

ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ

PACSnumbers: 07.05.Tr, 45.50.-j, 47.10.A-, 47.27.nf, 47.40.Ki, 81.15.Cd, 81.20.Rg, 81.65.Ps

Моделирование течения газа с твёрдыми частицами в коротком сопле

А. И. Долматов, А. В. Бильчук*

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»,
ул. Чкалова, 17,
61070 Харьков, Украина
*Государственная авиационная служба Украины,
просп. Победы, 14,
01135 Киев, Украина*

Проведено математическое моделирование трёхмерного течения газа с твёрдыми частицами в коротком осесимметричном сопле Лаваля и процесса взаимодействия потока с твёрдой поверхностью подложки. Получено пространственное распределение параметров среды в рабочей области. Установлены некоторые базовые закономерности, влияющие на эффективность процесса напыления, равномерность распределения частиц в потоке, гидравлические потери при течении газа в сопле и на свободном участке.

Ключевые слова: напыление, двухфазный поток, математическое моделирование, сверхзвуковое течение, сопло Лаваля.

Проведено математичне моделювання тривимірної течії газу з твердими частинками в короткому вісесиметричному Лавалевому соплі та процесу взаємочину потоку з твердою поверхнею підкладки. Одержано просторовий розподіл параметрів середовища в робочій області. Встановлено де-

Corresponding author: Anatoliy Ivanovych Dolmatov
E-mail: t.loza@khai.edu

*National Aerospace University 'Kharkiv Aviation Institute',
17 Chkalov Str., 61070 Kharkiv, Ukraine
*State Aviation Administration of Ukraine,
14 Peremohy Ave., 01135 Kyiv, Ukraine*

Citation: A. I. Dolmatov and O. V. Bilchuk, Modelling of Gas Flow with Solid Particles in a Short Nozzle, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 9: 1257–1271 (2018) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.40.09.1257.

які базові закономірності, що впливають на ефективність процесу напорошення, рівномірність розподілу частинок у потоці, гідравлічні втрати при течії газу в соплі та на вільній ділянці.

Ключові слова: напорошення, двофазний потік, математичне моделювання, надзвукова течія, Лавалево сопло.

Mathematical modelling of both the three-dimensional gas flow with solid particles in a short axisymmetric Laval nozzle and the process of interaction of flow with a solid-substrate surface is carried out. The spatial distribution of the parameters of the medium in the working region is obtained. Some basic regularities influencing on the efficiency of the sputtering process, the uniformity of the distribution of particles in the flow, hydraulic losses due to gas flow in the nozzle and within the free section are established.

Key words: sputtering, two-phase flow, mathematical modelling, supersonic flow, Laval's nozzle.

(Получено 24 апреля 2018 г.; окончат. вариант — 25 августа 2018 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Основной научно-исследовательской задачей настоящей работы является получение распределения параметров в проточной части сопла-напылителя, в непосредственной окрестности подложки-мишени и в присоединённой области течения при напылении мелкодисперсной порошковой смеси на твёрдую поверхность при сверхзвуковом истечении воздушно-порошковой смеси из форсунки напылителя. Для решения поставленной задачи используются методы математического моделирования трёхмерного вязкого сжимаемого газа с твёрдыми частицами в рабочей области, включающей в себя проточную часть короткого сопла-напылителя, свободной зоны между соплом и подложкой-мишенью и дополнительной присоединённой областью течения в окрестности твёрдых поверхностей сопла и мишени. Основой применяемых методов является математическая модель, включающая в себя систему уравнений неразрывности, Навье–Стокса, энергии, Редлиха–Квонга, импульса и энергии движения твёрдых недеформируемых частиц, баллистические уравнения траекторий движения частиц в градиентном потоке, критериальные уравнения прилипания при неупругом ударе и уравнения теплопроводности и теплового потока в твёрдой среде [1–3]. Для решения системы дифференциальных уравнений с частными производными при известных граничных условиях первого рода на проникаемых поверхностях и третьего рода на твёрдых поверхностях, ограничивающих расчётную область, используется метод контрольных объёмов, адаптированный к расчёту течения двухфазной среды. Для аппроксимации диффе-

ренциальных уравнений алгебраическими расчётное пространство дискретизировано структурированными гексагональными сетками мультиблоковой топологии с дополнительными законами распределения ячеек вблизи твёрдых поверхностей для адекватного моделирования пограничного слоя. Для адаптации геометрической модели к конечно-разностным схемам, расчётах течения и обработки результатов использовался специализированный многофункциональный САЕ-пакет высокого уровня ANSYS CFX 16.2.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ГЕОМЕТРИЯ РАСЧЁТНОЙ ОБЛАСТИ

Проточная часть короткого сопла представляет собой осесимметричное конфузор-конфузорное сопло Лавала с малым углом расширения сверхзвуковой части и цилиндрической камерой на входе, через которую поступает сжатый воздух, служащий носителем рабочего тела при напылении покрытия. К боковой поверхности цилиндрической камеры примыкает единственный цилиндрический канал, служащий для подвода воздушно-порошковой смеси к основному воздушному потоку перпендикулярно оси сопла Лавала и цилиндрической камеры (рис. 1).

Подложка-мишень расположена на расстоянии 25 мм от выходного среза сопла форсунки перпендикулярно оси сопла и представляет собой гладкую твёрдую металлическую поверхность. Воздушно-порошковая смесь, поступающая в точке ввода порошка (рис. 1),

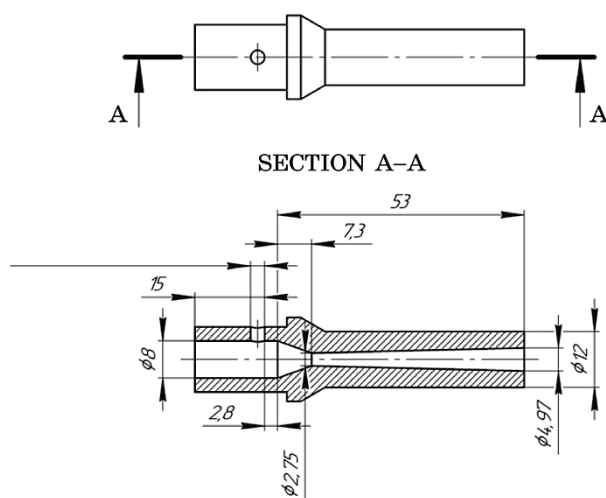


Рис. 1. Схема проточной части короткого сопла.

Fig. 1. Diagram of the short nozzle flowing part.

содержит твёрдые частицы с нормальным распределением размеров в диапазоне 30–80 мкм при медианном диаметре частицы 45 мкм. Массовый расход твёрдой фракции составляет 2 г/с при статическом давлении воздуха в воздушном и воздушно-порошковом входных каналах 9 атм.

Течение воздушно-порошковой смеси после истечения из сопла и столкновения с мишенью включает значительную присоединённую область, в которой наблюдаются возмущения параметров среды вследствие движения высокоэнергетического потока воздуха с остаточными твёрдыми частицами в атмосферной среде.

Для адекватного задания граничных условий первого рода на выходе из расчётной области, представляющей собой проницаемую границу с атмосферным давлением и нормальной по отношению к границе скорости движения среды, необходимо размещение выходной границы на достаточном удалении от среза сопла, поскольку релаксация давления имеет ограниченную скорость и требует известного пространства для установления нулевого градиента статического давления и выравнивания такового с атмосферным. В связи с этим при моделировании выходная граница была размещена на расстоянии 250 мм от среза сопла; дополнительная проницаемая граница была размещена параллельно мишени-подложке на расстоянии 50 мм от среза сопла.

Вследствие достаточно сложной пространственной структуры расчётной области и вместе с тем высокими требованиями к качеству и степени детализации сеток из-за сверхзвукового двухфазного течения, аппроксимация пространства выполнялась структурированными мультиблочными сетками с гексагональными элементами. Предотвращение возникновения изолированных участков течения при этом обеспечено заданием принципа трансляции переменных между контактными гранями блоковой топологии методом *General connection*, способ коррекции переменных — отключён (*None*) [4, 5]. Три отдельных блоковых подгруппы с независимой топологией были созданы для основной проточной части сопла, канала подвода воздушно-порошковой смеси и зоны свободного течения в окрестности внешней поверхности форсунки и подложки-мишени.

Поскольку большая часть элементов моделируемого участка течения представляет собой цилиндрические поверхности, для улучшения качества сетки во всех внутренних каналах применялась технология *O-grid*. По итогам структурирования и дискретизации пространства сгенерирована расчётная сетка, содержащая 1796054 ячейки с наихудшим качеством элемента по интегральному параметру качества 0,624 при минимально допустимом для расчётных сеток данного класса 0,3, т.е. условие качества сетки соблюдено со значительным запасом. Для эффективного моделирования присте-

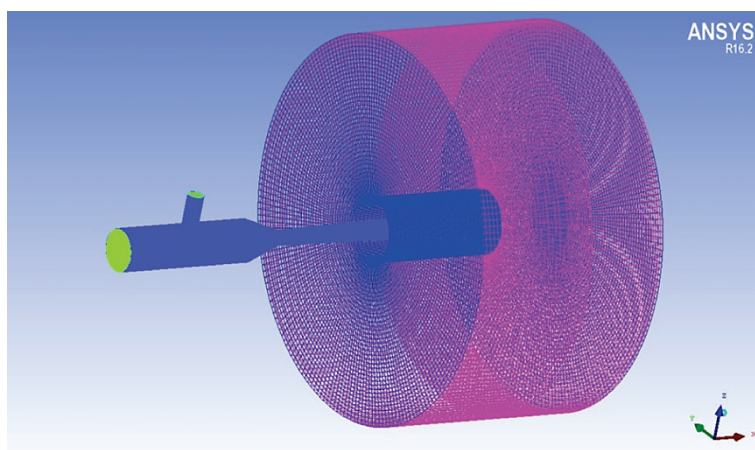


Рис. 2. Конечно-разностная сетка расчётной области течения.

Fig. 2. Finite-difference grid of the calculated flow region.

ночных пограничных слоёв на рёбрах O-grid, начинающихся на твёрдых поверхностях, был задан закон распределения высоты ячеек Hyperbolic с высотой первого (т.е. лежащего непосредственно на твёрдой стенке) слоя 1 мкм и инкрементом высоты 1,2 при общем числе выделенных на погранслои уровней сетки 15, что обеспечивает достаточный уровень параметра y^+ . Для задания граничных условий были созданы типичные поверхности Inlet1 (вход воздуха), Inlet2 (вход порошковой смеси), Outlet (граница выхода), Solid (все твёрдые поверхности), Interface (схемные соединения). Общий вид сетки представлен на рис. 2.

Полученная конечно-разностная сетка была импортирована в пакет ANSYS CFX 16.2 для последующего численного исследования течения газа с твёрдыми частицами.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЁХМЕРНОГО ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ СЖИМАЕМОЙ СРЕДЫ С ТВЁРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Основой численных исследований течения в плоском сопле и взаимодействия потока с подложкой является математическая модель трёхмерного турбулентного движения вязкой сжимаемой двухфазной среды [6, 7]. Используемая математическая модель состоит из уравнения неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x^i} (\rho C^i) = 0,$$

где ρ — плотность, x^i — контравариантные координаты, C^i — контравариантные компоненты скорости среды; уравнения Навье–Стокса:

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{C})}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{C} \otimes \mathbf{C}) = -\nabla p + \nabla\tau + \mathbf{S}_M,$$

где τ — тензор напряжений, вычисляемый как

$$\tau = \mu(\nabla\mathbf{C} + (\nabla\mathbf{C})^T) - \frac{2}{3}\delta\nabla\mathbf{C},$$

где \mathbf{C} — вектор абсолютной скорости, p — статическое давление, \mathbf{S}_M — момент внешних сил, μ — динамическая вязкость среды, δ — дельта-функция Кронекера; уравнения полной энергии:

$$\frac{\partial(\rho h^*)}{\partial t} - \frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{C}h^*) = \nabla(\lambda\nabla T) + \nabla(\mathbf{C}\tau) + \mathbf{C}\mathbf{S}_M + \mathbf{S}_E,$$

где h^* — полная энтальпия, λ — коэффициент теплопроводности, T — статическая температура, \mathbf{S}_E — источниковый член энергии (от химических реакций, внешних тепловых источников и т.д.); уравнения состояния реального газа в форме Редлиха–Квонга:

$$p = \frac{RT}{v - b + c} - \frac{a(T)}{v(v + b)},$$

где R — газовая постоянная, v — удельный объем, a , b , c — параметры уравнения, определяемые как

$$a = a_0 \left(\frac{T}{T_c} \right)^{-n}, \quad a_0 = \frac{0,42747R^2T_c^2}{p_c},$$

$$b = \frac{0,08664RT_c}{p_c},$$

$$c = \frac{RT_c}{p_c + \frac{a_0}{v_c(v_c + b)}} + b - v_c,$$

p_c , T_c , v_c — критические давление, температура и объем газа.

Замыкающими уравнениями служат уравнения модели турбулентности (при вычислениях использовалась SST-модель) и уравнениями кинетической теории движения твёрдых частиц:

$$\tau_{Sij} = -P_S\delta_{ij} + \mu_S \left(\frac{\partial C^i}{\partial x^j} + \frac{\partial C^j}{\partial x^i} - \frac{2}{3}\delta_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x^k} \right) + \zeta_S\delta_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x^k},$$

$$\begin{aligned}
 P_s &= \rho_s r_s \Theta_s (1 + 2(1 + e)g_0(r_s)), \\
 \mu_s &= \mu_{s, \text{col}} + \mu_{s, \text{kin}}, \\
 \mu_{s, \text{col}} &= \frac{4}{5} r_s^2 \rho_s d_p g_0 (1 + e) \sqrt{\frac{\Theta}{\pi}}, \\
 \mu_{s, \text{kin}} &= \frac{5\sqrt{\pi}}{48} \frac{\rho_s d_p}{g_0 (1 + e)} \left(1 + \frac{4}{5} (1 + e)g_0(r_s)\right)^2 \sqrt{\Theta}, \\
 \frac{\partial}{\partial t} n(v, t) + \frac{\partial}{\partial x^i} (C^i(v, t)n(v, t)) &= B_B - D_B + B_C - D_C,
 \end{aligned}$$

где P_s — давление на поверхности твёрдой частицы, μ_s — сдвиговая вязкость для твёрдых частиц, ζ_s — объёмная вязкость твёрдой фазы, $\mu_{s, \text{col}}$ и $\mu_{s, \text{kin}}$ — компоненты столкновений и кинетики сдвиговой вязкости соответственно, r_s — средний радиус твёрдой частицы, e — коэффициент неупругих столкновений твёрдых частиц, $g_0(r_s)$ — функция распределения частиц по радиусам, Θ — пульсационная скорость твёрдых частиц при турбулентном движении среды, $n(v, t)$ — плотность (количественная, м^{-3}) частиц объёма v в момент времени t , B_B — прирост частиц за счёт распада более крупных, D_B — расход частиц за счёт распада на более мелкие, B_C — прирост частиц за счёт слипания более мелких, D_C — расход частиц за счёт слипания с другими частицами. Последние четыре величины в рамках выбранной модели MUSIG определяются как

$$\begin{aligned}
 B_B &= \int_v^{\infty} g(\varepsilon, v) n(\varepsilon, t) d\varepsilon, \\
 D_B &= n(v, t) \int_0^v g(\varepsilon, v) d\varepsilon \\
 B_C &= \frac{1}{2} \int_0^v Q(v - \varepsilon, \varepsilon) n(v - \varepsilon, t) n(v, t) d\varepsilon, \\
 D_C &= n(v, t) \int_0^{\infty} Q(v, \varepsilon) n(\varepsilon, t) d\varepsilon,
 \end{aligned}$$

где $g(\varepsilon, v)$ — удельный расход распада частицы объёмом v на частицы объёмом ε и $v - \varepsilon$; $Q(v, \varepsilon)$ — удельный расход образования из частиц объёмом v и ε частицы объёмом $v + \varepsilon$ [8].

В ходе численных исследований течения были получены результаты в виде пространственных полей параметров, линий тока жидкой среды, траекторий частиц, распределений параметров вдоль контрольных траекторий, а также осреднённые показатели течения

газа в сопле и процесса напыления покрытия.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ТРЁХМЕРНОГО ВЯЗКОГО СЖИМАЕМОГО ГАЗА С ТВЁРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Для расчётов течения в рамках поставленной задачи использовался сольвер CFX SolverManager 16.2. Качественная и количественная достоверность результатов расчётов обеспечена заданным уровнем максимальных невязок компонент скорости и давления, полной энтальпии, кинетической энергии и угловой скорости диссипации турбулентности, а также функции стенки модели турбулентности, который в данной работе был установлен на уровне $MAX = 10^{-4}$, что соответствует возможной погрешности определения всех вышеперечисленных параметров в любой точке расчётного пространства не более 0,5% ; параметров, не рассчитываемых непосредственно — не более 1,2%. График сходимости параметров сошедшейся калькуляции по среднеквадратичным невязкам (напрямую не ограничен-

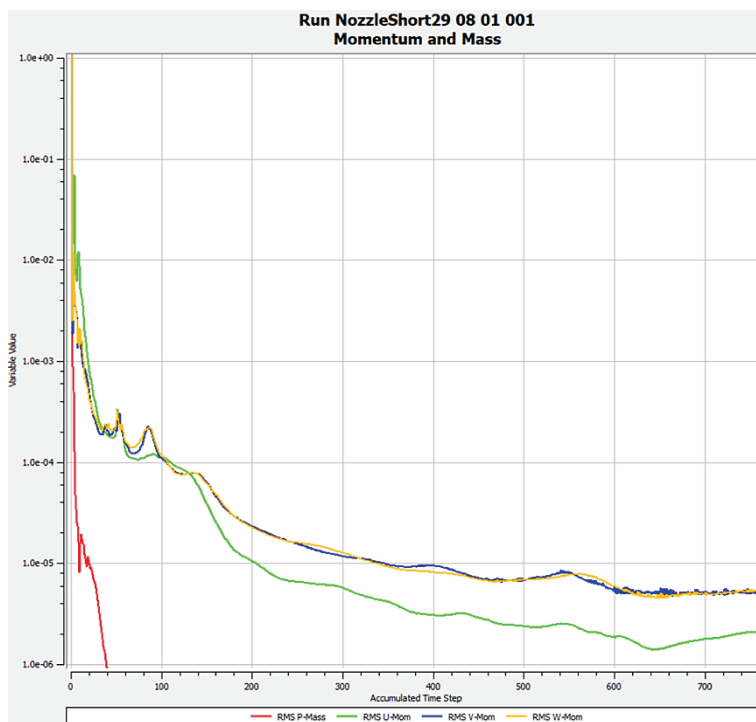


Рис. 3. Процесс сходимости (среднеквадратичные невязки).

Fig. 3. Convergence process (root-mean-square residuals).

ным, максимальное количество итераций установлено равным 1000) представлен на рис. 3.

Как видно из рисунка 3, процесс сходимости является плавным с монотонным убыванием среднеквадратичных невязок компонент скорости и давления по уравнениям неразрывности и Навье–Стокса, что свидетельствует о корректном задании граничных условий и адекватной дискретизации пространства конечно-разностной сеткой. Быстрое достижение заданного уровня невязок по давлению (рис. 3, красная линия) обусловлено высокой точностью предложенной математической модели движения твёрдых частиц; некоторое запаздывание компонент скорости C^x , C^y , C^z (зелёная, синяя и жёлтая линия на графиках соответственно) обусловлено сложной картиной распределения данных параметров вблизи зоны ударного взаимодействия потока с подложной напротив среза сопла и пространственной формы траекторий неприлипших твёрдых частиц.

На рисунке 4 представлен крупный план траекторий частиц в дозвуковой и сверхзвуковой частях короткого сопла.

Как видно из рисунка 4, асимметричный подвод дисперсного рабочего тела не обеспечивает равномерное заполнение критического сечения порошком, а ведёт к скоплению частиц в расположенном со стороны входного канала полусекторе. В сверхзвуковой части сопла при дальнейшем разгоне происходит некоторая гомогенизация потока, однако полностью равномерного распределения не происхо-

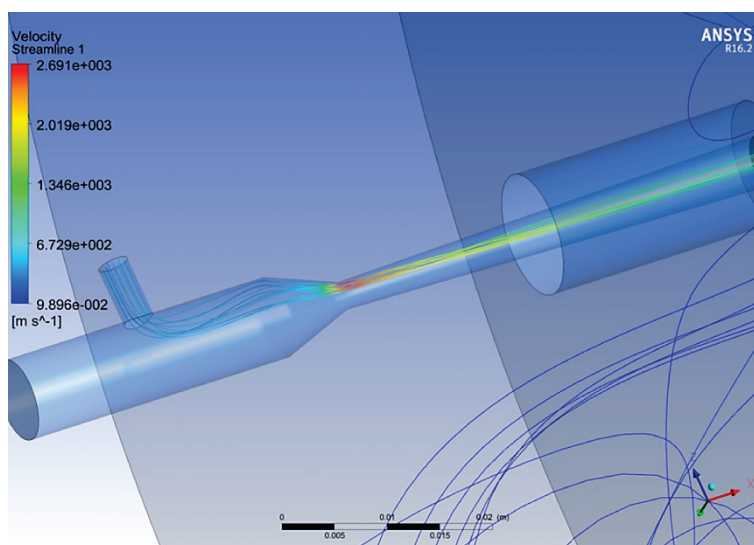


Рис. 4. Движение частиц порошка в коротком сопле.

Fig. 4. Movement of powder particles in the short nozzle.

дит вплоть до среза сопла, что, очевидно, сказывается также на равномерности напыления на поверхность. Максимальная скорость твёрдой частицы в сопле составляет 2691 м/с в первой трети расширяющейся (сверхзвуковой) части сопла, причём на последнем участке течения в сопле происходит торможение как несущего потока, так и напыляемых частиц вследствие вязкого трения (рис. 4), что свидетельствует о необходимости либо сокращения, либо перепрофилирования сверхзвуковой части сопла Лавала для достижения более высоких ударных скоростей напыления.

На расчётном режиме процент прилипания к подложке напыляемых частиц составляет, согласно данным моделирования, 92% с нелинейным распределением по поверхности с асимметричным отклонением к верхней части мишени, что соответствует установленному факту неравномерного распределения твёрдых частиц в несущем потоке. Траектории частиц, вследствие частично неупругого удара продолжающих движение в свободной части присоединённого течения, свидетельствуют о возникновении вблизи ударной зоны турбулентных вихрей различного масштаба и интенсивности, в которых происходит остаточное торможение твёрдых частиц. Генерируемые вихри являются крупномасштабными с асимметричным относительно оси сопла распределением интенсивности и масштаба, а также, очевидно, нестационарным характером течения в целом вследствие миграции вихрей и периодической перестройкой течения. Степень расширения поперечного сечения несущего течения (соответствующая степени рассеивания частиц и площади напыления на подложке) составляет 1,057 при расстоянии от среза сопла до мишени 25 мм, что свидетельствует о хорошей кучности напы-

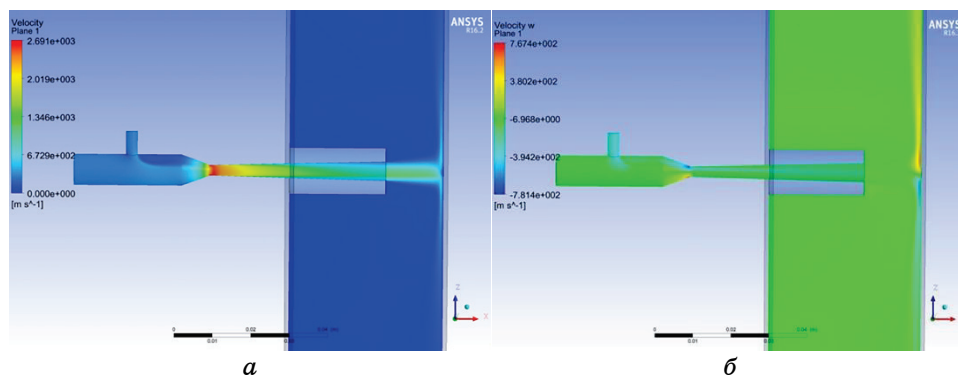


Рис. 5. Скорость потока в осевом сечении короткого сопла: абсолютная скорость (а), радиальная компонента (б).

Fig. 5. Flow velocity in the axial section of the short nozzle: absolute velocity (a), radial component (b).

ления и возможности напыления, при необходимости, с большего расстояния (закон увеличения степени расширения несущего течения представляет собой проблему для дальнейших численных исследований и не может быть установлен на основании моделирования процесса в рамках поставленных в работе задач).

Основной поток воздуха в дозвуковой части сопла испытывает значительную деформацию вблизи точки подвода порошка, приводящую к нерасчётному увеличению скорости в цилиндрической дозвуковой части до 321 м/с, что несколько увеличивает гидравлические потери. Интенсификация вихревого течения в нижней части расчётной области свидетельствует о развитой нестационарности течения, способной оказывать существенное влияние на показатели процесса напыления порошка.

На рисунках 5–7 представлены поля параметров потока. Как видно из рис. 5, б и рис. 7, в непосредственной окрестности пересечения канала подвода порошка и цилиндрической части сопла существует участок вихревого смешения потоков с повышенными гидравлическими потерями и неоптимальным распределением радиальной скорости. Данный эффект обусловлен, во-первых, асимметричным характером подачи воздушно-порошковой смеси в проточную часть сопла, а во-вторых, очень большим углом смешения потоков (90 градусов) из-за ортогональности осей сопла и канала подачи порошка. Перпендикулярное направление впрыска порошка приводит также к возникновению на стенке дозвуковой кониче-

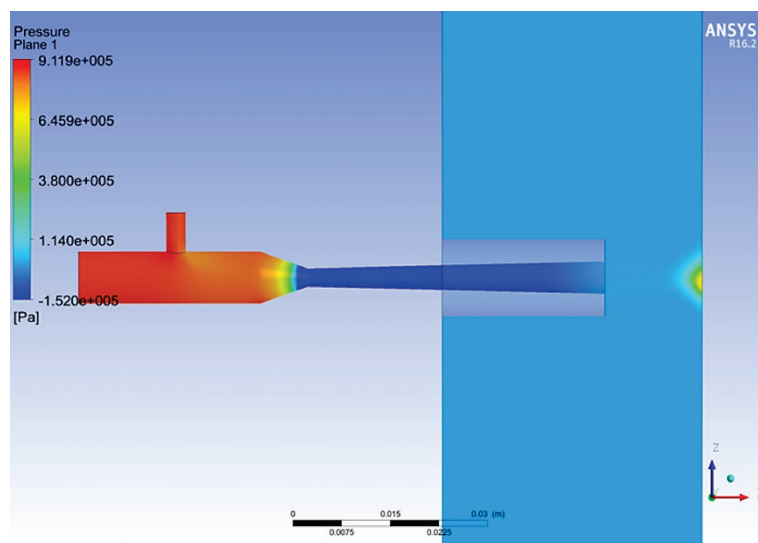


Рис. 6. Статическое давление.

Fig. 6. Static pressure.

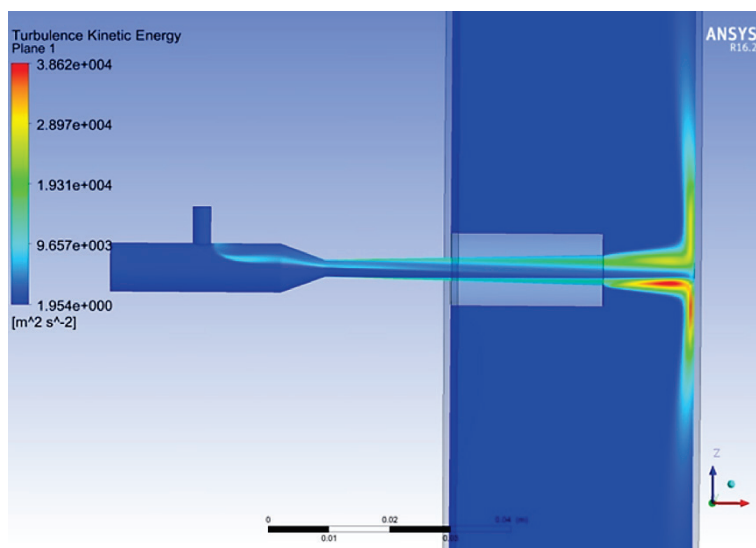


Рис. 7. Кинетическая энергия турбулентности.

Fig. 7. The turbulence kinetic energy.

ской части сопла участка заторможенного течения, увеличивающей гидравлические потери и неравномерность потока (рис. 5, а).

Статическое давление в сверхзвуковой части сопла снижается до 0,5 атм. (рис. 6, при расчётах в качестве базового использовалось значение давления 2 атм., минимум относительной шкалы — 1,5 атм. соответствует 0,5 атм.). В ударной зоне на поверхности подложки наблюдается практически симметричное увеличение статического давления потока до 8,5 атм. в большей части тени сопла и до 6–6,5 атм. на периферии тени сопла (очевидно, вследствие влияния пристеночного пограничного слоя, рис. 6). Согласно данным расчётов, на участке со статическим давлением 8,2 атм. и выше наблюдается на 28% выше степень прилипания частиц, чем в зоне со статическим давлением потока от 5,8 до 6,5 атм., причём данный эффект объясняется не только более высокой прижимной силой при баллистическом ударе твёрдой частицы о поверхность подложки, но и уменьшением углов атаки частиц на периферии тени сопла на подложке вследствие отклонения траекторий движения от ортогональных.

Кинетическая энергия турбулентности, представленная на рис. 7, обладает ярко выраженной пространственной асимметричностью не только внутри сопла, но и вблизи ударной зоны на поверхности подложки, что также связано с неравномерным распределением твёрдых частиц в сечении среза сопла и несимметричным профилем скорости газообразной среды. В целом зоне с меньшей энергией

турбулентности соответствуют меньшие гидравлические потери и большая абсолютная плотность прилипания частиц на поверхность подложки, однако при анализе относительной доли отражаемых от поверхности частиц порошка установлено, что большая абсолютная плотность прилипания обусловлена повышенной концентрацией порошка в данной зоне течения. Зависимость же результата соударения с поверхностью от кинетической энергии турбулентности носит нелинейный характер, и в целом увеличение кинетической энергии турбулентности в непосредственной окрестности ударной зоны, в особенности — в пограничном слое, в большей части ударной зоны приводит к росту неупругих (конъюгационных) соударений. Таким образом, наряду со снижением неравномерности потока для повышения качества напыления при использовании короткого сопла Лавала возможны методы, основанные на увеличении турбулентности в непосредственной окрестности подложки.

На рисунке 8 представлено распределение скорости в продольном направлении от входа основного потока воздуха до подложки.

Как видно из рисунка 8, распределение скорости на оси сопла имеет более гладкий характер, чем в сечении, близком к каналу ввода порошка. На подложке также наблюдаются различия в процессе ударного торможения потока, оказывающие принципиальное влияние на процесс напыления (в периферийном сечении наблюдается неполное торможение потока с частичным разгоном у поверхности из-за вихря, обусловленного неравномерным распределением

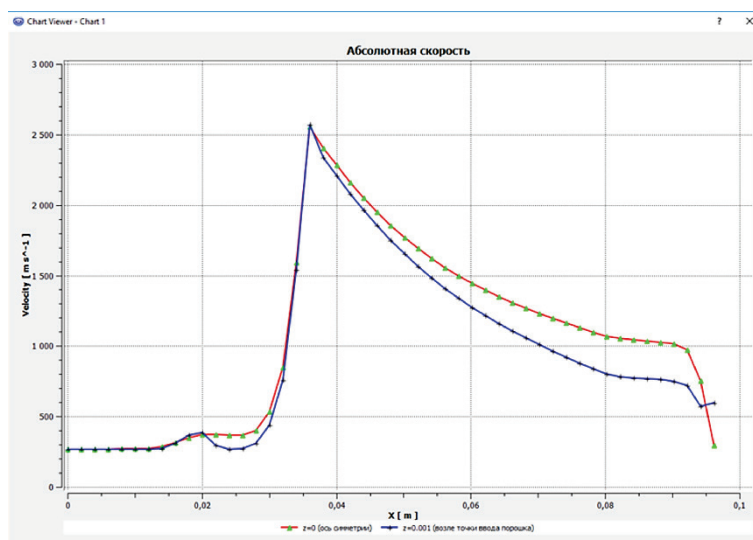


Рис. 8. Продольное распределение скорости.

Fig. 8. Longitudinal velocity distribution.

частиц и деформацией линий тока). Скорость течения в сверхзвуковой части сопла также изменяется в радиальном направлении, уменьшаясь от оси к периферии ввода порошка и практически не изменяясь между осью и противоположной стенкой (разумеется, исключая погранслои на стенке), что приводит к уменьшению скоростного напора и дополнительному снижению эффективности напыления на соответствующих участках.

Таким образом, при помощи математического моделирования трёхмерного течения газа с твёрдыми частицами в коротком осесимметричном сопле Лавала и процесса взаимодействия потока с твёрдой поверхностью подложки получено пространственное распределение параметров среды и установлены некоторые базовые закономерности, влияющие на эффективность процесса напыления, равномерность распределения частиц в потоке, гидравлические потери при течении газа в сопле и на свободном участке. На основании полученных данных возможно дальнейшее исследование процесса сверхзвукового напыления и усовершенствование конструкции и рабочего процесса в коротком осесимметричном сопле Лавала.

Для улучшения качества напыления (в частности, предотвращения частично неупругих ударов напыляемых частиц о подложку со сколами поверхности и возникновения участков с неравномерностями напыления) следует добиваться гомогенизации несущей струи на срезе сопла со степенью гомогенности на ниже 85–88%, что позволит обеспечить давление на подложке в тени сопла в диапазоне 8,2–9,4 атм., достаточное для равномерности напыляемого покрытия (неравномерность глубины напыления при этом не превышает 85–120 мкм, т.е. менее 3 диаметров напыляемых частиц). Поскольку на участках с давлением ниже 6,5 атм. может наблюдаться, согласно расчётам, неравномерность напыления до 200 мкм, в особенности — при условии низкой кинетической энергии турбулентности, целесообразно модернизировать сопло Лавала путём организации симметричной подачи напыляемого порошка в поток с четырёх направлений, симметрично расположенных вокруг оси сопла. Также следует рассмотреть возможность дополнительного повышения кинетической энергии турбулентности газодинамическими методами для создания у обрабатываемой подложки пристеночных зон с энергией турбулентности не ниже $2600 \text{ м}^2/\text{с}^2$ (при выбранных в работе параметрах напыления) на участках, близких к оси симметрии сопла, что позволит увеличить количество прилипающих частиц и повысить качество наносимого покрытия в целом.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Л. И. Седов, *Механика сплошной среды* (Москва: Наука: 1970).

2. Г. Н. Абрамович, *Прикладная газовая динамика* (Москва: Наука: 1968).
3. F. M. White, *Fluid Mechanics* (New York: McGraw Hill: 2011).
4. H. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (Harlow: Prentice Hall: 2007).
5. H. Lomax, Thomas H. Pulliam, and David W. Zingg, *Fundamentals of Computational Fluid Dynamics* (NASA Ames Research Center: 1999).
6. Г. Шлихтинг, *Теория пограничного слоя* (Москва: Наука: 1974).
7. F. S. Sherman, *Viscous Flow* (McGraw-Hill College: 1990).
8. D. C. Wilcox, *Turbulence Modelling for CFD* (DCW Industries: 2006).
9. J. D. Anderson, *Modern Compressible Flow* (Tata McGrawhill India Pvt Ltd: 2012).
10. P. Davidson, *Turbulence: an Introduction for Scientists and Engineers* (Oxford University Press: 2015).

REFERENCES

1. L. I. Sedov, *Mekhanika Sploshnoy Sredy* [Continuum Mechanics] (Moscow: Nauka: 1970) (in Russian).
2. G. N. Abramovich, *Prikladnaya Gazovaya Dinamika* [Applied Gas Dynamics] (Moscow: Nauka: 1968) (in Russian).
3. F. M. White, *Fluid Mechanics* (New York: McGraw Hill: 2011).
4. H. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (Harlow: Prentice Hall: 2007).
5. H. Lomax, Thomas H. Pulliam, and David W. Zingg, *Fundamentals of Computational Fluid Dynamics* (NASA Ames Research Center: 1999).
6. G. Shlikhting, *Teoriya Pogranichnogo Sloya* [The Boundary Layer Theory] (Moscow: Nauka: 1974) (in Russian).
7. F. S. Sherman, *Viscous Flow* (McGraw-Hill College: 1990).
8. D. C. Wilcox, *Turbulence Modelling for CFD* (DCW Industries: 2006).
9. J. D. Anderson, *Modern Compressible Flow* (Tata McGrawhill India Pvt Ltd: 2012).
10. P. Davidson, *Turbulence: an Introduction for Scientists and Engineers* (Oxford University Press: 2015).