

УДК 621.793

## Управление формой пятна напыления при ХГН Часть 2. Процесс напыления\*

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

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

E-mail: vkos@itam.nsc.ru

В работе исследованы высокоскоростные гетерогенные потоки, сформированные с применением нетрадиционных для холодного газодинамического напыления газодинамических сопловых схем и изучен процесс нанесения покрытия в этих условиях. Изучена возможность управления нетрадиционными газодинамическими способами (закрутка основного потока, применение сопел с проницаемым профилем и сквозными щелями на сверхзвуковом участке) распределения концентрации частиц в сверхзвуковой струе для получения необходимой формы пятна напыления. На основе полученных результатов предложен способ газодинамического конструирования формы пятна напыления, позволяющий расширить возможности метода холодного газодинамического напыления.

**Ключевые слова:** сверхзвуковая струя, холодное газодинамическое напыление, пятно напыления.

### Введение

В первой части работы [1] были представлены результаты исследования влияния различных способов газодинамического воздействия (закрутка потока в форкамере, перфорация, щели на сверхзвуковой части сопла у среза) на сверхзвуковые струи и их натекание на преграду в типичных условиях холодного газодинамического напыления (ХГН). Подтверждено образование системы крупномасштабных продольных вихрей на проницаемом участке сверхзвуковой части сопла у среза при перерасширенном течении, которые распространяются далее вниз по потоку. Наличие таких особенностей течения может оказать влияние на характер движения частиц и взаимодействия их с преградой в условиях ХГН и позволит управлять распределением концентрации частиц в струе для получения необходимой формы пятна напыления.

Результаты численного моделирования ускорения микрочастиц потоком закрученного газа с использованием метода ХГН представлены в работе [2]. В работе [3] исследовались продольные крупномасштабные вихри вблизи перфорированной стенки сопла в сверхзвуковой его части. Экспериментально установлено определяющее влияние вдува газа через перфорированную стенку на возникновение и параметры продольных вихрей.

---

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

В настоящей работе рассмотрены следующие нетрадиционные для ХГН схемы: закрутка основного потока, применение сопел с проницаемым профилем в виде определенного числа дренажных отверстий и сквозных щелей на сверхзвуковом участке. Изучению влияния на форму пятна напыления перечисленных газодинамических способов воздействия на двухфазный поток, а также их сочетаний (закрутка + проницаемость профиля) посвящена представляемая экспериментальная работа. Проведенные исследования позволяют расширить сферы применения ХГН.

### Схема и методика измерений

Схема соплового блока экспериментальной установки ХГН и схематические изображения конических сверхзвуковых сопел, применяемых в экспериментах, подробно описаны в первой части [1]. 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), имеют одинаковые диаметры критического ( $d_{cr} = 4$  мм) и выходного ( $d_{ex} = 8$  мм) сечений, меняется только угол полуоткрытия сверхзвуковой части сопла  $\alpha_n$ . По мере увеличения  $L_n$  он изменяется соответственно:  $\alpha_n = 7,6^\circ, 4,0^\circ, 2,7^\circ$  и  $1,3^\circ$ . Сопла проектировались и изготавливались с расчетным числом Маха на срезе  $M_{ex} = 2,94$  и аналогичны применяемым при ХГН. При достаточно длинной сверхзвуковой части происходит уменьшение числа Маха за счет значительной толщины вытеснения турбулентного пограничного слоя в сверхзвуковой части сопла. Оценка для сопла № 4 с  $L_n = 86$  мм при рабочих режимах ( $T_0 = 593$  К,  $p_0 = 1,5$  МПа,  $\gamma = 1,4$ ), характерных для ХГН, дает уменьшение числа Маха на 13 %. Для сопла № 3 с  $L_n = 43$  мм число Маха с учетом толщины пограничного слоя составило для холодного воздуха  $M_{ex} = 2,78$ , с подогревом на режиме ХГН  $M_{ex} = 2,73$ . Нерасчетность истечения струи составляла  $n = 0,6$  и  $0,65$  соответственно, т.е. режимы работы сопел соответствует перерасширенным.

Было проведено экспериментальное исследование процесса напыления с использованием таких сопел на режимах, характерных для ХГН. Покрываются порошками меди и алюминия на стальные и алюминиевые пластины. Расстояние от среза сопла до преграды во всех экспериментах было одинаковым ( $z_{ns} = 20$  мм). На рис. 1 показаны микрофотографии частиц используемых порошков.

Объемные функции распределения частиц по размерам, полученные с использованием прибора Beckman Coulter LS 13320, показаны на рис. 2. На рисунке приведены также аналитические аппроксимации с помощью выражения

$$f_V(d_p) = d_p^q \exp \left( -\frac{k_2}{n} \left( \frac{d_p}{d_{pc}} \right)^n - \frac{k_1}{p} \left( \frac{d_{pa}}{d_p} \right)^p \right) / A.$$

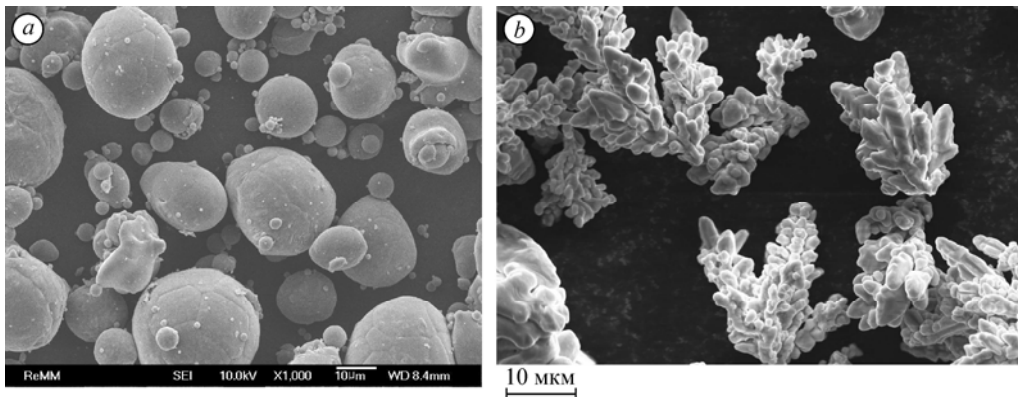


Рис. 1. Напыляемые порошки.

*a* — порошок алюминия АСД-1, *b* — порошок меди ПМС-1.

Таблица 1

Подгоночные параметры объемного распределения частиц по размеру

| Порошок | $d_{pa}$ , мкм | $d_{pc}$ , мкм | $n$ | $p$ | $q$ | $k_1$ | $k_2$ | $A$              |
|---------|----------------|----------------|-----|-----|-----|-------|-------|------------------|
| Al      | 2,9            | 34             | 3   | 3,8 | 1,6 | 1,39  | 1,6   | $6,2 \cdot 10^3$ |
| Cu      | 2,4            | 50,5           | 1,6 | 6   | 2,2 | 0,82  | 2,2   | $9,3 \cdot 10^4$ |

Рис. 2. Объемные функции распределения частиц по размерам.

1 — порошок алюминия АСД-1, 2 — порошок меди ПМС-1.

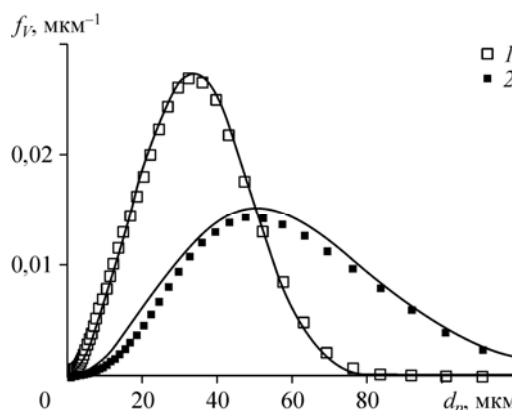


Таблица 2

Средний диаметр и стандартное отклонение распределения частиц по размерам использованных порошков

| Порошок | $\bar{d}_{pV_{exp}}$ , мкм | $sd_{V_{exp}}$ , мкм |
|---------|----------------------------|----------------------|
| Al      | 36                         | 15                   |
| Cu      | 69                         | 37                   |

Подгоночные параметры ( $d_{pa}$ ,  $d_{pc}$ ,  $n$ ,  $p$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $q$ ,  $A$ ) представлены в табл. 1.

Из рис. 2 и табл. 1 видно, что максимальную долю по объему (массе) занимают частицы размером 20–50 мкм для алюминия и 30–80 мкм для меди. Средние значения размеров частиц ( $\bar{d}_{pV_{exp}}$ ) и стандартное отклонение ( $sd_{V_{exp}}$ ), вычисленные по измеренному объемному распределению, представлены в табл. 2.

В проведенной серии экспериментов ставились цели определения влияния на процесс напыления следующих факторов:

1. закрутки основного потока;
2. проницаемости на соплах с различной длиной сверхзвуковой части сопла;
3. закрутки эжектируемого воздуха тангенциальным направлением каналов на проницаемом профиле сопла;
4. применения щелевой схемы проницаемого участка сверхзвуковой части сопла.

## Нанесение покрытий

### Непроницаемое сопло

Для случая сопла с незакрученной струей при продолжительности напыления несколько секунд пятно напыления имеет характерную конусообразную форму (рис. 3, а). В случае закрученной струи для этого же сопла наблюдается кольцевая форма пятна напыления увеличенного размера с отсутствием напыления в центре пятна (рис. 3, б). При продолжительном времени напыления формируется характерный кратерообразный вид. В работе [2] численным моделированием также показано, что закрутка потока оказывает существенное влияние на форму пятна напыления. Наличие закрутки обуславливает смещение частиц к стенке сопла под действием центробежной силы. В результате столкновения частиц со стенками сопла формируется пелена частиц, сходящая с его среза и формирующая покрытие в виде кратера.

Очевидно, что при выборе соответствующей степени закрутки потока можно получить достаточно равномерное по толщине пятно напыления — без явно выраженных пика и провала в центре.

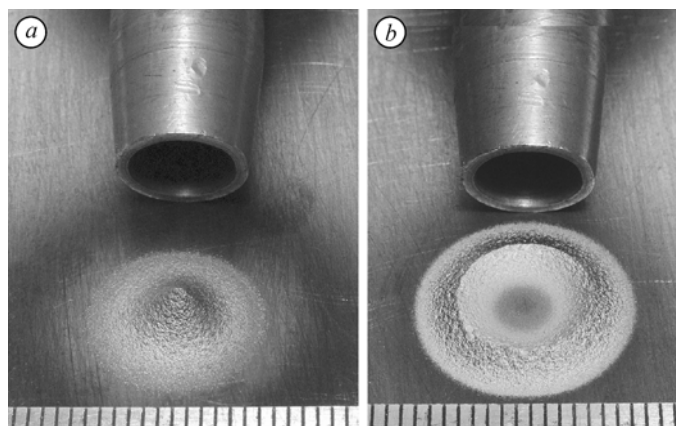


Рис. 3. Форма пятна напыления для сопла № 3 с незакрученной (а) и закрученной (б) струями.  
 $L_n = 43$  мм,  $\alpha_n = 2,7^\circ$ ,  $T_0 = 593$  К,  $p_0 = 1,6$  МПа.

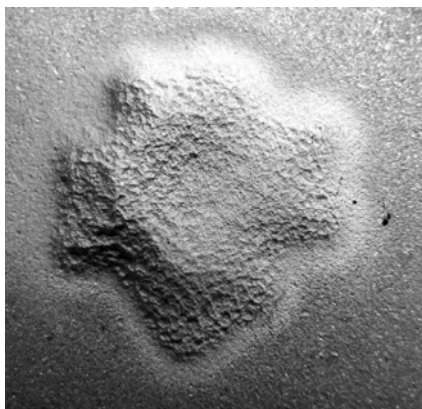


Рис. 4. Формы пятна ХГН для проницаемого сопла при незакрученном течении.  
Сопло № 3,  $L_n = 43$  мм,  $\alpha_n = 2,7^\circ$ ,  $T_0 = 593$  К,  $p_0 = 1,6$  МПа.

#### **Проницаемость в виде отверстий**

Совершенно иная картина получается при использовании для напыления сопел с проницаемым (перфорация 48-ю отверстиями) участком профиля. При напылении таким соплом получено пятно напыления крестообразной формы (см. рис. 4). Образование подобного пятна напыления возможно при наличии на периферии струи системы из четырех пар крупномасштабных вихрей с высокой интенсивностью крутки [3].

В следующем эксперименте число дренажных отверстий на проницаемом участке сопла было уменьшено в два раза ( $N_h = 24$ ). Показано, что форма пятна напыления осталась неизменной (четырёхлучевой крест) (рис. 5, а), следовательно, сохранилось и число парных вихрей.

Как известно, образование вихрей связано с резким искривлением линий тока под проницаемой поверхностью сопла под воздействием вдува внешней среды [3, 4]. Отмеченное количество дренажных отверстий ( $N_h = 24$ ) обеспечивает интенсивность вдува, необходимый для возникновения парных структур, а их число определяется другими параметрами ( $\alpha_n, L_n$ ).

Были проведены эксперименты с использованием сопла со вдувом внешней среды через 16 тангенциально расположенных по выходному участку сопла отверстий диаметром  $d_\tau = 1,5$  мм. Тем самым в пристенной зоне проточного тракта организуется закрученное течение. Качественное изменение направления вдува не отразилось на четырехлучевой форме (рис. 5, б) пятна напыления.

#### **Проницаемость в виде щелей**

Следующим способом организации пространственного течения в сопле была щелевая проницаемость сверхзвукового профиля сопла. Такой вид проницаемости существенным образом меняет форму двухфазной струи на перерасширенном режиме истечения: вдув

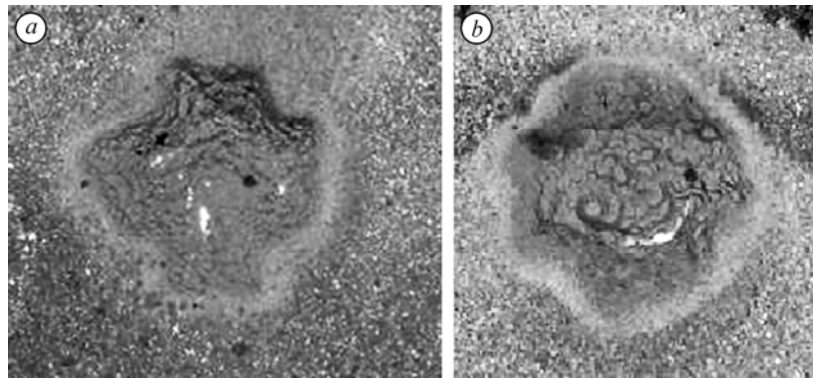


Рис. 5. Форма пятна напыления для сопла № 3.

*a* — при уменьшении числа отверстий на проницаемом участке сопла до  $N_h = 24$ , *b* — при тангенциальной эжекции внешней среды на проницаемом участке сопла  $N_h = 16$ .

внешней среды через щели в виде плоских эжектируемых струй, ориентированных перпендикулярно оси основного потока, оттесняет основной двухфазный поток, вызывает локальные отрывные течения, формирует видоизмененную общую пространственную картину течения струи. Данное явление оказывает значительное влияние на основной двухфазный поток и форму пятна напыления на преграде (см. рис. 6). Объемные звездообразные фигуры пятен напыления получены при продолжительном режиме работы установки.

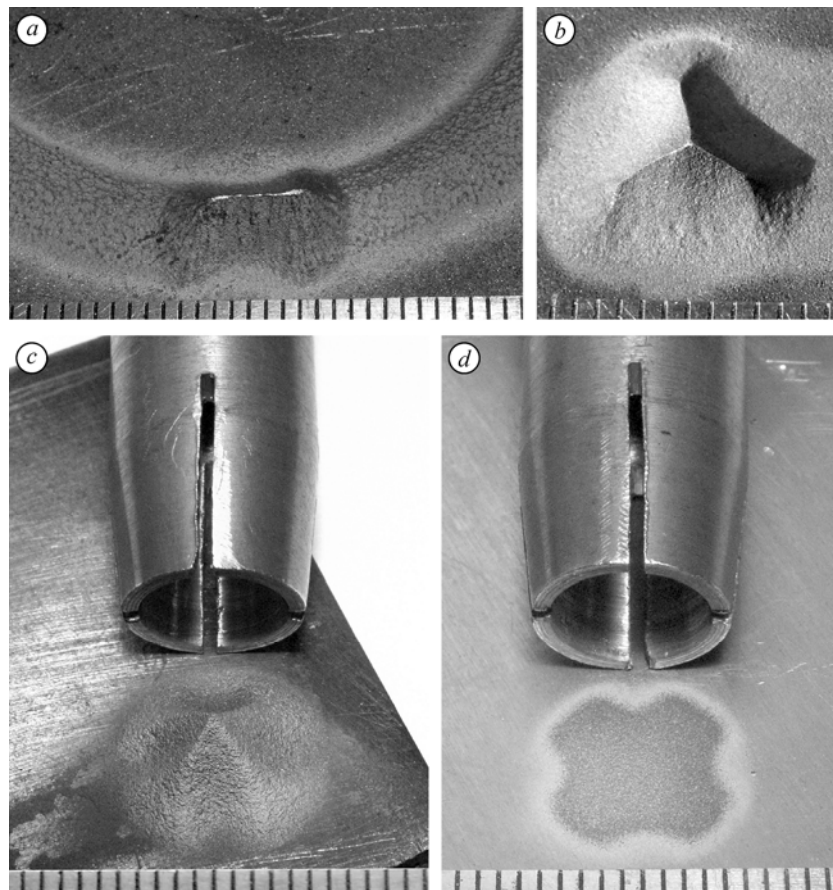


Рис. 6. Формы пятен напыления; проницаемость обеспечена продольными сквозными щелями. Количество щелей: две (*a*), три (*b*), четыре (*c*, *d*); сопло № 3,  $L_n = 43$  мм,  $\alpha_n = 2,7^\circ$ ,  $T_0 = 593$  К,  $p_0 = 1,6$  МПа.

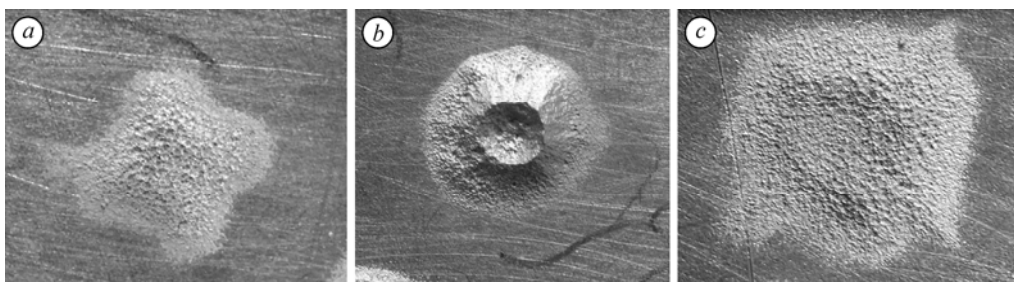


Рис. 7. Форма пятен напыления с различной степенью нерасчетности истечения двухфазной струи, проницаемость профиля в виде четырех щелей.

$n = 0,86$  (a), 1 (b), 1,68 (c); сопло № 3,  $L_n = 43$  мм,  $\alpha_n = 2,7^\circ$ ,  $T_0 = 593$  К,  $p_0 = 1,6$  МПа.

На рис. 6, c и d показана форма пятна напыления при разных временах напыления. На рис. 6, d отчетливо видна форма пятна напыления.

Очевидно, что на форму и размер пятна напыления существенное влияние будет оказывать нерасчетность истечения двухфазной струи. На рис. 7 представлены фотографии, иллюстрирующие результат напыления алюминиевого порошка на стальную преграду, полученный при давлениях в форкамере  $p_0 = 2,1, 2,6$  и  $4,1$  МПа проницаемым соплом с четырьмя щелями.

При  $n < 1$  (перерасширенная струя) впадины крестообразных пятен напыления соответствуют положению щелей, где присутствует эжекция воздуха (рис. 7, a). При переходе к недорасширенным режимам истечения струи ( $n > 1$ ) наблюдаются характерные острые лучи вне круглого пятна напыления (рис. 7, c), которые соответствуют выдуву наружу двухфазной струи. При расчетном режиме истечения ( $n = 1$ ) формируется пятно напыления круглой формы (см. рис. 7, b). В центре пятен напыления на расчетном и недорасширенных режимах истечения наблюдается кратер.

Результат по напылению, полученный при применении комбинированного способа воздействия на двухфазный поток (закрутка + проницаемый профиль сопла в виде четырех щелей), показан на рис. 8. На пятне напыления наблюдается изгиб лучей звездообразной фигуры в направлении закрутки потока. В центре пятна напыления толщина покрытия меньше по сравнению с периферийной областью — результат закрутки потока.

### Обсуждение результатов

В проведенных экспериментальных исследованиях применения нетрадиционных для ХГН газодинамических сопловых схем получены следующие результаты.

1. Применение закрутки основного потока приводит к формированию на преграде увеличенного кольцеобразного пятна напыления, что связано с влиянием центробежных сил на частицы.

2. Проницаемость выходного участка сопла в виде отверстий и связанная с ним эжекция окружающего воздуха приводят к формированию



Рис. 8. Форма пятна напыления для закрученной струи сопла со щелевой проницаемостью в виде четырех щелей.

Сопло № 3,  $L_n = 43$  мм,  $\alpha_n = 2,7^\circ$ ,  $T_0 = 593$  К,  $p_0 = 1,6$  МПа.

продольных крупномасштабных вихрей, распространяющихся вниз по потоку в турбулентной струе. При напылении такая двухфазная струя формирует пятно напыления, визуализирующее четырехпарную вихревую структуру.

3. Уменьшение количества отверстий проницаемого участка, а также тангенциальное расположение дренажных отверстий качественно не меняют форму пятна напыления, что свидетельствует о закономерности образования в двухфазной струе пространственной вихревой структуры.

4. Проницаемость выходного участка сопла в виде щелей и связанная с ним эжекция окружающего воздуха приводит к формированию пятна напыления, свидетельствующего об оттеснении основного двухфазного потока эжектируемыми щелевыми струями.

Вообще говоря, рассмотренные схемы воздействия на сверхзвуковой поток можно отнести к разряду слабых с точки зрения управления параметрами частиц твердой фазы, характерных для ХГН. Однако, как показано в работе, они, тем не менее, позволяют в той или иной мере влиять на процесс ХГН, в частности, на форму пятна напыления. С другой стороны, в настоящей работе впервые явление ХГН представлено как своего рода метод диагностики газодинамической структуры течений. Поскольку в экспериментах использовались сравнительно крупные частицы металлов (Al, Cu диаметром 10–50 мкм), следует ожидать, что влияние вышеперечисленных факторов (закрутка, проницаемость и т.п.) на осевую (нормальную к поверхности преграды) и радиальную скорости частиц слаб, таким образом, коэффициент напыления примерно одинаков для всех частиц и наблюдаемые эффекты связаны, в первую очередь, с перераспределением концентрации частиц в струе.

Что касается закрученных течений (см. [2]), полученные результаты достаточно очевидны из общефизических представлений. Действительно, закрутка потока должна привести к оттеснению основной массы частиц к периферии, что и подтверждается характерной формой пятна напыления. Кольцевая форма пятна напыления свидетельствует о перераспределении концентрации металлических частиц под действием центробежных сил закрученной струи, их выносе на периферию. Поперечный размер зоны периферийных максимумов на напылении примерно соответствует размерам максимумов на картине распределения давлений на преграде (см. [1], рис. 8). Уменьшение толщины покрытия в направлении к центру пятна может быть также связано с существованием рециркуляционной зоны в центре натекающей закрученной струи.

Менее очевидными являются результаты, полученные при напылении с использованием проницаемых сопел. Как было показано в работе [3], проницаемость (перфорация или продольные щели) стенок сверхзвукового сопла на участке у среза приводит к формированию продольных вихрей, схематично представленных на рис. 9.

Пятно напыления крестообразной формы с парными “лепестками” на концах формируется на перерасширенном режиме работы сопла.

Существующая эжекция воздуха через проницаемый профиль искривляет линии тока основного потока в коническом сопле, что является источником возникновения по окружности сопла вторичных течений, известных как вихри Тейлора–Гертлера. Возникновение же более

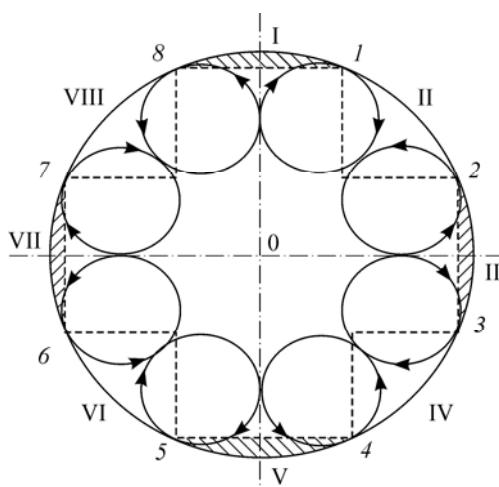


Рис. 9. Схема образования крестообразной структуры для проницаемого сопла при незакрученном течении.

крупных интенсивных продольных вихреобразований является результатом взаимодействия высоконапорной основной струи с эжектируемым воздухом в осесимметричном канале сопла. В достаточно толстом турбулентном слое смешения потоков происходит их самоорганизация в четырехпарную вихревую структуру и дальнейшая ее эволюция по длине слоя смешения истекающей двухфазной струи.

В работе [3] было показано, как эжекция атмосферного воздуха через перфорированный отверстиями профиль сверхзвукового сопла приводит к образованию крупных парных продольных вихрей. Используя схему, представленную на рис. 9, можно объяснить отклонение частиц в двухфазной струе, где сформирована крупномасштабная четырехпарная вихревая структура. Вихревое движение газа от поверхности сопла в секторах II, IV, VI, VIII отклоняет частицы от периферии к ядру струи, уменьшая их концентрацию в этих секторах. Движение газа в направлении к поверхности сопла в секторах I, III, V, VII отклоняет частицы из ядра в направлении к периферии струи, увеличивая там их концентрацию. Таким образом, интенсивные вихри в основной турбулентной струе перераспределяют инерционные частицы, формируют двухфазную четырехпарную продольную вихревую структуру. Далее сверхзвуковая струя с пространственным распределением плотности второй фазы истекает из сопла и вследствие инерционности ускоренных частиц сохраняет свою форму до момента взаимодействия с преградой. На пятне напыления пары “лепестков” на концах “креста” можно интерпретировать как пары вихрей, равномерно расположенных по окружности с поперечными размерами 2,2 мм. Этот факт может свидетельствовать о достаточно высокой интенсивности вихрей в струйном турбулентном слое смешения, способных отклонять металлические частицы.

Следует отметить, что в проникаемом сопле эжекция воздуха с комнатной температурой уменьшает температуру двухфазной струи после смешения потоков. Данный факт, возможно, также влияет на форму пятна напыления.

### **Заключение**

Экспериментальные исследования применения нетрадиционных для ХГН газодинамических сопловых схем показали, что возможно управление концентрацией частиц по сечению струи в условиях ХГН путем закрутки потока либо организации в струе продольных вихрей. На основе проведенных исследований предложен способ газодинамического конструирования формы пятна напыления при ХГН [5].

### **Список литературы**

1. **Зайковский В.Н., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Меламед Б.М., Трубачев Г.В.** Управление формой пятна напыления при ХГН. Ч. 1. Газодинамические аспекты // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21, № 1. С. 107–114.
2. **Киселев С.П., Киселев В.П., Зайковский В.И.** О влиянии закрутки потока газа на процесс нанесения покрытия на преграду методом холодного газодинамического напыления // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 2. С. 72–83.
3. **Зайковский В.И., Киселев С.П., Киселев В.П.** Продольные крупномасштабные вихри в сверхзвуковой части проникаемого сопла // ПМТФ. 2005. Т. 46, № 5. С. 68–75.
4. **Запрягаев 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.
5. **Пат. РФ 2396371, МПК C23C24/04, B05B7/10.** Способ газодинамического напыления порошковых материалов и устройство для его реализации (Варианты) / Алхимов А.П., Косарев В.Ф., Клинков С.В., Меламед Б.М., Зайковский В.Н.; заявитель и патентный обладатель ИТПМ СО РАН. № 2008128115/02; заявл. 09.07.2008; опубл. 20.01.2010, Бюл. № 22.

*Статья поступила в редакцию 1 апреля 2013 г.*