

Авторефер  
Б907

На правах рукописи

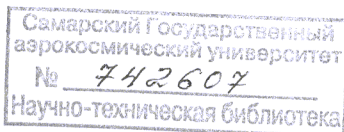


Буланова Екатерина Александровна

**ГЕНЕРАТОР СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ НА БАЗЕ МАЛОГАБАРИТНОЙ  
РАКЕТНОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ  
МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели  
и энергоустановки летательных аппаратов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Самара – 2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» (СГАУ) на кафедре механической обработки материалов

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Первышин Александр Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Богданович Валерий Иосифович

доктор технических наук, профессор  
Данильченко Валерий Павлович

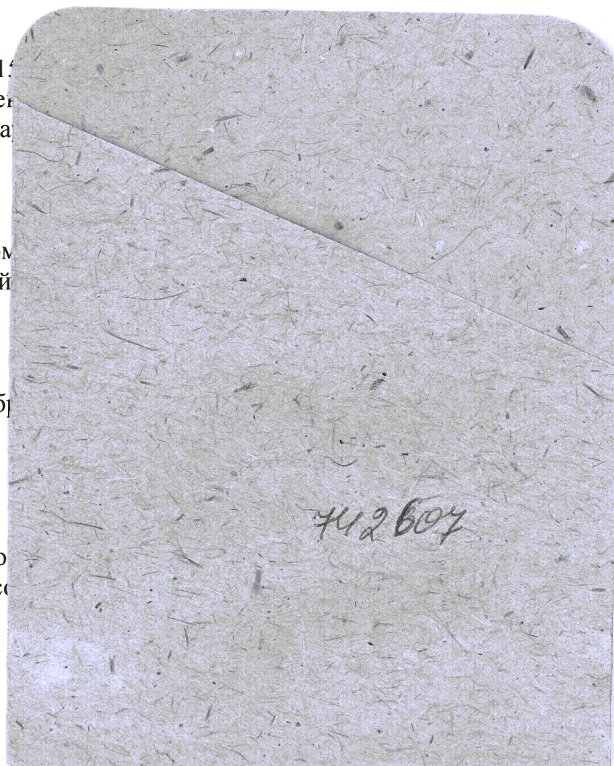
Ведущая организация: ОАО «Самарское конструкторское бюро  
машиностроения» (г. Самара)

Защита состоится «30»  
диссертационного совета Д.212.21.  
аэрокосмический университет имени  
г. Самара, Московское шоссе, 34, а

С диссертацией можно ознакомиться  
государственный аэрокосмический

Автореферат разослан «10» сентяб

Ученый секретарь диссертационно  
доктор технических наук, профессо



### Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Высокая энерговооруженность ракетных двигателей может быть использована не только для создания тяги, но и для различных технологических процессов. В последнее время появился целый ряд подобных устройств, предназначенных для создания сверхзвуковых высокотемпературных потоков как инструмента воздействия на технологический объект. Они получили название генераторы сверхзвуковых струй.

Богатый опыт разработки, исследования и эксплуатации подобных устройств, накопленный в Национальном аэрокосмическом университете имени Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана, Самарском государственном аэрокосмическом университете имени С.П. Королева и многих других учреждениях, как в отечественных, так и в зарубежных говорит о перспективности использования генераторов сверхзвуковых струй применительно к таким технологическим процессам, как резка, нанесение покрытий, струйно-абразивная обработка материалов.

В практике широкое распространение получила струйно-абразивная обработка материалов, которая применяется во многих технологических процессах: удаление загрязнений, ржавчины, масла и инородных тел с поверхности; подготовка поверхности к нанесению разного рода покрытий в целях улучшения качества и свойств покрытий; упрочнение поверхностей; очистка отливок от пригоревшей формовочной смеси; подготовка кромок под сварку и пайку; зачистка швов после сварки и пайки; получение матовой поверхности на изделиях из металлов, пластмассы и стекла и их декоративная отделка. Мобильные установки для струйно-абразивной обработки позволяют производить очистку поверхностей продуктопроводов от загрязнений, ремонт мостов, морских судов, военной техники; работы по восстановлению фасадов, гранитных памятников, набережных сооружений и др.

Разгон частиц абразива происходит за счет энергии активного потока, которым в большинстве устройств является воздух. Чем больше расход воздуха, тем большим может быть и расход абразива, разгоняемый активным потоком, величина же скорости абразива ограничивается скоростью активного потока. Дальнейшее развитие установок для струйно-абразивной обработки материалов связано с использованием в качестве активного потока продуктов сгорания топлив воздух-керосин или воздух-бензин. Это позволяет повысить производительность и качество процесса однако уменьшение габаритов генераторов связано с использованием газообразного не только окислителя, но и горючего. В этом случае исключается процесс испарения последнего, что позволяет уменьшить габариты камеры сгорания. Кроме того, связь специфических целевых функций, отвечающих за производительность и качество струйно-абразивной обработки материалов, с



режимными и конструктивными параметрами работы этих устройств не исследовалась.

Удельная производительность устройств для струйно-абразивной обработки материалов зависит от кинетических параметров потока частиц абразива. Установление связи этих параметров с режимными и конструктивными характеристиками, соответствующих генерирующих систем и поиск рациональных решений является основной проблемой, возникающей при разработке устройств для струйно-абразивной обработки материалов.

**Целью работы** является разработка генератора сверхзвуковых струй на базе ракетной камеры на газообразном топливе в качестве устройства для струйно-абразивной обработки материалов.

#### **Задачи исследования:**

1. Разработать математическую модель движения частиц абразива в струе продуктов сгорания и исследовать влияние параметров двухфазной струи на кинетические характеристики частиц в момент контакта с обрабатываемой поверхностью.
2. Разработать экспериментальное оборудование и провести измерение скорости и гранулометрического состава частиц абразива, движущихся в потоке продуктов сгорания генератора сверхзвуковых струй.
3. Создать генератор сверхзвуковых струй на базе малогабаритной ракетной камеры на газообразном топливе как устройства для разгона абразива.
4. Определить область рациональных режимов работы генератора сверхзвуковых струй для струйно-абразивной обработки материалов.
5. Оценить эффективность созданного устройства путем сравнения с существующими устройствами для струйно-абразивной обработки материалов.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач были использованы методы высшей математики, физики, газовой динамики, методы проектирования и расчета ракетных двигателей малой тяги на газообразном топливе, экспериментальные методы исследования двухфазных струй, а также ряд вычислительных программ.

**Научная новизна.** Математическая модель по определению кинетических характеристик монодисперсного потока частиц в сверхзвуковом потоке продуктов сгорания генератора сверхзвуковых струй с числом Рейнольдса  $50 \leq Re \leq 1250$ , которая впервые учитывает влияние дисперсной среды на скорость несущего потока, связанную с относительно большими расходами дисперсной среды. Решение получено в аналитическом виде.

Математическая модель движения полидисперсного потока частиц абразива в сверхзвуковой струе продуктов сгорания генератора сверхзвуковых струй для струйно-абразивной обработки материалов, позволяющая рассчитывать кинетические характеристики частиц различного диаметра, входящих в состав дисперсного потока.

Методика расчета кинетических параметров полидисперсного потока частиц абразива и потока продуктов сгорания при струйно-абразивной обработке материалов.

Результаты исследования влияния режимных параметров газогенератора и параметров технологического процесса струйно-абразивной обработки материалов на кинетические характеристики полидисперсного потока частиц абразива и потока продуктов сгорания генератора сверхзвуковых струй. Выявлена закономерность изменения мощности кинетической энергии потока частиц различного диаметра в зависимости от степени запыленности газового потока.

Конструкция генератора сверхзвуковых струй на базе ракетной камеры, реализующая разгон абразива.

**Практическая ценность.** Разработанный метод расчета кинетических характеристик потока частиц в сверхзвуковом потоке продуктов сгорания позволяет проводить численные исследования, направленные на повышение производительности генераторов сверхзвуковых струй для струйно-абразивной обработки материалов.

Предложенные рекомендации по выбору рациональных режимов работы позволяют повысить экономичность генераторов сверхзвуковых струй для струйно-абразивной обработки материалов на базе ракетных двигателей малой тяги.

Разработанные рекомендации и методики были реализованы при создании промышленного образца генератора сверхзвуковых струй для струйно-абразивной обработки материалов, который позволил уменьшить затраты в 2 раза при сохранении производительности и эксплуатационных характеристик при пробной эксплуатации на предприятии ОАО «Самарское конструкторское бюро машиностроения» (г. Самара).

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы были обсуждены на международных научно-технических конференциях: «Проблемы и перспективы двигателестроения» (Самара, СГАУ, 2006 г., 2009 г.), «Четвертая Российская национальная конференция по теплообмену РНКТ-4» (Москва, МЭИ, 2006 г.), на ежегодных всероссийских научно-технических конференциях «Королевские чтения» (Самара, СГАУ).

Кроме того, часть положений работы была доложена на выставке «Expo-Tool. Мир инструмента» в рамках конкурса «Инновации в инструментальной отрасли» в номинации «Перспективный проект» как проект трансфера наукоемких технологий в массовое производство, 2006 г.

Экспериментальное оборудование разработано и создано в рамках инновационной образовательной программы национального проекта «Образование».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 статей, 3 тезисов докладов, в том числе в изданиях, определенных ВАК Российской Федерации – 4 работы.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, выводов, списка использованных источников из 88 наименований, приложений. Общий объем диссертации составляет: 149 стр., 67 рисунков, 11 таблиц.

**Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы и направления исследования, дана краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** работы на основании анализа научно-технической литературы были рассмотрены пути использования высокой энерговооруженности ракетных двигателей в технологических целях. Проведен анализ существующих устройств на базе ракетных камер и характеристики струй продуктов сгорания, являющихся источником концентрированных потоков энергии, а также теоретических и экспериментальных методов исследования двухфазных струй. Установлены и сформулированы основные проблемы проектирования подобных устройств, что позволило определить цель и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** произведено численное моделирование процесса движения частиц в сверхзвуковой струе продуктов сгорания. Представлено развитие математической модели от движения монодисперсного потока частиц с нулевой начальной скоростью до движения полидисперсного потока частиц с ненулевой начальной скоростью каждой из групп частиц.

На первом этапе математическая модель описывает одномерное движение монодисперсного потока частиц, движущегося со скоростью  $w_i$  в потоке продуктов сгорания, скорость которого  $w_a$ . Известны параметры частиц: диаметр  $d_i$ , плотность вещества  $\rho_i$ , расход  $\dot{m}_i$ , также известен расход  $\dot{m}_a$  и термодинамические параметры потока продуктов сгорания: вязкость  $\eta_a$ , давление  $p_a$ , температура  $T_a$ , плотность  $\rho_a$ .

В модели приняты следующие допущения:

- частицы имеют сферическую форму;
- не учитывается взаимное соударение частиц;
- не учитывается тепловое взаимодействие потоков частиц и продуктов сгорания;
- параметры струи продуктов сгорания до ввода абразива постоянны на звуковом участке;
- со стороны газового потока на частицы действует аэродинамическая сила сопротивления, действие остальных сил пренебрежимо мало.

В результате взаимодействия частиц с газовым потоком происходит обмен импульсом и соответствующее изменение скоростей (рисунок 1). Учитывая то, что расход абразива и расход газа являются постоянными в течение работы газогенератора на номинальном режиме:  $\dot{m}_a = Const$ ;  $\dot{m}_i = Const$ , уравнение движения частиц можно записать, используя закон сохранения импульса силы и второй закон Ньютона:

$$\dot{m}_a \cdot \bar{w}_a + \dot{m}_i \cdot \bar{w}_i = Const; \quad \bar{P}_i = \dot{m}_i \cdot \frac{d\bar{w}_i}{d\tau}, \quad (1)$$

где  $\bar{P}_i$  - сила действующая на поток частиц со стороны потока продуктов сгорания.

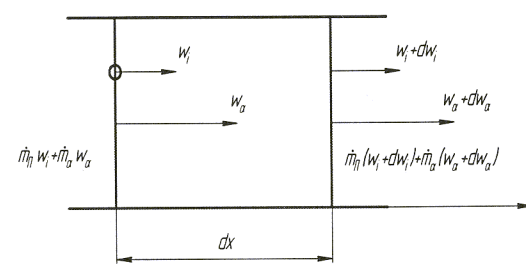


Рисунок 1 – Схема одномерного движения монодисперсного потока частиц в потоке продуктов сгорания

Величина аэродинамической силы определяется скоростью частицы относительно потока продуктов сгорания:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \cdot c_i \cdot f_m \cdot \rho_a \cdot (\bar{w}_a - \bar{w}_i) \cdot |\bar{w}_a - \bar{w}_i|, \quad (2)$$

где  $c_i = f(\text{Re}_{\text{omn}})$  - коэффициент сопротивления частицы, являющийся функцией числа Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{|\bar{w}_a - \bar{w}_i| \cdot d_i \cdot \rho_a}{\eta_a}.$$

Для вычисления коэффициента сопротивления использован закон, применимый для чисел Рейнольдса  $50 \leq \text{Re} \leq 1250$ :

$$c_i = \frac{13}{\sqrt{\text{Re}}}. \quad (3)$$

При прохождении некоторого пути  $dx$  частицей происходит изменение импульса частицы и импульса газового потока:

$$\frac{\dot{m}_n}{\dot{m}_a} = - \frac{dw_a}{dw_i} = \gamma, \quad (4)$$

где  $\gamma$  - коэффициент запыленности струи, равный отношению расходов потоков частиц и продуктов сгорания.

Сопоставление (1) и (2), с учетом (3) и (4), позволяет получить дифференциальное уравнение движения частицы:

$$\frac{dw_i}{d\tau} = A_1 \cdot [K - w_i \cdot (\gamma + 1)]^{1.5}, \quad \text{где } A_1 = \frac{\xi_1}{d_i^{1.5}}, \quad \xi_1 = \frac{3}{4} \cdot \frac{\psi \cdot \eta_a^{0.5} \cdot \rho_a^{0.5}}{\rho_i}, \quad K = w_{a0} + \gamma \cdot w_{i0} \quad (5)$$

При нулевой начальной скорости потока частиц  $w_{i0} = 0$  выражения зависимости скорости потока частиц (6) и скорости продуктов сгорания (7) от режимных параметров газогенератора и длины разгонного участка  $x$  имеют аналитический вид:



$$w_i = \frac{1}{\gamma + 1} \left\{ w_{\alpha 0} - \left[ \frac{4w_{\alpha 0}}{A_i(\gamma + 1) \left[ (\gamma + 1)x + \sqrt{(\gamma + 1)^2 x^2 + \frac{8x\sqrt{w_{\alpha 0}}}{A_i}} \right] + 4\sqrt{w_{\alpha 0}}} \right]^2 \right\} \quad (6)$$

$$w_\alpha = \frac{1}{\gamma + 1} \left\{ w_{\alpha 0} + \gamma \cdot \left[ \frac{4w_{\alpha 0}}{A_i(\gamma + 1) \left[ (\gamma + 1)x + \sqrt{(\gamma + 1)^2 x^2 + \frac{8x\sqrt{w_{\alpha 0}}}{A_i}} \right] + 4\sqrt{w_{\alpha 0}}} \right]^2 \right\} \quad (7)$$

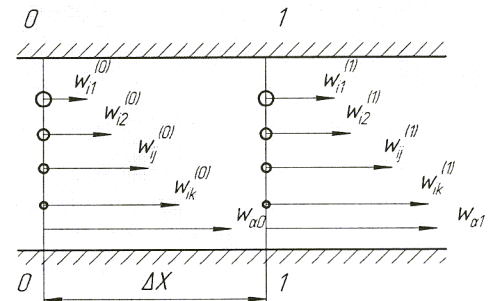


Рисунок 2 – Движение полидисперсного потока частиц в потоке продуктов сгорания

Реальный технологический процесс струйно-абразивной обработки предполагает использование полидисперсной смеси в качестве абразива. Таким образом, развитием теоретической модели является исследование влияния полидисперсности твердой фазы на ее импульсные и энергетические характеристики.

Для решения данной задачи используется подход Эйлера, при котором рассмотрены две границы

произвольно взятого бесконечно малого объема 0-1 движущегося двухфазного потока (рисунок 2).

Расстояние между границами равно  $\Delta x$ . Пусть полидисперсный поток частиц содержит  $k$  групп различного диаметра  $d_{i1}, d_{i2}, d_{i3} \dots d_{ik}$ . Движение будем считать установившимся, т. е. в одном месте пространства все параметры двухфазного потока постоянны, также как и число частиц каждой группы  $N_{i1}, N_{i2}, N_{i3} \dots N_{ik}$  постоянно для любой границы объема. Изменение скорости потока продуктов сгорания находится по выражению:

$$\Delta w_\alpha = -\Delta x \cdot \sum_{j=1}^n \frac{(w_\alpha - w_{ij})^{1.5}}{w_{ij}} \cdot A_{ij} \cdot \gamma_{ij}, \quad (8)$$

где  $A_{ij} = \frac{\xi_i}{d_{ij}^{1.5}}$ ,  $\gamma_{ij} = \frac{\dot{m}_{ij}}{\dot{m}_\alpha}$  - коэффициент запыленности отдельной группы частиц,

$m_{ij} = \frac{M_{ij}}{\Delta \tau_j}$  - расход частиц  $j$ -той группы;  $M_{ij} = m_{ij} \cdot N_{ij}$  - масса всех частиц  $j$ -той

группы;  $m_{ij} = \frac{\pi \cdot \rho_i}{6} \cdot d_{ij}^3$  - масса одиночной частицы диаметра  $j$ -той группы;  $\Delta \tau_j$  - время, за которое частица  $j$ -той группы проходит расстояние  $\Delta x$ .

Из закона сохранения импульса (рисунок 2):

$$\dot{m}_\alpha \cdot \Delta w_\alpha + \dot{m}_{i1} \cdot \Delta w_{i1} + \dots + \dot{m}_{ik} \cdot \Delta w_{ik} = 0, \text{ или } \Delta w_\alpha + \Delta w_{i1} \cdot \gamma_{i1} + \dots + \Delta w_{ik} \cdot \gamma_{ik} = 0 \quad (9)$$

Выражение для величин изменения скорости групп частиц одного диаметра

$$\text{имеет вид: } \Delta w_{ij} = \Delta x \cdot A_{ij} \cdot \frac{(w_\alpha - w_{ij})^{1.5}}{w_{ij}}. \quad (10)$$

Изучена устойчивость модели к величине  $\Delta x$ . В качестве критерия сравнения использовалось аналитическое решение (6) монодисперсной модели в сопоставлении его с полидисперсной моделью для монодисперсного случая. При уменьшении шага  $\Delta x$ , решение по модели для полидисперсного потока приближается к решению для монодисперсного потока. Причем, это особенно прослеживается для частиц с характерным размером  $d_i \leq 0,1$  мм, что объясняется относительно большим градиентом скорости на первых шагах.

Получено численное решение для потока частиц с высокими числами Рейнольдса  $Re \geq 1250$ . Приращение скорости газового потока

$$\Delta w_\alpha = A'_{ij} \cdot \Delta x \cdot \sum_j \frac{\gamma_{ij}}{d_{ij}} \cdot \frac{(w_\alpha - w_{ij})^2}{w_{ij}}, \text{ где } A'_{ij} = \frac{3}{4} \cdot c_i \cdot \frac{\rho_\alpha}{\rho_i}; \quad (11)$$

$$\text{приращение скорости потока частиц: } \Delta w_{ij} = A'_{ij} \cdot \Delta x \cdot \frac{(w_\alpha - w_{ij})^2}{d_{ij} \cdot w_{ij}} \quad (12)$$

В данном случае коэффициент сопротивления для  $Re \geq 1250$  сохраняется постоянным:  $c_i \approx 0,4$ .

В устройстве для струйно-абразивной обработки материалов ввод частиц производится в минимальном сечении сопла (рисунок 3), где реализуется звуковая скорость потока, с последующим разгоном частиц в свободной недорасширенной струе продуктов сгорания. В этом случае кинетические характеристики потока частиц могут быть представлены в следующем виде:

$$w_i = f(\alpha, p_K, K_{мст}, \gamma, d_i, \rho_i, l) \quad (13)$$

$$\dot{M}_i, W_i = f(\alpha, p_K, K_{мст}, \gamma, d_i, \rho_i, l, \dot{m}_i) \quad (14)$$

В этих выражениях отражается влияние режимных параметров генераторов сверхзвуковых струй (коэффициент избытка окислителя  $\alpha$ , давление в камере сгорания  $p_K$ ), и системы подачи частиц ( $\dot{m}_i$ ), вид топлива ( $K_{мст}$ ) и физико-механических свойств дисперсной фазы ( $d_i, \rho_i$ ), а также конструктивного параметра  $l$ .

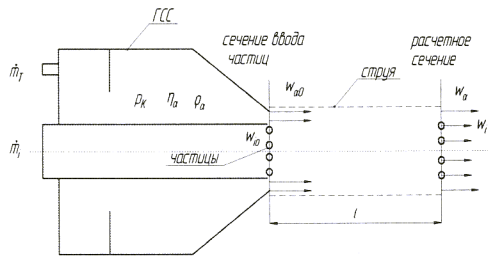


Рисунок 3 – Схема ввода частиц в поток продуктов сгорания

При проведении численного эксперимента были получены следующие результаты:

- скорость потока частиц возрастает с увеличением длины разгонного участка;
- такие параметры, как скорость, импульс силы, мощность кинетической энергии потока частиц имеют максимум при  $\alpha = 1,0$ ,
- мощность кинетической энергии потока частиц имеет максимум в зависимости от коэффициента запыленности струи  $\gamma$  (рисунок 4), который зависит от давления в камере сгорания  $p_K$ , состава топлива  $\alpha$ , диаметра частиц  $d_i$ .

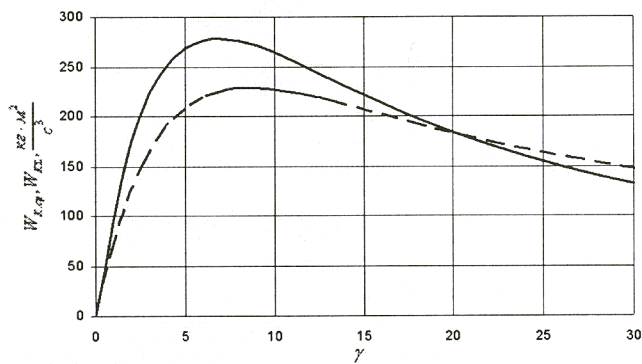


Рисунок 4 – Мощность кинетической энергии потока частиц в зависимости от коэффициента запыленности:  
 — для среднего диаметра;  
 - - - - суммарная мощность полидисперсного потока частиц

Для проведения экспресс-оценки кинетических параметров полидисперсного потока частиц получено выражение для решения по модели для монодисперсного потока со средним диаметром, результаты решения расходятся не более чем на 15% (рисунок 4).

**Третья глава.** По результатам теоретического исследования кинетических характеристик двухфазных струй выявлена область рациональных режимов генератора сверхзвуковых струй на компонентах воздух-пропан: давление в камере  $p_K = (2...5) \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ , расход пропана до 1 г/с, суммарный расход компонентов  $\dot{m}_T = 1..15 \text{ г/с}$ , коэффициент избытка окислителя из диапазона  $\alpha = 0,9..1,5$  коэффициент запыленности струи  $\gamma = 5..10$ .

При проектировании конструкции выполнены условия ввода абразива:

- 1) ввод абразива внутрь недорасширенной струи продуктов сгорания через камеру сгорания, минимально возможный осевой размер камеры сгорания;
- 2) ввод абразива в месте с максимальной скоростью газового потока, т.е. в минимальном сечении сопла;
- 3) прямолинейная подача абразива;
- 4) охлаждение трубки системы подачи абразива.

Выбрано предварительное смешение компонентов, что отвечает требованиям экономичности; электроискровая система воспламенения с безрасходной камерой воспламенения и радиальной подачей компонентов топлива, что уменьшает осевые габариты конструкции (рисунок 5).

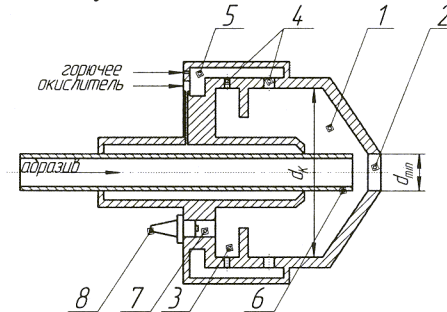


Рисунок 5 – Конструктивная схема устройства:

- 1 – камера сгорания; 2 – минимальное сечение; 3 – предкамера; 4 – форсунки топливной смеси; 5 – коллектор; 6 – трубка питателя абразива; 7 – воспламенительная камера; 8 – свеча зажигания

Охлаждение трубки питателя абразива производится воздухом, который также участвует в процессе горения, попадая в камеру сгорания.

В эксперименте для замера параметров частиц использовано устройство контроля дисперсной фазы, основанное на бесконтактном оптическом методе регистрации (рисунок 6).

Устройство контроля дисперсной фазы предназначено для измерения скорости и диаметра микрочастиц в газовых сверхзвуковых потоках, как в воздухе, так и в продуктах сгорания.

Измерение в данном устройстве осуществляется путем визуализации данных, передаваемых на компьютер непосредственно с датчика. Данные представляют собой: диаметры частиц и соответствующие им скорости в виде файла, гистограмму распределения частиц по скоростям в зависимости от диаметра, гистограмму распределения числа частиц в зависимости от диаметра.

Измерение расходов окислителя, горючего и абразива производилось весовым методом с использованием датчиков усилия, что позволило снизить погрешность измерения расхода пропана, поступающего в генератор в паровой фазе.

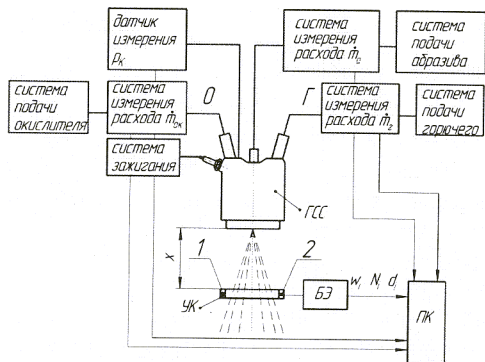


Рисунок 6 – Схема эксперимента:

1 – светодиод; 2 – фотодиод; БЭ – блок электроники; ГСС – генератор сверхзвуковых струй; ПК – персональный компьютер; УК – устройство контроля параметров дисперсной фазы

Благодаря системе автоматизации экспериментального стенда все параметры испытаний регистрировались в режиме текущего времени с частотой опроса 10Гц и данные передавались на персональный компьютер в виде таблиц и осциллограмм.

Четвертая глава содержит результаты эксперимента по определению скорости и гранулометрического состава частиц абразива, расходов компонентов топлива и абразива, давления в камере сгорания.

Объектом испытания являлся экспериментальный образец генератора сверхзвуковых струй на базе ракетного двигателя малой тяги на газообразном топливе для струйно-абразивной обработки материалов.

Эксперимент проводился для двух режимов работы газогенератора: на воздухе без процесса горения (холодный пуск) и на воздухе и пропане с горением в камере (горячий пуск). В качестве абразива использовался речной песок. Гранулометрический состав определялся числом частиц  $N_{ij}$  приходящихся на каждую фракцию диаметром  $d_{ij}$ . Экспериментальные данные по

гранулометрическому составу абразива при расходах:  $\dot{m}_i = 0,76 \text{ г/с}$  - на холодном пуске;  $\dot{m}_i = 5,0 \text{ г/с}$  - на горячем пуске, были получены в виде гистограмм. Режимные параметры газогенератора, при которых производился замер скоростей частиц абразива, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимные параметры газогенератора

Параметр/режим	$p_K, \text{ атм}$	$\dot{m}_a, \text{ г/с}$	$\alpha$	$\dot{m}_i, \text{ г/с}$	$w_{i0}, \text{ м/с}$	$x, \text{ мм}$
холодный пуск	2,3	13,7	$\infty$	0,76	21,1	75
горячий пуск	4,4	9,28	1,386	5	14,2	75

Экспериментальные данные по скорости частиц представлены на рисунках 7, 8. Расчет скоростей частиц производился по модели для полидисперсного потока, по выражениям (9, 10) и для частиц с высоким числом Рейнольдса по (11, 12) с шагом дискретности  $\Delta x = 1 \text{ мм}$ . (рисунок 7, 8).

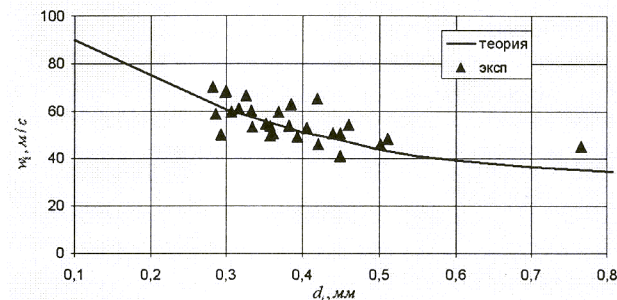


Рисунок 7 – Данные эксперимента и расчета по определению скоростей полидисперсного потока частиц абразива на холодном пуске

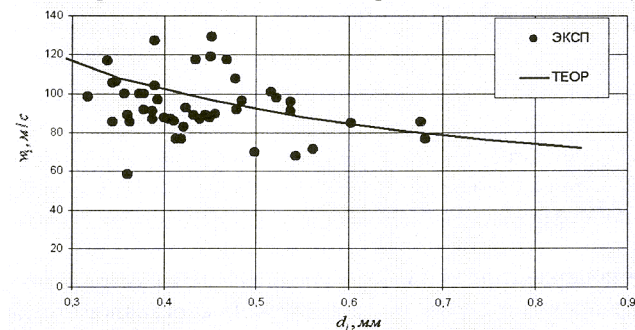


Рисунок 8 – Данные эксперимента и расчета по определению скоростей полидисперсного потока частиц абразива на горячем пуске



Для частиц, размер которых превышает 0,45 мм принципиально использовать для расчета кинетических характеристик выражения, полученные для частиц с высоким числом Рейнольдса. Относительная погрешность определения скорости частиц, таким образом, достигает  $\delta_w = 20\%$ , что связано с допущениями, принятыми при разработке математической модели.

В результате проведенных исследований разработан и изготовлен газогенератор сверхзвуковых струй для струйно-абразивной обработки материалов, а также соответствующая установка для его промышленной реализации.

Предназначение этой установки – удаление с очищаемой поверхности различных загрязнений, лакокрасочных и металлических покрытий, окисных образований. С учетом преимуществ самого газогенератора устройство может использоваться для очистки поверхностей в машиностроении, нефтяной, газовой и других отраслях промышленности. Габариты устройства позволяют производить очистку в труднодоступных местах. Основными требованиями к установке является портативность и мобильность, возможность эксплуатации в полевых условиях.

В состав установки (рисунок 9) входит генератор сверхзвуковых струй для струйно-абразивной обработки материалов – пропано-воздушный пескоструй, системы подачи воздуха, пропана, абразива.

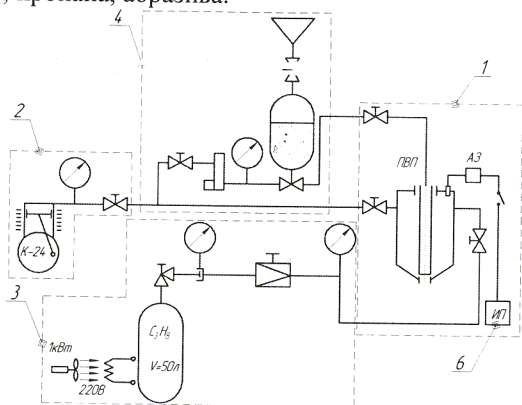


Рисунок 9 – Схема установки для струйно-абразивной обработки материалов:

1 – пропано-воздушный пескоструй; 2 – система подачи воздуха; 3 – система подачи пропана; 4 – система подачи абразива

Для оценки конкурентоспособности предложенного устройства разработан единый критерий сравнения устройств для струйно-абразивной обработки материалов.

$$\text{Данный критерий имеет вид: } K_{CAO} = \sqrt{\frac{W_{Ki}}{\dot{m}_a}} = \sqrt{\frac{\dot{m}_i \cdot w_i^2}{2 \cdot \dot{m}_a}} = w_i \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{2}}. \quad (15)$$

Он равен отношению мощности кинетической энергии потока абразива к расходу топлива. Так как коэффициент запыленности струи величина безразмерная, то физический смысл критерия – эффективная скорость частиц при струйно-абразивной обработке материалов.

Сопоставление спроектированного устройства с существующими устройствами для струйно-абразивной обработки показало преимущество нового устройства в 2,5 раза по эффективной скорости при струйно-абразивной обработке материалов.

### Основные результаты и выводы по работе

В работе решена важная техническая задача создания высокоэффективных технологических устройств для струйно-абразивной обработки материалов. Решена проблема установления связи кинетических параметров потока частиц с режимными и конструктивными характеристиками, соответствующих генерирующих систем и поиск рациональных решений.

1. Разработана и исследована математическая модель движения частиц абразива в струе продуктов сгорания. Исследование влияния параметров двухфазной струи на кинетические характеристики частиц в момент контакта с обрабатываемой поверхностью показало, что мощность кинетической энергии потока частиц имеет максимальное значение при коэффициенте запыленности струи  $\gamma = 5..10$  в зависимости от размера частиц.

2. Создан экспериментальный стенд и проведено экспериментальное исследование по измерению скорости и гранулометрического состава частиц абразива, движущихся в потоке продуктов сгорания генератора сверхзвуковых струй.

3. Разработана конструкция генератора сверхзвуковых струй на базе ракетного двигателя малой тяги как устройства для разгона абразива.

4. Определена область рациональных режимов работы генератора сверхзвуковых струй на базе ракетной камеры для струйно-абразивной обработки материалов.

5. Разработан единый критерий сравнения устройств для струйно-абразивной обработки материалов, на основании которого проведен сравнительный анализ существующих устройств и спроектированного в рамках данной диссертационной работы. Показано, что предложенное устройство превосходит существующие аналоги минимум в 2,5 раза. Создана установка для струйно-абразивной обработки, позволяющая производить обработку поверхностей в труднодоступных местах.

### Основное содержание диссертации опубликовано

в рецензируемых журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации:



1. Буланова Е.А. Импульсные и энергетические характеристики недорасширенных двухфазных струй продуктов сгорания / Е.А. Буланова, А.Н. Первышин // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2006. - № 2 (10). – С. 352-357.
2. Буланова Е.А. Измерение скорости частиц абразива в потоке продуктов сгорания / Е.А. Буланова, А.Н. Первышин // Актуальные вопросы тепло- и массообмена, энергоэффективность, исследование вихревых закрученных потоков: Спец. выпуск. Известия Самар. науч. центра РАН. – 2008.– С. 66-70.
3. Буланова Е.А. Исследование модели движения полидисперсного потока частиц в струе продуктов сгорания / Е.А. Буланова, А.Н. Первышин // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2008. - № 3 (16). – С. 7-14.
4. Буланова Е.А. Модель движения полидисперсного потока частиц в сверхзвуковой струе продуктов сгорания / Е.А. Буланова, А.Н. Первышин // Актуальные вопросы тепло- и массообмена, энергоэффективность, исследование вихревых закрученных потоков: Спец. выпуск. Известия Самар. науч. центра РАН. – 2008.– С. 71-78.

в других изданиях:

5. Буланова Е.А. Метод экспериментального определения импульсного воздействия твердой фазы на преграду // VIII Королевские чтения: Сб. тезис. доклад. научн. конф. - Самара, 2006 г. – С. 22.
6. Буланова Е.А. Модели взаимодействия частиц дисперсной среды в потоке недорасширенной струи продуктов сгорания // Прогрессивные технологии и оборудование в машиностроении и металлургии: Труды междунар. научн.-технич. конф., посвящ. 50-летию Липецк. гос. технич. ун-та (11-12 мая 2006 г.). – Липецк, 2006. – Часть 1 – С.44-47.
7. Буланова Е.А. Экспериментальная оценка скорости частиц в сверхзвуковом потоке продуктов сгорания / Е.А. Буланова, А.Н. Первышин // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Матер. междунар. научн.-технич. конф. (21-23 июня 2006 г.). – Самара: СГАУ, 2006. – В 2Ч.Ч.1. – С.6-7.
8. Буланова Е.А. Исследование движения дисперсной среды в недорасширенной струе продуктов сгорания / Е.А. Буланова, А.Н. Первышин // Дисперсные потоки и пористые среды. Интенсификация теплообмена : Труды Четвертой рос. нац. конф. по теплообм. – М: Издательский дом МЭИ, 2006. – Т. 6. — С.40-43.
9. Буланова Е.А. Критерий сравнения устройств для струйно-абразивной обработки материалов / Е.А. Буланова, А.Н. Первышин // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: Матер. междунар. научн.-технич. конф. (24-26 июня 2009 г.). – Самара: СГАУ, 2009. – В 2Ч.Ч.1. – С.127-128.

Подписано в печать 01.09.09.

Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
443086, Самара, Московское шоссе 34, СГАУ