

PACS numbers: 47.55.Kf, 47.70.Pq, 47.80.Jk, 47.85.mb, 81.15.Gh, 81.15.Rs, 82.33.Vx

Моделирование распределения частиц в двухфазном потоке детонационно-плазменной установки

А. И. Долматов, К. А. Данько, Ю. А. Невешкин

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»,
ул. Чкалова, 17,
61070 Харьков, Украина*

В статье рассмотрено моделирование распределения частиц в двухфазном потоке с последующим анализом поведения частиц в стволе детонационно-плазменной установки и за срезом ствола вплоть до подложки. Полученные результаты позволяют в дальнейшем совершенствовать оборудование и разрабатывать технологические процессы нанесения защитных покрытий на нагруженные детали авиационных двигателей с оптимальными параметрами глубины загрузки и фракции порошка.

У статті розглянуто моделювання розподілу частинок у двофазному потоці з подальшою аналізою поведінки частинок у стовбурі детонаційно-плазмової устави та за зрізом стовбура аж до підложжя. Одержані результати уможливають в подальшому вдосконалювати обладнання і розробляти технологічні процеси нанесення захисних покриттів на навантажені деталі авіаційних двигунів з оптимальними параметрами глибини завантаження та фракції порошку.

This paper presents modelling of particle behaviour in two-phase flow. The analysis of particle behaviour inside the barrel of detonation-gun-plasma unit and outside its cut up to the substrate is performed. The obtained results could be used for further improvement of the experimental equipment and development of protective-coatings' deposition technologies for loaded aircraft-engines' parts, providing optimal parameters of powder injection point and fraction of the powder.

Ключевые слова: двухфазное течение, детонация, плазма, моделирование, глубина загрузки, распределение.

(Получено 8 апреля 2014 г.; окончат. вариант — 19 августа 2014 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

В статье представлены результаты работы по моделированию двухфазного течения в стволе детонационно-плазменной установки [1].

Работа выполнялась в рамках анализа возможностей современного оборудования для повышения жизненного цикла деталей авиационных двигателей путём нанесения защитных покрытий на наиболее нагруженные их элементы.

Так как в литературе отсутствует информация о возможностях рассматриваемого оборудования и, в первую очередь, об энергетических параметрах частиц напыляемого материала, то было принято решение выполнить предварительный анализ поведения частиц в стволе детонационно-плазменной установки и за срезом ствола, вплоть до подложки. В качестве исследуемого параметра была выбрана скорость частиц, отвечающая за кинетическую составляющую энергии при образовании связей с подложкой. Материалом для исследования был выбран твёрдый сплав ВК-20. Цель исследования — определение оптимальных технологических параметров, при которых частицы достигают максимальной скорости в момент соударения с подложкой. Технологическими параметрами в данном случае служат: фракция порошка напыляемого материала (0,1, 1 и 20 мкм) и глубина загрузки в ствол установки ($S_1 = 300$ мм, $S_2 = 350$ мм и $S_3 = 400$ мм).

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С целью получения информации о параметрах частиц напыляемого материала различной фракции было смоделировано течение потока продуктов детонации с подачей частиц порошка. При этом учитывалось влияние частиц на поток.

Поток продуктов детонации рассматривался нами как несжимаемый и вязкий, с неизменными физическими свойствами по всей длине ствола. Уравнения, описывающие движение несжимаемой вязкой среды, выражают сохранение массы и количества движения:

$$\nabla \mathbf{v} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v} + \frac{1}{2} \nabla (\mathbf{v} \times \mathbf{v}) + (\nabla \mathbf{v}) \mathbf{v} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} + \boldsymbol{\Omega} (\boldsymbol{\Omega} \mathbf{r}) = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mathbf{F} - \nu \nabla (\nabla \mathbf{v}); \quad (2)$$

здесь \mathbf{v} — скорость частицы, измеряемая в системе координат, вращающейся с постоянной угловой скоростью $\boldsymbol{\Omega}$; \mathbf{r} , t , P , ρ , ν , \mathbf{F} представляют, соответственно, радиус-вектор частицы, время, давление, плотность, кинематическую вязкость и массовую силу, отнесенную к единице массы. Массовая сила предполагается консерва-

тивной: $\mathbf{F} = \nabla A$, так что её вместе с центробежной силой и P можно записать в форме редуцированного давления:

$$p = P + \rho A - \rho(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r})(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r})/2. \quad (3)$$

Это упрощает уравнение (2):

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla \mathbf{v} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \mathbf{v} \nabla(\nabla \mathbf{v}). \quad (4)$$

Полная форма конвективного ускорения $\mathbf{v} \times \nabla \mathbf{v}$ используется чаще, чем инвариантное векторное представление.

Уравнения движения в инерциальной системе координат получаются из предыдущих уравнений, если положить в них $\boldsymbol{\Omega} = 0$.

Формула

$$\mathbf{v}_{\text{inert}} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r} + \mathbf{v}_{\text{rot}}$$

связывает между собой скорости частицы в инерциальной и вращающейся системах.

На твёрдых непроницаемых поверхностях вязкий газ должен двигаться вместе с этими поверхностями, так как скольжение вдоль них или пересечение их невозможно. Если поверхность проницаемая, можно задать нормальную компоненту скорости, но требование отсутствия скольжения или относительной тангенциальной скорости остаётся в силе. В общем случае граничная поверхность имеет части, равномерно вращающиеся с угловой скоростью $\boldsymbol{\Omega}_w$. По отношению к системе, вращающейся со скоростью $\boldsymbol{\Omega}$, граничное условие на такой поверхности есть:

$$\mathbf{v} = (\boldsymbol{\Omega}_w - \boldsymbol{\Omega}) \times \mathbf{r}. \quad (5)$$

Постановка задачи завершается описанием начального поля скорости:

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}, 0) = \mathbf{v}_*(\mathbf{r}). \quad (6)$$

Задача, таким образом, состоит в том, чтобы решить уравнения (1) и (4) в фиксированной области с граничными условиями (5) и (6).

Пусть L, Ω^{-1}, U характеризуют типичную длину, время и относительную скорость движения частицы. Замена переменных $\mathbf{r}, t, \mathbf{v}, \boldsymbol{\Omega}, p$ их нормированными значениями $L\mathbf{r}, \Omega^{-1}t, U\mathbf{v}, \Omega\mathbf{k}, p\Omega ULp$ позволяет привести уравнения к безразмерному виду:

$$\nabla \mathbf{v} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{v} + \varepsilon \mathbf{v} \times \nabla \mathbf{v} + 2\hat{\mathbf{k}} \times \mathbf{v} = -\nabla p - E \nabla(\nabla \mathbf{v}) \quad (8)$$

с соответствующими граничными условиями. Знак над $\hat{\mathbf{k}}$ отмечает единичный вектор. При этом появляются два важных безразмерных параметра: число Экмана:

$$E = \frac{\nu}{\Omega L^2} \quad (9)$$

и число Россби:

$$\varepsilon = \frac{U}{\Omega L}. \quad (10)$$

Первый является грубой мерой отношения типичной силы вязкости к силе Кориолиса и есть, по существу, обратное число Рейнольдса. Подобно этому число Россби — отношение конвективного ускорения к ускорению Кориолиса — даёт общую оценку относительного значения нелинейных членов. Число Экмана очень мало в большинстве тех случаев, когда преимущественно проявляются эффекты вращения. Практически величина 10^{-5} является для него обычной, и в последующем предположение $E \ll 1$ используется без дальнейших оговорок. Число Россби имеет порядок единицы или меньше; в линейной теории его значение принимается бесконечно малым.

Безразмерное уравнение вихря во вращающейся системе есть:

$$\frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{\omega} + \nabla \{ (\varepsilon \boldsymbol{\omega} + 2\hat{\mathbf{k}}) \times \mathbf{v} \} = -E \nabla \times \nabla \times \boldsymbol{\omega}, \quad (11)$$

где

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{v} \frac{1}{2}. \quad (12)$$

Тривиальное решение этих уравнений $\mathbf{v} = 0$, отвечает, конечно, нетривиальному состоянию твёрдого вращения, наблюдаемому во вращающейся системе. В инерциальной системе соответствующая размерная скорость есть просто $\mathbf{v}_{\text{inert}} = \hat{\mathbf{k}} \times \mathbf{r}$. Очевидно, что вязкая среда (газ или жидкость), заключённая в закрытый равномерно вращающийся сосуд, стремится с течением времени к этому естественному состоянию жёсткого вращения.

В качестве среды для расчёта распределения параметров частиц был выбран ANSYS CFX — профессиональный аналитический программный комплекс, предназначенный для решения широкого спектра задач вычислительной газо- и гидродинамики.

Основой всей расчётной технологии ANSYS CFX являются алгоритмы Algebraic Coupled Multigrid. Используя неявную связанную схему решения линеаризованной системы уравнений, они обеспечивают быструю и устойчивую сходимость во всех типах задач. При этом время решения задачи находится в линейной зависимости от объёма расчётной сетки.

Преимущество ANSYS CFX особенно проявляется при решении больших моделей с многокомпонентными течениями и сложной структурой. Алгоритмы ANSYS CFX малочувствительны к отношениям размеров элементов, временным шагам и релаксационным факторам. Точность решения достигается как за счёт высокой точности на узел, так и схемой дискретизации второго порядка устанавливаемой по умолчанию. Эти же свойства сохраняются при параллельных расчётах, обеспечивая отличные параметры ускорения на многопроцессорных системах и кластерах рабочих станций.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Математическая модель и постановка задачи реализовывалась с применением программного комплекса DGun (Detonation-Gun), разработанного на кафедре технологий производства авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета «ХАИ». Программная реализация физической модели импульсного процесса течения двухфазного потока в канале детонационно-плазменного ускорителя рассматривалась нами ранее [1].

Используя зависимости и допущения, приведённые выше, для решения задачи об ускорении и нагреве частицы в канале ствола, выбраны входные параметрами для расчётов: горючее вещество; параметры газа; параметры смеси; технологические параметры; параметры ускорителя; дополнительные параметры.

В свою очередь, для начала расчёта из базы данных считываются свойства горючего вещества такие как: формула, тип горючего, молекулярная масса и плотность.

Параметры газа: коэффициент динамической вязкости газа μ_t , коэффициент теплопроводности газа λ_t , теплоёмкость газа при постоянном объёме C_v .

Полученная информация дополняется параметрами смеси: процентное содержание горючего и коэффициент политропы.

В качестве технологических параметров выступают дистанция напыления и длина ствола. Параметры ускорителя задаются удельной энергией электрической составляющей.

Дополнительные параметры, также загружаемые при выборе горючего, представляют собой коэффициенты членов полинома третьей степени используемого для определения скорости детонации и температуры её продуктов.

В дополнительных настройках пользователю предоставляется возможность выбора количества шагов расчёта, и заложен блок оптимизации.

При запуске задачи на расчёт последовательно выполняются следующие действия: считываются все введённые данные; производится расчёт распределения параметров газа по каналу ствола в зависимости от положения детонационной волны; выводятся графики изменения скорости, температуры, плотности и давления газа (продуктов детонации) от времени и в зависимости от положения детонационной волны.

Расчёты велись для цилиндрического ствола длиной $l = 1,6$ м. В качестве исходной взрывчатой смеси была выбрана смесь ацетилена C_2H_2 с кислородом O_2 и содержанием горючего 30%.

Решение задачи распределения параметров частиц состояло из трёх этапов: построение модели; задание исходных данных, граничных условий и получение решения; обзор и анализ полученных результатов.

В качестве 3D-модели для построения сетки была импортирована модель из SolidWorks и посредством DesignModeler для последующего задания сетки преобразована в тело, состоящее из ограничивающих поверхностей, описывающих геометрию ствола, подложку и ограничивающий вычислительный домен; поверхности модели представлены на рис. 1.

После была сгенерирована сетка в модуле ANSYS Meshing с из-

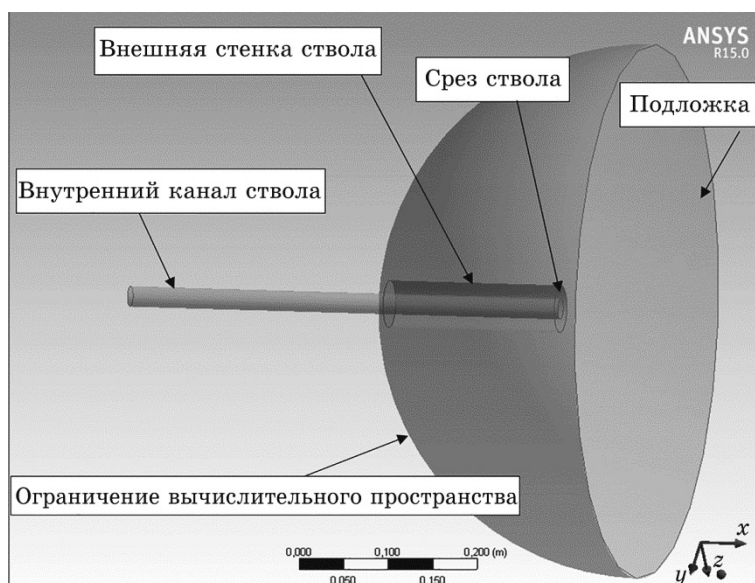


Рис. 1. Поверхности модели.

мельчением сетки пристеночных областей и задания материала твёрдых частиц ВК-20 (плотность $\rho_p = 15630$ кг/м³ и молярная масса $M = 195,86$ г/моль). Использован метод MeTiS partitioner. Этот метод обеспечивает наибольшую эффективность при разделении на части, чем Recursive Coordinate Bisection или User Specified Direction [2].

Далее были описаны настройки для вычислительного домена, среди которых тип домена, вещества, образующие поток, давление и температура в стволе пушки, фракция частиц напыляемого материала и др.

Дальнейшим шагом было задание граничных условий на расчётном домене. На рисунке 2 указаны принятые границы. Моделирование велось для схемы исходного размещения порошка, когда газозвесь порошка в горючей смеси занимает ограниченный участок ствола K на расстоянии S от среза ствола. Исходные данные представлены на рис. 3.

Таким образом, отдельно моделировалось перемещение частиц каждой из трёх фракций: диаметром 20 мкм, 1 мкм и 0,1 мкм под действием продуктов детонации в канале ствола при разных значениях глубины загрузки.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате моделирования были получены распределения вдоль координаты X (оси ствола) различных параметров частиц трёх фракций (рис. 4 и 5).

На рисунках 6–11 представлены полученные зависимости процесса в виде графиков, характеризующих основные закономерности процесса.

Таким образом, на рис. 6 представлен график зависимости положения частиц напыляемого материала от времени. Рассмотрен участок их траектории от среза ствола до подложки. При этом в рассмотрение принимались частицы, находящиеся на фронте газозвеси (в плоскости участка K , ближайшей к срезу ствола ($S = 300$ мм)). Три кривые на графике описывают закон движения частиц разной фракции: 0,1, 1 и 20 мкм.

Из графика видно, что первой до подложки подлетает частица диаметром 1 мкм. За ней, с разрывом около $5 \cdot 10^{-7}$ с, следует частица диаметром 20 мкм. Последней достигает цели наименьшая частица (0,1 мкм) с разрывом порядка $5,5 \cdot 10^{-6}$ с по сравнению с первой.

Полученные из графика на рисунке 6 данные полезны, но не дают полной картины движения частиц газозвеси протяжённостью $K = 0,1$ м. Поэтому было выполнено повторное моделирование с сохранением всех исходных параметров, кроме одного — глубины загрузки. Результаты моделирования представлены на рис. 7 и 8.

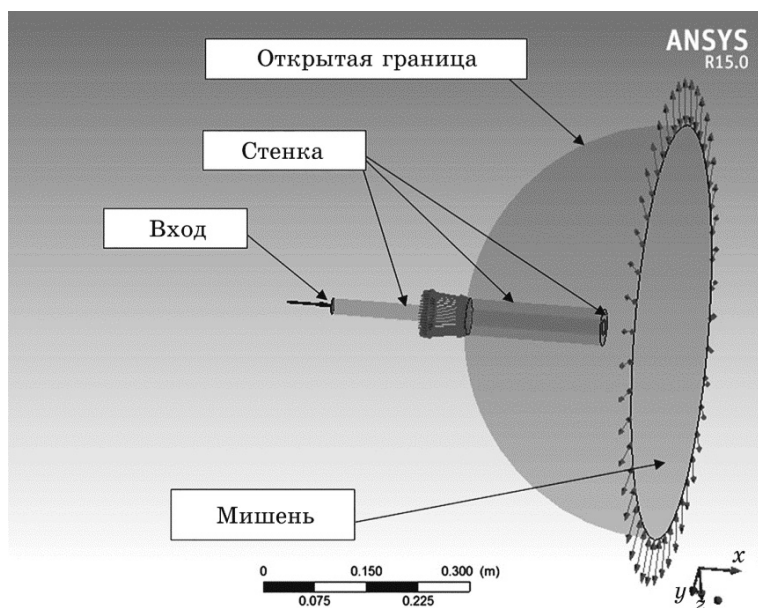


Рис. 2. Определение граничных условий.

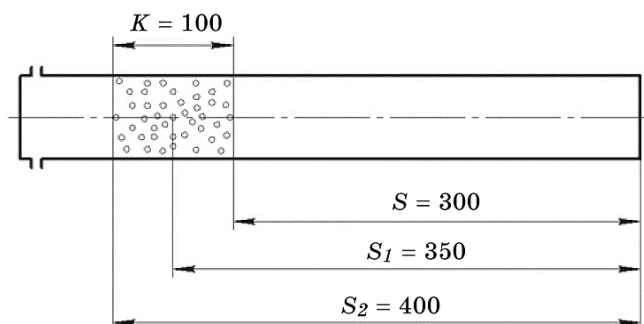


Рис. 3. Расстояния для начала подачи частиц в канал ствола.

На рисунке 7 глубина загрузки $S = 350$ мм, что соответствует середине участка K и, как известно из закона нормального распределения вероятностей, в плоскости, проходящей через эту точку, ожидается наибольшее количество частиц. В этом случае первой достигает подложки частица диаметром 20 мкм, за ней с небольшим отставанием (примерно $2 \cdot 10^{-6}$ с) следует частица диаметром 1 мкм, и последней достигает цели частица диаметром 0,1 мкм, приблизительно через $1,5 \cdot 10^{-5}$ с после первой.

Кривые, представленные на рисунке 8, соответствуют глубине загрузки $S = 400$ мм и описывают движение частиц, находящихся в

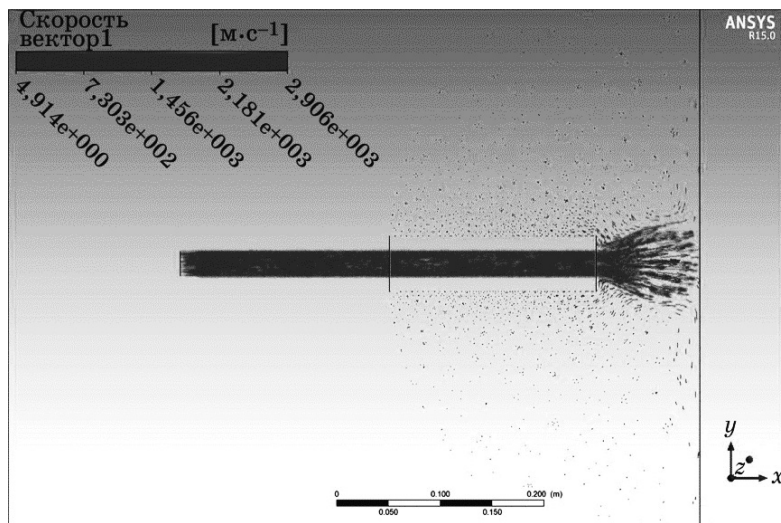


Рис. 4. Распределение полей скоростей в векторной форме частиц диаметром 20 мкм при загрузке $S = 400$ мм.

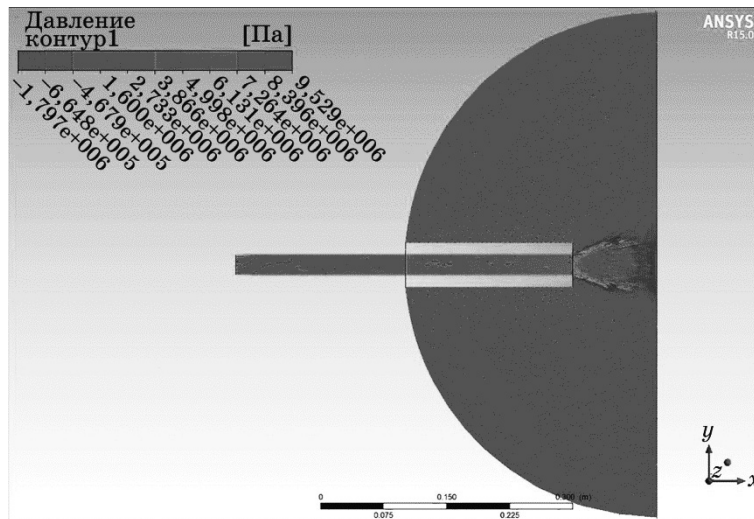


Рис. 5. Распределение поля давления частиц диаметром 20 мкм при загрузке $S = 400$ мм.

дальней от среза ствола плоскости участка K . Результаты моделирования повторяют предыдущий эксперимент с разницей лишь во времени отставания, которое в данном случае составляет порядка $2 \cdot 10^{-6}$ с и $2,3 \cdot 10^{-5}$ с соответственно.

По результатам рассмотрения графиков (рис. 6–8) может быть

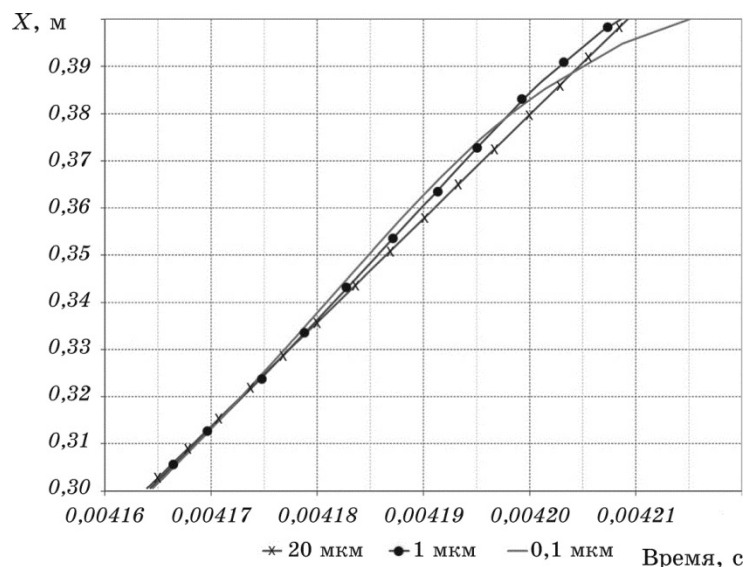


Рис. 6. Положение за срезом ствола частиц диаметром 20, 1 и 0,1 мкм в зависимости от времени при загрузке $S = 300$ мм.

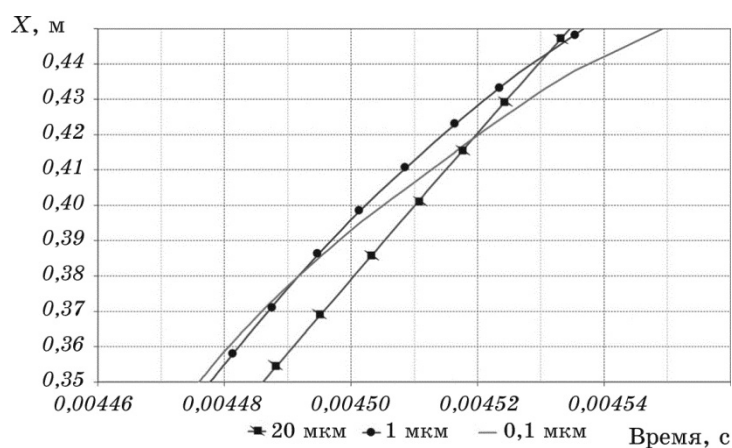


Рис. 7. Положение за срезом ствола частиц диаметром 20, 1 и 0,1 мкм в зависимости от времени при загрузке $S = 350$ мм.

сделан вывод о том, что у частиц размером 0,1 мкм время отставания от первой частицы, столкнувшейся с подложкой (в первом эксперименте это частица диаметром 1 мкм, во втором и третьем — 20 мкм), на порядок больше, чем разница по времени между моментами столкновения с подложкой первой и второй частиц.

Кроме того, из графиков мы получаем приблизительные границы

времени пребывания всех частиц газозвеси протяжённостью $K = 0,1$ м в пространстве между срезом ствола и подложкой. Полученный промежуток времени от $5 \cdot 10^{-5}$ с до $9 \cdot 10^{-5}$ с. Исключая из рассмотрения частицы диаметром $0,1$ мкм, этот же промежуток сократится от $4,5 \cdot 10^{-5}$ с до $6 \cdot 10^{-5}$ с, тем самым сокращая время взаимодействия частиц с окружающей средой на 63% и, как следствие, существенно уменьшая число окислов, снижающих рабочие характеристики покрытий.

На серии графиков, представленных на рисунках 9, 10 и 11, показано для разных загрузок порошка распределение за срезом ствола скорости частиц диаметром $0,1$, 1 и 20 мкм соответственно.

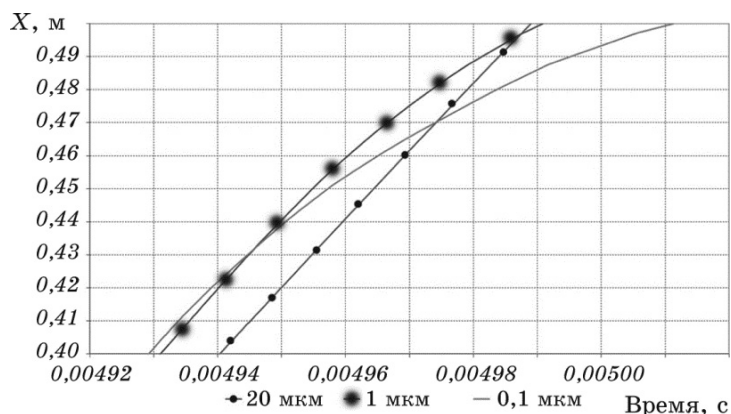


Рис. 8. Положение за срезом ствола частиц диаметром 20 , 1 и $0,1$ мкм в зависимости от времени при загрузке $S = 400$ мм.

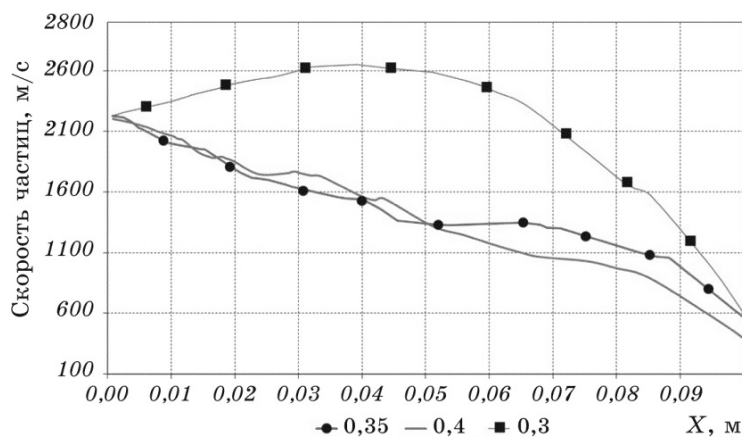


Рис. 9. Распределение за срезом ствола скорости частиц диаметром $0,1$ мкм при разной загрузке порошка.

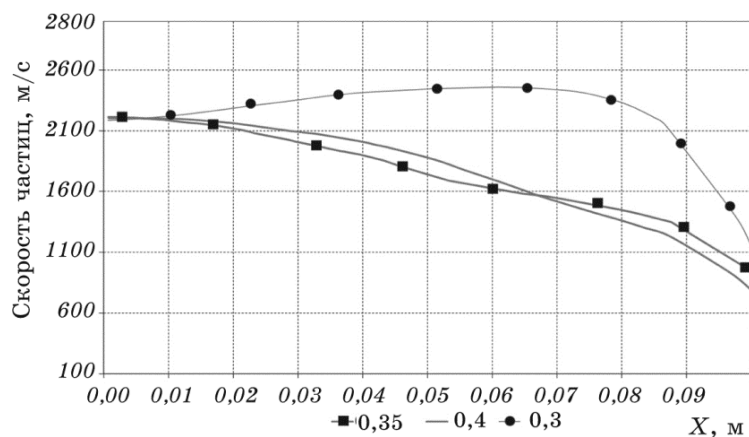


Рис. 10. Распределение за срезом ствола скорости частиц диаметром 1 мкм при разной загрузке порошка.

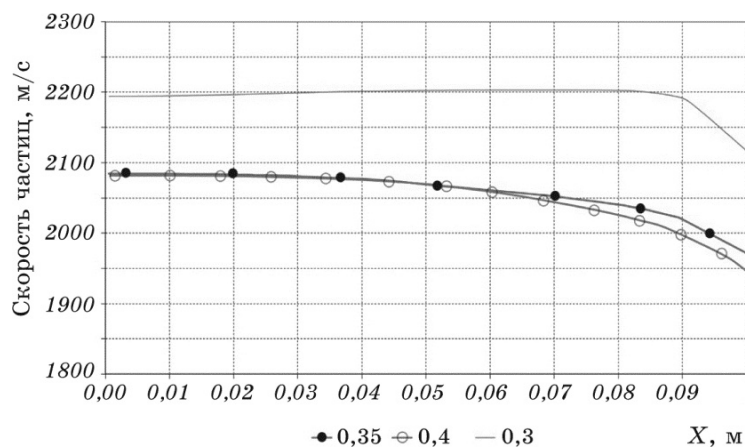


Рис. 11. Распределение за срезом ствола скорости частиц диаметром 20 мкм при разной загрузке порошка.

5. ВЫВОДЫ

Проанализировав графики, можно отметить, что наибольшей кинетической энергией во всех трёх случаях обладают частицы, находящиеся в сечении, ближайшем к срезу ствола ($S = 0,3$ м). Сравнивая скорости в момент соударения с подложкой частиц разной фракции, получаем следующие значения (для $S = 0,3$ м): 20 мкм — 2120 м/с, 1 мкм — 1200 м/с, 0,1 мкм — 600 м/с. Разброс же скоростей для частиц одной фракции при разной глубине загрузки составляет от 200 м/с до 400 м/с. Таким образом, из полученных рас-

пределений видно, что максимальной кинетической энергией в момент соударения с подложкой обладают частицы диаметром 20 мкм. Такой вывод подтверждают результаты моделирования, описанные в работе [3]. А именно, что «с энергетической точки зрения, учитывая преобладающее значение кинетической энергии, наиболее эффективными для нанесения покрытий являются частицы размером 10^{-5} – 10^{-6} м». Это позволяет сделать вывод о том, что, независимо от источника транспортирующего потока при газодинамическом напылении, применение фракций менее 1 мкм нерацонально.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Долматов, С. В. Сергеев, *Теоретические основы создания защитных нанокompозитных покрытий на высоконагруженных элементах конструкций авиационных двигателей* (Отчёт НИР: Г204-8/2012) (Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»: 2013), с. 135.
2. G .Karypis and V. Kumar, *METIS—A Software Package for Partitioning Unstructured Graphs, Partitioning Meshes, and Computing Fill-Reducing Orderings of Sparse Matrices. Version 3.0. Manual* (University of Minnesota and Army HPC Research Center: 1997).
3. С. В. Сергеев, К. А. Данько, *Авиационно-космическая техника и технология*, № 7: 33 (2011).

REFERENCES

1. A. I. Dolmatov and S. V. Sergeev, *Teoreticheskie Osnovy Sozdaniya Zashchitnykh Nanokompозitnykh Pokrytiy na Vysokonagruzhennykh Elementakh Konstrukciy Aviatsionnykh Dvigatelay* (Report SRW: G204-8/2012) (National Aerospace University 'KhAI') (Kharkiv: 2013), p. 135 (in Russian).
2. G .Karypis and V. Kumar, *METIS—A Software Package for Partitioning Unstructured Graphs, Partitioning Meshes, and Computing Fill-Reducing Orderings of Sparse Matrices. Version 3.0. Manual* (University of Minnesota and Army HPC Research Center: 1997).
3. S. V. Sergeev and K. A. Dan'ko, *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, No. 7: 33 (2011) (in Russian).