

УДК 621.793

Управление формой пятна напыления при ХГН. Часть 1. Газодинамические аспекты*

**В.Н. Зайковский, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, Б.М. Меламед,
Г.В. Трубочеев**

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

E-mail: vkos@itam.nsc.ru

В работе исследованы сверхзвуковые струи, сформированные с применением нетрадиционных для холодного газодинамического напыления сопловых схем: с закруткой основного потока; с использованием сопла с проницаемым профилем и сквозными щелями на сверхзвуковом участке. Показано, что закрутка потока в форкамере сопла сохраняется вплоть до преграды и вихревая система, формирующаяся в проницаемых соплах, изменяет волновую структуру перерасширенной струи и отошедший прямой скачок уплотнения перед преградой. Наличие таких особенностей течения может оказать влияние на характер движения частиц и взаимодействия их с преградой в условиях холодного газодинамического напыления и позволит управлять распределением концентрации частиц в струе для получения необходимой формы пятна напыления.

Ключевые слова: сверхзвуковая струя, отрывная зона, закрутка потока, вихревая система, холодное газодинамическое напыление.

Введение

Развитие метода холодного газодинамического напыления (ХГН) является актуальной практической задачей. Традиционная схема формирования сверхзвукового двухфазного потока в условиях ХГН заключается в использовании сверхзвукового сопла Лавала (конического или прямоугольного), в форкамеру которого подается газопорошковая смесь [1]. Одной из разновидностей схем является подача смеси не в форкамеру, а в сверхзвуковую часть сопла [2, 3], что позволяет избежать эрозии стенок в критическом сечении сопла. Известна также схема подачи порошковой смеси с использованием эжектора [4]. Данные схемы хорошо зарекомендовали себя и нашли широкое применение на практике.

Представляет интерес исследование высокоскоростных гетерогенных потоков, сформированных с применением нетрадиционных для ХГН газодинамических сопловых схем, и изучение процесса нанесения покрытия в этих условиях. Также важно исследование возможности управления распределением концентрации частиц в струе для получения необходимой формы пятна напыления, позволяющей расширить возможности метода ХГН. В ряде случаев для решения различных технических задач эффективно используется газодинамический вихревой генератор, осуществляющий закрутку потока. При этом используются фундаментальные особенности закрученных течений, заключающиеся

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №: 11-08-01336-а и 12-08-00621-а).

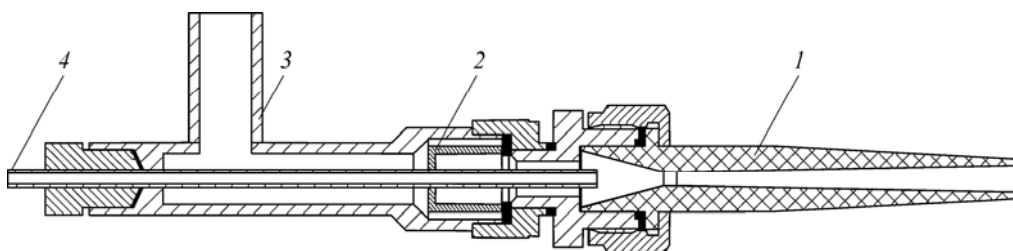


Рис. 1. Схема соплового блока экспериментальной установки.

1 — сверхзвуковое сопло ($M_{\text{ex}} = 3$), 2 — тангенциальный завихритель, обеспечивающий закрутку течения в дозвуковой части сопла, 3 — подвод воздуха, 4 — подача порошковой фазы.

в формировании неоднородных распределений плотности, температуры и давления газа по сечению потока, увеличении тепло- и массообмена, перераспределении поля скоростей по сравнению с незакрученными течениями, сепарации частиц дисперсной фазы в поле центробежных сил, образовании в приосевой области обратных течений в сильно закрученных потоках. Локальные вихревые структуры формируются в слое смешения сверхзвуковой струи (см. [5]), где стационарные продольные вихри образовывались путем создания искусственных микронеровностей на выходе из сопла. Ранее в работе [6] исследовалась структура течения в перфорированном участке на срезе сверхзвукового сопла, и было обнаружено возникновение крупномасштабных парных контрвращающихся продольных вихрей в проницаемом участке сопла. Они возникают в результате взаимодействия воздуха внешней среды, эжектируемого через перфорированную отверстием поверхностью сопла, с перераширенным основным сверхзвуковым потоком ($p_{\text{ex}} = 0,03 - 0,05$ МПа) и дальнейшим их распространением вниз по потоку в канале сопла.

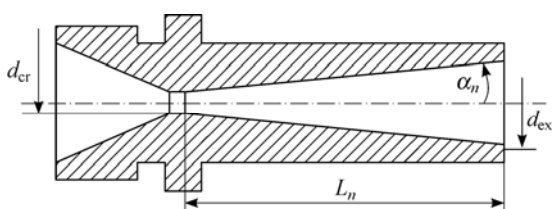
В настоящей работе рассмотрены нетрадиционные для ХГН схемы: с закруткой основного потока; с применением сопел с проницаемым участком сверхзвукового профиля в виде определенного числа дренажных отверстий или сквозных щелей. Проведенные исследования позволяют существенно расширить сферы применения ХГН и тем самым разработать методические приемы управления этим процессом.

1. Схема и методика измерений

Схема соплового блока экспериментальной установки ХГН представлена на рис. 1.

На рис. 2 приведено схематическое изображение конических сверхзвуковых сопел, применяемых в экспериментах. Сопла выполнены с одинаковой дозвуковой частью и отличаются длиной сверхзвукового профиля сопла: $L_n = 15, 29, 43, 86$ мм (для сопел № 1, 2, 3 и 4 соответственно), они имеют одинаковые диаметры критического ($d_{\text{cr}} = 4$ мм) и выходного ($d_{\text{ex}} = 8$ мм) сечения, меняется только угол полураскрытия сверхзвуковой части сопла α_n . По мере увеличения L_n он соответственно изменяется: $\alpha_n = 7,6^\circ, 4,0^\circ, 2,7^\circ$ до $1,3^\circ$.

Сверхзвуковые сопла были выполнены с непроницаемой сверхзвуковой частью или с проницаемым выходным участком сверхзвуковой части длиной $L_{\text{ex}} = 12$ мм от среза сопла, дренированным 48-ю радиальными отверстиями диаметром $d_h = 1,5$ мм, равномерно



расположенными по образующей поверхности (рис. 3, a), 16-ю тангенциальными отверстиями диаметром $d_h = 1,5$ мм (рис. 3, b) и различным числом продольных сквозных щелей

Рис. 2. Схема сверхзвукового сопла.

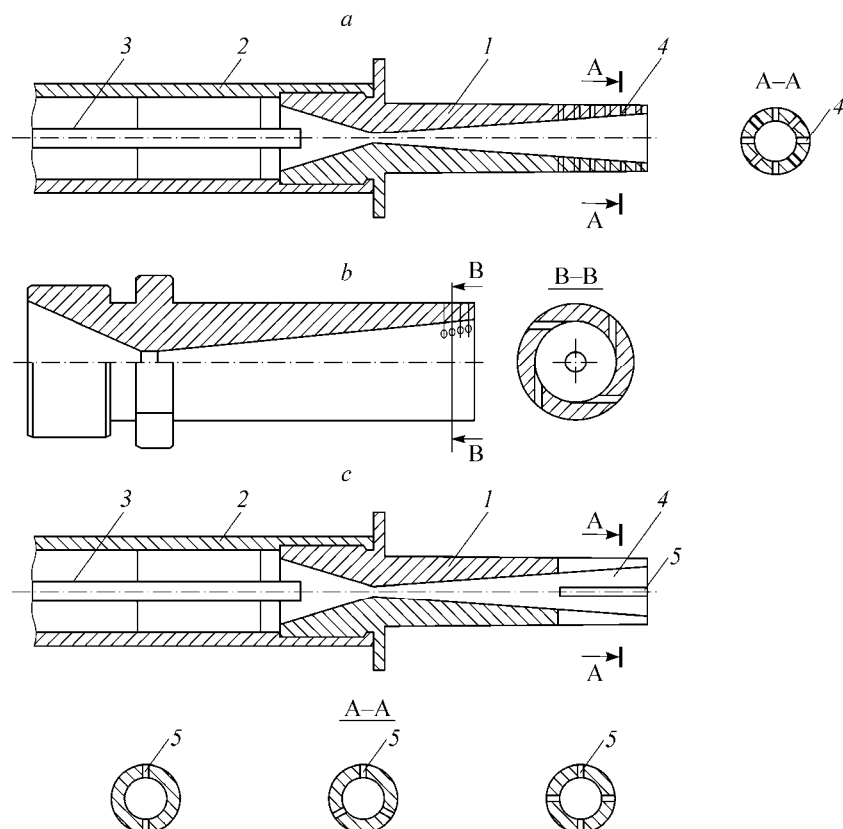


Рис. 3. Схема сверхзвукового проницаемого сопла.

a — радиальная эжекция, *1* — сопло, *2* — форкамера, *3* — канал подачи порошковой смеси, *4* — отверстия проницаемого участка профиля; *b* — тангенциальная эжекция для частичной закрутки течения; *c* — профиль с различным числом продольных сквозных щелей на выходе сопла, ширина щелей $\delta_{\text{cut}} = 0,7$ мм, *1* — сопло, *2* — форкамера, *3* — канал подачи порошковой смеси, *4* — участок профиля со щелями, *5* — щели.

на выходе сопла (рис. 3, *c*). Длина проницаемого участка подбиралась исходя из условия обеспечения эжекции на проницаемом участке профиля, где существует перерасширение основного сверхзвукового потока.

Для закрутки потока в форкамере сопла устанавливался тангенциальный завихритель (см. рис. 1). Изменение степени закрутки потока достигалось варьированием числа входных, тангенциально расположенных отверстий на входе в завихритель. В сопловом блоке установки применялись сменные вставки генератора с числом отверстий 16, 24, 32 диаметром 1,5 мм.

Оптическая визуализация газодинамической картины струйных сверхзвуковых течений и натекания струи на преграду проводилась с использованием теневого прибора ИАБ-451 с адаптивным визуализирующим транспарантом (АВТ) [7]. В качестве источника света использовалась ртутная лампа ДРШ-250. Регистрация изображения выполнялась зеркальной камерой Canon 450D 4272×2848 pxl с размером матрицы $22,2 \times 14,8$ мм со временем экспозиции $t = 250$ мкс. Для визуализации линий тока растекающейся по преграде струи применялся метод саже-масляной визуализации. Распределение давления на преграде измерялось тензометрическим датчиком с погрешностью $\pm 0,2\%$. На преграде располагалось 15 дренажных отверстий диаметром 0,5 мм с шагом 2 мм на одной оси, симметрично натекающей струе. Схема дренирования показана на рис. 4.

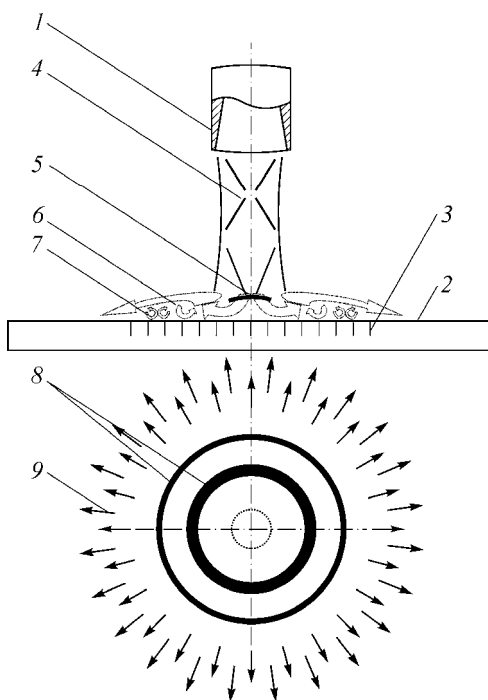


Рис. 4. Реконструкция газодинамической картины натекания незакрученной струи на преграду, схема расположения дренажных отверстий.

1 — сверхзвуковое сопло, 2 — преграда, 3 — расположение дренажных отверстий на преграде, 4 — косые скачки 1-й бочки, 5 — отошедший прямой скачок, 6 — внутренний тороидальный вихрь, 7 — внешний тороидальный вихрь, 8 — темные линии стекания сажи между тороидальными вихрями, 9 — радиальные линии растекания сажи.

2. Газодинамика однофазных струй

На первом этапе методами пневмометрии, оптической и сажемасленной диагностики были проведены исследования струй, истекающих из сопел с различными проницаемыми участками сверхзвукового профиля, и натекание их на преграду.

2.1. Взаимодействие незакрученной и закрученной сверхзвуковых струй с преградой

Для сравнительного анализа взаимодействия с преградой закрученных и незакрученных струй на рис. 5 в одном масштабе представлены теневые картины, полученные для сопел различной длины. Характерные результаты сажемасляной визуализации представлены на рис. 6.

На теневой картине (рис. 5, *a*) видно характерное течение сверхзвуковой перерасширенной струи с регулярным взаимодействием косых скачков уплотнения. Угол наклона скачка уплотнения от перерасширения струи на срезе сопла $\alpha_s = 22^\circ$ и соответствует числу $M_{ex} \approx 2,7$. Перерасширенная сверхзвуковая струя (нерасчетность истечения струи $n = 0,6$) истекает в среду с большим атмосферным давлением с некоторым уменьшением поперечного размера. Перед преградой, расположенной в конце падающих скачков уплотнения, формируется отошедший прямой скачок уплотнения.

На картине сажемасляной визуализации (рис. 6, *a*) в центре наблюдается светлое пятно интенсивного растекания (уноса сажи). Две темные кольцевые зоны стекания сажи 8 (рис. 4) свидетельствуют об образовании двух интенсивных тороидальных вихрей 6, 7. Внутренняя зона стекания сажи образуется от взаимодействия натекающей струи при ее повороте на 90° и встречного вращения внутреннего тороидального вихря. Образующийся внутренний тороидальный вихрь 6 взаимодействует с внешним, менее интенсивным тороидальным вихрем 7, в результате формируется внешняя линия стекания сажи, схематично показанная на схеме реконструкции течения (рис. 4). Две светлые кольцевые зоны растекания сажи показывают размер и положение обоих тороидальных вихрей, след внешнего, более слабого вихря менее выражен. Дальнейшее растекание струи газа по периферии преграды, визуализируемое радиальными линиями тока на саже 9, показывает отсутствие видимых интенсивных вихреобразований.

Применение более коротких сопел, с большим углом раскрытия сверхзвукового профиля, увеличивает поперечный размер струи, что и наблюдается на теневых картинах (см. рис. 5, *c* и 5, *e*). На картине сажемасляной визуализации увеличивается светлое центральное пятно интенсивного растекания сажи на преграде. Наблюдается уменьшение поперечной зоны между линиями стекания сажи, соответствующей ширине внутреннего тороидального вихря, но размер внешней линии стекания сажи остается неизменным.

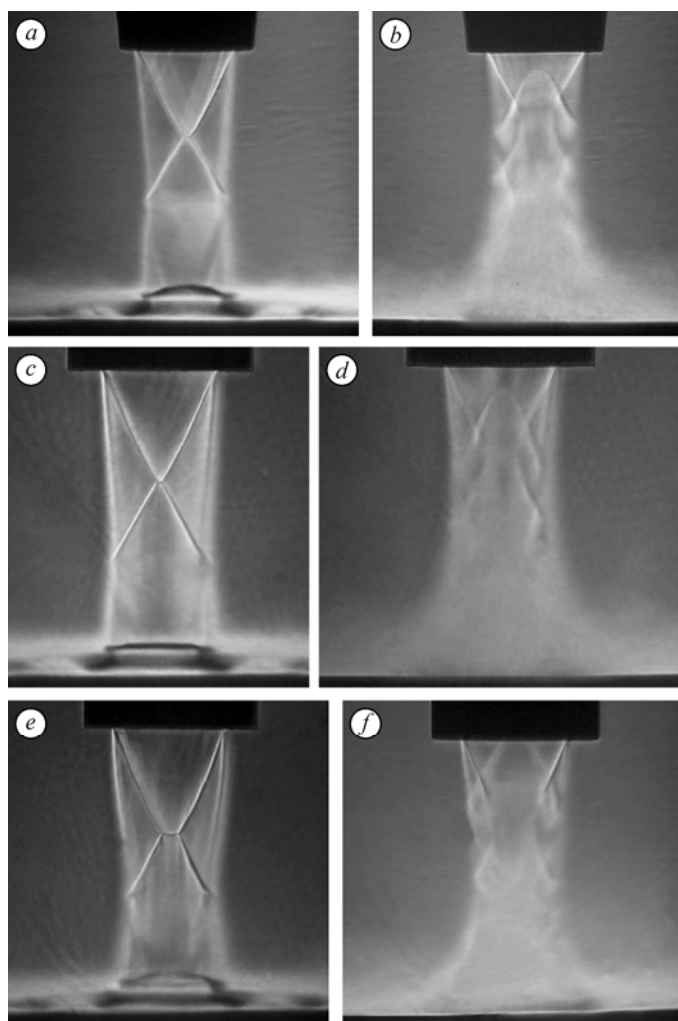


Рис. 5. Теневые картины натекания струи на преграду.

$T_0 = 293 \text{ K}$, $p_0 = 1,6 \text{ МПа}$; a, b — сопло № 3, $L_n = 43 \text{ мм}$, $\alpha_n = 2,7^\circ$; c, d — сопло № 2, $L_n = 29 \text{ мм}$, $\alpha_n = 4^\circ$;
 e, f — сопло № 1, $L_n = 15 \text{ мм}$, $\alpha_n = 7,6$.

Закрутка потока в форкамере сопла тангенциальным завихрителем видоизменяет волновую картину течения струи, увеличивает ее поперечный размер по всей длине, особенно вблизи преграды (рис. 5, b, d и f). В центре натекающей закрученной струи вблизи преграды наблюдается хорошо известная рециркуляционная зона [8]. Это свидетельствует о том, что закрутка потока в форкамере сопла сохраняется вплоть до преграды. Следует также отметить, что отошедший прямой скачок уплотнения в этом случае не наблюдается. Подобное явление разрушения прямого (косого) скачка описывалось в работе [9].

На сажемаслянной картине (см. рис. 6, b) видно светлое пятно растекания сажи, близкое по размеру рециркуляционной зоне. Натекающее закрученное течение на преграде не дает выраженной картины зон стекания сажи. Следы от тороидальных вихрей слабо выражены, внешнее кольцо линии стекания сажи незаметно, далее на периферии преграды наблюдаются радиальные линии растекания сажи, где эффект закрученного течения ослабевает.

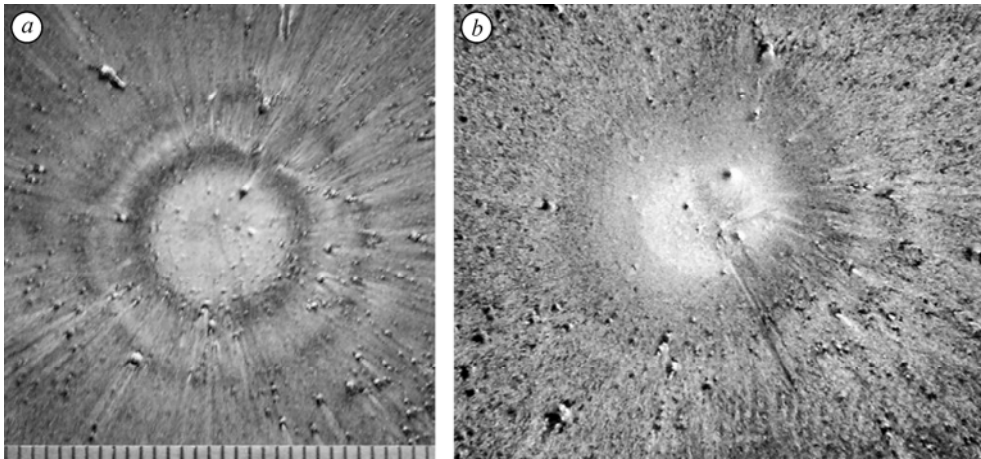


Рис. 6. Картины сажемасляной визуализации на преграде.

$T_0 = 293 \text{ К}, p_0 = 1,6 \text{ МПа}, L_n = 43 \text{ мм}, \alpha_n = 2,7^\circ$; *a* — незакрученное течение, *b* — закрученное течение.

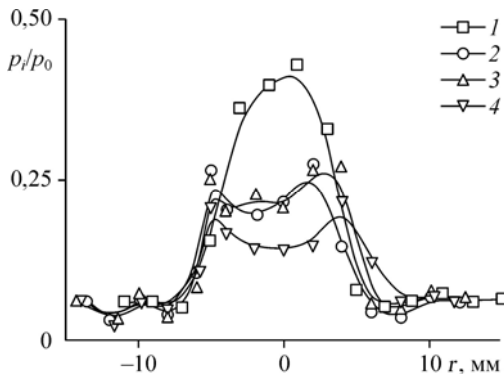
2.2. Распределение давления на преграде

На рис. 7 для незакрученной струи приведены результаты измерения распределения давления на поверхности преграды в районе натекания сверхзвуковой струи.

Для сопла с максимальной длиной сверхзвуковой части ($L_n = 86 \text{ мм}$) распределение давления характеризуется выраженным максимумом в центре, значение которого близко к давлению за прямым скачком уплотнения для числа $M_{ex} = 2,65$. Для более коротких сопел ($L_n = 43, 29$ и 15 мм) давление на преграде ниже. Отмеченные изменения, по-видимому, связаны с перестройкой системы скачков по мере изменения длины сверхзвуковой части сопла и соответственно угла полураскрытия профиля сопла. Следует отметить, что с уменьшением длины сопла уменьшается толщина пограничного слоя, формирующегося на его внутренней поверхности, увеличивается число Маха на срезе сопла. Это приводит к снижению соотношения давления на прямом скачке уплотнения, что отражается в отличиях измеренных давлений.

Для всех сопел, кроме сопла с $L_n = 86 \text{ мм}$, наблюдаются два периферийных максимума и минимум в центре зоны натекания струи. Зона максимумов расширяется с увеличением угла раскрытия сопла и ее размеры приближаются к размерам светлого пятна растекания сажи на сажемасляной визуализации и к видимым границам натекающей струи на теневых картинах.

Распределение давления на преграде для закрученной сверхзвуковой струи для сопел № 1–4 показано на рис. 8. Давление на преграде в области натекания струи прибли-



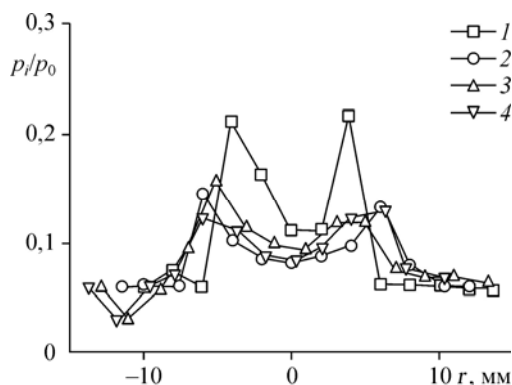
тельно в два раза меньше по сравнению со случаем незакрученной струи.

Картины распределения давления подобны для всех сопел — минимумы давления в центре и зона периферийных максимумов с близкими размерами зон и значениями давления для сопел с длиной $L_n = 15, 29, 43 \text{ мм}$. В отличие от незакрученной струи,

Рис. 7. Радиальные распределения давления на преграде при незакрученном течении.

$T_0 = 293 \text{ К}, p_0 = 1,6 \text{ МПа}; L_n = 86$ (1), 43 (2), 29 (3), 15 (4) мм.

Рис. 8. Радиальные распределения локального давления на преграде при закрученном течении. $T_0 = 293$ К, $p_0 = 1,6$ МПа; $L_n = 86$ (1), 43 (2), 29 (3), 15 (4) мм.



для сопла с $L_n = 86$ мм отсутствует максимум давления в центре преграды. Поперечный размер зоны периферийных максимумов давления при натекании закрученной струи увеличивается примерно в 1,5 раза, максимумы давления близки к видимым границам натекающей закрученной струи на теневых картинах (рис. 5). Пониженный (приблизительно в два раза) уровень давления на преграде для закрученной сверхзвуковой струи, по-видимому, связан с наличием осевой зоны разрежения [8].

2.3. Проницаемые стенки

Исследование натекания на преграду перерасширенной струи, истекающей из сопла с проницаемым участком на сверхзвуковом профиле, показало существенное влияние проницаемости стенки на общую картину течения (рис. 9). На таком режиме истечения струи в сопле на проницаемом участке профиля существует разрежение, происходит эжекция (подсос) воздуха из окружающей среды через перфорированные отверстия. На теневой картине (рис. 9, *b*) наблюдается исчезновение падающих и отраженных косых скачков уплотнения в струе, уменьшение поперечных размеров отошедшего прямого скачка уплотнения перед преградой. Наблюдаются только слабые косые скачки уплотнения вблизи среза сопла, образованные возмущениями от множества мелкомасштабных струй, втекающих через отверстия профиля сопла.

Теневая картина (рис. 9, *c*) истечения перерасширенной струи из сопла с щелевой проницаемостью профиля, так же, как и в случае перфорированной проницаемости, показывает исчезновение скачков уплотнения в струе и уменьшение поперечного размера отошедшего прямого скачка перед преградой. Можно предположить, что вихревая система, формирующаяся в проницаемых соплах, трансформирует волновую структуру перерасширенной струи и отошедший прямой скачок уплотнения перед преградой, особенно для случая проницаемости профиля сопла в виде продольных щелей, что и наблюдается в картинах теневой визуализации.

Применение закрутки потока в сопле с проницаемым профилем еще более видоизменяет волновую структуру струи (рис. 9, *d*). Причиной такой трансформации волновой

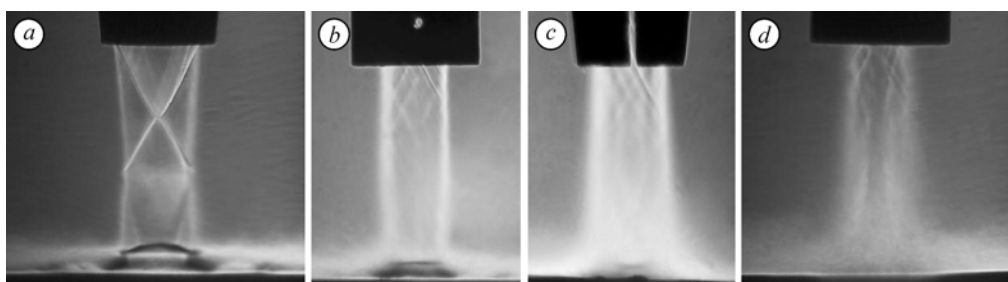


Рис. 9. Теневые картины струйного течения из сопла.

$L_n = 43$ мм, $\alpha_n = 2,7^\circ$, $T_0 = 293$ К, $p_0 = 1,6$ МПа; *a* — с непроницаемым сверхзвуковым профилем, *b* — проницаемый профиль в виде отверстий, *c* — проницаемый профиль в виде четырех щелей, *d* — проницаемый профиль в виде отверстий и закрутка в форкамере.

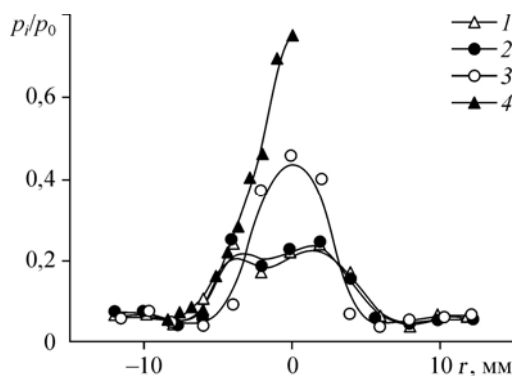


Рис. 10. Радиальные распределения давления на преграде для сопла № 3 с непроницаемым и проницаемым профилями.

$L_n = 43$ мм, $\alpha_n = 2,7^\circ$, $T_0 = 293$ К, $p_0 = 1,6$ МПа;
1 — гладкий профиль, 2 — профиль с кавернами,
3 — проницаемый с отверстиями, 4 — проницаемый с четырьмя щелями.

картины струи может являться образование достаточно интенсивных продольных вихревых структур в струе вследствие взаимодействия эжектируемого воздуха с основным сверхзвуковым потоком [6].

Подобное разрушение косога скачка уплотнения в вихревом следе отмечено в работе [9].

На рис. 10 показаны распределения давления на поверхности преграды для сопла № 3 с непроницаемым профилем и с проницаемостью, реализованной двумя способами: в виде отверстий и в виде четырех продольных сквозных щелей шириной 0,7 мм.

Для непроницаемого случая применялись сопла с гладким сверхзвуковым профилем и сопло с закрытыми снаружи отверстиями, когда на сверхзвуковом профиле присутствует поле каверн с заглушенными отверстиями. Давление на преграде в обоих случаях практически не различалось. Опыты с проницаемым профилем сопла показывают пикообразную картину распределения давления в центре преграды, особенно для случая с четырьмя продольными щелями.

Заключение

Исследования, проведенные в типичных условиях ХГН, показывают, что закрутка потока в форкамере сопла сохраняется вплоть до преграды и вихревая система, формирующаяся в проницаемых соплах, трансформирует волновую структуру перерасширенной струи и отошедший прямой скачок уплотнения перед преградой. Наличие таких особенностей течения может оказать влияние на характер движения частиц и взаимодействия их с преградой в условиях ХГН [8] и позволит управлять распределением концентрации частиц в струе для получения необходимой формы пятна напыления.

Список литературы

1. Papyrin A., Kosarev V., Klinkov S., Fomin V. Cold spray technology. Amsterdam: Elsevier Sci., 2007. 321 p.
2. Пат. 2100474 РФ, МПК⁶ C23C4/00, R05B7/00, C23C26/00. Устройство для газодинамического нанесения покрытий из порошковых материалов / Каширин А.И., Ключев О.Ф., Буздыгар Т.В.; заявитель и патентообладатель ООО "Обнинский центр порошкового напыления". № 96121833/02; заявл. 13.11.1996; опубл. 27.12.1997. Бюлл. № 36.
3. Maev R., Leshchynsky V. Introduction to low pressure gas dynamic spray / WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2007. 234 p.
4. Косарев В.Ф., Клинков С.В., Сова А.А. Исследование эжекторной схемы формирования гетерогенных потоков в условиях холодного газодинамического напыления // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13, № 3. С. 359–368.
5. Запругаев В.И., Киселев Н.П., Павлов А.А. Влияние кривизны линий тока на интенсивность продольных вихрей в слое смешения сверхзвуковых струй // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 3. С. 32–43.
6. Зайковский В.И., Киселев С.П., Киселев В.П. Продольные крупномасштабные вихри в сверхзвуковой части проницаемого сопла // ПМТФ. 2005. Т. 46, № 5. С. 68–75.
7. Павлов А.А., Павлов Ал.А., Голубев М.П. Использование фототропных материалов в качестве адаптивных визуализирующих транспарантов в теневых приборах // Тр. IX междунар. науч.-техн. конф. ОМИП-2007, Москва, 26–29 июня, 2007. М.: Изд. МЭИ, 2007. С. 170–173.
8. Киселев С.П., Киселев В.П., Зайковский В.Н. О влиянии закрутки потока газа на процесс напыления частиц на преграду в методе ХГН // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 2. С. 72–83.
9. Боровой В.Я., Кубышина Т.В., Скуратов А.С., Яковлева Л.В. Вихрь в сверхзвуковом потоке и его влияние на обтекание и теплообмен затупленного тела // МЖГ. 2000. № 5. С. 66–76.

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2013 г.