

УДК 621.793

ВЛИЯНИЕ КОНИЧЕСКОЙ ОТРЫВНОЙ ЗОНЫ НА ПРОЦЕСС ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

А. П. Алхимов, В. Ф. Косарев, С. В. Клинков, А. А. Сова

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск
E-mail: vkos@itam.nsc.ru

Представлены результаты экспериментального и численного исследования влияния конических отрывных зон, искусственно создаваемых перед преградой при натекании на нее сверхзвуковой двухфазной струи, на характер движения частиц диаметром менее 1 мкм и на процесс холодного газодинамического напыления в целом. В результате расчетов выявлено существенное влияние искусственно создаваемой перед преградой конической отрывной зоны на характер движения частиц, в частности установлено увеличение по сравнению со схемой напыления без иглы максимальной скорости соударения частиц с преградой. Тем самым показана возможность формирования путем холодного газодинамического напыления покрытия из частиц диаметром менее 1 мкм, предложена схема практической реализации процесса.

Ключевые слова: сверхзвуковая струя, коническая отрывная зона, соударение частиц с преградой, холодное газодинамическое напыление.

Введение. Исследование высокоскоростного ударного взаимодействия частиц диаметром менее 1 мкм с поверхностью преграды, в том числе условий эрозионно-адгезионного перехода, представляет научный и практический интерес и позволяет расширить области использования метода холодного газодинамического напыления (ХГН). Специфика процесса ХГН заключается в том, что для формирования сплошного покрытия необходимо нанести несколько слоев частиц. Таким образом, характерная минимальная толщина покрытия составляет порядка нескольких диаметров частиц. При использовании порошков с частицами диаметром $d_p = 30$ мкм минимальная толщина сплошного покрытия приблизительно равна 100 мкм. В некоторых случаях требуется получение сплошных покрытий толщиной не более $5 \div 10$ мкм, следовательно, для напыления необходимо использовать порошки с частицами диаметром $1 \div 3$ мкм и менее. Известно, что при натекании сверхзвуковой струи на преграду перед последней возникает скачок уплотнения [1]. За скачком сверхзвуковое течение газа переходит в дозвуковое и образуется сжатый слой газа, в котором частицы двухфазной струи теряют скорость. Потеря скорости тем больше, чем меньше диаметр частиц. Одно из главных условий ХГН заключается в том, что скорость удара частиц должна быть больше некоторого критического значения, при котором начинается формирование покрытия. Вследствие торможения в сжатом слое (в случае использования сопла стандартного для ХГН размера $d_{ex} \approx 6$ мм) частицам диаметром $1 \div 3$ мкм и менее невозможно придать необходимую для закрепления скорость удара. Вследствие этого

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 11-08-01336-а, 09-08-00543-а).

© Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Клинков С. В., Сова А. А., 2012

возможности метода ХГН формировать покрытия из частиц диаметром менее $1 \div 3$ мкм ограничены.

Одним из путей решения данной проблемы является трансформация прямой ударной волны в косую. О возможности такой трансформации и приемлемых методах свидетельствуют публикации. Например, в работе [2] обнаружено формирование конических отрывных зон одиночными частицами, выдуваемыми навстречу потоку. В [3] предложен способ получения покрытий из смеси основного наносимого порошка и вспомогательного порошка с крупными частицами. При этом крупные частицы служат для трансформации ударной волны при отскоке от поверхности преграды. Недостатком предложенного в работе [3] метода является кратковременное и нерегулярное существование трансформированной ударной волны. В работе [4] предложена схема с применением иглы (или пластины), закрепленной на поверхности преграды. Однако в [4] показана только возможность трансформации ударной волны, возможность увеличения скорости удара мелких частиц, проходящих через трансформированную область вблизи поверхности преграды, осталась невыясненной. Экспериментальное изучение скорости удара мелких (диаметром не более 1 мкм) частиц связано с определенными трудностями, поэтому в настоящей работе выполнен расчет с использованием пакета Fluent. Следует также отметить, что подобного рода исследования ранее не проводились.

Экспериментальная установка и методы исследования. Схема установки для изучения ХГН приведена на рис. 1. В данной работе, как и в работе [4], исследуется натекание сверхзвуковой струи на преграду с закрепленной на ней иглой.

Для ускорения частиц используются сверхзвуковые конические сопла с диаметрами критического сечения $d_{cr} = 2 \div 6$ мм, выходного сечения $d_{ex} = 4 \div 10$ мм и длиной сверхзвуковой части $L_n = 40 \div 100$ мм. Давление торможения составляет $p_0 = 1,2 \div 2,0$ МПа, температура торможения $T_0 = 290 \div 700$ К, число Маха на выходе из сопла $M_{ex} = 2 \div 3$.

Расчет двухфазного течения в сопле и при натекании на преграду с иглой проводился с использованием программного пакета Fluent путем решения двумерных осесимметричных уравнений Навье — Стокса. Влияние турбулентности на параметры газового потока моделировалось с помощью $(k-\varepsilon)$ -модели RNG [5]. Количество ячеек в расчетной области составляет примерно 100 000. Более подробно условия расчета движения частиц представлены ниже.

Экспериментальные данные и результаты расчетов. В работе [4] показано, что рассчитываемое поле газового течения удовлетворительно согласуется с результатами экспериментов, проводившихся при различных условиях (теньевыми фотографиями и данными измерений давления на преграде). С учетом приемлемой точности воспроизведе-

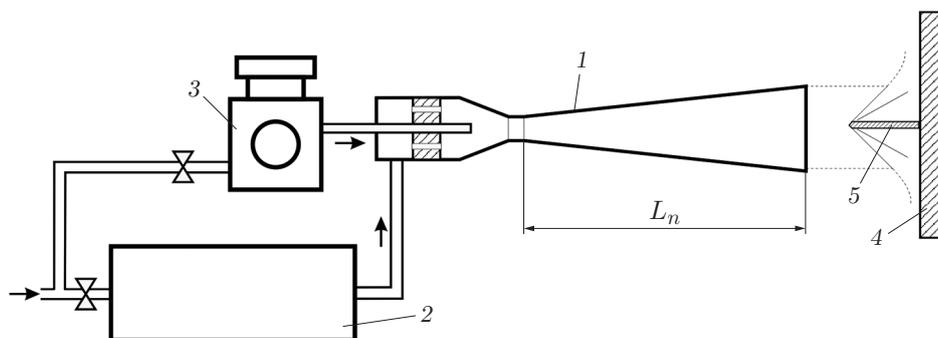


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — сверхзвуковое сопло, 2 — подогреватель газа, 3 — дозатор частиц, 4 — преграда, 5 — игла

ния газодинамической картины проведены расчеты движения частиц с целью исследования особенностей течения в отрывных зонах для получения максимально высоких скоростей удара мелких ($d_p = 0,3 \div 1,0$ мкм) частиц.

Геометрические параметры сопла были следующие: $d_{cr} = 3$ мм, $d_{ex} = 4,8$ мм, $L_n = 70$ мм, расстояние от среза сопла до подложки $l_{ns} = 12$ мм. Расчеты проводились для двух случаев: 1) поверхность без иглы; 2) поверхность с установленной на ней иглой длиной $l_n = 7$ мм и диаметром $d_n = 0,7$ мм. Ось симметрии иглы совпадала с осью симметрии сопла. Температура торможения воздуха составляла $T_0 = 500$ К, давление торможения $p_0 = 1,3$ МПа. Коэффициент сопротивления C_D вычислялся с помощью аппроксимации [6]

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 3,6 Re_p^{0,6}) + \frac{1,85 Re_p}{6251 + Re_p},$$

где Re_p — число Рейнольдса для частицы.

Ввиду малых объемных концентраций частиц в условиях экспериментов в расчетах не учитывалось влияние частиц на параметры газа. Рассматривались частицы меди ($\rho_p = 8900$ кг/м³) диаметром 0,3, 0,5 и 1 мкм, которые с нулевой начальной скоростью инжестировались в форкамеру сопла, затем определялась их скорость в выходном сечении сопла. После этого частицы инжестировались в выходном сечении сопла в девяти точках: первая на расстоянии 0,2 мм от оси сопла, расстояние по радиальной координате сопла между последующими точками составляло 0,27 мм. Начальная скорость частиц задавалась равной скорости частиц на срезе при их инжестии в форкамеру.

На рис. 2 показаны траектории движения частиц меди при натекании на преграду без иглы и с иглой. Видно, что в конфигурации без иглы частицы диаметром 0,3 мкм в сжатом слое увлекаются потоком, движутся вдоль поверхности преграды или соударяются под очень острыми углами, при этом скорость соударения по нормали значительно меньше 100 м/с. При натекании двухфазного потока на преграду с иглой частицы, инжестированные вблизи оси сопла, ударяются о преграду в области, достаточно удаленной по радиальной координате от оси сопла и иглы (см. рис. 2, б, г, е), т. е. концентрация частиц перераспределяется таким образом, что частицы ударяются о подложку в кольцевых областях с внешним диаметром, примерно равным $1,25d_{ex}$, и внутренним диаметром $0,9d_{ex}$, $0,75d_{ex}$ и $0,55d_{ex}$ для частиц диаметром 0,3, 0,5 и 1,0 мкм соответственно.

На рис. 3 показана зависимость скорости удара о подложку медных частиц различного диаметра от радиальной координаты удара относительно оси сопла. Видно, что в случае без иглы для частиц диаметром 0,5 и 1 мкм радиальные координаты удара частиц близки к радиальным координатам их инжестии в сопло. Также видно, что для частиц диаметром 0,5 и 1 мкм существует оптимальная зона инжестии, позволяющая получить наиболее высокие скорости удара частиц о подложку. Данная зона расположена в кольце с малым и большим относительным радиусом $2r/d_{ex}$, приблизительно равным 0,5 и 1 соответственно. Следует отметить, что частицы диаметром 0,5 мкм имеют меньшую скорость удара, чем частицы диаметром 1 мкм. Это обусловлено тем, что в сжатом слое газа перед преградой частицы диаметром 0,5 мкм теряют свою скорость более интенсивно, в частности частица 9 разворачивается потоком и не соударяется с подложкой. Заметим также, что частицы диаметром 0,3 мкм либо вообще не долетают до подложки (частицы 8, 9), либо соударяются с подложкой под очень острым углом (см. рис. 2, а).

Установка иглы существенно меняет структуру течения газа и частиц вблизи подложки, что позволяет частицам 6 и 7 диаметром 0,3 мкм, введенным в поток, не только долететь до преграды, но и иметь скорость удара, превышающую 400 м/с, при нормальной составляющей скорости удара более 100 м/с (см. рис. 3, в).

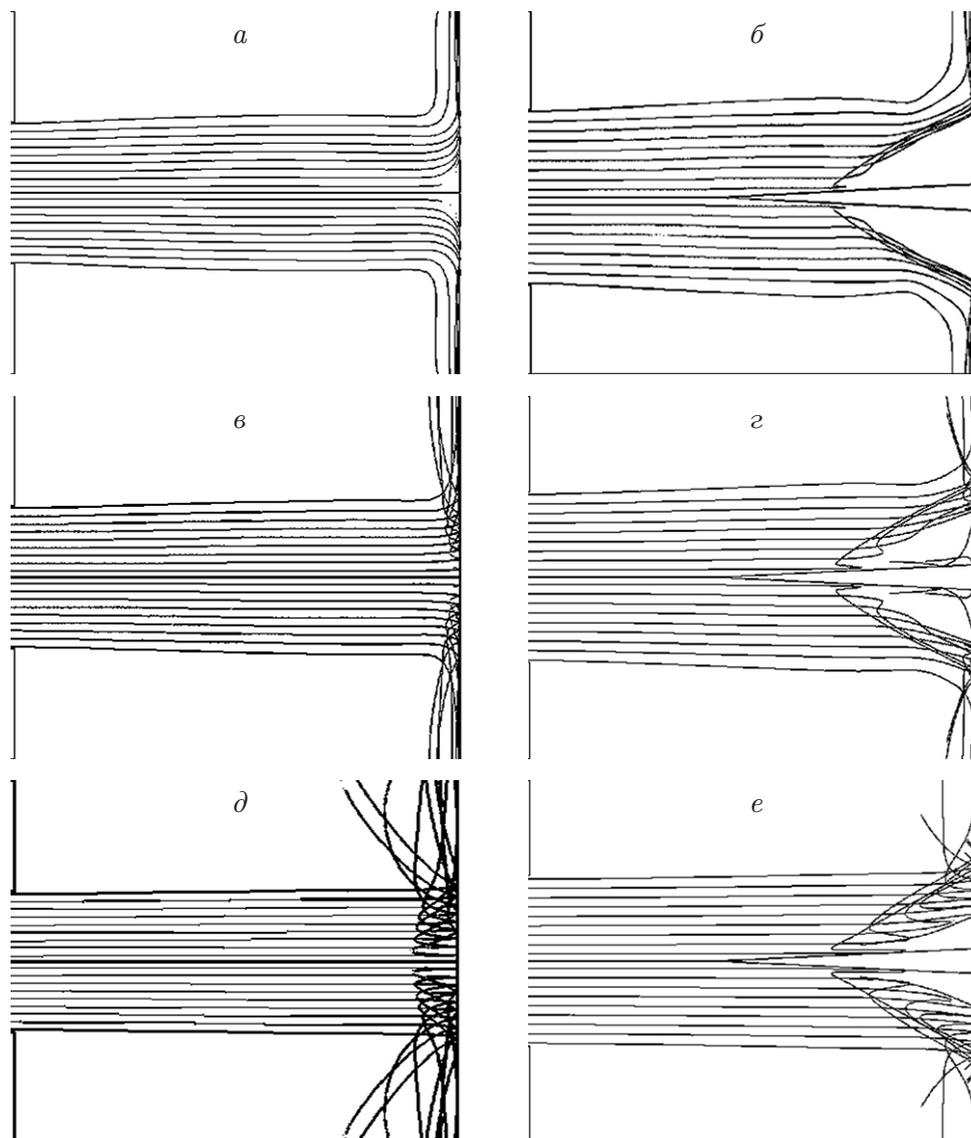


Рис. 2. Траектории движения частиц меди различного диаметра при натекании на преграду без иглы (*а, в, д*) и с иглой (*б, г, е*) при $T_0 = 500$ К, $p_0 = 3,0$ МПа: *а, б* — $d_p = 0,3$ мкм, *в, г* — $d_p = 0,5$ мкм, *д, е* — $d_p = 1,0$ мкм

При наличии иглы и соответствующей позиции ввода в поток максимальная скорость удара частиц диаметром 0,5 и 1 мкм примерно на 100 м/с больше, чем в случае отсутствия иглы.

Полученные результаты позволяют предположить, что использование искусственно создаваемых конических отрывных зон расширяет возможности метода ХГН при нанесении покрытий из частиц диаметром менее 1 мкм.

Практическая реализация. Применение иглы, жестко связанной с преградой, для формирования покрытий не представляет практического интереса. Более целесообразно использовать схему с иглой (или клином), жестко связанной с соплом (рис. 4). Поскольку при этом качественная картина остается близкой или такой же, как в случае использования иглы, жестко связанной с преградой (рис. 5), при постановке экспериментов с напылением применялась данная схема.

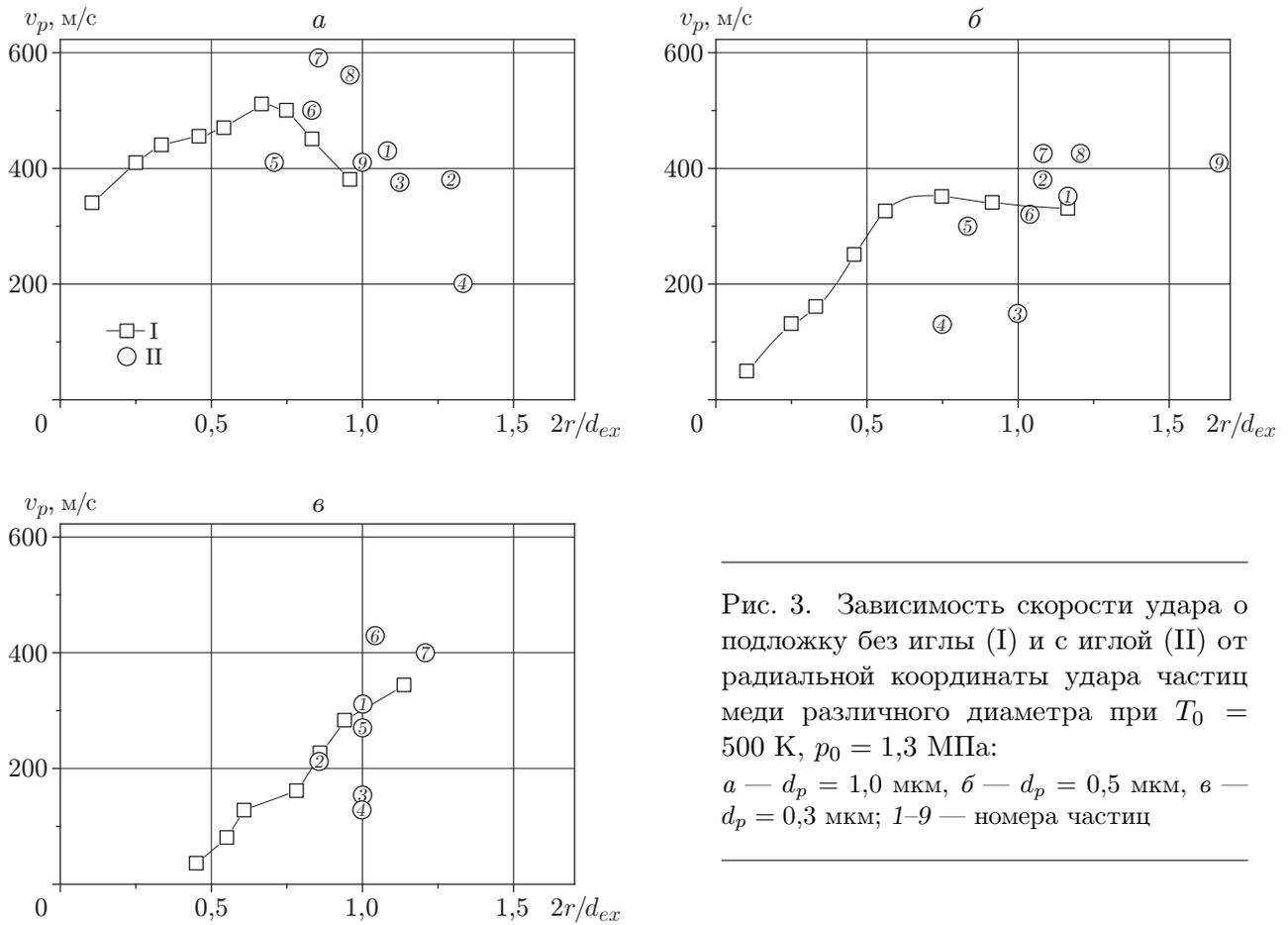


Рис. 3. Зависимость скорости удара о подложку без иглы (I) и с иглой (II) от радиальной координаты удара частиц меди различного диаметра при $T_0 = 500$ К, $p_0 = 1,3$ МПа:
 а — $d_p = 1,0$ мкм, б — $d_p = 0,5$ мкм, в — $d_p = 0,3$ мкм; 1-9 — номера частиц

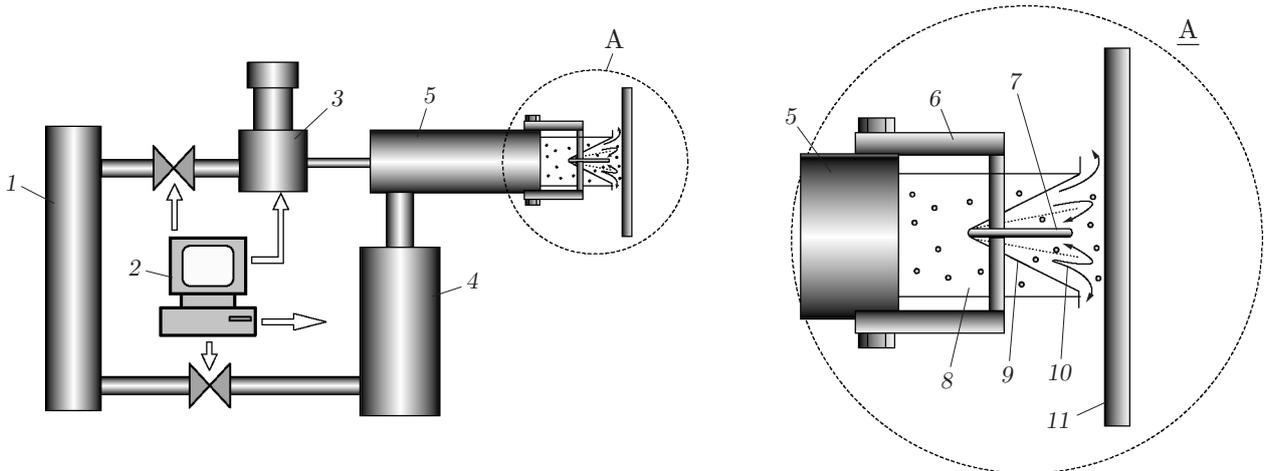


Рис. 4. Схема установки газодинамического напыления с иглой, жестко связанной с соплом:

1 — источник сжатого газа, 2 — пульт управления и контроля, 3 — дозатор частиц, 4 — подогреватель газа, 5 — сверхзвуковое сопло, 6 — крепление иглы, 7 — игла, 8 — сверхзвуковой двухфазный поток, 9 — конический скачок, 10 — кольцевая сверхзвуковая струя, 11 — подложка

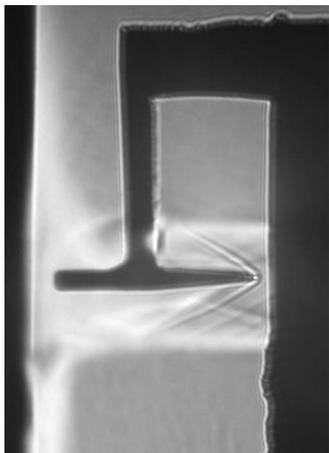


Рис. 5. Результаты теневой визуализации течения вблизи иглы, жестко связанной с соплом

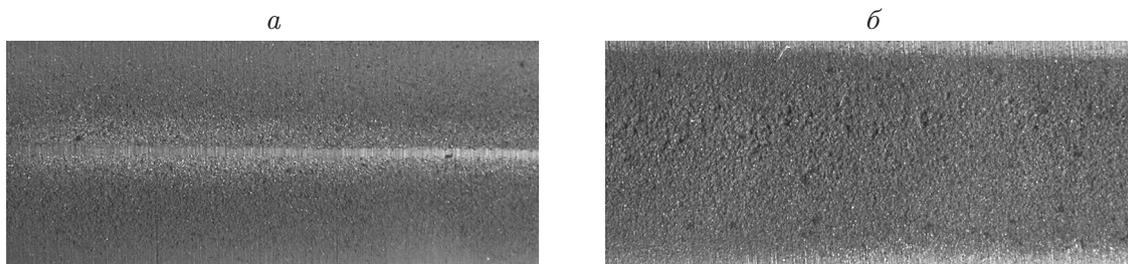


Рис. 6. Полоса напыления из частиц меди диаметром $d_p = 0,5 \div 1,5$ мкм: *а* — при перемещении сопла в направлении вдоль пилона, *б* — при перемещении сопла в направлении, перпендикулярном пилону

На рис. 6 показаны полосы напыления из высокодисперсных частиц меди диаметром $d_p = 0,6 \div 1,5$ мкм. При перемещении подложки вдоль пилона (система крепления иглы) в центре покрытия наблюдается светлая полоса (см. рис. 6, *а*), соответствующая отсутствию покрытия, вследствие наличия тени от пилона. При перемещении подложки в направлении, перпендикулярном пилону, получается равномерное покрытие (см. рис. 6, *б*). Предварительный анализ покрытий показал высокий уровень их адгезионно-когезионной прочности.

Заключение. Проведены расчеты движения одиночных частиц при натекании сверхзвуковой струи на преграду с иглой в условиях, близких к условиям ХГН. Анализ полученных траекторий, координат и скоростей соударения частиц с преградой показывает, что применение схемы с иглой обеспечивает более благоприятные для ХГН малоинерционными частицами (диаметром $0,3 \div 1,0$ мкм) условия их соударения с поверхностью по сравнению со схемой напыления без иглы, в частности, позволяет существенно увеличить скорость соударения частиц с преградой. Для практической реализации предложена схема с иглой, жестко связанной с соплом.

Авторы выражают благодарность Г. В. Трубачеву за помощь в проведении экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алхимов А. П. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / А. П. Алхимов, В. Ф. Косарев, С. В. Клинков, В. М. Фомин. М.: Физматлит, 2010.

2. **Яненко Н. Н., Алхимов А. П., Нестерович Н. И. и др.** Изменение волновой структуры при обтекании тел сверхзвуковым двухфазным потоком // Докл. АН СССР. 1981. Т. 260, № 4. С. 821–825.
3. **Пат. 2353706 РФ, МПК С23С 24/04, С23С 28/02.** Способ изготовления функциональной поверхности / А. П. Алхимов, В. М. Фомин, В. Ф. Косарев, Ю. Н. Артеменко, А. А. Парщиков, В. Г. Гиммельман, Г. С. Кучинский, А. П. Мозгов, Е. Б. Кабанов, С. М. Бондаренко. № 2007114942/02; Заявл. 20.04.07; Оpubл. 27.04.09, Бюл. № 12.
4. **Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Клинков С. В. и др.** Формирование конических отрывных зон при натекании сверхзвуковой струи на преграду в условиях ХГН // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 2. С. 257–263.
5. **Launder В. Е.** Lectures in mathematical models of turbulence / В. Е. Launder, D. В. Spalding. L.: Acad. Press, 1972.
6. **Morsi S. A., Alexander A. J.** An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems // J. Fluid Mech. 1972. V. 55, pt 2. P. 193–208.

Поступила в редакцию 14/II 2012 г.
