

Расчетно-теоретическое исследование характеристик течения двухфазного потока в пескоструйном аппарате

© 2020

*Горелов Николай Дмитриевич*¹, студент кафедры «Ракетные двигатели»

Попов Всеволод Валериевич^{*2}, студент кафедры «Ракетные двигатели»

*Берников Владимир Владиславович*³, инженер

Научно-исследовательского института энергетического машиностроения

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва (Россия)

*E-mail: sebastien97@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6761-8874>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6409-4294>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8116-9657>

Аннотация: В статье рассматривается возможность конверсионного применения ракетной установки как пескоструйного аппарата для термоабразивной обработки. Получение более высоких итоговых характеристик обрабатываемой поверхности достигается путем воздействия на объект высокотемпературного двухфазного потока, разгоняемого в цилиндрической части сопла установки. Эжекторная подача сыпучего абразива обуславливает относительную простоту конструкции аппарата. Обоснование эффективности устройства подобного рода проведено посредством моделирования газодинамического процесса в программном комплексе вычислительной гидрогазодинамики, расчеты которого базируются на системе уравнений, включающей ключевые параметры как транспортирующего газа, так и частиц твердой фазы. В моделировании процесса учитывается влияние геометрических и режимных особенностей, соответствующих реальной установке-прототипу. При дальнейшем анализе исследуется влияние различных граничных условий на сверхзвуковой двухфазный поток для определения оптимального режима. Учитывается взаимное влияние газового потока и твердых частиц абразива, начиная от сечения подачи порошка и заканчивая выходным сечением сопла. Приведено сравнение полей температуры и давления в зависимости от входных значений, а также основывающиеся на этих значениях поля скоростей рабочего тела. Отдельно проведен анализ зависимости скорости движения твердых частиц от координаты при различных начальных данных температуры и давления. Особое внимание уделяется рассмотрению степени влияния размера частиц *k*-фазы на скоростные показатели. В процессе исследования выявлены ключевые способы регулирования установки для достижения заданных режимных параметров. В заключение приводятся выводы об эффективности и конкурентоспособности исследуемого метода термоабразивной обработки.

Ключевые слова: термоабразивная обработка; пескоструйный аппарат; сверхзвуковой эжектор; двухфазный поток; метод конечных объемов.

Благодарности: Авторы статьи благодарят кандидата технических наук, начальника отдела ЭМ 1.4 Научно-исследовательского института энергетического машиностроения В.И. Томака за содействие при подготовке материала статьи и предоставление информации об установке-прототипе, а также доктора технических наук, профессора кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана А.В. Сухова за ценные советы при проведении исследования.

Для цитирования: Горелов Н.Д., Попов В.В., Берников В.В. Расчетно-теоретическое исследование характеристик течения двухфазного потока в пескоструйном аппарате // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2020. № 2. С. 32–41. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-2-32-41.

ВВЕДЕНИЕ

Применение в других отраслях народного хозяйства новых конструкторских решений, уникальных идей и технологий ракетно-космической отрасли представляется стратегически оправданным с макроэкономической точки зрения. По этой причине конверсия является одним из наиболее приоритетных направлений исследований в области ракетного двигателестроения на сегодняшний день [1].

Одним из конверсионных направлений научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы кафедры Э1 и отдела ЭМ1-4 (филиал МГТУ) является исследование характеристик течения двухфазного сверхзвукового высокотемпературного потока в ракетной установке, работающей на топливе «керосин – воздух» с эжектор-

ной системой подачи абразивного вещества [2]. Назначение установки такого рода – абразивоструйная очистка поверхностей различных систем и агрегатов, в частности днищ кораблей от ржавчины. Впоследствии подобные устройства могут использоваться для газодинамического цинкования и других видов поверхностной обработки различных систем и агрегатов.

Основное преимущество обработки такими устройствами заключается в том, что на обрабатываемую поверхность производится как механическое воздействие, оказываемое сверхзвуковым потоком, так и тепловое и химическое, что обеспечивает существенное повышение эффективности работы установки, а именно скорости и качества очистки обрабатываемых поверхностей. Существующие в настоящее время пескоструйные аппараты, применяемые для газодинамической очистки,

в основном работают на холодном дозвуковом двухфазном потоке. Эффективность и скорость обработки поверхностей такими устройствами сравнительно невелика.

Изучению сверхзвуковых эжекторов посвящен ряд работ отечественных исследователей, направленных на определение оптимальных геометрических параметров установки при работе на критических режимах. Экспериментальные исследования в данной области способствовали пониманию термодинамики процесса, что, например, позволило реализовать в сверхзвуковом эжекторе с конической камерой смешения более эффективный процесс эжектирования пассивного газа [3]. Была предложена общая теория сверхзвуковых эжекторов, опирающаяся на термодинамику необратимых процессов, разработаны глобальные методики расчета двухфазных струйных аппаратов эжекторного типа с конической и цилиндрической камерами смешения [4].

Численное моделирование является одним из наиболее предпочтительных методов изучения процессов, протекающих в таких установках. Подобный подход был применен для верификации результатов, полученных в ходе экспериментального исследования структуры течения двухфазного потока и полей дисперсной фазы для эжектора с профилированным соплом [5]. Зарубежные авторы представили численные расчеты для моделирования сверхзвуковых эжекторных установок как с изобарической [6], так и с конической [7] камерами смешения. Кроме того, в ряде иностранных работ рассматривается влияние профилирования сопла на характеристики устройства при различных значениях входного давления [8], а также приводится комплексное численное исследование процессов в двухмерном двухфазном сверхзвуковом аппарате с эжектированием поперечными микроструями [9].

Приведенные выше исследования несут более общий характер или же имеют другую область применения, как, например, в работе [5] – для проведения высотных испытаний в авиационной и ракетно-космической отрасли. Перед авторами настоящей работы стоит задача определить степень влияния исходных параметров на режимы работы установки как пескоструйного аппарата. В качестве твердой фазы может выступать мелкодисперсный абразив, в частности речной песок [10].

Цель исследования – моделирование процессов, соответствующих различным режимам работы сверхзвуковой двухфазной эжекторной установки как пескоструйного аппарата, и анализ степени влияния исходных параметров на эффективность режимов термообработки.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Сохранение определенной величины U означает, что ее изменение во времени $\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega$ внутри произвольно выбранного объема Ω , имеющего замкнутую границу $\partial\Omega$, можно выразить как прирост этой величины за счет потока – величину U , проходящую через границу объема dS со скоростью $v - \int_{\partial S} U(\vec{v} \cdot \vec{n}) d\vec{S}$, и за счет любых внутренних или внешних сил Q или источников $\int_{\Omega} Q_v d\Omega + \int_{\partial S} \vec{Q}_s \cdot d\vec{S}$.

Решение уравнений газовой динамики проводится методом конечных объемов, принцип которого заключается в разбиении области потока на большое число элементарных объемов, в каждом из которых должны выполняться законы сохранения массы, импульса и энергии [11; 12].

Представим уравнения, соответствующие законам сохранения.

Закон сохранения массы, или уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho d\Omega + \int_{\partial S} \rho(\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = 0, \quad (1)$$

закон сохранения импульса, или количества движения:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega + \int_{\partial S} \rho \vec{v}(\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = - \int_{\partial S} \rho \vec{n} dS + \int_{\partial S} (\vec{\tau} \cdot \vec{n}) dS, \quad (2)$$

закон сохранения энергии:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho E d\Omega + \int_{\partial S} \rho E(\vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \\ = - \int_{\partial S} k(\nabla T \cdot \vec{n}) dS + \int_{\partial S} (\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \vec{n} dS \end{aligned}, \quad (3)$$

где ρ – плотность потока;

$v = [u, v, w]^T$ – скорость потока;

n – нормаль к поверхности dS ;

p – абсолютное давление;

τ – тензор касательных напряжений;

E – энергия;

k – коэффициент теплопроводности;

∇T – градиент температуры.

В случае ньютоновской жидкости система уравнений (1–3) представляет собой систему интегральных уравнений Навье – Стокса [13; 14]. Применяя теорему Гаусса, можно привести их к дифференциальному виду [15].

В трехмерном виде уравнения Навье – Стокса являются системой из пяти уравнений с семью неизвестными ρ, u, v, w, E, p, T [16]. Следовательно, необходимо ввести два дополнительных уравнения, которые должны устанавливать связь между термодинамическим состоянием жидкости. Одним из таких уравнений является уравнение состояния идеального газа

$$p = (\gamma - 1) \rho \left(E - \frac{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}{2} \right),$$

а в качестве второго примем зависимость энтальпии от температуры, которое будет иметь эмпирический, полиномиальный вид [10]:

$$H(T) = \sum_{i=0}^N a_i T^i,$$

где γ – коэффициент адиабаты;

H – энтальпия;

a – эмпирический коэффициент.

Необходимо ввести уравнение движения твердых частиц, которое описывает поведение частиц k -фазы, движущихся по аппарату:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p), \quad (4)$$

где u_p – скорость твердых частиц;
 u – скорость газа;
 $F_D(u - u_p)$ – сила лобового сопротивления, которая может быть вычислена по следующей формуле:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}, \quad (5)$$

где ρ_p и d_p – плотность и диаметр твердых частиц соответственно;
 μ – динамическая вязкость среды;
 C_D – коэффициент лобового сопротивления для идеально сферических частиц, который вычисляется по эмпирической формуле:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}, \quad (6)$$

где a_1, a_2, a_3 – коэффициенты, зависящие от относительного числа Рейнольдса [17]:

$$Re = \frac{\rho d_p |u - u_p|}{\mu}.$$

Геометрические данные для обчислываемой модели, представленные на рис. 1, взяты с реально существующего прототипа, находящегося в МГТУ. Продукты сгорания топливной смеси «керосин – воздух» поступают

из камеры сгорания через диффузор в цилиндрический канал, где разгоняются до звуковых скоростей. На начальном участке цилиндрического канала происходит эжекторная подача твердого порошка (абразива), который уносится потоком горячего рабочего тела. В сопле происходит разгон абразива, и в результате высокотемпературный двухфазный поток направляется на обрабатываемую поверхность.

Расчет методом конечных объемов выполняется в программном пакете “Ansys Fluent”.

Первым шагом в решении задачи является построение расчетной сетки модели. Сетка построена при помощи программного пакета “Ansys Mesh”, число ячеек – 56809. На рис. 2 изображена часть сетки вблизи критического сечения и зоны подачи абразива.

Задача решается для стационарного двухмерного осесимметричного случая. Решение уравнений производится с помощью так называемых density-based алгоритмов [18]. При решении также используются модели энергии, турбулентности и модель лагранжевых частиц, которая необходима для моделирования твердых частиц – абразива с плотностью 2000 кг/м³.

В качестве топлива используется смесь воздуха и керосина с массовым соотношением $K_m=100$, термодинамические параметры которой рассчитаны с применением программы “Tetra”. Из расчетов этой программы взяты полиномиальная зависимость удельной теплоемкости и динамической вязкости от температуры и молярная масса газовой фазы.

Для учета модели турбулентности выбрана двухпараметрическая $k-\epsilon$ -модель со стандартными параметрами как оптимальная для данного класса задач [19]. Данная модель вводит в систему уравнений Навье – Стокса два дополнительных уравнения: переноса кинетической энергии турбулентности и переноса диссипации турбулентности, а также два параметра: k – кинетическая энергия турбулентности и ϵ – коэффициент диссипации этой энергии.

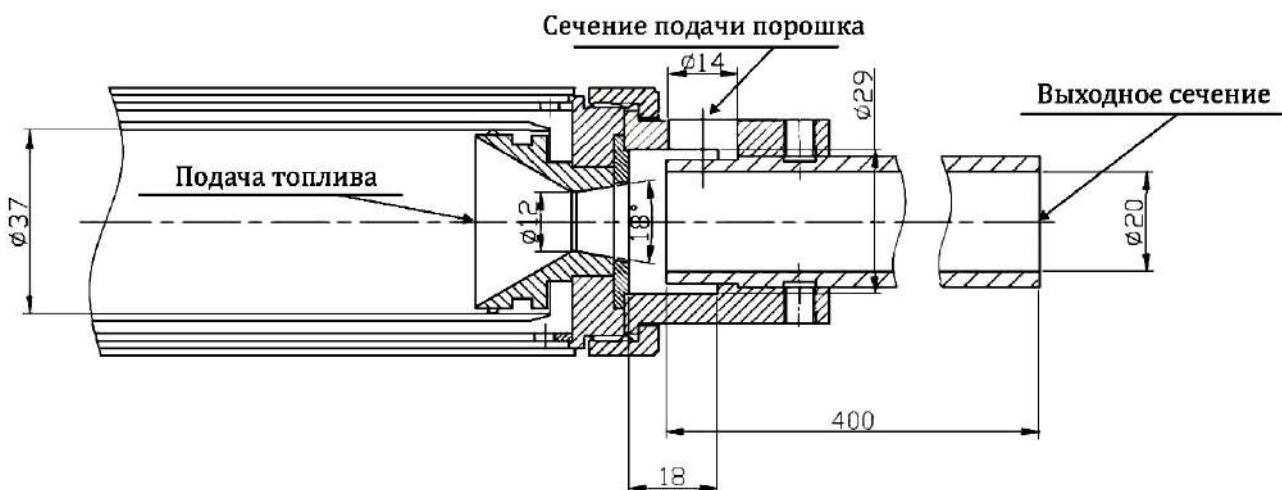


Рис. 1. Геометрия модели
 Fig. 1. Model geometry

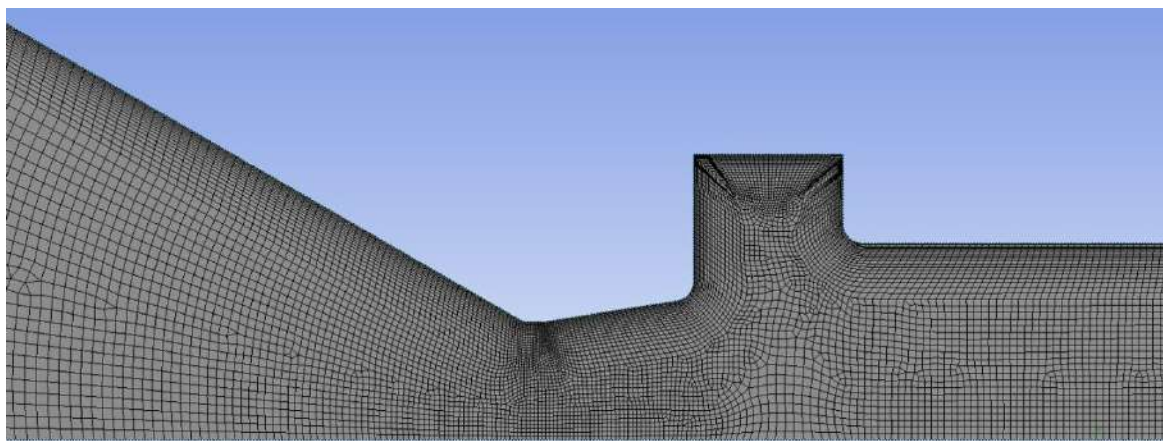


Рис. 2. Расчетная сетка
Fig. 2. Computational grid

В качестве граничных заданы следующие условия:

– параметры потока в выходном сечении цилиндрического участка совпадают с параметрами внешней среды $p=0,1$ МПа, $T=298$ К;

– параметры потока в сечении подачи частиц: $p=0,11$ МПа, $T=298$ К;

– параметры потока во входном сечении: $p=p_{вх}$, $T=T_{вх}$;

– диаметр частиц твердой фазы: $d=d_p$.

В данной работе проведено исследование влияния давления $p_{вх}$ и температуры рабочего тела на входе в сопло $T_{вх}$, а также диаметра частиц твердой фазы d_p на выходные характеристики потока. Диапазон изменения этих параметров взят из паспорта установки.

На основе расчетов необходимо подобрать оптимальный режим работы пескоструйного аппарата для наиболее эффективной его работы. Расчеты производятся итерационно до тех пор, пока разница между двумя последовательными итерациями не будет меньше 10^{-7} .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первый из параметров, влияющих на работу пескоструйного аппарата, – температура газовой фазы на входе в канал установки. При работе непосредственно с аппаратом варьирование этого параметра может достигаться изменением массового расхода керосина в топливе. Например, для получения более высоких температур массовый расход керосина необходимо увеличить. Диапазон температур, в котором производится исследование, составляет $T_{вх}=500...1000$ К.

На рис. 3 представлены поля температур. Как и следовало ожидать, повышение температуры на входе приводит к более высоким температурам потока на выходе: при температуре на входе 1000 К температура на выходе составляет ~ 750 К, а при температуре на входе 500 К температура на выходе ~ 360 К.

Изменение температуры также влияет и на скорость потока. На рис. 4 представлены поля скоростей потока. Можно заметить, что при повышении температуры значительно увеличивается скорость потока в зоне смеше-

ния (700 м/с при температуре 1000 К и 300 м/с при температуре 500 К) и незначительно растет скорость рабочего тела на выходе из канала.

При температуре на входе 1000 К скорость газа на выходе из канала составляет 500 м/с, а при температуре 500 К ~ 300 м/с.

Интересно рассмотреть влияние температуры на скорость твердых частиц. На рис. 5 представлены зависимости скорости движения частиц и температуры от длины пройденного пути.

При существенном увеличении температуры на входе в установку не наблюдается сколько-нибудь значительного изменения скорости твердых частиц, т.е. можно говорить о том, что, если для повышения качества обработки поверхности требуется увеличить скорость частиц, изменять температуру неэффективно. Здесь следует отметить невысокий уровень нагрева частиц, а именно $\Delta T_p=10$ К и $\Delta T_p=2$ при температуре потока во входном сечении установки 1000 К и 500 К соответственно. Это объяснимо малым временем пребывания частиц в цилиндрической части канала установки. Другими словами, температурное влияние самих частиц на обрабатываемую поверхность невелико.

Исходя из вышеперечисленных особенностей, можно сделать вывод, что варьирование начальной температуры газа позволяет увеличивать температуру потока, действующего на обрабатываемую поверхность со стороны газа, и не позволяет увеличить скорость истекающих из канала установки частиц k -фазы. Давление на входе является параметром, регулировать который можно, например, увеличением давления на выходе из компрессора, который подает воздух на вход и на наддув баков горючего. Рассматривается следующий диапазон изменения давления на входе в канал: $p_{вх}=0,3...0,5$ МПа. На рис. 6 представлены поля давлений потока при тчении по каналу пескоструйной установки при различных давлениях на входе, а на рис. 7 – поля скоростей. При повышении давления растет число косых скачков на выходе из сопла, что можно наблюдать на рисунках полей скоростей. При давлении на входе $p_{вх}=0,5$ МПа скорость потока на выходе составляет порядка 500 м/с, а при давлении $p_{вх}=0,3$ МПа – 380 м/с.

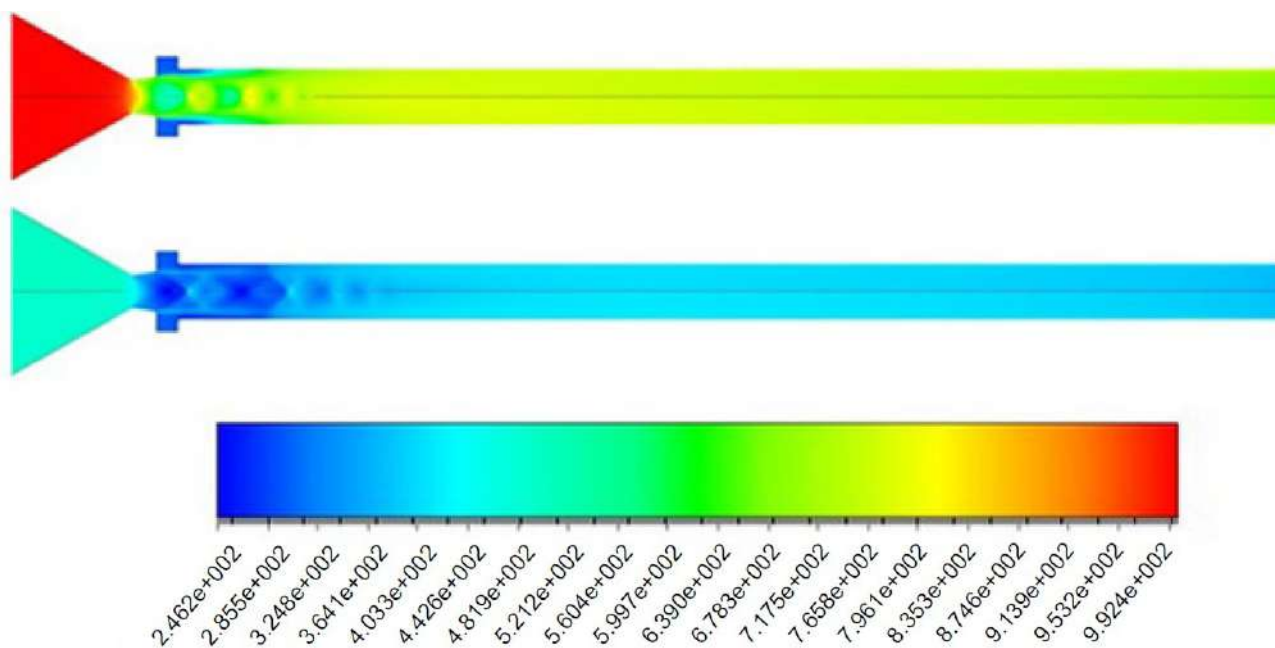


Рис. 3. Поля температур при различных температурах на входе в канал (1000 К – сверху; 500 К – снизу)
Fig. 3. Temperature fields at different temperatures at the channel inlet (1000 K – from the top; 500 K – from the bottom)

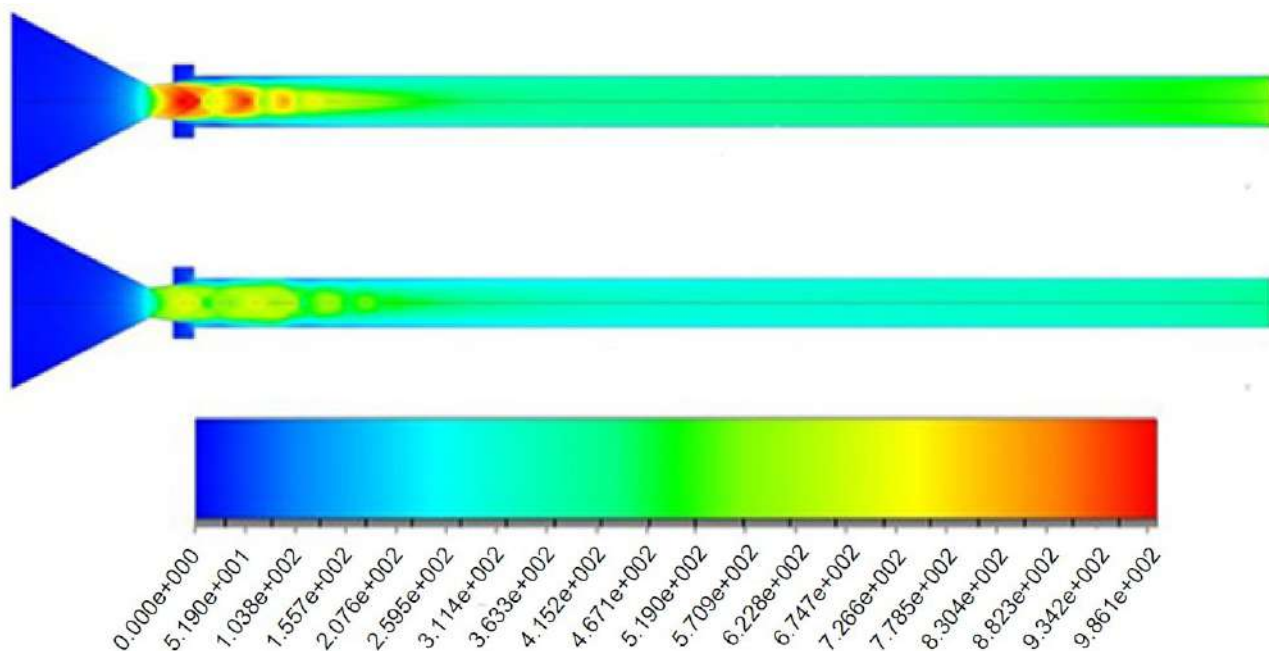


Рис. 4. Поля скоростей при различных температурах на входе в канал (1000 К – сверху; 500 К – снизу)
Fig. 4. Velocity fields at different temperatures at the channel inlet (1000 K – from the top; 500 K – from the bottom)

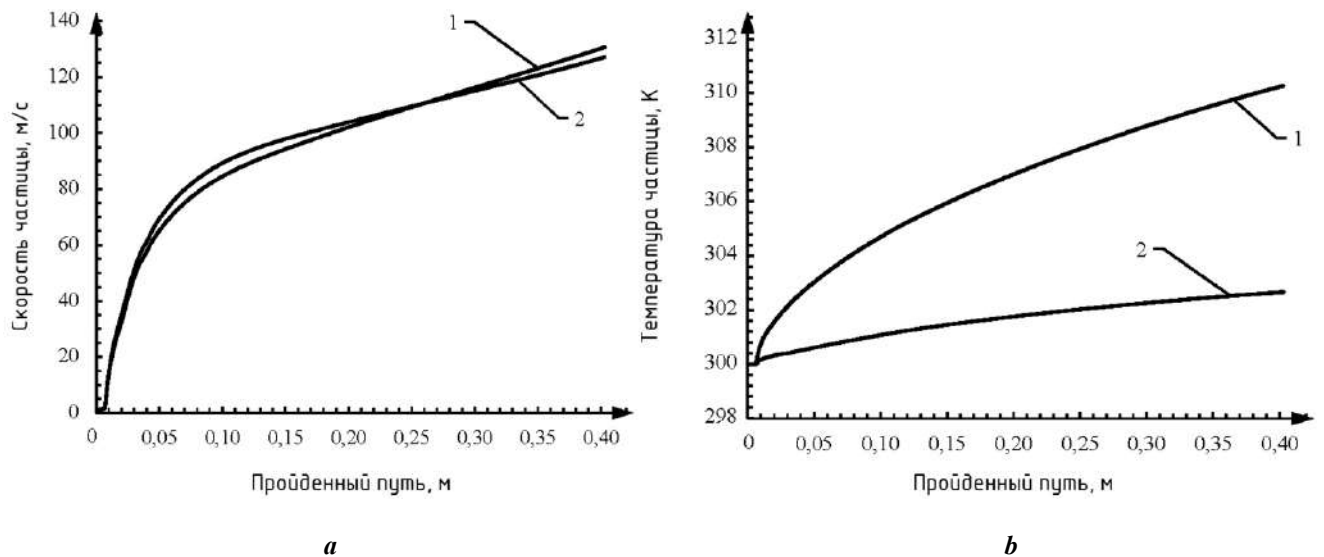


Рис. 5. Зависимость скорости (а) и температуры (б) частиц порошка от координаты X (1 – при температуре 1000 К; 2 – 500 К)
Fig. 5. The dependence of velocity (a) and temperature (b) of powder particles on X-coordinate (1 – at the temperature of 1000 K; 2 – 500 K)

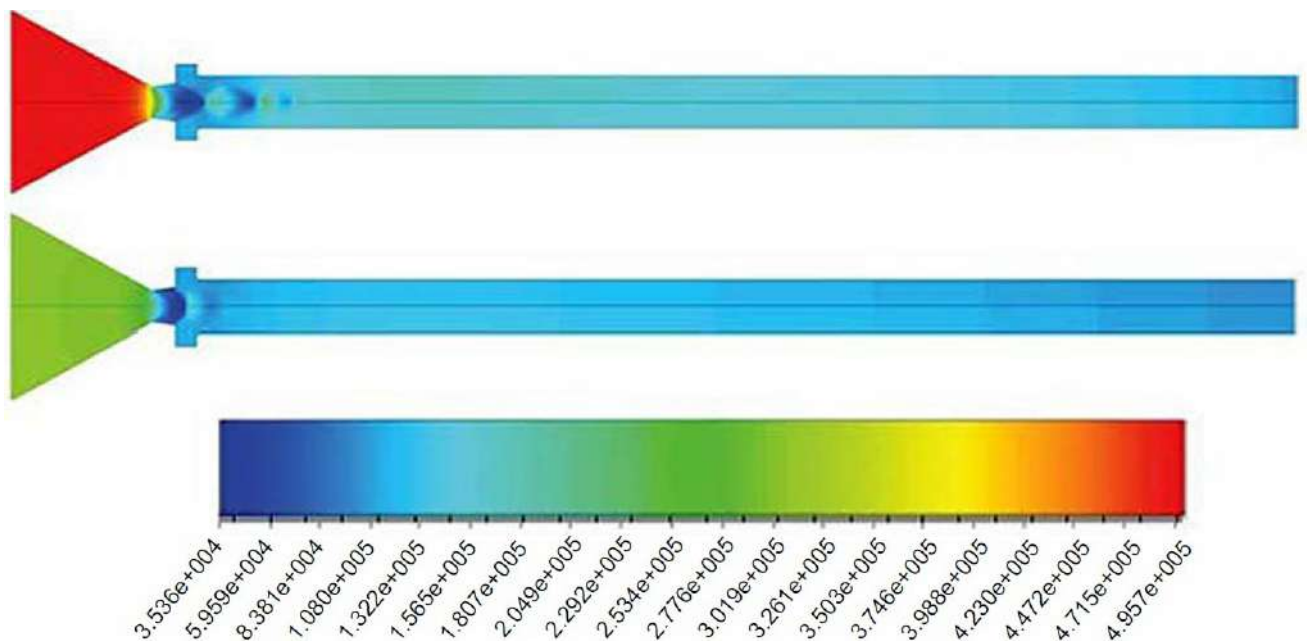


Рис. 6. Поля давлений при различных давлениях на входе в канал (0,5 МПа – сверху; 0,3 МПа – снизу)
Fig. 6. Pressure fields at different pressures at the channel inlet (0.5 MPa – from the top; 0.3 MPa – from the bottom)

Давление на входе в канал установки также значительно влияет на скорость частиц порошка, что видно по данным, приведенным на рис. 8, где показано увеличение скорости частиц с ростом давления. На данном графике изображена зависимость скорости частиц от пройденного пути. Так, с увеличением давления с 0,3 до 0,5 МПа скорость частиц

на срезе ускорителя растет от 90 до 135 м/с. Это говорит о том, что давление является одним из параметров, существенно влияющих на скорость частиц, а следовательно, на эффективность работы всей пескоструйной установки.

Исходя из вышеописанного, можно обеспечить возможность настройки пескоструйного аппарата для подбора

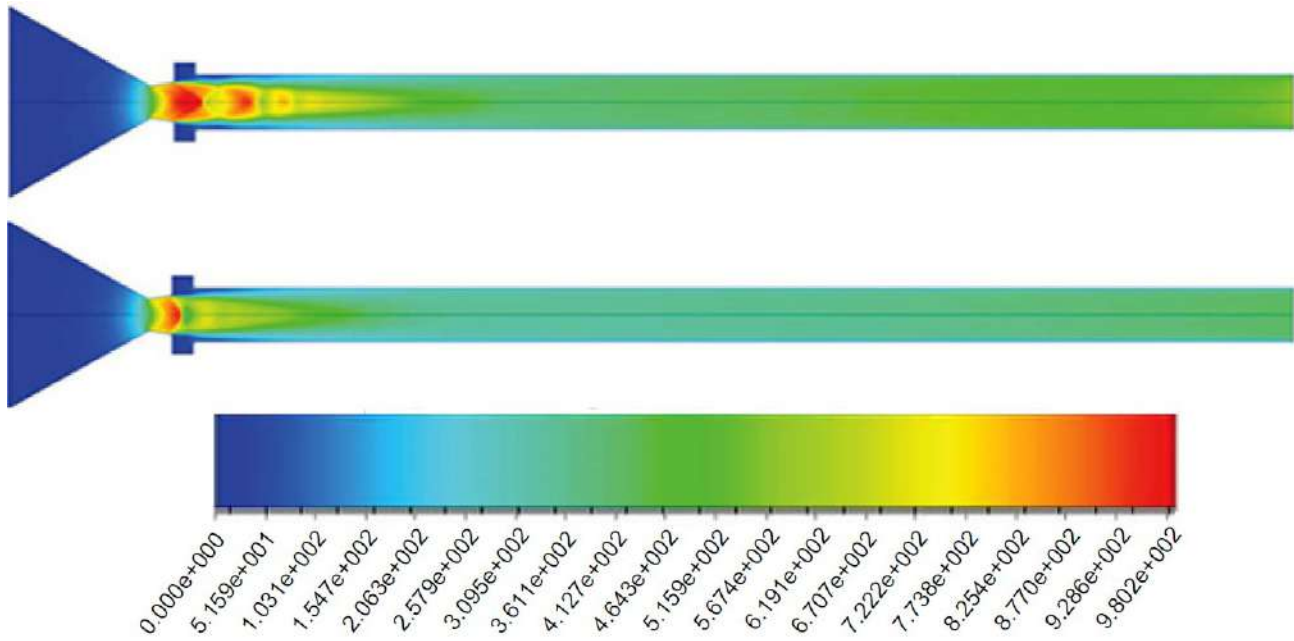


Рис. 7. Поля скоростей при различных давлениях на входе в канал (0,5 МПа – сверху; 0,3 МПа – снизу)
Fig. 7. Velocity fields at different pressures at the channel inlet (0.5 MPa – from the top; 0.3 MPa – from the bottom)

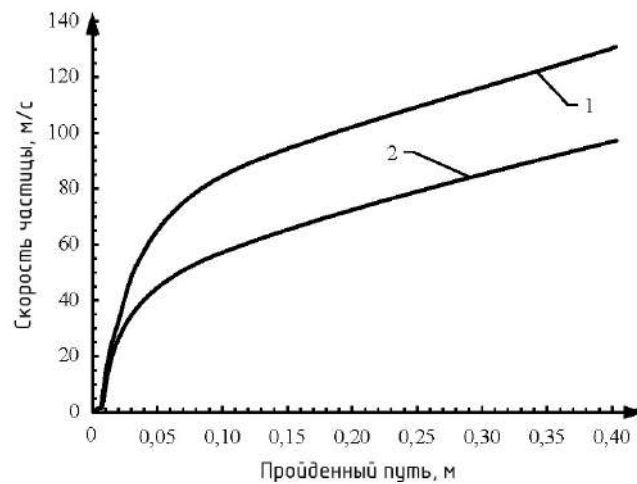


Рис. 8. Зависимость скорости частиц порошка от давления в канале установки (1 – 0,5 МПа; 2 – 0,3 МПа)
Fig. 8. The dependence of powder particles velocity on the pressure at the device channel inlet (1 – 0.5 MPa; 2 – 0.3 MPa)

требуемого скоростного режима течения частиц порошка на выходе из канала установки.

Последний параметр, который влияет на работу изучаемого аппарата, – диаметр частиц твердой фазы. Изучение этого параметра проводилось при следующих граничных условиях: $p_{вх}=0,5$ МПа, $T_{вх}=1000$ К. Эти параметры позволяют получить наибольшие

значения скорости. Диапазон изменения диаметров: $d_p=500...1500$ мкм.

На рис. 9 показано изменение скорости частиц различного диаметра по длине пройденного пути; цифрами обозначены кривые, соответствующие следующим диаметрам: 1 – 500 мкм; 2 – 750 мкм; 3 – 1000 мкм; 4 – 1250 мкм; 5 – 1500 мкм. С уменьшением диаметра

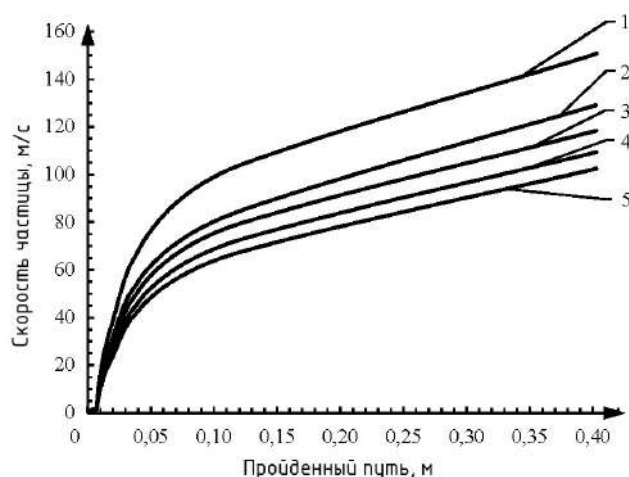


Рис. 9. Зависимость скоростей движения частиц от их диаметра
(1 – 500 мкм; 2 – 750 мкм; 3 – 1000 мкм; 4 – 1250 мкм; 5 – 1500 мкм)

Fig. 9. The dependence of particles motion velocities on their diameter
(1 – 500 micron; 2 – 750 micron; 3 – 1000 micron; 4 – 1250 micron; 5 – 1500 micron)

частиц скорость их движения существенно растет: так, при диаметре $d_p=1500$ мкм скорость частиц на выходе из канала составляет ~ 95 м/с, а при диаметре $d_p=500$ мкм ~ 150 м/с.

Данное поведение объясняется аналитически [20]. Согласно уравнению (6), сила, действующая на частицу со стороны газового потока, прямо пропорциональна произведению коэффициента лобового сопротивления на величину относительного числа Рейнольдса и обратно пропорциональна квадрату диаметра частицы.

Проведя математические преобразования уравнения (4) путем подстановки в него уравнений (5) и (6), покажем, что величина силы лобового сопротивления обратно пропорциональна кубу диаметра частицы:

$$F_D \sim \frac{1}{d_p^2} \left(a_1 \text{Re} + a_2 + \frac{a_3}{\text{Re}} \right) \sim \frac{1}{d_p^2 \text{Re}} \sim \frac{1}{d_p^3}.$$

Очевидно существенное влияние диаметра частиц на их скорость выхода из установки. Это означает, что возможно регулирование обработки поверхностей различных систем и агрегатов путем изменения типа абразивного порошка и дисперсности его состава.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Обоснована возможность эффективного конверсионного применения ракетной двигательной установки в качестве устройства для термоабразивной обработки поверхностей, а именно пескоструйного аппарата.

Показана большая степень влияния температурного воздействия на режим термической обработки; достигнуто более высокое значение скорости частиц при меньшем давлении подачи воздуха сравнительно с традиционными (холодными) установками.

Подтверждено низкое влияние изменения температуры на входе на скорость частиц абразива.

Продемонстрирована высокая степень влияния входного давления на скорость частиц и режим обработки. Выявлена низкая эффективность изменения начальной температуры для улучшения качества обрабатываемой поверхности; отмечен невысокий уровень нагрева частиц, а именно не более 10 К, для рассматриваемого диапазона параметров.

Показано, что регулирование режима обработки поверхностей различных систем и агрегатов возможно путем изменения типа абразивного порошка и его дисперсности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягодников Д.А., Александренков В.П., Власов Ю.Н. Актуальные проблемы ракетного двигателестроения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 295 с.
2. Цегельский В.Г. К теории газовых эжекторов с цилиндрической и конической камерами смешения // Известия вузов. Машиностроение. 2012. № 2. С. 46–71.
3. Цегельский В.Г., Акимов М.В., Сафаргалиев Т.Д. Экспериментально-теоретическое исследование режимов работы сверхзвуковых газовых эжекторов с цилиндрической и конической камерами смешения // Известия вузов. Машиностроение. 2012. № 3. С. 48–58.
4. Цегельский В.Г. Струйные аппараты. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 573 с.
5. Лепешинский И.А., Решетников В.А., Заранкевич И.А. Численное моделирование и экспериментальное исследование жидкостно-газового двухфазного эжектора со сверхзвуковым профилированным соплом // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. № 2. С. 164–171.
6. Zhu Y., Cai W., Wen C., Li Y. Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors // Applied Thermal Engineering. 2009. Vol. 29. № 5-6. P. 898–905.

7. Kim S., Kwon S. Experimental determination of geometric parameters for an annular injection type supersonic ejector // *Journal of Fluids Engineering*. 2006. Vol. 128. № 6. P. 1164–1171.
8. Vojta L., Dvorak V. Measurement and calculating of supersonic ejectors // *EPJ Web of Conferences*. 2019. Vol. 213. P. 1–7.
9. Dandani M., Lepiller V., Abderrahmane G., Désévaux P. Numerical Visualizations of Mixing Enhancement in a 2D Supersonic Ejector // *Fluid Dynamics and Materials Processing*. 2018. Vol. 14. № 1. P. 23–37.
10. Минязев Д.В. Абразивные материалы для пескоструйной обработки // *Наука и образование сегодня*. 2017. № 6. С. 30–34.
11. Chung T.J. *Computational Fluid Dynamics*. 2nd ed. Cambridge University Press, 2010. 1058 p.
12. Blazek J. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. 3rd ed. Elsevier, 2015. 451 p.
13. Schlichting H. *Boundary Layer Theory*. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 1979. 817 p.
14. White F.M. *Viscous Fluid Flow*. New York: McGraw-Hill, 1991. 614 p.
15. Vinokur M. Conservation Equations of Gas Dynamics in Curvilinear Coordinate Systems // *Journal of Computational Physics*. 1974. Vol. 14. P. 105–125.
16. Bussing T.R.A., Murman E.M. Finite-Volume Method for the Calculation of Compressible Chemically Reacting Flows // *AIAA Journal*. 1988. Vol. 26. P. 1070–1078.
17. Liepmann H.W., Roshko A. *Elements of Gas Dynamics*. New York: John Wiley & Sons, 1957. 460 p.
18. Hunter C.A. Experimental investigation of separated nozzle flows // *Journal of propulsion and power*. 2004. Vol. 20. № 3. P. 527–532.
19. Morsi S.A., Alexander A.J. An investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems // *Journal of Fluid Mechanics*. 1972. Vol. 55. № 2. P. 193–208.
20. Bardina J.E., Huang P.G., Coakley T.J. *Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development*. Washington: Ames Research Center, 1997. 87 p.
4. Tsegelsky V.G. *Struynye apparaty* [Inkjet machines]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2017. 573 p.
5. Lepeshinsky I.A., Reshetnikov V.A., Zarankevich I.A. Numerical modeling and experimental research of a two-phase liquid-gas ejector with a profiled supersonic nozzle. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2017, vol. 16, no. 2, pp. 164–171.
6. Zhu Y., Cai W., Wen C., Li Y. Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors. *Applied Thermal Engineering*, 2009, vol. 29, no. 5–6, pp. 898–905.
7. Kim S., Kwon S. Experimental determination of geometric parameters for an annular injection type supersonic ejector. *Journal of Fluids Engineering*, 2006, vol. 128, no. 6, pp. 1164–1171.
8. Vojta L., Dvorak V. Measurement and calculating of supersonic ejectors. *EPJ Web of Conferences*, 2019, vol. 213, pp. 1–7.
9. Dandani M., Lepiller V., Abderrahmane G., Désévaux P. Numerical Visualizations of Mixing Enhancement in a 2D Supersonic Ejector. *Fluid Dynamics and Materials Processing*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 23–37.
10. Minyazev D.V. Sandblasting abrasives. *Nauka i obrazovanie segodnya*, 2017, no. 6, pp. 30–34.
11. Chung T.J. *Computational Fluid Dynamics*. Cambridge University Press, 2010. 2nd ed., 1058 p.
12. Blazek J. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Elsevier, 2015. 3rd ed., 451 p.
13. Schlichting H. *Boundary Layer Theory*. New York, McGraw-Hill, 1979. 7th ed., 817 p.
14. White F.M. *Viscous Fluid Flow*. New York, McGraw-Hill, 1991. 614 p.
15. Vinokur M. Conservation Equations of Gas Dynamics in Curvilinear Coordinate Systems. *Journal of Computational Physics*, 1974, vol. 14, pp. 105–125.
16. Bussing T.R.A., Murman E.M. Finite-Volume Method for the Calculation of Compressible Chemically Reacting Flows. *AIAA Journal*, 1988, vol. 26, pp. 1070–1078.
17. Liepmann H.W., Roshko A. *Elements of Gas Dynamics*. New York, John Wiley & Sons, 1957. 460 p.
18. Hunter C.A. Experimental investigation of separated nozzle flows. *Journal of propulsion and power*, 2004, vol. 20, no. 3, pp. 527–532.
19. Morsi S.A., Alexander A.J. An investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, vol. 55, no. 2, pp. 193–208.
20. Bardina J.E., Huang P.G., Coakley T.J. *Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development*. Washington, Ames Research Center, 1997. 87 p.

REFERENCES

1. Yagodnikov D.A., Aleksandrenkov V.P., Vlasov Yu.N. *Aktualnye problemy raketnogo dvigatelestroeniya* [Actual problems of rocket propulsion]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2017. 295 p.
2. Tsegelsky V.G. On the theory of gas ejectors having cylindrical and conical mixing chambers. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*, 2012, no. 2, pp. 46–71.
3. Tsegelsky V.G., Akimov M.V., Safargaliev T.D. Experimental and theoretical investigation of operating modes of supersonic gas ejectors with cylindrical and conical

Calculation-theoretical study of characteristics of the two-phase flow in a sandblasting machine

© 2020

*Nikolay D. Gorelov*¹, student of Chair “Rocket Engines”

Vsevolod V. Popov^{*2}, student of Chair “Rocket Engines”

*Vladimir V. Bernikov*³, engineer of the Research Institute of Power Engineering

Bauman Moscow State Technical University, Moscow (Russia)

*E-mail: sebastien97@mail.ru

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6761-8874>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6409-4294>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8116-9657>

Abstract: The paper considers the possibility of conversion applying of a rocket engine as a sandblasting machine for thermo-abrasive treatment. The higher performance characteristics of a treated surface can be achieved through the exposure of the high-temperature two-phase flow accelerated in the device nozzle barrel on the object. The ejection feed of granular abrasive substances determines the relative structural simplicity of the device structure. The authors prove the efficiency of such a device using the gas-dynamic process modeling in the CFD software package, the calculations of which are based on combined equations including the key parameters of both the carrier gas and the solid phase particles. The process modeling considers the influence of the geometry and the specifics equal to the real operating prototype. During further analysis, to determine the optimal mode, the authors investigated the influence of various border conditions on the supersonic two-phase flow. The study considers the mutual influence of gas flow and abrasive solid particles starting from the powder delivery section to the nozzle outlet section. The study presents the comparison of temperature and pressure fields depending on the input values, as well as the fluid velocity fields based on these values. The authors carried out the analysis of the dependence of solid particle motion speed on the coordinate at various initial data of temperature and pressure. The study pays special attention to the consideration of the impact of the k -phase particle size on the speed parameters. During the study, the authors identified the main methods of device adjustment to achieve the required mode parameters. As a result of the analysis, the paper concludes on the efficiency and competitive ability of the thermo-abrasive treatment method under the study.

Keywords: thermo-abrasive treatment; sandblasting machine; supersonic ejector; two-phase flow; finite volume method.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to PhD in Engineering Sciences, Head of EM 1.4 Department of the Research Institute of Power Engineering V.I. Tomak for his support in preparing the material for this paper and providing the information on the prototype installation and to Doctor of Engineering Sciences, professor of Chair “Rocket Engines” of Bauman Moscow State Technical University A.V. Sukhov for valuable advice when carrying out the research.

For citation: Gorelov N.D., Popov V.V., Bernikov V.V. Calculation-theoretical study of characteristics of the two-phase flow in a sandblasting machine. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 2, pp. 32–41. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-2-32-41.