуждался в работе [4] относительно радиальных неоднородностей во внешнем контуре сопла, которые обусловлены как продольной кривизной, так и искривлением внешнего канала. Величина радиальных неоднородностей достигает 30 % в профиле полного давления внешнего канала.

В модельных двухконтурных соплах присутствуют внутренние элементы конструкции в виде поддерживающих пилонов, связывающих внутренний и внешний каналы двухконтурного сопла и центральное тело. При определенном соотношении геометрических размеров пилоны могут приводить к возникновению дополнительных неоднородностей в поле течения струи.

Представленная работа посвящена экспериментальному исследованию пространственной стационарной структуры течения высокоскоростной струи, истекающей из двухконтурного осесимметричного сопла, с учетом реальных особенностей внутренней конструкции сопла. Эксперименты проводятся при дозвуковом и сверхзвуковом режимах истечения струи. Данные эксперимента включают результаты теневой визуализации течения, результаты зондирования струйного течения пневмоприемником полного давления в радиальном и азимутальном направлениях. Целью работы является экспериментальное исследование трехмерной структуры течения высокоскоростной струи, истекающей из модельного двухконтурного сопла, и выявление причин формирования существенной азимутальной неравномерности в двухконтурной струе.

1. Экспериментальное оборудование

Струйный модуль

Эксперименты по исследованию трехмерной структуры течения проводились с использованием струйного модуля аэродинамической трубы периодического действия Т-326 ИТПМ СО РАН, описание которого приведено в работах [5, 6]. В настоящей работе при зондировании потока использовался приемник полного давления (трубка Пито) с внутренним диаметром 0,4 мм. Перемещение зонда осуществлялось по трем координатам — X , Y , Z — с помощью трехосевого координатного устройства, закрепленного в рабочей камере над соплом. Диапазон перемещений координатного устройства составлял $200 \times 200 \times 200 \text{ мм}^3$. Для измерения давления использовались высокоточные датчики давления с диапазоном измерения от 0 до 0,6 МПа и точностью измерения 0,1 %.

Визуализация течения высокоскоростных струй, истекающих из двухконтурного конвергентного сопла, проводилась с использованием теневого метода (шлирен-визуализация) и метода лазерного ножа.

Теневая визуализация течения проводилась с использованием высокоскоростной цифровой фотокамеры и длиннофокусного объектива. Для получения снимков на экспериментальной установке применялся штатный прибор Теплера ИАБ-451. Теневые снимки выполнялись с помощью ножа Фуко, расположенного в коллиматорной части ИАБ-а, где располагался объектив, служащий для формирования изображения. Нож устанавливался вертикально или горизонтально и смещался так, чтобы перекрывалась половина изображения источника света, что позволяло регистрировать камерой теневые снимки с продольными либо поперечными градиентами плотности исследуемого течения.

Двухконтурное сопло

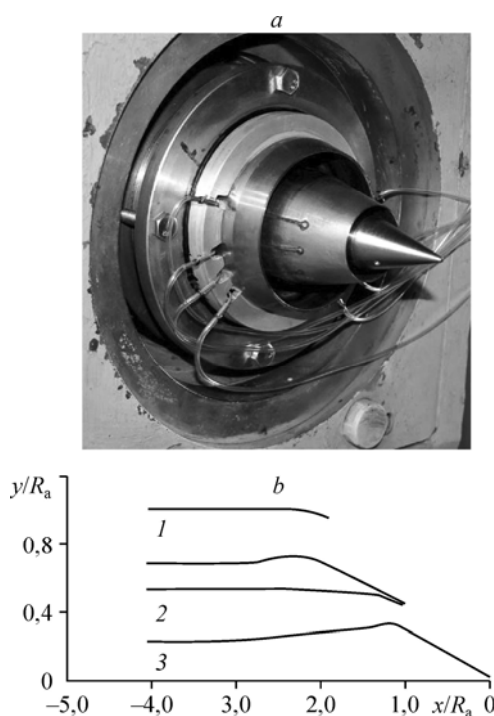
При проведении экспериментов использовалось двухконтурное осесимметричное конвергентное профилированное сопло с центральным телом (рис. 1а), которое было изготовлено с целью получения экспериментальных данных для верификации результатов численных исследований [7]. Геометрическая форма внутренних контуров сопла (см. рис. 1б) выбирались с использованием данных численного моделирования, выполненного в ЦАГИ группой под руководством Боснякова С.М. (см. рис. 1б). Особенность конструкции заключается в том, что на входе в сопло располагаются элементы, загромождающие входные каналы контуров, а именно: поддерживающие пилоны 3 (3 шт.) и трубки 4 для измерения пристенного давления и давления на входе во внешний и внутренний контуры (см. 1, 2 на рис. 2б). Загромождение внутренних каналов пилонами и трубками для обоих контуров сопла уменьшает площадь внутреннего проходного сечения на 17 % как во внутреннем, так и во внешнем контурах сопла.

Параметры эксперимента

В экспериментах исследовались различные газодинамические режимы истечения холодной воздушной струи из конвергентного двухконтурного сопла в затопленное пространство, соответствующие отношению давлений $NPR = P_0/P_c = 1,7, 1,8, 1,9, 2,25$ (P_0, P_c — давления в форкамере и рабочей камере установки). Струйное число Маха, вычисленное по формуле для изэнтропического течения для вышеуказанных значений NPR , составляло соответственно $M_j = 0,9, 0,95, 1,0, 1,14$. Температура торможения в форкамере и рабочей камере установки варьировалась в пределах $T_0 = T_c = 291 \pm 10$ К.

Рис. 1. Фотография двухконтурного сопла в рабочей камере аэродинамической трубы Т-326 (а) и геометрическая форма его контуров (б).

б: 1 — внешний контур, 2 — внутренний контур, 3 — центральное тело.



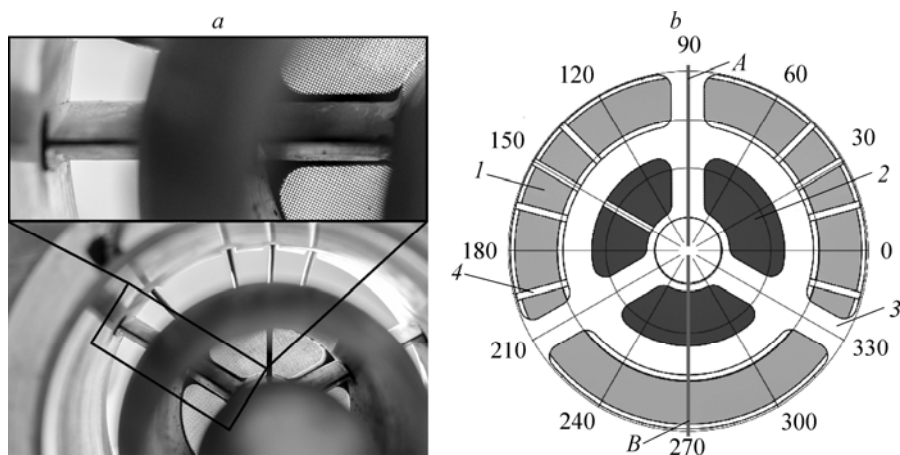


Рис. 2. Фотография (а) и схема (b) поддерживающих пилонов двухконтурного сопла.

1, 2 — внешний и внутренний контуры, 3 — пилоны, 4 — трубки,
A, B — сечения напротив пилона и между пилонами.

2. Визуализация течения

Визуализация течения струи, истекающей из двухконтурного сопла, на начальном участке получена с помощью теневого прибора ИАБ-451. В качестве источника света использовался стандартный осветитель с ртутной лампой; шлирен-изображение формировалось с помощью диафрагмы диаметром 0,5 мм и плоского ножа Фуко, который располагался вдоль оси модели. Для получения осредненной картины течения применялась экспозиция длительностью 10 мс, для получения мгновенной картины течения — 4 мкс. Регистрация изображения проводилась с использованием цифровой видеокамеры Видеоскан-285/П-USB.

На рис. 3 представлена теневая визуализация струи для дозвукового режима истечения ($NPR = 1,8$), на рис. 4 — для сверхзвукового режима ($NPR = 2,25$). При $NPR = 1,8$ происходит истечение высокоскоростной трансзвуковой струи в затопленное пространство на начальном участке при постоянном струйном числе Маха $M_j = 0,95$. На осредненной шлирен-фотографии (рис. 3а) демонстрируются внешняя граница струи и слой смешения, заключенный в область между потоками внешнего и внутреннего контура.

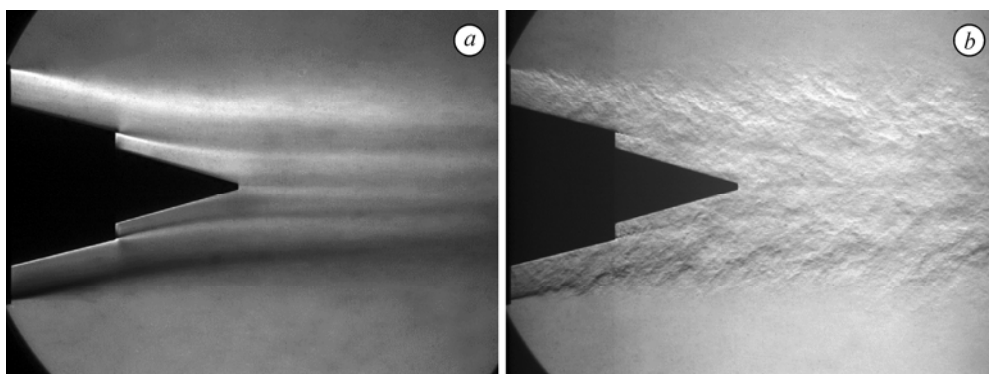


Рис. 3. Шлирен-фотография дозвуковой струи при $NPR = 1,8$, $M_j = 0,95$.

Время экспозиции 10 мс (а) и 4 мкс (b).

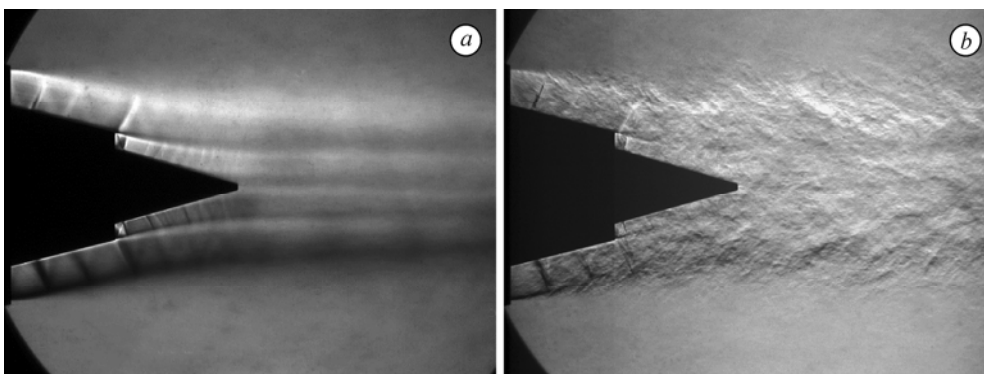


Рис. 4. Шлирен-фотография сверхзвуковой струи при $\text{NPR} = 2,25$, $M_j = 1,14$.
Время экспозиции 10 мс (а) и 4 мкс (б).

В центральной области течения за конусом центрального тела сопла виден след. На мгновенной визуализации (рис. 3б) можно наблюдать пульсации плотности потока, границы струй, истекающих из внешнего и внутреннего контуров сопла. Прослеживается переход от слабо возмущенной внешней границы струи внешнего контура, регистрируемой вблизи среза, до существенного увеличения флуктуаций плотности с увеличением расстояния от среза сопла.

При $\text{NPR} = 2,25$ формируется слабонедорасширенная сверхзвуковая струя со степенью нерасчетности $n = 1,18$, где $n = P_a/P_c$ (P_a — статическое давление на срезе сопла) (см. рис. 4). На фотографиях помимо границ струй, истекающих из контуров сопла, и следа от центрального тела на выходе сопла видна ударно-волновая структура течения как во внешней, так и во внутренней струях. Также отчетливо видны скачки уплотнения, формирующиеся на выходе сопла, сопутствующие истечению слабонедорасширенной струи (рис. 4а). Вероятной причиной диссипации скачков уплотнения в области потока за центральным телом может быть высокий уровень турбулентности в струйном течении. Шлирен-фотографии демонстрируют, что за конусом центрального тела при $\text{NPR} = 2,25$ структура течения практически не отличается от дозвуковой струи при $\text{NPR} = 1,8$ (рис. 3). На мгновенной визуализации (рис. 4б) зарегистрированы существенные флуктуации плотности в потоке струи.

На рис. 5 приведена картина визуализации струйного течения для режима истечения, когда во внешнем контуре реализуется сверхзвуковое течение $M_j = 1,14$, а во внутреннем контуре за счет дросселирования потока путем установки проволочной сетки на входе в контур — дозвуковое ($M_j = 0,9$). Изображение получено с использованием

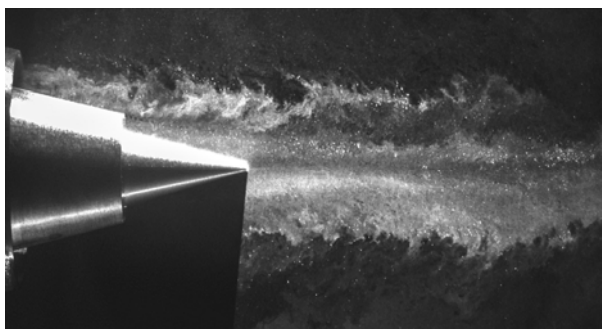


Рис. 5. Визуализация течения струи, истекающей из двухконтурного сопла, методом лазерного ножа.
На внутреннем контуре $\text{NPR}_1 = 1,72$, на внешнем контуре $\text{NPR}_2 = 2,25$;
время экспозиции 4 нс.

метода лазерного ножа при малой экспозиции. Представлен продольный диаметральный срез течения в струе с засевом светоотражающими микрочастицами, вводимыми в форкамеру установки. Видна корреляция с данными мгновенной теневой визуализации. На внешней границе струи присутствуют существенные крупномасштабные турбулентные флуктуации течения, во внутреннем течении струи видна относительно слабо возмущенная струя, истекающая из внутреннего контура сопла. Темная область вблизи оси соответствует низкой концентрации частиц в отрывной области, возникающей вблизи вершины конуса центрального тела. Следует отметить высокий уровень пульсаций течения во внешнем потоке и малый уровень пульсаций во внутреннем потоке двухконтурной струи.

3. Результаты исследования

Схематичное изображение структуры течения высокоскоростной струи, истекающей из двухконтурного сопла, построено на основе анализа картин визуализации и данных измерений пространственного распределения полного давления (см. рис. 6). В экспериментах с двухконтурным соплом была принята цилиндрическая система координат x, r, φ , где x — продольная, r — радиальная, φ — азимутальная координаты. Сжатый воздух через трубопровод высокого давления подается в форкамеру установки 1. Заданный режим истечения поддерживается с помощью пневмодросселя и определяется давлением торможения P_0 , давлением в рабочей камере P_c и температурой торможения T_0 . Воздух из форкамеры 1 поступает во внутренний 4 и внешний 5 контуры сопла. Выходное сечение внутренней струи (совпадающее со срезом сопла) соответствует продольной координате x_2 , выходное сечение внешней струи — координате x_1 . Во внутреннем контуре 4 сопла поток формируется образующей центрального тела 3 и внутренней поверхностью контура. Во внешнем контуре 5 поток формируется внутренней поверхностью наружного контура и внешней поверхностью внутреннего контура сопла. Результирующая двухконтурная струя формируется путем смешения двух кольцевых потоков — внутреннего и внешнего.

Кольцевая струя формируется на выходе внешнего контура на расстоянии x_1 в области между затопленным пространством камеры Эйфеля и внешней обечайкой внутреннего контура. Как видно из мгновенной визуализации (рис. 3б) и визуализации, выполненной с помощью лазерного ножа (рис. 5), во внешней струе имеются турбулентные

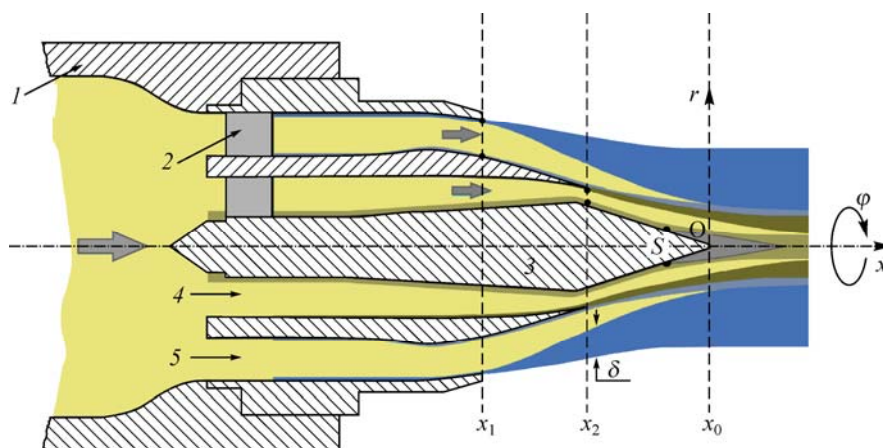


Рис. 6. Схема течения двухконтурной высокоскоростной струи при $NPR = 1,8$.

1 — форкамера установки, 2 — пилон, 3 — центральное тело,
4 — внутренний контур, 5 — внешний контур.

флуктуации потока, обусловленные развитием сдвиговой неустойчивости в слое смешения струи с газом в затопленном пространстве. Течение струи из внутреннего контура x_2 на периферии ограничено потоком внешней струи и пристенным течением вблизи поверхности центрального тела. При обтекании струей внутреннего контура центрального тела на некотором расстоянии от вершины его конуса происходит отрыв пограничного слоя, толщиной δ_{1i} . Точка S на рис. 6 соответствует точке отрыва потока, которая отчетливо регистрируется и на радиальных профилях измеренного полного давления.

С помощью координатного устройства и автоматизированной системы сбора данных в различных поперечных сечениях двухконтурной струи получены радиальные и азимутальные профили полного давления $P_t(x, r, \varphi)$, измеренные трубкой Пито. Данные получены при различных газодинамических режимах, определяемых давлением в форкамере установки. Исследовалось несколько газодинамических режимов ($\text{NPR} = 1,7\text{--}2,25$, $M_j = 0,9\text{--}1,14$). Радиальные профили полного давления измерялись от оси струи. С целью оценки влияния поддерживающих пилонов на пространственную структуру течения определялись профили для двух азимутальных сечений ($\varphi = \text{const}$), соответствующих сечениям напротив пилона — $\varphi = 90^\circ$ (A) и между пилонов — $\varphi = 270^\circ$ (B) (рис. 2б).

Влияние режима истечения на радиальное распределение давления показано на рис. 7, где R_a — радиус в выходном сечении внешнего контура сопла. Здесь представлены характерные данные для дозвукового 1 и сверхзвукового 2 режимов истечения струи. Следует отметить, что полное давление во входном участке внешнего и внутреннего контуров для представленных результатов одинаково. Профили имеют подобный вид с особенностями, обусловленными газодинамической структурой течения. На оси $r/R_a \approx 0$ регистрируется минимум давления, обусловленный наличием отрывного течения в следе за конусом центрального тела, для сверхзвукового режима (2) регистрируется пониженное давление в приосевой области. На графике можно выделить данные, относящиеся к внутренней области течения ($r/R_a \approx 0\text{--}0,3$) и внешней ($r/R_a \approx 0,4\text{--}1,4$). Локальный минимум измеренного полного давления при $r/R_a = 0,33$ соответствует середине слоя смешения между внутренним и внешним струйными течениями. Более низкое значения давления на внешней границе струи ($r/R_a \approx 1,4$) для режима истечения $\text{NPR} = 2,25$ объясняется более сильными эжекционными свойствами сверхзвуковой струи по сравнению с дозвуковой струей ($\text{NPR} = 1,7$), что приводит к понижению давления в камере Эйфеля аэродинамической трубы с увеличением расхода струи.

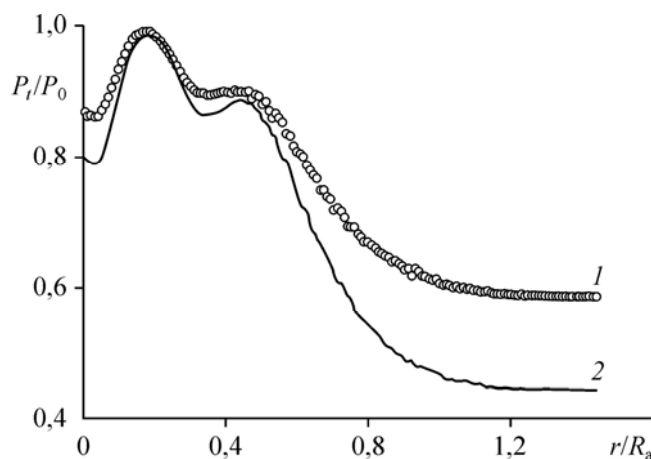


Рис. 7. Радиальные профили давления в сечении между пилонами при $x/R_a = 2,32$.
 $\text{NPR} = 1,7$ (1), $2,25$ (2).

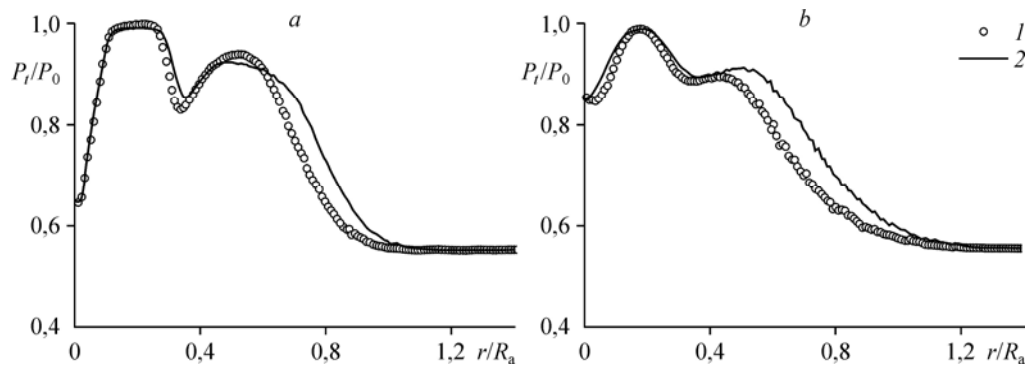


Рис. 8. Радиальные профили давления, измеренные трубкой Пито в сечениях между пилонами (1) и в сечении в следе за пилоном (2) при дозвуковом режиме течения $NPR = 1,8$. $x/R_a = 0$ (a), $2,32$ (b).

На рис. 8a представлены экспериментальные данные распределения давления вдоль радиуса на расстоянии $x/R_a = 0$ (сечение x_0 на рис. 6), а на рис. 8b — на расстоянии $x/R_a = 2,32$. Показаны радиальные распределения давления между пилонами (1) и в сечении в следе за пилоном в сечении (2). Для струи, истекающей из внутреннего контура сопла при радиусах менее 0,4, наблюдается незначительное отличие в распределениях давления. Для струи, истекающей из внешнего контура сопла ($r/R_a > 0,4$), наблюдается существенное отличие в распределении давления в зависимости от азимутального расположения измерительного сечения. В зависимости от газодинамического режима истечения (дозвуковой или сверхзвуковой) несколько меняется форма профилей давления. Давление на оси струи ($r/R_a = 0$) растет с увеличением расстояния, что обусловлено поступлением высоконапорного газа в приосевую область за счет смешения с потоком внутренней струи (рис. 6).

Характерные измеренные азимутальные профили относительного среднего давления dP_t/P , где $dP_t/P = (P_t/P_0 - (P_t/P_0)_{ср.зн.})/(P_t/P_0)_{ср.зн.}$ ($P = (P_t/P_0)_{ср.зн.}$, ср.зн. — среднее значение), для сверхзвукового режима течения ($NPR = 2,25$) представлены на рис. 9. Азимутальные распределения полного давления измерены в двух поперечных сечениях струи: $x/R_a = 0$ и $2,32$ (рис. 9a и 9b соответственно). Измерения выполнены при значениях радиальной координаты, соответствующих струйным потокам из внутреннего и внешнего контуров. Кривые 1 и 3 относятся к внутренней струе, 2, 4 — к внешней. Для внешней

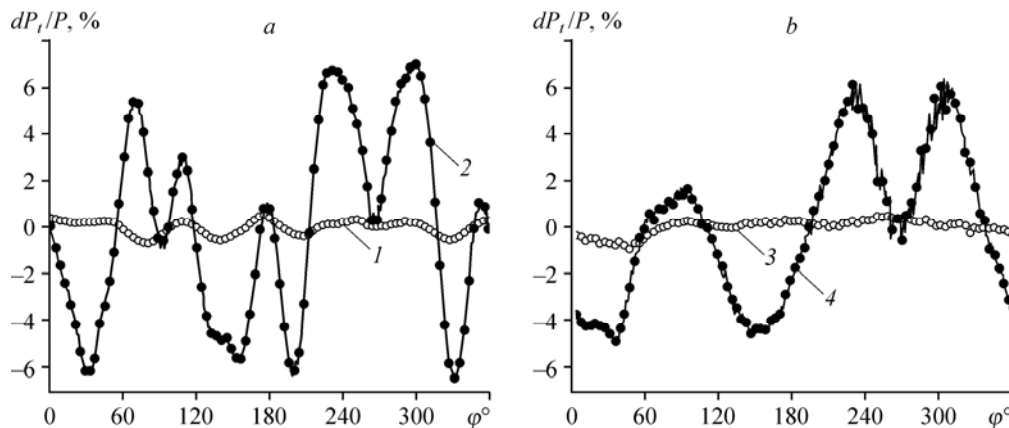


Рис. 9. Азимутальные профили давления, измеренные трубкой Пито при $NPR = 2,25$. $x/R_a = 0$ (a), $2,32$ (b); $r/R_a = 0,19$ (1), $0,53$ (2), $0,17$ (3), $0,43$ (4); 1, 3 — внутренняя струя, 2, 4 — внешняя струя.

Рис. 10. Среднеквадратичное отклонение полного измеренного азимутального давления.

$x/R_a = 0$: $r/R_a = 0,53$ (1), 0,19 (3);
 $x/R_a = 2,32$: $r/R_a = 0,43$ (2), 0,17 (4).

струи данные получены при радиусах $r/R_a = 0,43$ и $0,53$, для внутренней — при $r/R_a = 0,17$ и $0,19$. На графиках показана существенная азимутальная неоднородность струйного потока, регистрируемая как во внутреннем, так и во внешнем потоках. Из рисунков видно, что как вблизи (рис. 9a), так и вдали от сопла (рис. 9b) регистрируются азимутальные неоднородности давления. Наибольшая неоднородность течения регистрируется во внешней струе (2, 4), здесь максимальный размах (от минимума к максимуму) составляет 12 %, в то время как для внутренней струи (1, 3) — 1 %. Существенное отличие профилей во внешней и внутренней струях связано с пространственной неоднородностью течения, вызванной наличием вихревых структур, формирующихся вследствие возмущений, генерируемых внутренними элементами конструкции сопла. Эти возмущения от пилонов распространяются по внутренним каналам и формируют неоднородности в струйном потоке. Наблюдаемое течение аналогично струе, истекающей из сопла с вихрегенераторами на срезе, когда азимутальную неоднородность порождают искусственные вихребразующие элементы — табы, шевроны, микроструи [8–11].

Среднеквадратичное отклонение давления от среднего значения, вычисленное по измеренным профилям, подобным изображенным на рис. 9, представлено на рис. 10 и в таблице. Здесь приведены данные, полученные для исследуемых режимов в двух поперечных сечениях — $x/R_a = 0$ (кривые 1, 3) и $x/R_a = 2,32$ (кривые 2, 4) — при постоянном радиусе, соответствующих внешнему (1, 2) и внутреннему (3, 4) течениям двухконтурной струи. Зависимость величины неоднородности от струйного числа Маха M_j имеет монотонный характер, с увеличением числа Маха величина неоднородностей увеличивается. Наибольшие отклонения регистрируются в сечении $x/R_a = 0$ во внешнем струйном потоке, наименьшие — во внутреннем. На расстоянии $x/R_a = 2,32$ при $r/R_a = 0,17$ (внутреннее течение, кривая 4) при переходе от дозвукового режима ($M_j = 0,9$) к сверхзвуковому ($M_j = 1,14$) величина азимутальных неоднородностей возрастает в два раза, однако она значительно меньше, чем во внешней струе. Вблизи центрального конуса при радиусе $r/R_a = 0,19$ (3) наблюдается постоянная величина азимутальной неоднородности для всех режимов течения.

Наиболее вероятной причиной возникновения существенных азимутальных неоднородностей потока в струйном течении двухконтурной струи является загромождение проходного сечения. При этом следует отметить, что влияние относительного загромождения

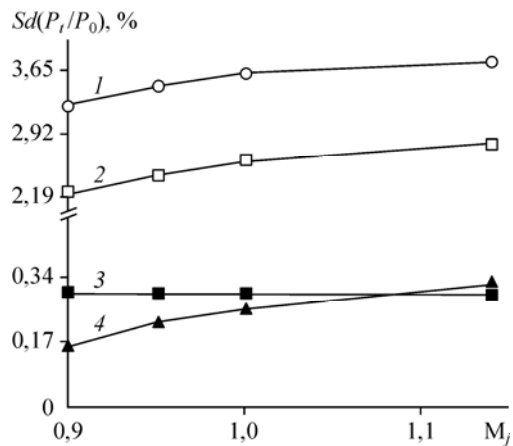


Таблица
Среднеквадратичное отклонение полного измеренного азимутального давления

x/R_a	r/R_a	№ кривой на рис. 10	$Sd(P_t/P_0)$, %			
			$M_j = 0,9$	$M_j = 0,95$	$M_j = 1$	$M_j = 1,14$
0	0,53	1	3,26	3,48	3,63	3,76
	0,19	3	0,3			
2,32	0,43	2	2,2	2,4	2,58	2,8
	0,17	4	0,16	0,23	0,26	0,33

на изменение локального числа Маха потока в канале существенно усиливается при трансзвуковой скорости потока. Уровень возмущений для внутренней струи существенно ниже, чем для внешней, что связано с наличием дополнительного сужения канала за счет загромождения проходного сечения.

Число Маха потока в канале определяется формулой для изоэнтропического течения [12]:

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left(\frac{1 + \alpha}{1 + \alpha M^2} \right)^{-\beta},$$

здесь A и A^* — соответственно площадь проходного сечения внутреннего канала и критического сечения сопла, $\alpha = (\gamma - 1)/2$, $\beta = (\gamma + 1)/(2(\gamma - 1))$, γ — отношение теплоемкостей, M — число Маха в канале, $M^* = 1$ — число Маха в критическом сечении сопла.

Отношение площади проходного сечения внутреннего канала к критическому сечению сопла для обоих контуров представлено на рис. 11а. Геометрическое число Маха для внутреннего и внешнего контуров сопла, рассчитанное по формуле изоэнтропического течения, представлено на рис. 11б. Значения в точках 1а и 2а получены с учетом уменьшения площади поперечного сечения за счет пилонов и трубок на входе в сопло. В окрестности пилонов формируется локальная неоднородность, которая распространяется вниз по потоку в канале, проходит через критическое сечение сопла и далее распространяется в струйном потоке. Как видно из рисунка, одно и то же загромождение ($\approx 17\%$) приводит к различным изменениям числа Маха в канале сопла: во внутреннем контуре число Маха с учетом загромождения составляет 0,3 (для «чистого» сопла $M = 0,24$), а во внешнем контуре число Маха может достигать значения 0,9 (для «чистого» канала $M = 0,6$). При обтекании пилонов во внешнем контуре поток локально ускоряется до трансзвуковой скорости (см. 1а на рис. 11б), что приводит к формированию интенсивного следа, который и является причиной формирования азимутальной неравномерности течения в потоке струи. За счет того, что относительная площадь внутреннего канала (относительно площади критического сечения сопла) больше по сравнению с аналогичной величиной для внешнего канала, его влияние на изменение числа Маха во внутреннем канале меньше (см. рис. 11а). Эту особенность трансзвукового течения в каналах, площадь которых соизмерима с площадью критического сечения сопла, следует учитывать при проектировании моделей для верификации результатов численных расчетов,

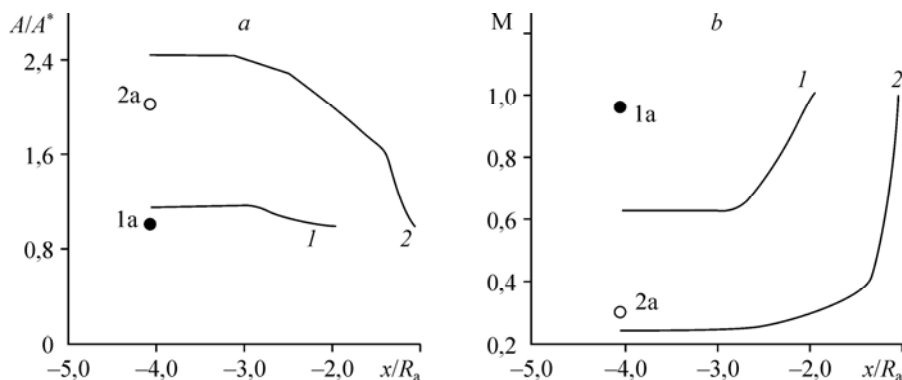


Рис. 11. Относительная площадь (а) и геометрическое число Маха (б) двухконтурного сопла.

1 — внешний контур, 2 — внутренний контур;
значения в точках 1а, 2а получены при загромождении каналов пилонами и трубками.

тем более в случаях, когда эти расчеты проводятся в осесимметричной постановке. Следует отметить, что высокая чувствительность к изменению площади поперечного сечения транзвукового потока должна учитываться при анализе экспериментальных данных, направленных на исследование характеристик пульсаций.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование пространственной структуры высокоскоростной струи, истекающей из двухконтурного осесимметричного сопла с центральным телом при транзвуковом и сверхзвуковом режимах истечения.

На основе анализа картин визуализации и данных измерений пространственного распределения полного давления реконструирована структура течения в начальном участке двухконтурной воздушной струи. Представлены характерные профили распределения измеренного полного давления.

Выявлено существенное влияние загромождения внутреннего предсоплового канала на неравномерность азимутального распределения измеренного давления в струйном течении. Среднеквадратичные значения этих неоднородностей в потоке внешней струи достигают 3,6 % относительно среднего значения. Величина выявленных возмущений во внутреннем контуре струи существенно меньше и не превосходит 0,34 %.

Показано, что причиной формирования существенных азимутальных неоднородностей в струйном течении является малая площадь проходного сечения канала относительно площади выходного сечения сопла. Последнее приводит к формированию локальных транзвуковых областей течения, которые и являются источниками неоднородности потока. Выявленное возможное влияние внутреннего загромождения площади проходного сечения предсоплового канала следует учитывать при проектировании моделей. Это обуславливает необходимость проведения расчетов трехмерного течения при проведении численного моделирования.

Список литературы

1. Vlasenko V., Bosniakov S., Mikhailov S., Morozov A., Troshin A. Computational approach for investigation of thrust and acoustic performances of present-day nozzles // Computational approach for investigation of thrust and acoustic performances of present-day nozzles. Progress in Aerospace Sci. 2010. Vol. 46. P. 141–197.
2. Xiong J., Nielsen P., Liu F., Papamoschou D. Computation of high-speed coaxial jets with fan flow deflection // AIAA J. 2010. Vol. 48, No. 10. P. 2249–2262.
3. Saiyed N.H., Mikkelsen K.L., Bridges J.E. Acoustics and thrust of quiet separate-flow high-bypass-ratio nozzles // AIAA J. 2003. Vol. 41, No. 3. P. 372–378.
4. Лаврухин Г.Н. Аэрогазодинамика реактивных сопел. Т. 1. Внутренние характеристики сопел. М.: Физматлит, 2003. 376 с.
5. Запругаев В.И., Киселев Н.П., Пивоваров А.А. Газодинамическая структура осесимметричной сверхзвуковой недорасширенной струи // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2015. № 1. С. 95–107.
6. Волков К.Н., Запругаев В.И., Емельянов В.Н., Губанов Д.А., Кавун И.Н., Киселев Н.П., Тетерина И.В., Яковчук М.С. Визуализация данных физического и математического моделирования в газовой динамике. М.: Физматлит. 2018. 360 с.
7. Босняков С.М., Волков А.В., Дубень А.П., Запругаев В.И., Козубская Т.К., Михайлов С.В., Трошин А.И., Цветкова О.В. Численное моделирование течения струи из двухконтурного сопла с помощью различных вихреразрешающих подходов на неструктурированных сетках // Вычислительный эксперимент в аэроакустике: сб. тезисов VII Всеросс. конф. совместно с молодежной школой-конференцией. Светлогорск, 17–22 сент. 2018 г. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018. С. 57–58.
8. Zapryagaev V., Pickalov V., Kiselev N., Nepomnyashchiy A. Combination interaction of Taylor–Goertler vortices in a curved shear layer of a supersonic jet // Theoret. Comput. Fluid Dynamics. 2004. Vol. 18, No. 2–4. P. 301–308.

9. Запрягаев В.И., Киселев Н.П., Пивоваров А.А., Кавун И.Н., Бойко В.М. Влияние шевронов на структуру течения сверхзвуковой неизобарической струи // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. Т. 49. С. 5–17.
10. Запрягаев В.И., Кавун И.Н., Киселев Н.П. Структура течения на начальном участке сверхзвуковой струи, истекающей из сопла с шевронами // Прикл. механика и техн. физика. 2010. Т. 51, № 2. С. 71–80.
11. Губанов Д.А., Запрягаев В.И., Киселев Н.П. Структура течения сверхзвуковой недорасширенной струи с вдувом микроструй // Вестник НГУ. Серия: Физика. 2013. Т. 8, вып. 1. С. 44–55.
12. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. Изд. 3-е., перераб. и доп. М.: Наука, 1970. 904 с.

*Статья поступила в редакцию 25 февраля 2019 г.,
после доработки — 23 апреля 2019 г.,
принята к публикации 26 августа 2019 г.*