

## **РАСЧЕТ СКОРОСТЕЙ ПОТОКА И ЧАСТИЦ ПО ТРАКТУ СОПЛА ЛАВАЛЯ ПРИ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В СРЕДЕ ANSYS CFX**

### **Введение**

Основные показатели качества деталей авиационного двигателя, такие, как предел выносливости, коэффициент трения, контактная прочность и износостойкость материалов, в основном определяются свойствами поверхностных слоев деталей и соединений. Снижение интенсивности изнашивания поверхностных слоев материала, обусловленную его механическими, физико-химическими и трибологическими характеристиками, можно обеспечить таким наиболее эффективным технологическим методом, как нанесение покрытий.

Основным требованием к качеству покрытия, определяющим эффективность его применения независимо от вида, состава и технологии нанесения, является интенсивное адгезионное взаимодействие материалов покрытия и поверхности детали. Повысить адгезионные свойства можно за счет взаимного механического зацепления неровностей поверхности и непосредственным межатомным взаимодействием материалов покрытия и подложки. Для выполнения этих условий лучше применять метод струйно-абразивной обработки, позволяющий провести очистку, подготовку и активацию поверхности [1].

Основными параметрами струйно-абразивной обработки, определяющими режим истечения и удара по образцу абразивных частиц, являются: давление воздуха, расстояние от среза сопла до испытуемого образца, скорость выброса абразивного материала и его количество.

### **1. Формулирование проблемы**

Важнейшими параметрами струйно-абразивной обработки являются кинетическая энергия абразивных частиц и, в частности, их скорость.

Деформационное упрочнение поверхности, которое достигается за счёт кинетической энергии потока частиц, приводит к повышению усталостной прочности, износостойкости, контактной выносливости и коррозионной стойкости. Глубина и степень наклепа определяются взаимодействием абразивной частицы с обрабатываемой поверхностью и зависят от режима струйно-абразивной обработки, а также физико-механических свойств материала обрабатываемой детали.

Большинство задач при определении технологических параметров

струйно-абразивной обработки решаются экспериментальным методом, связанным с некоторыми ограничениями технического характера:

- исследования проводятся не во всей области изменения определенных параметров, в результате чего определяются только интегральные характеристики процесса обработки;

- высокая трудоемкость и стоимость проведения полноценных экспериментальных исследований.

В целях сокращения объемов и повышения качества планируемых экспериментальных исследований в данной работе предложено численное моделирование распределения скорости газового потока и частиц в канале сопла Лаваля. Для моделирования выбрана компьютерная среда Ansys CFX – интегрированная система программного обеспечения, предназначенная для решения всего спектра задач гидрогазодинамики.

## 2. Основные аналитические зависимости, используемые для численного моделирования распределения скорости потока и частиц в программном комплексе Ansys CFX

В целях получения удобной аналитической зависимости для расчета скорости частицы по каналу сопла в работе [2] нами был введен комплексный параметр, который описывает изменение плотности газового потока в проточной части:

$$\xi_j = \frac{3C_0\rho_j}{4\rho_p d}, \quad (1)$$

где  $C_0$  – коэффициент лобового сопротивления;

$\rho_j$  – плотность потока рабочей среды в  $i$ -м сечении;

$\rho_p$  – плотность частицы;

$d$  – диаметр частицы,

Также установлена зависимость скорости частицы в канале сопла Лаваля от параметров газового потока и частицы (плотность и диаметр):

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} = \xi_j V_i^2 - 2\xi_j (U_i + at)V_i + \xi_j (U_i^2 + 2U_i at + a^2 t^2), \quad (2)$$

где  $U_i$  – скорость потока рабочей среды в  $i$ -м сечении;

$V_i$  – скорость частицы в  $i$ -м сечении,

$a = \frac{U_{i+1}^2 - U_i^2}{2L_{i+1,j}}$  – ускорение потока ( $U_{i+1}$ ,  $U_i$  – скорость потока в соответствующих сечениях;  $L_{i+1,j}$  – расстояние между  $i$ -м и  $i+1$ -м сечениями).

Дифференциальные уравнения первого порядка такого вида являются уравнением Риккати и в общем случае не интегрируются в квадратурах. Решение уравнения (2) подробно изложено нами в работе [2] и

получено в виде двух систем:

$$\left. \begin{aligned} \xi_j &= \frac{3C_0\rho_j}{4\rho_\gamma d}; \\ C_1 &= \frac{V_0\xi_0^2 + \xi_0\sqrt{a\xi_0} - U_0\xi_0^2}{V_0\xi_0 - \sqrt{a\xi_0} - U_0\xi_0}; \\ V_{1i} &= a(t_i - t_0) + \frac{\sqrt{a\xi_i} + U_0\xi_i}{\xi_i} + \frac{2\sqrt{a\xi_i}}{C_1 e^{-2\sqrt{a\xi_i}(t_i-t_0)} - \xi_i}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \xi_j &= \frac{3C_0\rho_j}{4\rho_\gamma d}; \\ C_2 &= \frac{U_0\xi_0^2 + \xi_0\sqrt{a\xi_0} - V_0\xi_0^2}{V_0\xi_0 + \sqrt{a\xi_0} - U_0\xi_0}; \\ V_{2i} &= a(t_i - t_0) - \frac{\sqrt{a\xi_i} - U_0\xi_i}{\xi_i} + \frac{2\sqrt{a\xi_i}}{C_2 e^{2\sqrt{a\xi_i}(t_i-t_0)} + \xi_i}; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $U_0, V_0, \xi_0$  – значение скорости потока, скорости частицы и функции плотности потока в момент времени  $t_0$ .

На основании теоретических исследований кинематики частицы, разгоняемой потоком газа в сопле, получены выражения, которые дают возможность провести расчет скорости частицы при столкновении с подложкой:

$$V = \frac{V_c}{1 + V_c \xi_c t}; \quad (6)$$

$$S(t) = \frac{1}{\xi_c} \ln(1 + V_c \xi_c t), \quad (7)$$

где  $\xi_c = \frac{3C_0\rho_c}{4\rho_\gamma d}$  – комплекс, учитывающий плотность среды  $\rho_c$ , в которой движется частица;

$V_c$  – скорость частицы на выходе из сопла.

В целях получения информации об адекватности модельных представлений распределения скорости потока и частиц по тракту сопла проведен анализ в среде Ansys CFX.

### 3. Результаты моделирования скорости потока и частиц в программном комплексе Ansys CFX

Моделирование распределения скоростей газового потока и частиц при струйно-абразивной обработке было проведено с помощью следующего алгоритма:

- создание трехмерной (параметрической) модели сопла Лавалья (рис. 1) и обозначения регионов, описывающих граничные условия расчета;
- создание расчетной сетки конечных элементов с обозначением граничных условий на заданных регионах;
- непосредственный расчет скоростей движения газового потока и частиц.

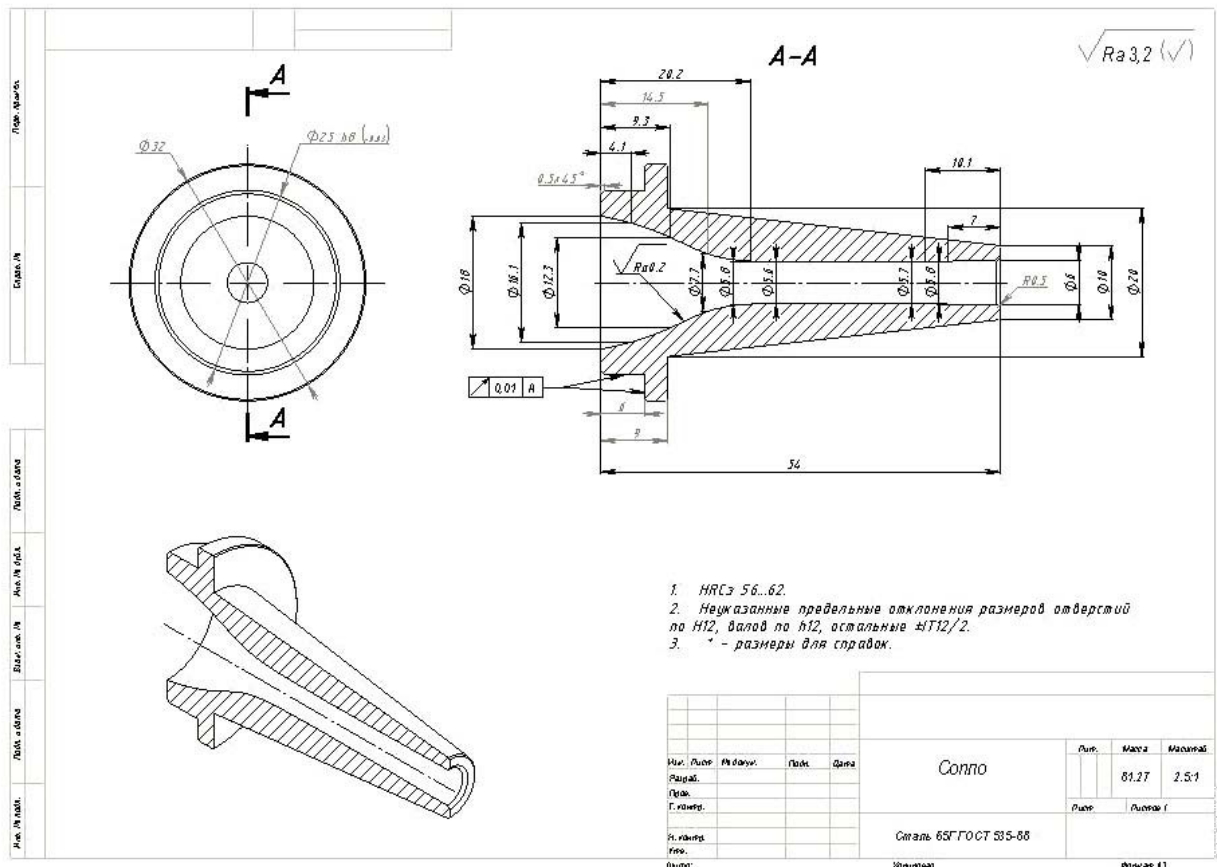


Рисунок 1 – Сопло Лавалья

Расчет скоростей газового потока и частиц в канале сопла Лавалья проводился при следующих исходных данных:

- давление на входе в сопло  $P_0^* = 0,6$  МПа;
- материал частицы: каолин, обогащенный для керамических изделий, марки КЕ–2 по ТУ 5729–070–00284530–96;
- диаметр частицы – 10 мкм;

– насыпная плотность –  $380 \text{ кг/м}^3$ .

На рис. 2 – 5 приведены результаты моделирования.

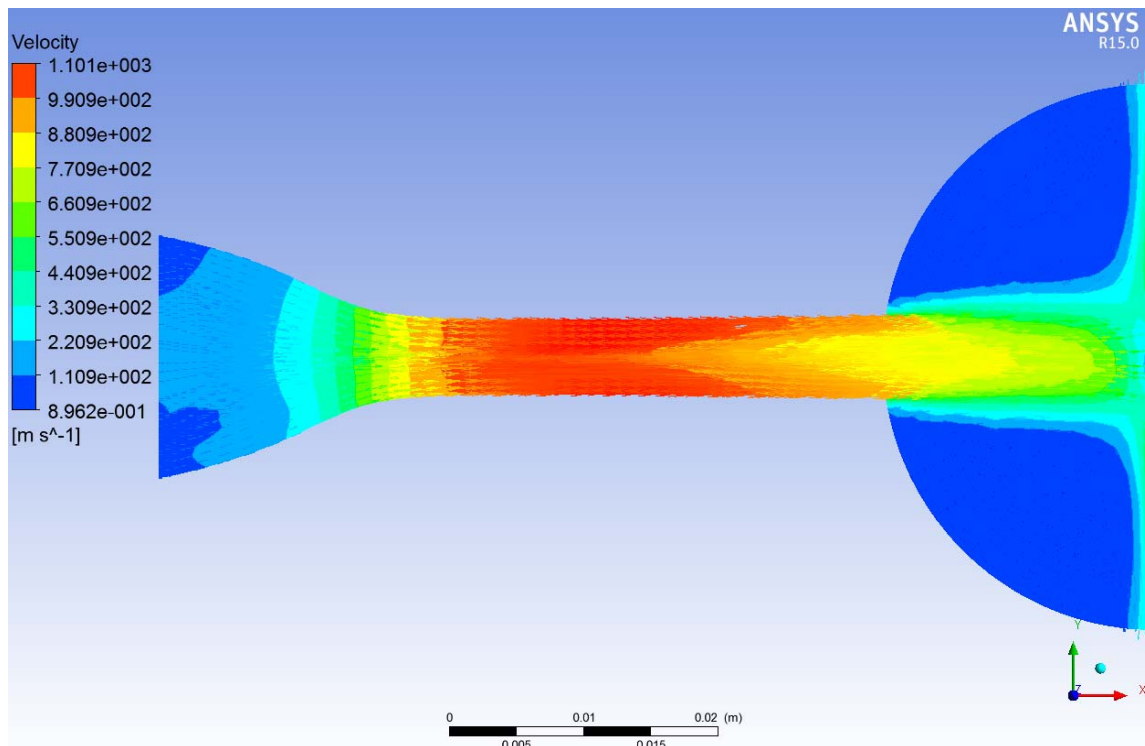


Рисунок 2 – Распределение поля скоростей потока по длине сопла и при столкновении с поверхностью

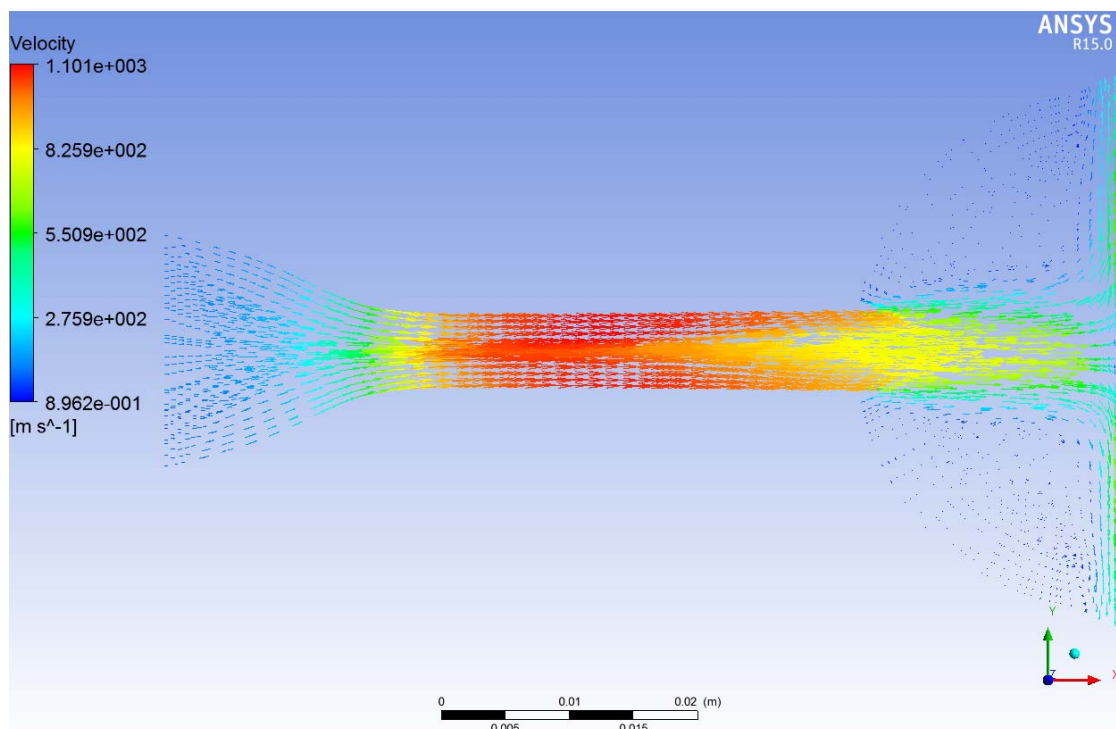


Рисунок 3 – Распределение поля скоростей в векторном представлении потока по длине сопла и при столкновении с поверхностью

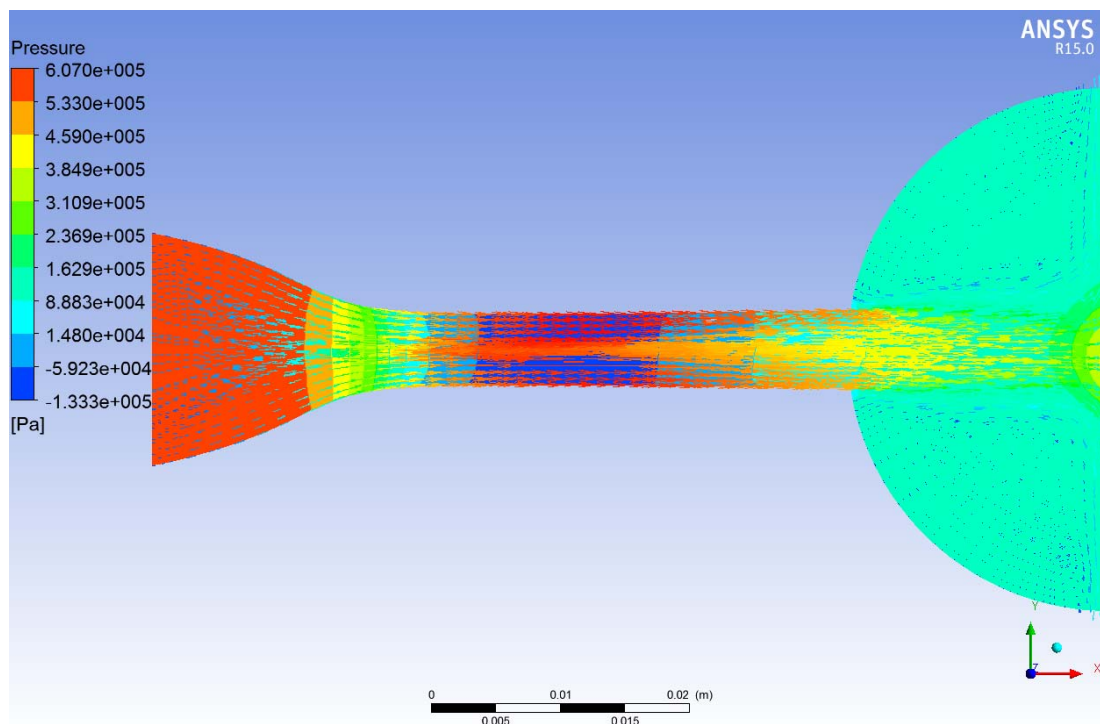


Рисунок 4 – Распределение поля давления потока по длине сопла и при столкновении с поверхностью

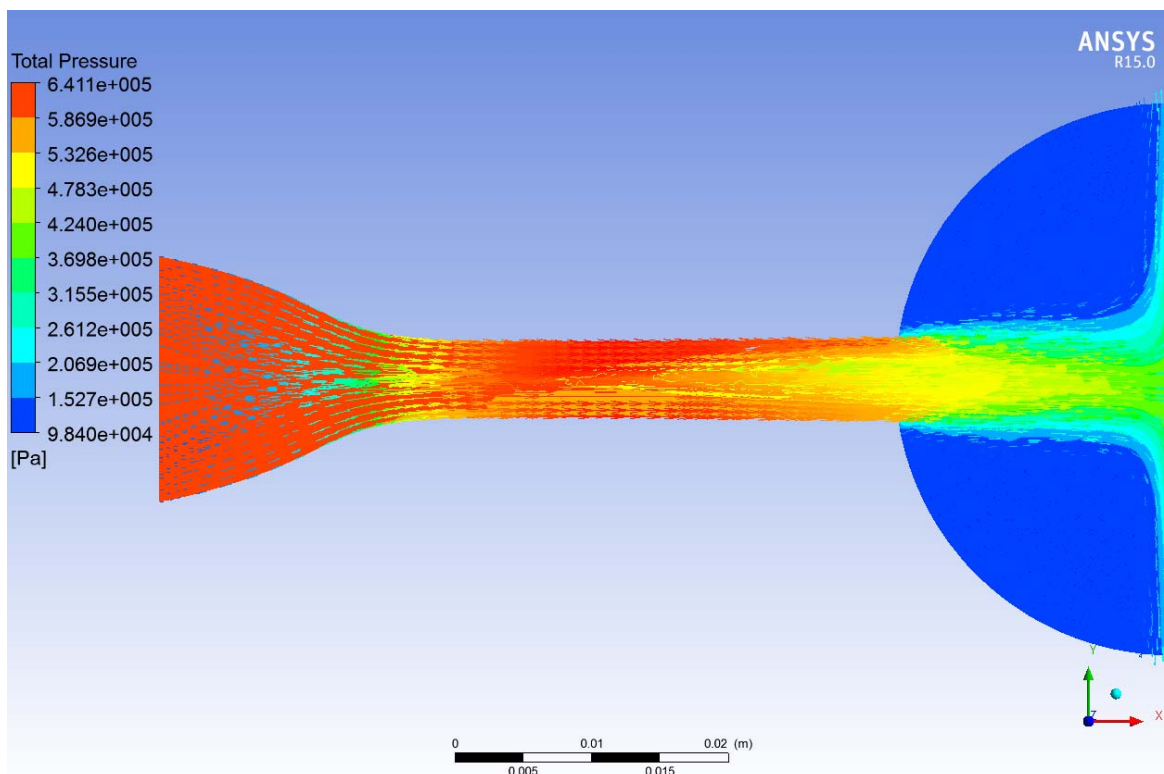


Рисунок 5 – Распределение поля полного давления потока по длине сопла и при столкновении с поверхностью

Сравнение результатов моделирования скоростей потока по длине сопла и при столкновении с поверхностью хорошо согласуется с аналитическими зависимостями (4), (5). Погрешность разработанного метода расчета скорости частицы определяется количеством расчетных сечений сопла и ограничивается лишь объемом вычислений. При необходимости погрешность расчетов может корректироваться исследователем в зависимости от требуемой точности конечной целевой функции (скорости при столкновении с поверхностью, кинетической энергии, глубины и степени наклепа и т. п.).

### Выводы

1. Сформулирована проблема необходимости численного моделирования распределения поля скоростей потока и частиц при струйно-абразивной обработке.

2. Приведены основные аналитические зависимости, используемые для численного моделирования распределения скорости потока и частиц.

3. Проведен анализ в среде ANSYS CFX распределения скорости потока и частиц по тракту сопла Лаваля и при столкновении с поверхностью.

4. Представлены результаты моделирования поля скоростей и полей давлений потока и частиц по длине сопла Лаваля и при столкновении с подложкой.

### Список использованных источников

1. Сергеев, С. В. Анализ способов отделочно-упрочняющей обработки поверхности деталей ГТД свободным абразивом / С. В. Сергеев, Т. В. Лоза, А. П. Петренко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. – Х., 2013. – вып. 4(76). – С. 80–88.

2. Теоретические основы создания защитных нанокompозитных покрытий на высоконагруженных элементах конструкций авиационных двигателей [Текст]: отчет о НИР (заключ.) / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т» ; рук. Долматов А. И. ; исполн.: Сергеев С. В. [и др.]. – Х., 2014. – 136 с. – № ГР 0112U001320.

*Поступила в редакцию 12.05.2015.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. Ф. Сорокин,  
Национальный аэрокосмический университет  
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*