

УДК 621.793.71

**Исследование влияния геометрии газодинамического тракта соплового насадка на температуру и скорость частиц в установках для сверхзвукового газопламенного напыления**

*Ходыкин А.А., аспирант  
кафедры «Ракетные двигатели»,  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Воронцов А.В., д.т.н., профессор  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[daj@bmstu.ru](mailto:daj@bmstu.ru)*

**ВВЕДЕНИЕ**

Являясь одним из наиболее интересных направлений конверсионного применения ракетных двигателей, технология сверхзвукового газопламенного напыления (СГН) находит все более широкое применение.

Использование метода сверхзвукового газопламенного напыления позволяет получать покрытия с характеристиками, недостижимыми для традиционных и более распространенных процессов газотермического напыления, таких как газопламенное проволочное и порошковое напыление, плазменное напыление, электродуговая металлизация и др.

Основным элементом сверхзвуковой технологической установки является сверхзвуковая горелка, которая по сути представляет собой микроракетный двигатель с присоединенным насадком для ускорения частиц и устройством подачи порошкообразного материала (ПМ).

Сочетание высоких скоростей частиц (до 700 м/с), равномерного нагрева и малого времени пребывания позволяет получать очень плотные покрытия с хорошей адгезией (до 80 МПа и выше). Свойства покрытия являются более предсказуемыми и покрытия имеют хорошую гомогенную микроструктуру.

В настоящей работе аппарат численных методов применен для исследования влияния диаметра соплового насадка установки СГН на скорость и температуру напыляемых частиц. Целью исследования являлось расчетное определение оптимальной

геометрии соплового насадка. Расчеты проведены для частиц диаметром 20 мкм, материал частиц - 88WC 12Co.

Расчеты проводились с использованием программного комплекса HyperFLOW2D.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Расчеты характеристик сверхзвукового двухфазного потока были выполнены для трех различных сопловых насадков с диаметрами трактов 9 мм, 10 мм, 11 мм.

Газодинамический тракт горелки включает в себя сопло Лавала (с конической конфузорной частью и конической диффузорной частью) и цилиндрический ускорительный сопловой насадок, в котором происходит нагрев и ускорение частиц конденсированной фазы (рис. 1). Высокотемпературное рабочее тело генерируется камерой сгорания. Расчеты проведены для топливной пары этанол–кислород, давление в камере сгорания составляет 0,7 МПа.



Рис. 1. Схема технологической установки для сверхзвукового газопламенного напыления покрытий: 1 - камера сгорания; 2 - сопло; 3 - сопловой насадок

Расчеты выполнены в двумерной осесимметричной постановке с использованием прямоугольной равномерной сетки с числом ячеек 2964 по осевой и 800 по радиальной координате.

Частицы конденсированной фазы вводятся в сечении среза диффузорной части сопла в осевом направлении.

В программном комплексе HyperFLOW2D течение сверхзвукового двухфазного потока описывается с помощью комбинированного метода Эйлера–Лагранжа. Система уравнений Навье–Стокса для газа [1], имеет вид:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial(A-R)}{\partial x} + \frac{\partial(B-X)}{\partial r} + \frac{F}{r} = S,$$

$$\text{где } \sigma = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ e \\ \rho Y_1 \\ \vdots \\ \rho Y_{i-1} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ \rho uv \\ (e + p)u \\ \rho Y_1 u \\ \vdots \\ \rho Y_{i-1} u \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ p + \rho v^2 \\ (e + p)v \\ \rho Y_1 v \\ \vdots \\ \rho Y_{i-1} v \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xr} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xr} + q_x \\ \rho D_1 \frac{\partial Y_1}{\partial x} \\ \vdots \\ \rho D_{i-1} \frac{\partial Y_{i-1}}{\partial x} \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xr} \\ \tau_{rr} \\ u\tau_{xr} + v\tau_{rx} + q_r \\ \rho D_1 \frac{\partial Y_1}{\partial r} \\ \vdots \\ \rho D_{i-1} \frac{\partial Y_{i-1}}{\partial r} \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv - \tau_{xr} \\ \rho v^2 - \tau_{rr} + \tau_{\theta\theta} \\ (e + p)v - u\tau_{xr} - v\tau_{rx} - q_r \\ \rho Y_1 v - \rho D_1 \frac{\partial Y_1}{\partial r} \\ \vdots \\ \rho Y_{i-1} v - \rho D_{i-1} \frac{\partial Y_{i-1}}{\partial r} \end{bmatrix}, \quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ S_U \\ S_V \\ S_E \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right), \quad \tau_{rr} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3}\mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right),$$

$\tau_{\theta\theta} = 2\mu \frac{v}{r} - \frac{2}{3}\mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right)$ ,  $\tau_{xr} = \tau_{rx} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$  — вязкие напряжения для газового потока,

$q_x = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \sum_{i=1}^{N_s} D_i h_i \frac{\partial(\rho Y)_i}{\partial x}$ ,  $q_r = \lambda \frac{\partial T}{\partial r} + \sum_{i=1}^{N_s} D_i h_i \frac{\partial(\rho Y)_i}{\partial r}$  — тепловые потоки в осевом и радиальном

направлениях,  $e = \frac{p}{k-1} + \rho \frac{u^2 + v^2}{2}$  — полная энергия единицы массы газа,  $x$ ,  $r$  — осевая и

радиальные координаты,  $u$ ,  $v$  — осевая и радиальная составляющие скорости газа,  $T$ ,  $p$ ,  $\rho$  —

температура, давление и плотность газа,  $h_i = H_{fi} + \int_{T_0}^T C_{pi} dT$  — энтальпия  $i$ -го компонента газовой

фазы,  $Y_i$ ,  $H_{fi}$  — массовая концентрация и энтальпия образования  $i$ -го компонента газовой фазы,

$C_p$ ,  $D$ ,  $\mu$ ,  $\lambda$  — теплоемкость и коэффициенты диффузии, эффективной вязкости, теплопроводности газа.

Для учета влияния турбулентности использовалась модель Спаларта-Альмараса.

Турбулентная динамическая вязкость при этом выражается следующим образом [2]:

$$\mu_t = \rho \nu_t f_{v1},$$

где  $f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}$ ,  $\chi = \frac{\nu_t}{\nu}$ , а  $\nu$  — кинематическая вязкость.

Турбулентная кинематическая вязкость определяется из уравнения:

$$\frac{\partial(\rho v_t)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} v_t) = \frac{1}{\sigma_v} \left[ \nabla((\mu + \rho v_t) \nabla v_t) + C_{b2} \rho |\nabla v_t|^2 \right] + C_{b1} \rho \tilde{\Omega} v_t - C_{w1} \rho f_w \left( \frac{v_t}{y} \right)^2.$$

Здесь

$$f_{v1} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}},$$

$$\tilde{\Omega} = \Omega + \frac{v_t}{\kappa^2 y^2} f_{v2},$$

$$f_w = g \left[ \frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]^{1/6},$$

$$g = r + C_{w2} (r^6 - r),$$

$$r = \frac{v_t}{\tilde{\Omega} \kappa^2 y^2},$$

где  $\kappa$  – постоянная Кармана,  $g$  – произвольная функция,

$$C_{b1} = 0,1355, C_{b2} = 0,622, \sigma_v = 2/3 c_3, C_{v1} = 7,1, C_{w1} = \frac{C_{b1}}{k^2} + \frac{1 + C_{b2}}{\sigma_v}, C_{w2} = 0,3, C_{w3} = 2, k = 0,4187 -$$

эмпирические коэффициенты замыкания.

Для учета влияния конденсированной фазы на газ используются осредненные по времени источниковые члены  $S_U$ ,  $S_V$  и  $S_e$ , которые вычисляются в соответствии с формулами

$$S_u = \frac{3\rho}{4\rho_P d_P} \sum_{j=0}^{j=n} \left[ \left( \frac{\sum_{i=0}^{i=k} C_x (u - u_P) |u - u_P| \Delta \tau_i}{\sum_{i=0}^{i=k} \Delta \tau_i} \right) \rho_{Pj} \right],$$

$$S_v = \frac{3\rho}{4\rho_P d_P} \sum_{j=0}^{j=n} \left[ \left( \frac{\sum_{i=0}^{i=k} C_x (v - v_P) |v - v_P| \Delta \tau_i}{\sum_{i=0}^{i=k} \Delta \tau_i} \right) \rho_{Pj} \right].$$

$$S_e = \frac{6\lambda}{\rho_P d_P^2} \sum_{j=0}^{j=n} \left[ \left( \frac{\sum_{i=0}^{i=k} Nu (T - T_P) \Delta \tau_i}{\sum_{i=0}^{i=k} \Delta \tau_i} \right) \rho_{Pj} \right].$$

Для описания движения частиц применяется траекторная модель. Изменение параметров частиц по траектории определяется из уравнений движения и уравнения энергии единичной частицы:

$$\frac{du_p}{dt} m_p = F_p C_x \frac{(u - u_p)|u - u_p|}{2} \rho,$$

$$\frac{dv_p}{dt} m_p = F_p C_x \frac{(v - v_p)|v - v_p|}{2} \rho,$$

$$\frac{dT_p}{dt} (m_p C_p) = S_p Nu_p \frac{\lambda(T - T_p)}{d_p},$$

где  $m_p = 1/6 \pi \rho_p d_p^3$  — масса одиночной частицы,  $C_p$ ,  $\rho_p$  — теплоемкость и плотность материала частиц,  $F_p = 1/4 \pi d_p^2$  — площадь миделя частицы,  $C_x$  — коэффициент аэродинамического сопротивления сферической частицы,  $S_p = \pi d_p^2$  — площадь поверхности частицы,  $Nu_p$  — число Нуссельта для частицы,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности газа.

Плотность частиц на  $j$ -ой траектории вычисляется как  $\rho_{pi} = \rho_{p0} r_{0j} / r_j$ , где  $r_j$  — текущая радиальная координата  $j$ -ой траектории частицы.

Коэффициенты аэродинамического сопротивления сферической частицы  $C_x$  и число Нуссельта для частицы вычисляются по следующим зависимостям [3]

$$C_x = \frac{24}{Re_p} \frac{(1 + 0,15 \cdot Re_p^{0,687}) \left[ 1 + \exp\left(-\frac{0,427}{M_p^{4,63}} - \frac{3,0}{Re_p^{0,88}}\right) \right]}{1 + \frac{M_p}{Re_p} \left[ 3,82 + 1,28 \exp\left(-1,25 \frac{Re_p}{M_p}\right) \right]},$$

$$Nu_p = \frac{2,0 + 0,459 Re_p^{0,55} Pr^{0,33}}{1 + 3,42 \frac{M_p (2,0 + 0,459 Re_p^{0,55} Pr^{0,33})}{Re_p Pr}},$$

где  $Re_p = \frac{\rho |\bar{W} - \bar{W}_p| d_p}{\mu}$  — относительное число Рейнольдса,  $M_p = \frac{|\bar{W} - \bar{W}_p|}{a}$  —

относительное число Маха,  $Pr$  — Число Прандтля. Указанные зависимости справедливы для чисел Маха в диапазоне 0 ... 2.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчеты проведены для трех различных сопловых насадков с диаметрами канала 9 мм, 10 мм и 11 мм. В варианте тракта с насадком диаметром 9 мм диффузорная часть сопла переходит в цилиндрический насадок через угловую точку. В остальных вариантах диаметр насадка больше диаметра среза сопла, в результате чего в месте их сопряжения образуется уступ.

На рис. 2 показаны графики изменения параметров газа по длине газодинамического тракта. Пунктиром обозначены сечения ввода частиц и среза насадка. Как видно из графиков, по мере увеличения диаметра насадка происходит падение статического давления газа в насадке, рост средней скорости по длине насадка и падение средней температуры.

Рассмотрим картину течения газа, представленную на полях статического давления (рис. 3), температуры (рис. 4) и скорости (рис. 5). Увеличение диаметра насадка приводит к большему расширению потока, за счет чего происходит снижение статического давления и увеличение осевой скорости газа. В то же время больший уступ при диаметре 11 мм генерирует скачок уплотнения большей интенсивности, который способствует более сильному падению скорости газа за скачком. К срезу насадка скорость, температура и давление газа для всех рассматриваемых вариантов становятся примерно равными. При этом средний уровень температуры газа в насадке диаметром 11 мм заметно ниже. Среднее значение скорости газа для этого насадка незначительно превышает скорость для насадков диаметром 9 и 10 мм.

На рис. 5, 6 представлены графики изменения осевой скорости и температуры частиц по длине тракта для рассматриваемых вариантов сопловых насадков. Наибольшее значение скорости частицы достигают в насадке диаметром 9 мм. Это связано с тем, что на начальном участке движения частицы не проходят столь интенсивного скачка уплотнения, как в насадке диаметром 11 мм. Ускорение частицы при этом происходит более равномерно. Максимальное значение скорости частицы составляет примерно 780 м/с, что выше скорости в насадке диаметром 11 мм.

Характер зависимостей температуры частиц по длине газодинамического тракта соответствует характеру зависимостей температур газа. Наибольшую температуру частицы имеют в насадке диаметром 9 мм. При этом к концу траектории температуры частиц в насадках диаметром 10 и 11 мм практически сравниваются.

Температурные зависимости имеют ярко выраженные горизонтальные участки на уровне 1765 К, соответствующем температуре плавления кобальта. Длина этих участков тем больше, чем больше диаметр насадка. Это связано с тем, что по мере роста диаметра насадка скорость частиц в нем падает, соответственно возрастает и время их пребывания.

Полученные результаты показали значительное влияние диаметра насадка сверхзвуковой технологической установки на скорость и температуру частиц.

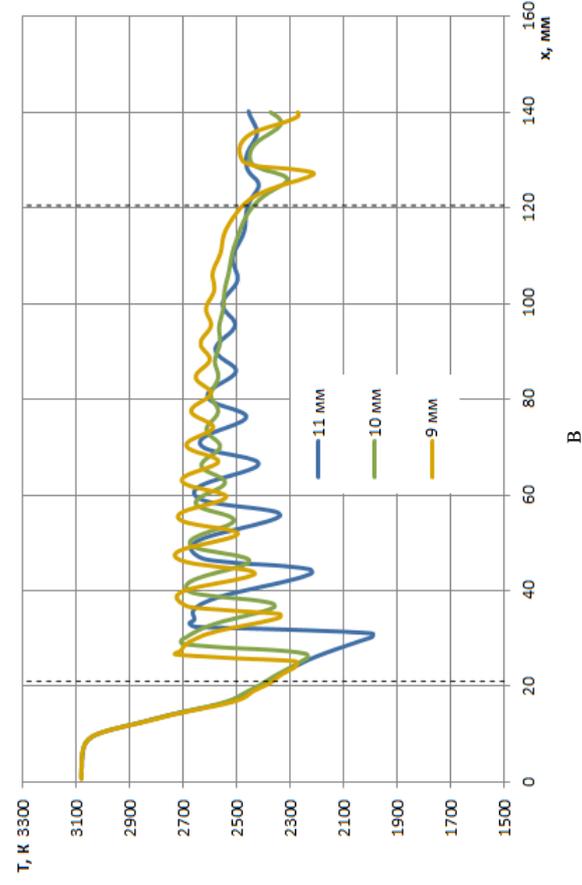
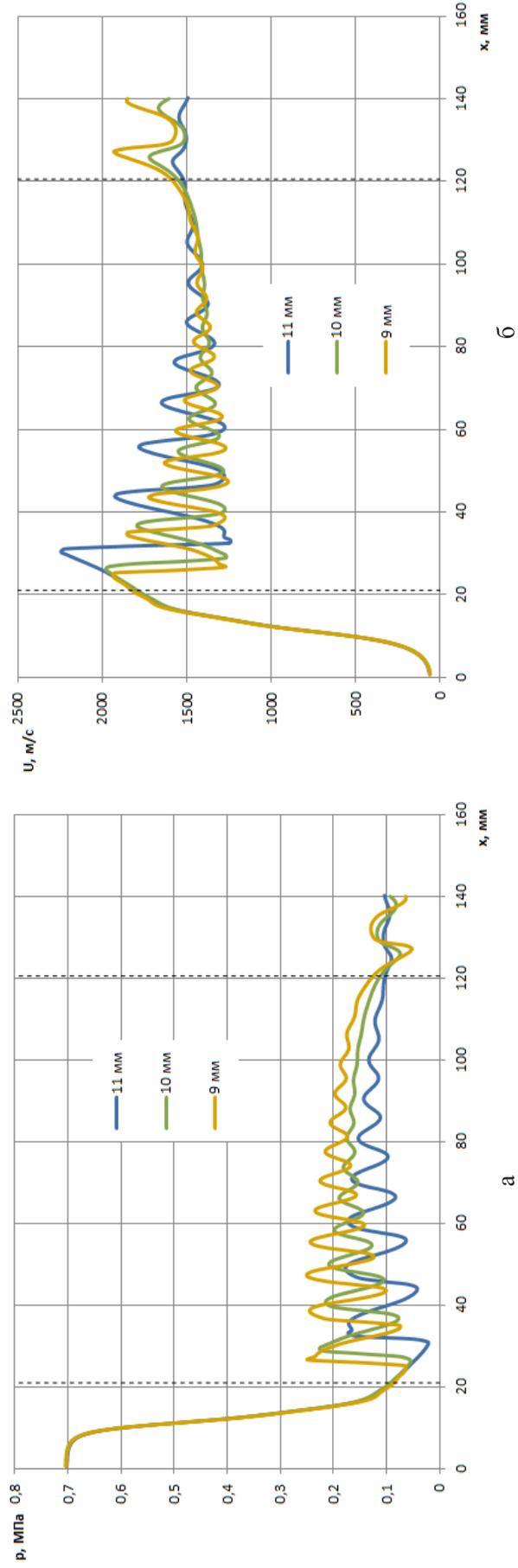


Рис. 2. Распределения параметров газа по длине соплового насадка:  
 а - давление, б - скорость, в - температура

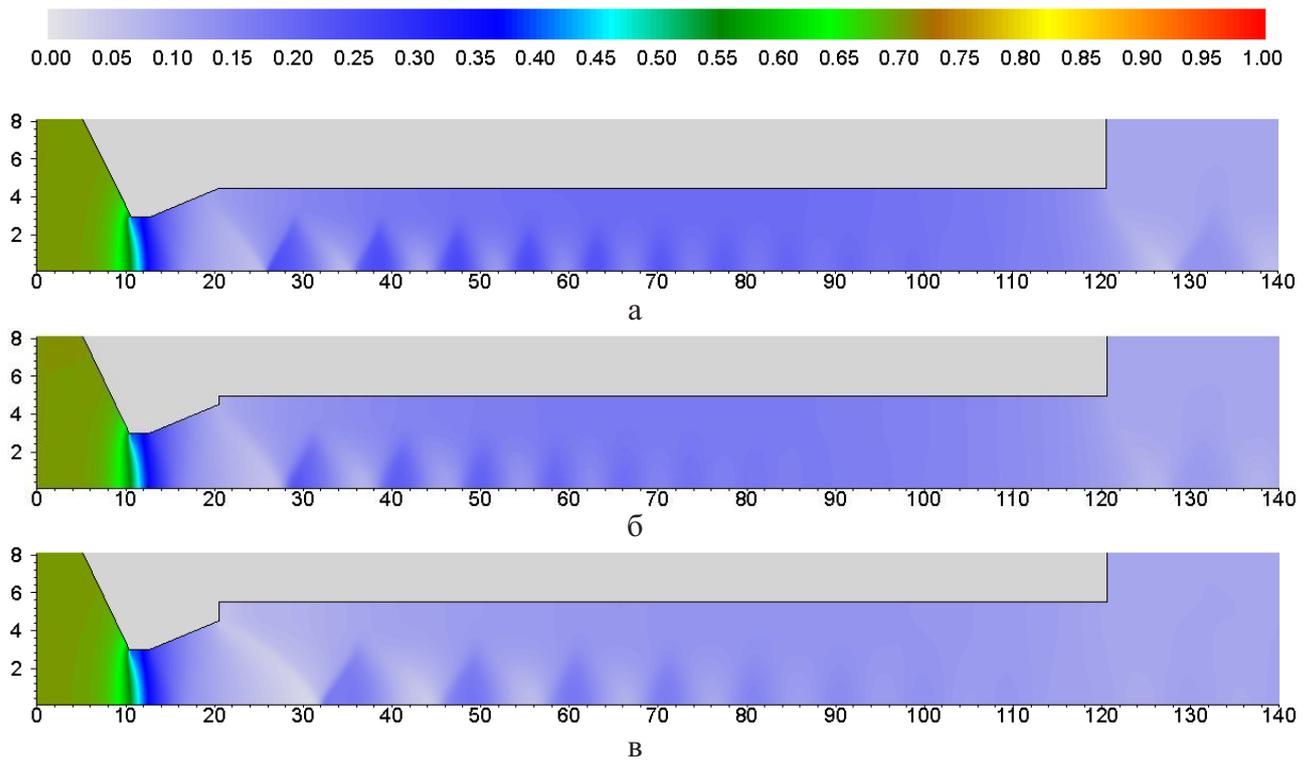


Рис. 3. Поля распределения статического давления газа, МПа для насадков диаметром:  
а – 9 мм, б – 10 мм, в – 11 мм

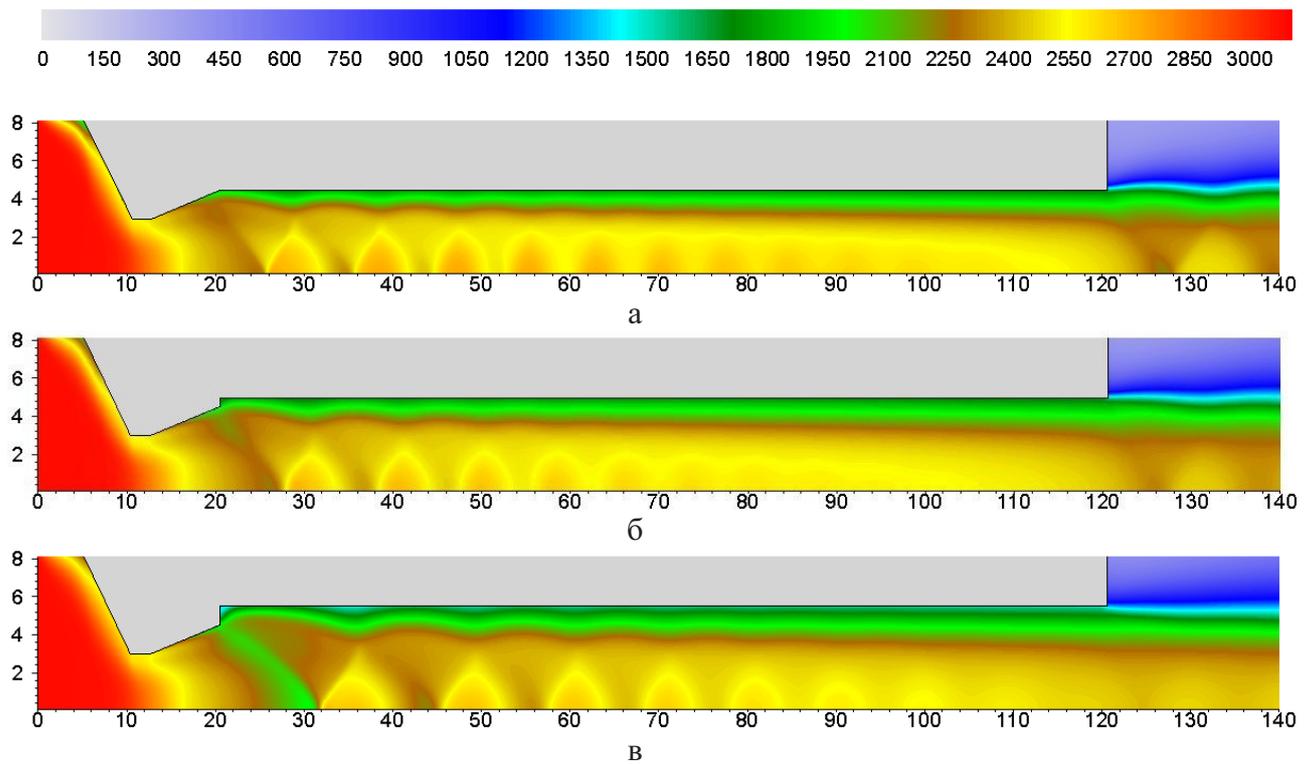


Рис. 4. Поля распределения температур газа, К для насадков диаметром:  
а – 9 мм, б – 10 мм, в – 11 мм

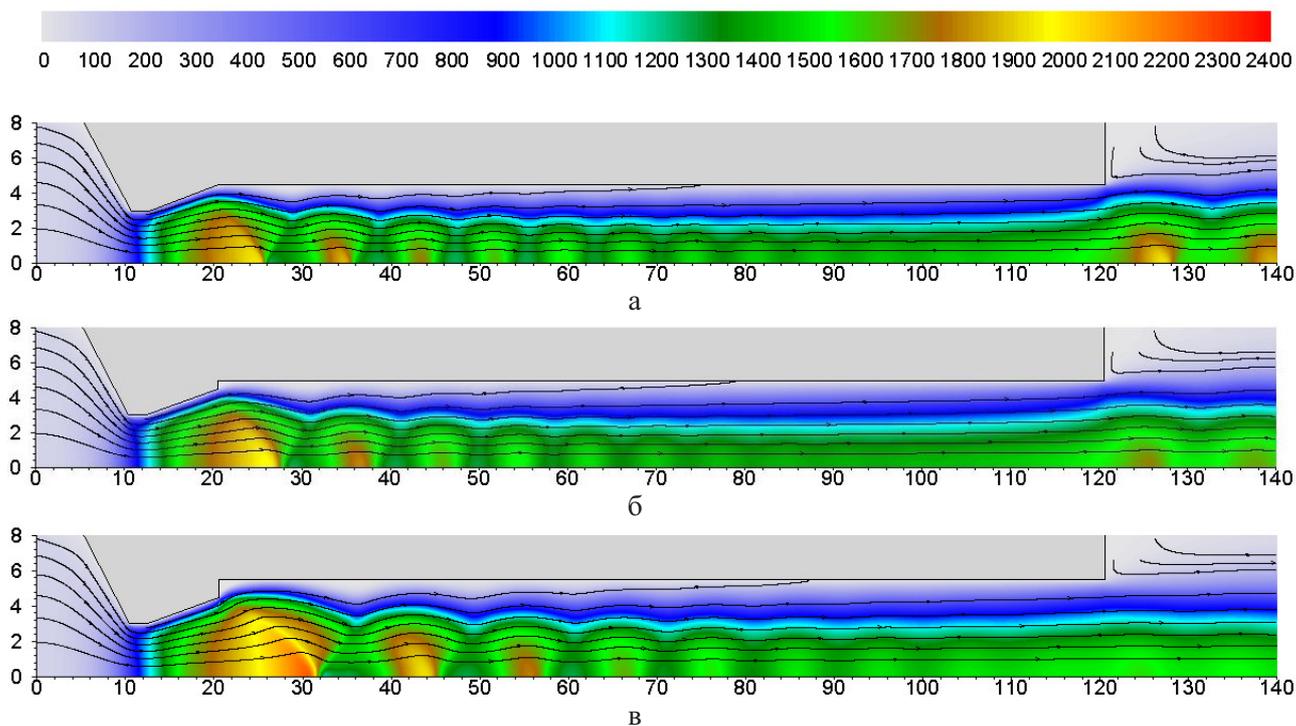


Рис. 4. Поля распределения осевых скоростей газа, м/с для насадков диаметром:  
а – 9 мм, б – 10 мм, в – 11 мм

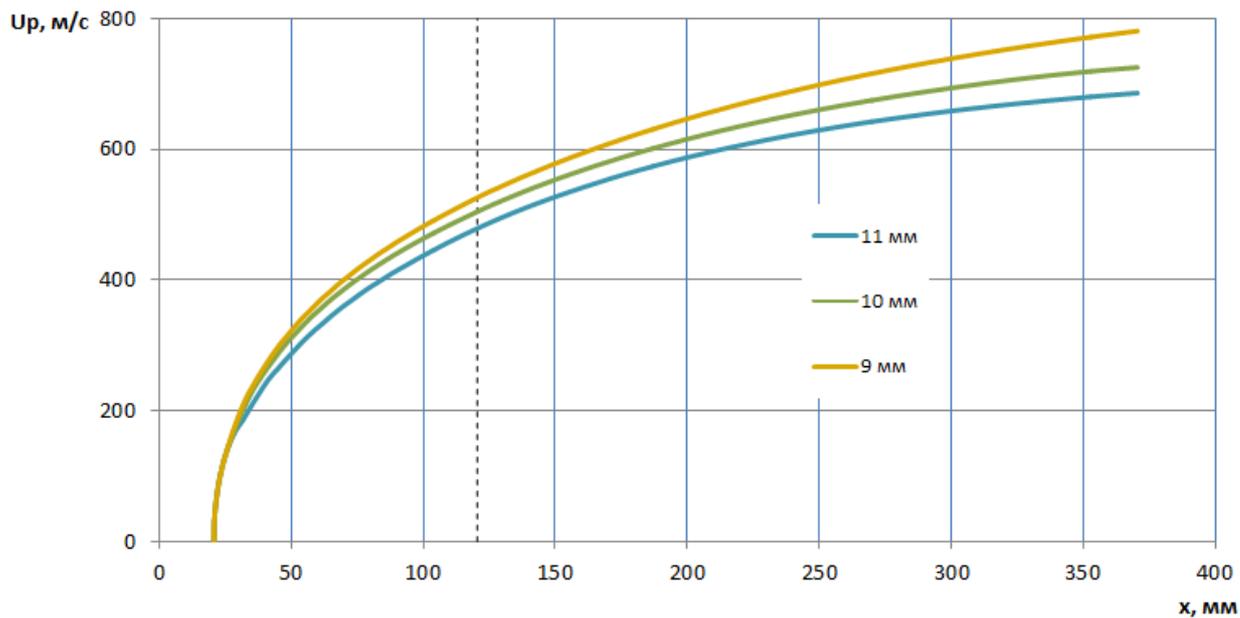


Рис. 5. Распределение осевых скоростей частиц по длине газодинамического тракта

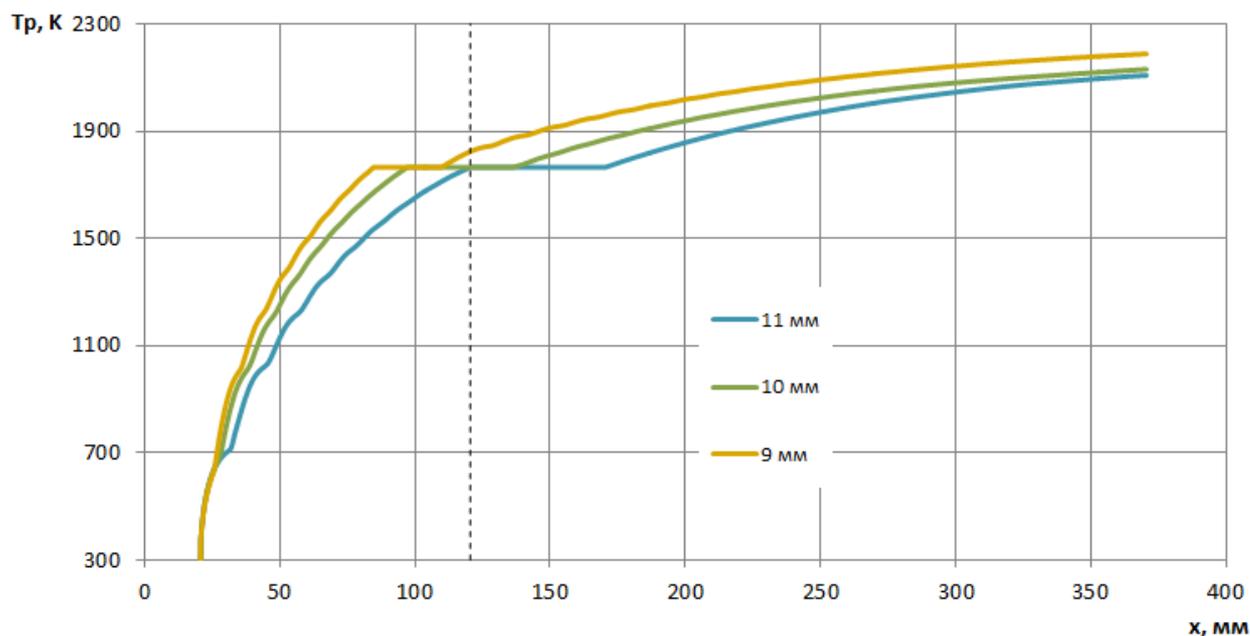


Рис. 6. Распределение температуры частиц по длине газодинамического тракта

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена серия расчетов характеристик сверхзвукового двухфазного потока в тракте установки для СГН. Рассмотрены три различных сопловых насадка при одинаковых начальных условиях в камере сгорания установки. Полученные результаты показывают возможность влияния на скорость и температуру частиц конденсированной фазы путем изменения диаметра насадка. Результаты исследования могут быть использованы для модернизации существующих технологических установок и расширения их операционного окна.

## Список литературы

1. Hoffman K., Chiang S. Computational Fluid Dynamics. 2000.- Vol. 1.- p. 486.- Vol. 2.- p. 469.- Vol. 3.- p. 175.
2. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие.- Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2012.
3. Стернин Л.Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах.- М.: Машиностроение, 1974.- 212 с.