

УДК 621.793

Газодинамика сверхзвуковой радиальной струи. Часть I*

В.Ф. Косарев, С.В. Клинков, В.Н. Зайковский, С.Г. Кундасев

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

E-mail: vkos@itam.nsc.ru

Исследована газодинамика сверхзвуковой радиальной струи в условиях, близких к условиям холодного газодинамического напыления. Проведена ее визуализация при истечении в затопленное пространство с атмосферным давлением и натекании на преграду. Для незакрученной и закрученной сверхзвуковой радиальной струи трубкой Пито измерены профили давления на различных расстояниях от среза сопла для различной ширины сверхзвуковой части сопла $\delta_{\text{ex}} = 0,5\text{--}2$ мм и давления в форкамере сопла $p_0 = 1\text{--}2,5$ МПа.

Ключевые слова: сверхзвуковая радиальная струя, холодное газодинамическое напыление, профиль давления.

Введение

Повышение защиты стальных труб от коррозии остается одной из актуальных научно-технических и экономических проблем. В Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича (ИТПМ) СО РАН был разработан метод холодного газодинамического напыления (ХГН), получивший в настоящее время широкое распространение как у нас в стране, так и за рубежом [1]. Суть его заключается в том, что пластичные частицы металлов и сплавов с характерным размером от 5 до 100 мкм, разогнанные в газовом потоке до высоких скоростей (от 300 до 900 м/с), при ударе о поверхность преграды формируют покрытие. На основе метода ХГН в настоящее время разработаны технологии и оборудование для нанесения антикоррозионных покрытий на внутреннюю поверхность труб диаметром более 100 мм.

Обзор литературы в этой области [2–8] позволяет выделить два подхода к решению обозначенной проблемы: первый заключается в использовании одиночного сопла либо набора сопел, и в этом случае требуется полное либо частичное вращение трубы; второй заключается в использовании кольцевых сопел, что позволяет избавиться от вращения трубы, однако в предложенных конструкциях частицы разворачиваются на $90 \pm 5^\circ$ в самом конце разгонного участка, что нежелательно, поскольку они сталкиваются со стенкой поворотного канала, и это приводит к потере их скорости, а также к изменению формы канала из-за эрозии или, наоборот, осаждения частиц на поверхности поворотного канала. Представляется интересным рассмотреть конструкцию, в которой частицы

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 14-01-00352-а, 15-08-04129-а).

разворачиваются в начале разгонного участка. Это может быть реализовано с помощью радиальных сопел, представляющих собой два соосных диска, отстоящих друг от друга на некотором расстоянии. Газ с частицами в этом случае подается из приосевой зоны и уско-ряется, радиально растекаясь в зазоре между дисками.

Принципиально необходимо было получить ответы на следующие вопросы: какова минимально возможная длина разгонного участка и, соответственно, минимальный диаметр труб; насколько равномерно распределение частиц внутри радиальных сопел, соответст-венно, равномерность покрытий; какова характерная длина сверхзвукового участка струй, истекающих из радиальных сопел и продолжающих расширяться (это является существен-ным отличием радиальных струй от струй, истекающих из одиночных сопел). Последнее позволяет прогнозировать характерный диапазон внутренних диаметров труб, на которые могут быть нанесены покрытия одним напылительным узлом.

В настоящей работе исследуется возможность применения радиального сверхзвуко-вого сопла для нанесения покрытий на внутреннюю поверхность цилиндрических труб методом ХГН с целью исключения вращения трубы. В задачи исследований входило измерение профилей давления в сверхзвуковых радиальных струях на различных рас-стояниях от среза сопла, шлирен-визуализация струй и их натекания на преграду при варьировании в широких пределах ширины канала сверхзвуковой части сопла и давле-ния торможения.

Схема и методика измерений

Эксперименты по измерению полного давления трубкой Пито и визуализации поля течения проводились в рабочей части аэродинамической трубы Т-326 ИТПМ СО РАН. Воздух из форкамеры через трубу внутренним диаметром 113 мм подводится к соплу, помещенному в рабочую часть трубы — камеру Эйфеля объемом $0,94 \text{ м}^3$, длиной 870 мм, шириной 830 мм, высотой 1300 мм. В качестве измерительного зонда использовалась трубка Пито внешним диаметром 0,8 мм, с датчиком полного давления на 1 МПа. Внут-ренний диаметр приёмника давления составлял порядка 0,5 мм, что достаточно велико по отношению к ширине канала сверхзвуковой части сопла δ_{ex} . Использование приёмников меньшего размера затруднительно из-за большого времени отклика, поэтому абсолютные величины полного давления за скачком в измеренных поперечных профилях получаются усредненными по диаметру приемника, особенно в зоне больших градиентов. Перемеще-ние измерительного зонда в потоке осуществляется при помощи XYZ-координатника с высокой точностью позиционирования (номинальное значение погрешности позицио-нирования составляет не более ± 20 мкм). Все измеряемые параметры регистрировались автоматизированной системой сбора данных трубы Т-326. Система оптической визуали-зации течения выполнена на базе теневого прибора ИАБ-451. Она позволяет получать цифровые шлирен- и прямотеневые изображения с экспозицией от 4 мкс до 1 с и частотой фотографирования 3–4 кадра в секунду. В качестве источника света использовалась ртутная лампа, изображение принималось цифровой видеокамерой Видеоскан-285/USB.

Исследуемая струя создавалась радиальным соплом, фотография и схематическое изображение которого представлены на рис. 1. Рабочий газ, имеющий заданную темпе-ратуру и давление, поступает из нагревателя газа в корпус соплового узла 1, далее — в генератор радиального или закрученного потоков и через радиальные или тангенци-альные отверстия 4 в форкамеру 6 радиального сопла. Газопорошковая смесь из дозатора порошка через радиальные отверстия 5 также поступает в форкамеру сопла. Затем вся смесь перед критическим сечением сопла разворачивается и ускоряется в сверхзвуковой части сопла, приобретает необходимые для напыления параметры и при высокоскоростном натекании на внутреннюю поверхность изделия (трубы) образует покрытие. Радиальное

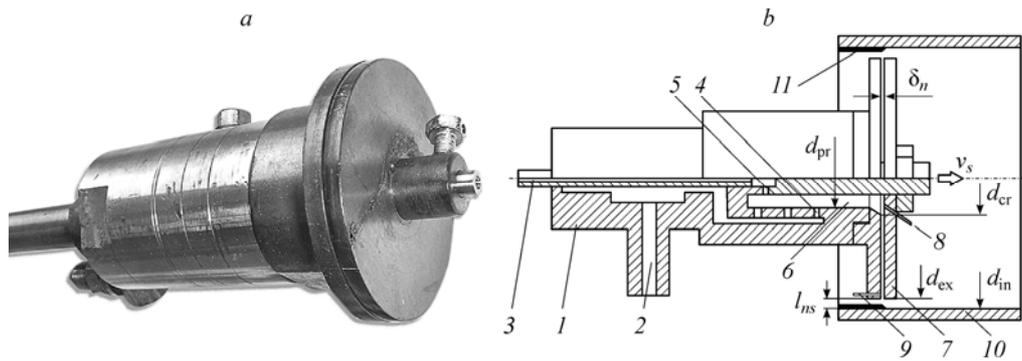


Рис. 1. Фото и схема соплового блока со сверхзвуковым радиальным соплом.

$$L_n = 27 \text{ мм}, \delta_n = 0,5 - 2 \text{ мм.}$$

1 — корпус, 2 — подача рабочего газа, 3 — подача частиц порошка, 4 — радиальные или тангенсальные отверстия подачи рабочего газа, 5 — радиальные отверстия подачи порошка, 6 — форкамера, 7 — радиальное сверхзвуковое сопло, 8 — место измерения давления в форкамере, 9 — место измерения статического давления, 10 — напыляемая труба, 11 — покрытие.

сопло имело диаметр критического сечения $d_{cr} = 18$ мм, диаметр выходного сечения $d_{ex} = 72$ мм, число Маха, вычисленное по одномерной модели идеального газа, $M_{ex} = 2,94$.

В экспериментах использовались сменные форкамеры с радиальным и тангенсальным вдувом газа. Давление в форкамере сопла варьировалось от 1 до 2,5 МПа и измерялось датчиком полного давления в точке 8, показанной на схеме (рис. 1b). Ширина канала сверхзвуковой части сопла δ_{ex} в ходе эксперимента варьировалась от 0,5 мм до 2 мм. В стенке сопла на расстоянии 2 мм от выходного сечения располагался датчик статического давления. Описанные выше оборудование и узлы позволили провести цикл экспериментов по визуализации сверхзвуковой радиальной струи и измерению профилей давления в струе.

Газодинамика сверхзвуковой радиальной струи

Визуализация

Предварительно была проведена визуализация сверхзвуковой радиальной струи при истечении в затопленное пространство с атмосферным давлением и ее натекания на преграду (рис. 2–4). На рис. 2 приведены картины осесимметричной волновой структуры радиально растекающихся сверхзвуковых струй в плоскости, параллельной течению, в том числе при натекании на плоскую преграду при варьировании давления в форкамере p_0 , ширины проточного канала δ_{ex} и расстояния от среза сопла до преграды l_{ns} . Время экспозиции составляло 10 мс. На снимках чётко просматриваются периодические темные и светлые кольца, интенсивность и величина промежутков которых зависит как от ширины канала ($\delta_{ex} = 0,5-2$ мм), так и от величины давления в форкамере ($p_0 = 1-2,5$ МПа). Отмеченные кольцевые образования являются «бочками», в которых происходит постепенное выравнивание давления в струе с атмосферным давлением. Можно заключить, что для радиальных струй не существует понятия «расчетная струя», поскольку при движении ее в затопленном пространстве давление всегда падает и становится, как это свойственно сверхзвуковым струям, ниже атмосферного, затем давление начинает расти и оказывается выше атмосферного, и т.д., что приводит к формированию «бочек».

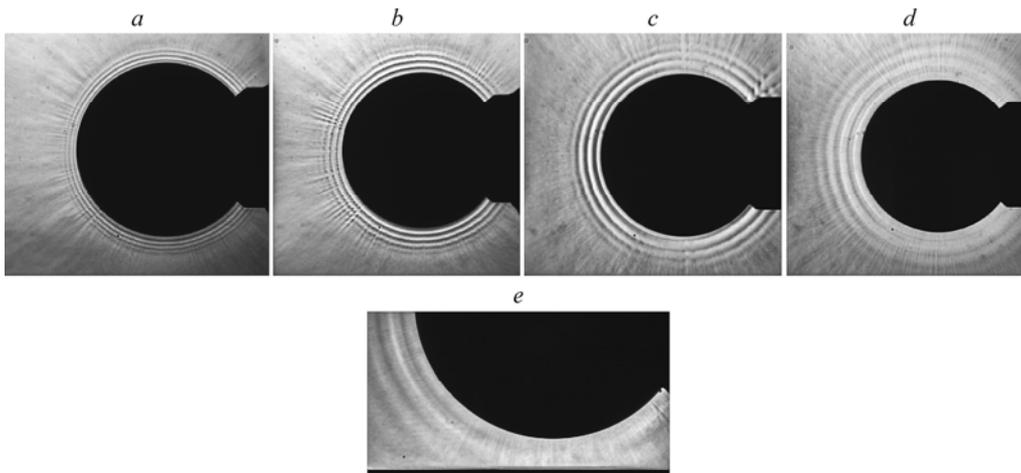


Рис. 2. Шлирен-фотографии осесимметричной волновой структуры радиально растекающихся сверхзвуковых струй в плоскости, параллельной течению (*a–d*), и при натекании на плоскую преграду (*e*).

$a, c — p_0 = 1,5$ МПа, $b, d — p_0 = 2,5$ МПа, $e — p_0 = 2,5$ МПа, $l_{ns} = 8$ мм ($l_{ns}/\delta_{ex} = 4$);
 $\delta_{ex} = 0,5$ (*a, b*), 2 (*c, d, e*) мм.

На рис. 2 хорошо прослеживается наличие первых 3–5 «бочек», далее заметны только радиальные лучи, которые, скорее всего, представляют собой продольные вихри типа вихрей Тэйлора–Гертлера [9].

При рассматриваемом расположении радиального сопла относительно проходящего света затруднительно наблюдать скачек уплотнения, возникающий при натекании радиальной струи на плоскую преграду. Связано это с тем, что лучи света распространяются в том же направлении, в котором движется воздух, растекаясь вдоль поверхности преграды. Гораздо лучше картина натекания видна на фотографиях, полученных при таком расположении радиального сопла относительно лучей света, когда растекающийся вдоль поверхности поток воздуха не влияет на изображение (рис. 4).

На рис. 3 приведена картина свободной радиальной струи в перпендикулярной плоскости (когда плоскости стенок сопла параллельны лучам света). Видно, что радиальные струи резко расширяются на некотором расстоянии от среза сопла. Это расстояние зависит как от ширины канала сопла, так и от давления в форкамере (рис. 3*a–3c*). Следует отметить, что время экспозиции в этом случае сравнительно велико, что приводит к размазыванию картины на участке, который отображается как резкое расширение струи. На самом деле это могут быть автоколебания струи наподобие тех, которые описаны в работах [10, 11]. И действительно, в некоторых случаях, при уменьшении времени экспозиции до 4 мкс, такие автоколебания струи наблюдались (рис. 3*d*).

На рис. 3*c* виден несимметричный отрыв потока вблизи среза сопла при $\delta_{ex} = 2$ мм и давлении в форкамере $p_0 = 1$ МПа. Как известно, отрыв внутри сопла наступает в режимах сильного перерасширения. Оценка на основе одномерной модели течения идеального газа показывает, что при давлении торможения 1 МПа нерасчетность на срезе сопла должна составлять примерно 0,3, что является критической величиной, ниже которой в обычных соплах наступает отрыв (при числе Маха близком к 3). Измерение статического давления на срезе радиальных сопел при разных давлениях торможения и разных расстояниях между стенками сопла (см. рис. 5), однако, не подтверждает столь

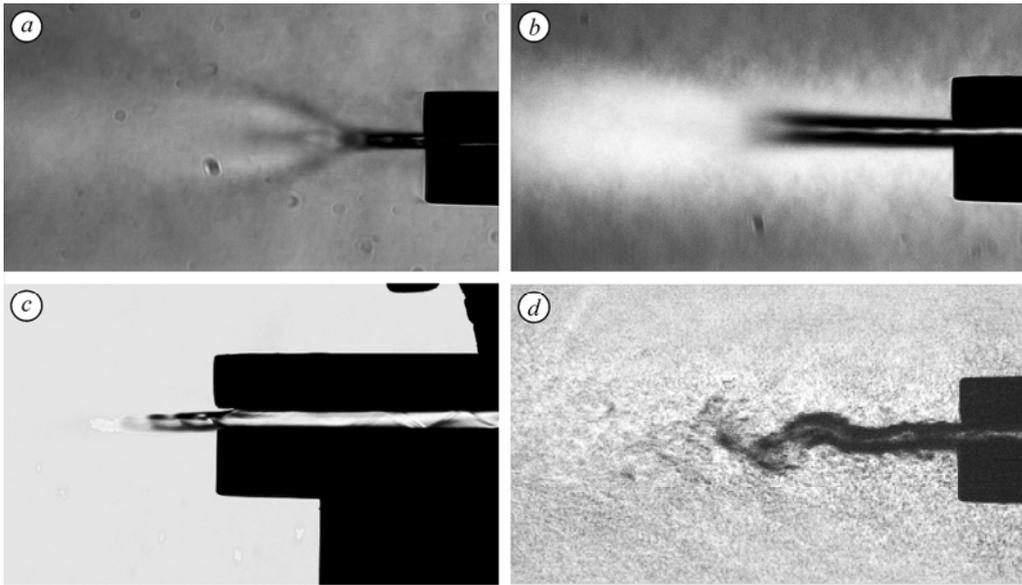


Рис. 3. Шлирен-фотографии свободной струи в плоскости, когда плоскости стенок сопла параллельны лучам света.
 a — $\delta_{\text{ex}} = 0,5$ мм, $p_0 = 2,5$ МПа, b — $\delta_{\text{ex}} = 2$ мм, $p_0 = 2,5$ МПа,
 c — $\delta_{\text{ex}} = 2$ мм, $p_0 = 1,0$ МПа, d — $\delta_{\text{ex}} = 2$ мм, $p_0 = 1$ МПа.

глубокой степени перерасширения. Она остается на уровне не ниже 0,8. Возможная причина несимметричного отрыва в исследуемых соплах обсуждается ниже.

На рис. 4 представлен ряд снимков натекания струи на плоскую преграду, установленную на различных расстояниях от среза сопла. Первые три фотографии (рис. 4а–4с) сделаны при ширине сверхзвукового канала $\delta_{\text{ex}} = 3$ мм. На них, так же как и на рис. 4д, достаточно наглядно просматривается система косых скачков уплотнения между стенками сопла. Предположительно причина их возникновения — местный отрыв потока, возникающий при переходе от осевого течения в дозвуковой части сопла к радиальному в сверхзвуковой части, сопровождающемся поворотом потока на 90° . Возникший далее косой скачок, отражаясь от противоположных стенок сопла, доходит до среза сопла.

На рис. 4а, 4б, так же как и на рис. 3с, наглядно зафиксирован несимметричный отрыв потока вблизи среза сопла. При данном сочетании геометрических и газодинамических начальных параметров отраженный косой скачок в условиях несколько перерасширенного течения (измеренное значение примерно равно $n = 0,8$) при падении на стенку сопла вблизи выходного сечения провоцирует отрыв пограничного слоя вниз по потоку. На рис. 3с, 4а, 4б видно, что несимметричный отрыв сопровождается отклонением плоскости струи от плоскости стенок сопла. Отклонение происходит в противоположную сторону от той стенки сопла, на которой имеет место ранний отрыв, спровоцированный косым скачком.

После среза сопла в струе наблюдается двоякая ромбовидная система косых скачков. Второй скачок возникает при отрыве потока на второй стенке сопла, как это типично для обычных струй, что особенно хорошо видно на фотографии рис. 3с. Двоякая ромбовидная система косых скачков распространяется вниз по потоку до области, где возникает отошедший от преграды прямой скачок (рис. 4а).

При натекании радиальной струи на плоскую преграду в результате взаимодействия двоякой системы отраженных косых и отошедшего от поверхности преграды прямого

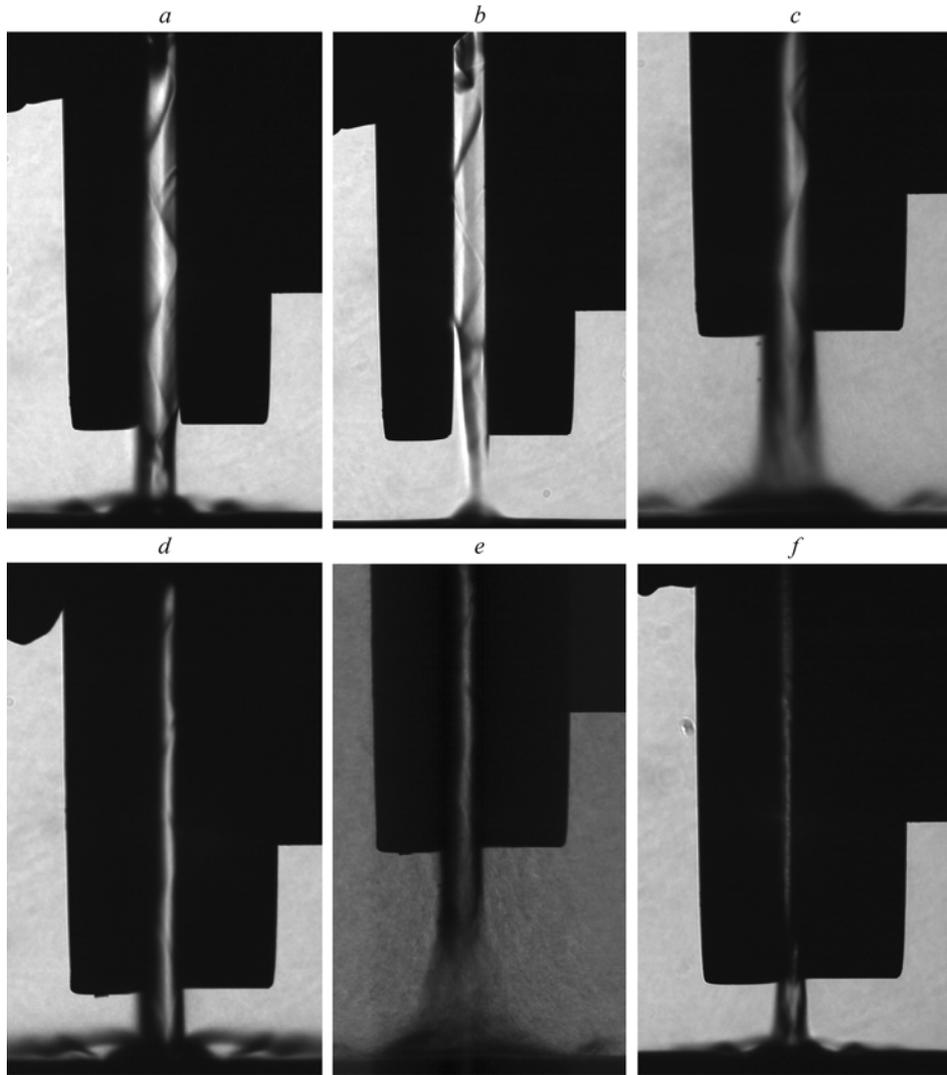


Рис. 4. Шлирен-фотографии струи, натекающей на преграду, когда плоскости стенок сопла параллельны лучам света.

a — $\delta_{\text{ex}} = 3$ мм, $p_0 = 1,5$ МПа, $l_{\text{ns}} = 6$ мм ($l_{\text{ns}}/\delta_{\text{ex}} = 2$), *b* — $\delta_{\text{ex}} = 3$ мм, $p_0 = 2,5$ МПа, $l_{\text{ns}} = 6$ мм ($l_{\text{ns}}/\delta_{\text{ex}} = 2$),
c — $\delta_{\text{ex}} = 3$ мм, $p_0 = 2,5$ МПа, $l_{\text{ns}} = 12$ мм ($l_{\text{ns}}/\delta_{\text{ex}} = 4$), *d* — $\delta_{\text{ex}} = 2$ мм, $p_0 = 2,5$ МПа, $l_{\text{ns}} = 4$ мм ($l_{\text{ns}}/\delta_{\text{ex}} = 2$),
e — $\delta_{\text{ex}} = 2$ мм, $p_0 = 2,5$ МПа, $l_{\text{ns}} = 16$ мм ($l_{\text{ns}}/\delta_{\text{ex}} = 8$), *f* — $\delta_{\text{ex}} = 0,5$ мм, $p_0 = 2,5$ МПа, $l_{\text{ns}} = 4$ мм ($l_{\text{ns}}/\delta_{\text{ex}} = 8$).

скачков образуется весьма специфическая интерференционная картина (рис. 4*a*, 4*c*, 4*d*, 4*f*), интерпретировать которую в настоящее время затруднительно. Не исключено, что это связано с оптической схемой визуализации, когда лучи света проходят по прямой, в то время как газовая струя имеет радиальную симметрию. В итоге на кадре видна интегральная картина, не соответствующая срезу в плоскости, перпендикулярной поверхности преграды и плоскости струи.

На рис. 4*e* видно, что если преграда установлена достаточно далеко от среза сопла (в данном случае $l_{\text{ns}}/\delta_{\text{ex}} = 8$), то так же, как это наблюдалось при отсутствии преграды (рис. 3*a*–3*c*), радиальная струя резко расширяется.

Число Маха на срезе сопла

На рис. 5 приведены значения статического давления в 2 мм от среза вглубь сопла и измеренного трубкой Пито давления на срезе радиального сопла (нормированные на соответствующие давления в форкамере) в зависимости от полного давления в форкамере и ширины канала сверхзвуковой части сопла.

Сопло с минимальной шириной ($\delta_{\text{ex}} = 0,5$) в диапазоне давления в форкамере $p_0 = 1,5 - 2,5$ МПа (точка с $p_0 = 1$ МПа не была получена по причине возникающей вибрации конструкции) работает в режиме недорасширения ($1 \leq n \leq 1,4$). Сопла шириной $\delta_{\text{ex}} = 1 - 2$ мм работают в режиме перерасширения ($0,8 \leq n \leq 1$).

Согласно теории изэнтропического течения идеального газа отношение статического давления к давлению в форкамере должно оставаться постоянным независимо от давления в форкамере и ширины сопла. Однако, как видно из рис. 5а, этого не происходит. Последнее свидетельствует о том, что в рассмотренных условиях эксперимента течение не описывается изэнтропической моделью из-за вязкости и скачков уплотнения.

Как известно [12], число Маха можно определить тремя способами, используя данные измерений трех давлений: давления торможения p_0 , статического давления p и давления, измеряемого трубкой Пито p'_0 , по отношениям p/p_0 , p'_0/p , p'_0/p_0 . Использование формул, содержащих статическое давление, вообще говоря, некорректно вследствие его сильного изменения на скачках уплотнения. В отношении p'_0/p_0 для вычисления числа Маха должно быть взято полное давление потока на срезе сопла. Однако в сверхзвуковых потоках его невозможно измерить, поэтому вместо него используется давление, измеренное в форкамере. Ранее проведенные экспериментальные исследования [13, 14] показали, что пограничный слой, образующийся на стенках в соплах с большим удлинением $L_n/\delta_{\text{ex}} > 20$, оказывает заметное влияние на параметры течения внутри сопла. Это приводит к их отличию от параметров, рассчитанных для изэнтропического течения идеального газа. В нашем случае при длине сверхзвуковой части сопла $L_n = 27$ мм отношение L_n/δ_{ex} менялось от 13,5 (для сопла с $\delta_{\text{ex}} = 2$ мм) до 54 (для сопла с $\delta_{\text{ex}} = 0,5$ мм). Таким образом, можно ожидать, что оценка полного давления на срезе сопла, полученного с помощью давления, измеренного в форкамере, будет завышенной (согласно расчету на 15 – 20 % для сопла шириной 0,5 мм). Измерение угла наклона скачков в сопле дает величину примерно 25° . Этот угол для течения с числом Маха в диапазоне 2,5–3 близок к углу Маха и, как показывают оценки, потеря полного давления на скачке оказывается незначительной (менее 1 %). Отсюда следует, что падение давления торможения связано в основном с потерями за счет вязкости. Можно показать, что ошибка определения полного давления в размере 20 % приводит к ошибке вычисления числа

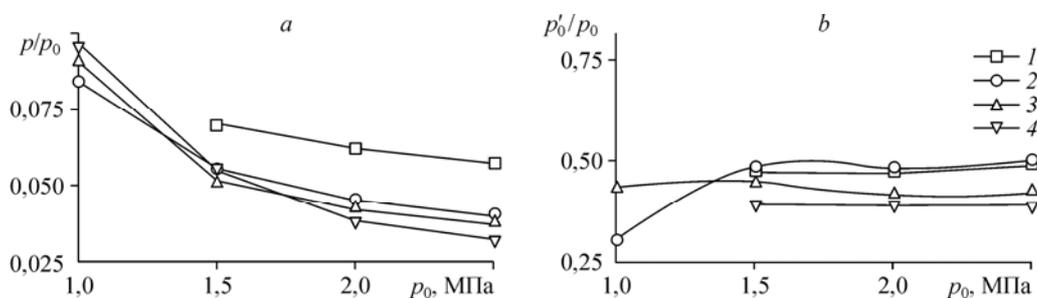


Рис. 5 Относительные значения статического давления вблизи среза радиального сопла (а) и давления, измеренного трубкой Пито на срезе сопла (б).

$\delta_{\text{ex}} = 0,5$ (1), 1 (2), 1,5 (3), 2 (4) мм.

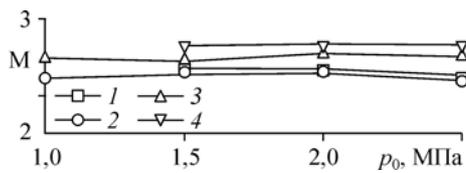


Рис. 6 Зависимость от давления в форкамере числа Маха на срезе сопла, вычисленного по отношению p'_0/p_0 для сопел с $\delta_{ex} = 0,5$ —2 мм.

$$\delta_{ex} = 0,5 (1), 1 (2), 1,5 (3), 2 (4) \text{ мм.}$$

Маха (в диапазоне 2,5–3) 5–10 %. Соответственно, для сопел шириной более 0,5 мм она будет еще меньше. Результаты расчетов по отношению p'_0/p_0 представлены на рис. 6. Видно, что уменьшение ширины сопла приводит к уменьшению числа Маха. Это является основным препятствием практического использования сопел с еще меньшей шириной.

Профили давления

На рис. 7 приведены профили давления, измеренные трубкой Пито на различных расстояниях от среза сопла для различной ширины сверхзвуковой части сопла δ_{ex} и давления в форкамере сопла $p_0 = 1$ –2,5 МПа. Измеренное давление p'_0 нормировано на давление в форкамере сопла p_0 . Расстояние от среза сопла r_z и поперечная координата y нормированы на ширину сверхзвуковой части сопла δ_{ex} .

В результате исследований получены типичные профили давлений, измеряемых трубкой Пито, характерные для сверхзвуковой турбулентной струи, распространяющейся в затопленном пространстве с атмосферным давлением. При заданных величинах δ_{ex} и p_0 поперечные размеры профилей давлений на начальном участке сверхзвуковой радиальной струи примерно одинаковы, далее вниз по течению при $r_z/\delta_{ex} = 8$ –10 происходит существенное увеличение размеров, что соответствует визуализационным картинкам, фиксирующим разбухание струи, представленным ранее.

Сравнение закрученной и незакрученной струй

Особых отличий в структуре течения закрученной струи по сравнению с незакрученным потоком не наблюдается. Отмечаются сходные осесимметричные периодические волновые структуры, внезапное расширение струи на достаточном удалении от среза сопла, те же сложные картины взаимодействия отраженных и отошедших скачков уплотнения при натекании струи на преграду.

Отметим, что закрученное течение, вызванное тангенциальным подводом рабочего газа, существует только в цилиндрической дозвуковой вихревой камере. В сопле и струе линии тока расходятся радиально, так же как и при течении без закрутки. Закрутка потока в форкамере может способствовать процессу напыления за счет более равномерного распределения частиц по сечению сопла.

Для закрученного течения качественные и количественные характеристики измеренных трубкой Пито профилей давлений в основном совпадают с аналогичными характеристиками для незакрученного течения. Можно лишь отметить некоторое увеличение максимумов давлений, характерное для всех профилей, полученных при различной ширине сверхзвуковой части сопла δ_{ex} и давлениях в форкамере p_0 .

На рис. 8 сопоставлены типичные поперечные распределения отношения измеренного трубкой Пито давления к давлению в форкамере для закрученного и незакрученного течений. Для закрученного течения поперечный размер струи оказывается несколько больше, чем для незакрученного. Поскольку радиальная скорость при закрутке получается

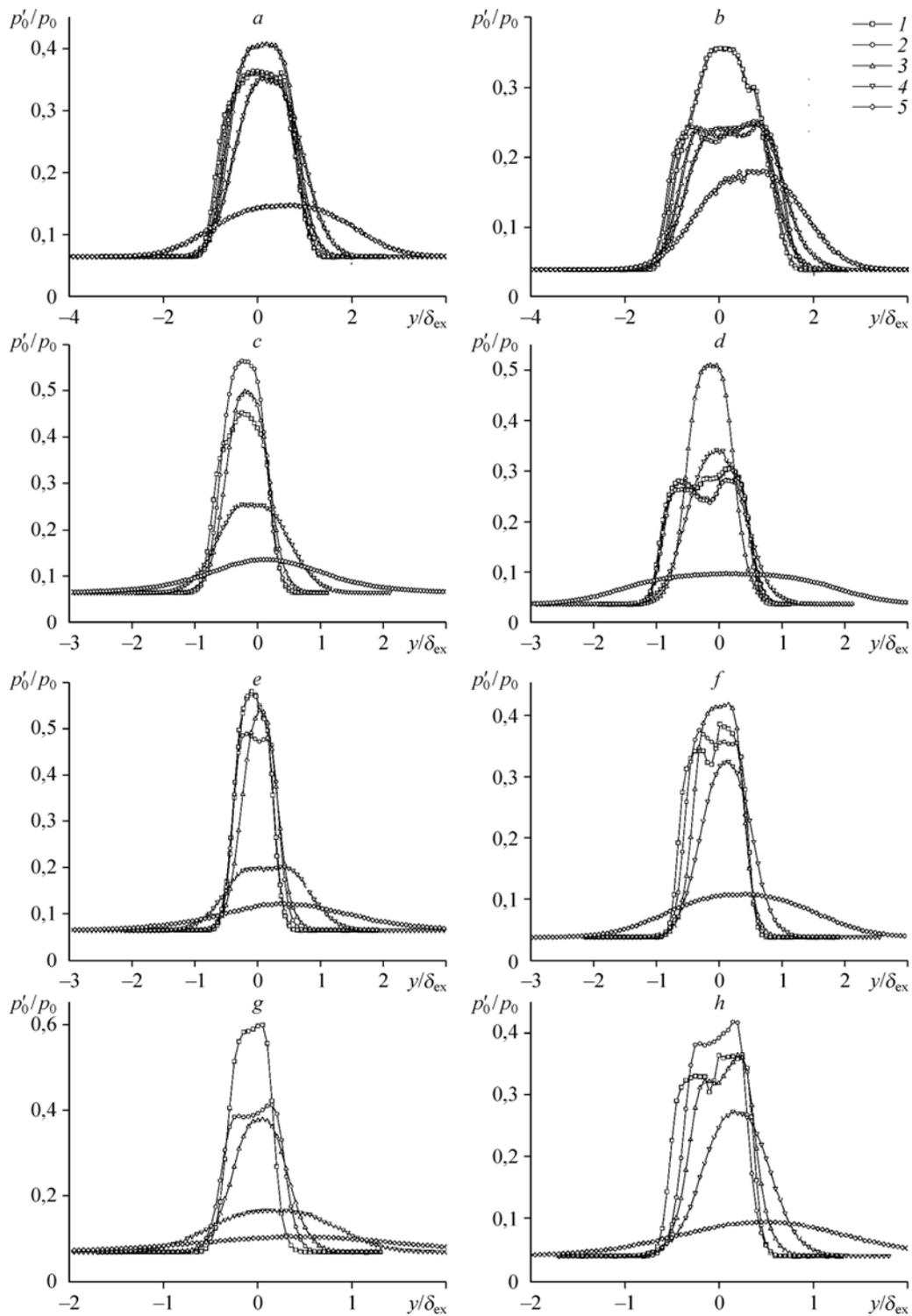


Рис. 7. Нормированные профили давления, измеренные трубкой Пито на различных расстояниях от среза сопла.

$\delta_{\text{ex}} = 0,5$ мм: a — $p_0 = 1,5$ МПа, $n = 1,05$, b — $p_0 = 2,5$ МПа, $n = 1,425$; $\delta_{\text{ex}} = 1$ мм: c — $p_0 = 1,5$ МПа, $n = 0,83$,
 d — $p_0 = 2,5$ МПа, $n = 1$; $\delta_{\text{ex}} = 1,5$ мм: e — $p_0 = 1,5$ МПа, $n = 0,77$, f — $p_0 = 2,5$ МПа, $n = 0,925$;
 $\delta_{\text{ex}} = 2$ мм: g — $p_0 = 1,5$ МПа, $n = 0,83$, h — $p_0 = 2,5$ МПа, $n = 0,8$; $r_z/\delta_{\text{ex}} = 1$ (1), 2 (2), 4 (3), 8 (4), 16 (5);

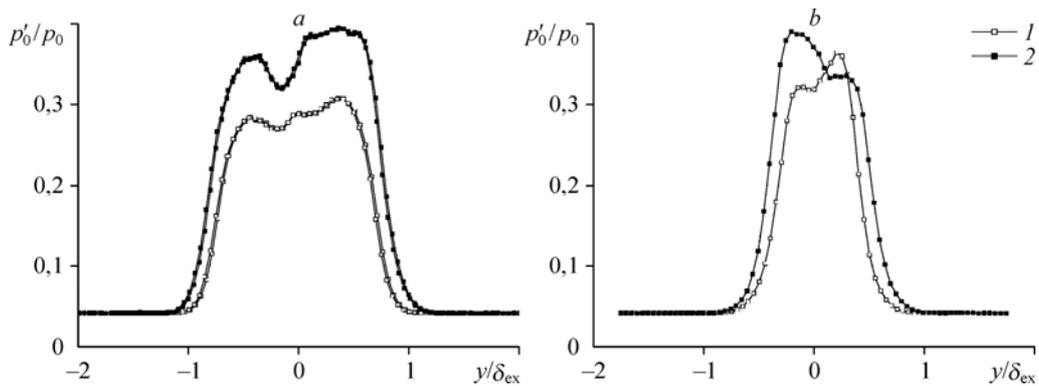


Рис. 8. Типичные поперечные распределения отношения измеренного трубкой Пито давления к давлению в форкамере для закрученного и незакрученного течений.

$p_0 = 2,5$ МПа: a — $\delta_{\text{ex}} = 1$ мм, $r_z = 1$ мм ($r_z/\delta_{\text{ex}} = 1$), b — $\delta_{\text{ex}} = 2$ мм, $r_z = 8$ мм ($r_z/\delta_{\text{ex}} = 4$); закрученное (1) и незакрученное (2) течения.

ниже, то статическое давление оказывается выше. Более высокому давлению обычно соответствует более широкая струя. По-видимому, этим объясняется наблюдаемое уширение струи при закрутке в форкамере.

Заключение

Исследована газодинамика сверхзвуковой радиальной струи в условиях, близких к условиям холодного газодинамического напыления. Измерены трубкой Пито профили давления в незакрученной и закрученной сверхзвуковых радиальных струях на различных расстояниях от среза сопла (1–16 калибров), при различных давлениях в форкамере (1–2,5 МПа) и при различной ширине сопла (0,5–2 мм). Также проведена оптическая визуализация свободных радиальных струй при истечении в затопленное пространство с атмосферным давлением и струй, натекающих на преграду.

Показано, что:

- статическое давление вблизи среза радиальных сопел при разных давлениях в форкамере и разных расстояниях между стенками сопла лежит в диапазоне 0,08–0,14 МПа;
- в сверхзвуковой радиальной струе прослеживается наличие первых 3–5 «бочек» после чего наблюдается резкое ее расширение; расстояние от среза сопла, на котором наблюдается расширение (3,5–6,5 ширин сопла), зависит как от ширины сопла, так и от давления в форкамере;
- в условиях перерасширенного течения ($n \approx 0,8$) в ряде случаев наблюдается несимметричный отрыв потока вблизи среза сопла, спровоцированный отраженным косым скачком, и отклонение струи от плоскости стенок сопла;
- в некоторых случаях наблюдались автоколебания струи;
- уменьшение ширины сопла приводит к уменьшению числа Маха на срезе сопла, что является основным препятствием практического использования сопел еще меньшей ширины;
- при закрутке потока в форкамере сопла существенных отличий в структуре струи по сравнению с незакрученным потоком не наблюдается.

Авторы благодарят И.Н. Кавун за помощь в проведении экспериментов.

Список обозначений

d_{in} — внутренний диаметр напыляемой трубы,	p — статическое давление,
d_{ex} — диаметр выходного сечения радиального сопла,	p_0 — давление в форкамере,
d_{cr} — диаметр критического сечения радиального сопла,	p'_0 — давление, измеренное трубкой Пито,
d_{pr} — диаметр форкамеры,	r — радиальная координата, отсчитываемая от оси сопла,
L_n — длина сверхзвуковой части радиального сопла,	$r_z = r - d_{ex}/2$ — радиальная координата, отсчитываемая от среза сопла,
l_{ns} — расстояние от среза сопла до напыляемой поверхности,	y — поперечная координата,
M — число Маха,	δ_n — ширина канала сверхзвуковой части сопла,
M_{ex} — число Маха на срезе сопла,	δ_{ex} — ширина канала сверхзвуковой части сопла на выходе.
n — нерасчетность струи, истекающей из радиального сопла,	

Список литературы

1. Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Папырин А.Н. Метод “холодного” газодинамического напыления // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315, № 5. С. 1062–1065.
2. Пат. РФ 2075535, МПК⁶ C23C4/16. Установка для нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы / Алхимов А.П., Гуляев В.П., Демчук А.Ф., Косарев В.Ф., Спесивцев В.П., Ларионов В.П.; заявитель и патентообладатель Ин-т теорет. и прикл. механики СО РАН. № 95101407/02; заявл. 31.01.1995; опубл. 20.03.1997.
3. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / Под ред. В.М. Фомина. М.: Физматлит, 2010. 536 с.
4. Пат. РФ 2194091, МПК⁷ B05B7/14. Устройство для нанесения покрытий на внутренние поверхности изделий / Никитин П.В., Смолин А.Г.; заявитель и патентообладатель П.В. Никитин, А.Г. Смолин; № 98107988/02; заявл. 20.04.1998; опубл. 10.12.2002.
5. Пат. РФ 2222639, МПК⁷ B05B7/14. Устройство для нанесения покрытий на внутренние поверхности изделий / Никитин П.В., Смолин А.Г., Мелендо Мануэль; заявитель и патентообладатель П.В. Никитин, А.Г. Смолин, Мануэль Мелендо; № 200118980/02; заявл. 20.01.1999; опубл. 27.01.1999.
6. Пат. РФ № 2087207, МПК B05B7/14. Устройство для нанесения покрытий из порошковых материалов / Дикун Ю.В.; заявитель и патентообладатель АОЗТ “Тотем”; № 95113255/02; заявл. 14.08.1995; опубл. 20.08.1997.
7. Huber H., Johannes V., Heinz V. Fixed inner spray nozzle to supply gas and powder mixture, for painting surfaces, has sleeve and insert, formed so that outer contour of insert forms Laval nozzle with inner contour of sleeve // DE19961202 (C1). 2001-07-26.
8. Alexandre S., Laguionie T., Vaccaud B. Realization of an internal cold spray coating of stainless steel in an aluminum cylinder // Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions / Ed. B.R. Marple, M.M. Hyland, Y.-C. Lau, C.-J. Li, R.S. Lima, G. Montavon. Published by ASM Intern., Materials Park, Ohio, USA, Copyright, 2007. P. 1–6.
9. Глазнев В.Н., Запрягаев В.И., Усков В.Н., Терехова Н.М., Ерофеев В.К., Григорьев В.В., Кожемякин А.О., Котенок В.А., Омельченко А.В. Струйные и нестационарные течения в газовой динамике / Под ред. С.А. Гапонов, А.А. Маслов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 200 с.
10. Kosarev V.F., Klinkov S.V., Alkhimov A.P., Papyrin A.N. On some aspects of gas dynamic of the cold spray process // J. of Thermal Spray Technology. 2003. Vol. 12, No. 2. P. 265–281.
11. Papyrin A.N., Alkhimov A.P., Kosarev V.F., Klinkov S.V. Experimental study of interaction of supersonic two-phase jet with a substrate under cold spray // Thermal Spray 2001: New Surfaces For A New Millennium / Ed. C.C. Berndt, K.A. Khor, E. Lugscheider. Pub. ASM International, Materials Park, OH. 2001. P. 423–431.
12. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969. 824 с.
13. Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F. The features of cold spray nozzle design // J. of Thermal Spray Technology. 2001. Vol. 10, № 2. P. 375–381.
14. Papyrin A., Kosarev V., Klinkov S., Alkhimov A., Fomin V. Cold spray technology // Elsevier Sci. 2007. 336 p.

Статья поступила в редакцию 28 октября 2014 г.,
после доработки — 20 января 2015 г.