

Научная статья

УДК 533.6.011

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178467>

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЛИЯНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
НА СЛУЧАЙНО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ЧАСТИЦ В ДВУХФАЗНОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ**

**Максим Александрович Абрамов^{1✉}, Константин Юрьевич Арефьев²,
Андрей Владимирович Воронецкий³, Александр Вадимович Саркисов⁴,
Илья Максимович Гришин⁵, Сергей Владимирович Кручков⁶**

^{1,2,5,6}Московский физико-технический институт,

Долгопрудный, Московская область, Россия

^{1,2,3,4}Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

Москва, Россия

¹abramov.ma@mipt.ru

Аннотация. Представлены результаты расчетно-экспериментального исследования особенностей течения двухфазного сверхзвукового потока при воздействии сносящего потока. С помощью экспериментальной установки, созданной на базе стенда для газодинамического напыления покрытий, определено влияние скоростного напора сносящего потока на поперечное распределение частиц дисперсной фазы в сверхзвуковом потоке. Определены значения эмпирических коэффициентов в уравнениях преобразования дискретных траекторий частиц в

локально-непрерывное поле расходонапряженности дисперсной фазы. Проведен анализ влияния скоростного напора сносящего потока на среднеквадратичное отклонение локализации частиц вдоль траектории в сверхзвуковом потоке на основе сравнения расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: двухфазный поток, метод Лагранжа-Эйлера, плотность распределения вероятности, среднеквадратичное отклонение, расходонапряженность дисперсной фазы

Финансирование: работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации № МД-1814.2022.4

Для цитирования: Абрамов М.А, Арефьев К.Ю., Воронетский А.В., Саркисов А.В., Гришин И.М., Кручков С.В. Расчетно-экспериментальное исследование влияния газодинамических факторов на случайно-статистическое распределение частиц в двухфазном высокоскоростном потоке // Труды МАИ. 2024. № 134. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=178467>

Original article

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE GAS DYNAMIC FACTORS' IMPACT ON THE STOCHASTIC-STATISTICAL DISPERSION OF PARTICLES IN A TWO-PHASE HIGH-VELOCITY FLOW

**Maxim A. Abramov¹, Konstantin Yu. Arefiev², Andrey V. Voronetsky³,
Alexander V. Sarkisov⁴, Ilya M. Grishin⁵, Sergey V. Kruchkov⁶**

^{1,2,5,6}Moscow Institute of Physics and Technology,

Dolgoprudny, Moscow region, Russia

^{1,2,3,4}Bauman Moscow State Technical University,

Moscow, Russia

¹abramov.ma@mipt.ru

Abstract: The present study explores the gas-dynamic factors impact, specifically directed injection, on the empirical coefficients used to convert discrete particle trajectories into a locally continuous field of the dispersed phase flow intensity in supersonic turbulent two-phase flows. Statistical modeling is employed to develop a technique for the particle localization distribution evaluating, with account for the probabilistic nature of the trajectory deviations.

A discrete-continuous transformation method is applied by constructing a probability density function to evaluate the particle localization distribution. This technique assumes that the cluster velocity vector deviation from the section normal is negligible. By utilizing this probability density function, an equation is derived to convert discrete particle trajectories into a continuous field, approximating a two-dimensional normal distribution. The flow rate intensity, defined as the ratio of the particles mass flow to the unit area, is used to create a continuous field of particle flow intensity distribution. The basic trajectories of cluster motion are computed with the Lagrange-Euler method. A supersonic experimental setup for gas-dynamic spraying of coatings is employed to determine the the normal distribution value and examine the particles spatial localization.

The experimental data reveals that the acquired volumetric layer of sprayed condensed phase indicates the particle distribution structure in the cross-section of a high-speed two-phase flow.

The main findings of the study demonstrate that random factors significantly affect the particle distribution in the flow. The standard deviation of particle spatial localization ranges from 4.8 to 5.4 mm for a dispersed phase size of 15 to 40 μm in a supersonic flow, regardless of the presence or absence of a drifting flow.

Keywords: two-phase flow, Lagrange-Euler method, probability density function, mean-square deviation, dispersed phase flow rate.

Funding: the research was funded by the Grant of the President of the Russian Federation № MD-1814.2022.4

For citation: Abramov M.A., Arefiev K.Yu., Voronetsky A.V., Sarkisov A.V., Grishin I.M., Kruchkov S.V. Computational and experimental research of the gas dynamic factors' impact on the stochastic-statistical dispersion of particles in a two-phase high-velocity flow, *Trudy MAI*, 2024, no. 134. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=178467>

Введение

Исследование двухфазных потоков является перспективным направлением работ вследствие их растущего применения в энергетических, силовых и технологических установках [1-3]. Дисперсная фаза в потоке может выполнять роль энерговыделяющих кластеров, адгезионных или абразивных компонентов.

Улучшение распределения частиц и разработка технологий управления двухфазными потоками являются ключевыми проблемами при организации рабочего процесса энергосиловых установках и в современных стендовых и технологических устройствах. Для большого количества инжектируемых твердых частиц в высокоскоростные потоки с высокой энтальпией эти проблемы стоят особенно остро.

Для повышения энергоэффективности двухфазного рабочего тела требуется исследовать фундаментальные закономерности неравновесных по скорости и химическому составу процессов в рассматриваемых двухфазных рабочих телах.

Комплексный обзор вопросов изучения и моделирования многофазных течений представлен в работе [4]. В частности, определение траекторий движения твердых частиц в несущем потоке газа на сегодняшний день проводится как в экспериментальных условиях с применением бесконтактных оптических методов [5-7], так и с помощью методов численного моделирования [8, 9].

Проблема многофазной газовой динамики до сих пор не решена, хотя значительные успехи были достигнуты в работах Р.И. Нигматуллина [10], В.Г. Накорякова [11] и многих других, но они относятся к движению многофазных сред при малых скоростях. Высокоскоростные двухфазные потоки исследовались в МГТУ им. Н.Э. Баумана [12-14], в ИТПМ СО РАН [15,16] и др. научных организациях РФ.

Довольно большое количество современных работ посвящено изучению двухфазных течений с использованием математического моделирования на основе комбинированного подхода Лагранжа-Эйлера [17-19]. В рамках данных работ

авторами рассмотрены и применены различные модели межфазного взаимодействия, массо уноса, горения и конденсации частиц, взаимодействия частиц со стенками проточного тракта. Однако на сегодня практически не были затронуты вопросы последующего анализа распределения траекторий частиц в сечении проточного тракта, а именно получения непрерывной функции расходонапряженности потока частиц в сечении и количественных значений параметра эффективности смешения частиц с потоком газа.

Основы такой технологии моделирования были разработаны авторами и представлены в работе [20], где была предложена методика вторичной обработки результатов расчета двухфазного течения в каналах сложной формы. Эта методика позволяет спрогнозировать эффективность (оценить качество) процессов смешения. Затем, в работах [21, 22] авторами была проведена модернизация данной методики на основе введения в алгоритм обработки результатов расчета дискретно-непрерывного преобразования параметров распределения конденсированных частиц на основе вероятностного подхода для определения возможной области локализации их индивидуальных траекторий. В работе [23] был разработан и апробирован метод экспериментального исследования особенностей распределения частиц в высокоскоростном потоке. Данный метод позволил определить значение среднеквадратичного отклонения пространственной локализации частиц относительно траектории ее движения σ для оценки с достаточной точностью процессов распределения конденсированной фазы в условиях отсутствия воздействия возмущающих факторов на высокоскоростной двухфазный поток.

Задачей настоящего исследования является установление влияния газодинамических факторов, в частности направленного вдува, на значение эмпирических коэффициентов, входящих в уравнения преобразования дискретных траекторий частиц в локально-непрерывное поле раскодонапряженности дисперсной фазы в сверхзвуковых турбулентных двухфазных потоках.

Математическая модель

Следует отметить, что важной задачей является разработка подходов и специализированных математических моделей для прогнозирования отклонения движения частиц от базовых траекторий в силу случайно-статистических факторов. Такое отклонение может значительно повлиять на распределение частиц в двухфазном потоке.

Примем, что отклонение частиц от базовой траектории происходит в результате воздействия поперечной (направленной перпендикулярно к касательной в каждой точке траектории) силы P_r . Такую силу P_r можно разделить на несколько составляющих, зависящих от различных факторов:

$$\vec{P}_r = \vec{P}_{Re} + \vec{P}_{Da}. \quad (1)$$

Здесь P_{Re} - сила, возникающая вследствие отклонений формы частицы от сферической, наличия турбулентных пульсаций, а также; P_{Da} - сила, возникающая вследствие неравномерно распределенных химических реакций на поверхности частицы при ее воспламенении и горении в потоке.

В рамках настоящей работы предложен следующий предварительный вид зависимостей (2 и 3), описывающих значения модуля сил P_{Re} и P_{Da} .

$$|P_{Re}| = K_1 \cdot F_p \cdot C_X \cdot \frac{V_T^2 + V_B^2 + V_{отн}^2}{2} \cdot \rho. \quad (2)$$

$$\frac{|P_{Da}|}{|P_{Re}|} = K_2 \cdot Da. \quad (3)$$

Здесь K_1, K_2 - эмпирические коэффициенты; V_T - характерная скорость для турбулентных пульсаций; V_B - поперечная скорость в вихревом следе за частицей; $V_{отн}$ - относительная скорость частицы; Da - число Дамкеллера.

Для определения направления действия сил P_{Re} и P_{Da} рассмотрим полярную систему координат, построенную в плоскости, перпендикулярной касательной базовой траектории. Нулевая точка системы координат совпадает с точкой пересечения плоскости базовой траектории. Некоторые пояснения представлены на рисунке 1.

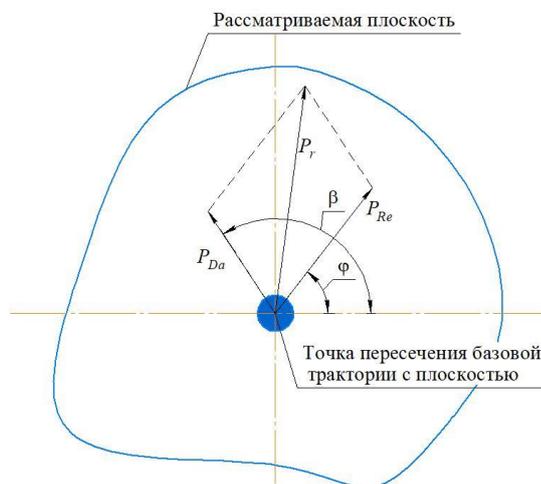


Рисунок 1 - Поперечные силы, действующие на частицу

Значения угла направленности силы P_{Re} могут быть оценены через безразмерный критерий – число Струхаля (4 – 5).

$$\varphi = \varphi_0 + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t . \quad (4)$$

$$f = \frac{V_T + V_B + V_{отн}}{L} \cdot Sh . \quad (5)$$

Здесь Sh - характерное число Струхала для сферы.

Скорость изменения угла β , определяющего направление действия силы P_{Da} , пропорциональна числу Дамкеллера.

Статистическое моделирование большого количества частиц, двигающихся вблизи базовой траектории дало возможность разработать методику оценки неравномерности локализации частиц с поправкой на вероятностный характер отклонений их траекторий (с вероятностной поправкой). Суть данной методики, основы которой были описаны в работах [21, 22] заключается в следующем. Для рассматриваемого кластера строится функция плотности вероятности пространственной локализации данной конкретной траектории частицы (ПЛТЧ) в рассматриваемом сечении. При этом положение максимума функции ПЛТЧ соответствует положению точки пересечения траектории движения кластера с плоскостью рассматриваемого сечения. В данном случае принимается, что отклонение вектора скорости кластера от нормали к плоскости рассматриваемого сечения незначительно влияет на результаты анализа. Уравнение дискретно-непрерывного преобразования в данном случае основано на определении функции плотности распределения вероятности $p_{\text{ч}}$ пересечения индивидуальными частицами рассматриваемого сечения с координатой x вблизи траектории кластера, которая может быть описана с помощью двумерного нормального (коэффициент корреляции случайных величин $r = 0$) распределения Гаусса (6).

$$p_{\text{ч}}(y, z) = \frac{\exp\left(-\frac{(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}{2\sigma^2}\right)}{2\pi\sigma^2}, \quad (6)$$

где y, z – случайные величины координат локализации частицы (кластера частиц) в рассматриваемом сечении; y_0, z_0 - координаты точки пересечения траектории движения частицы (кластера частиц) с плоскостью рассматриваемого сечения; σ - среднеквадратичное отклонение пространственной локализации частиц относительно траектории кластера (для данного исследования принимается, что среднеквадратичное отклонение случайных величин равны $\sigma_y = \sigma_z = \sigma$). Стоит отметить, что рассматриваемые величины y и z являются независимыми, а параметр σ может быть определен экспериментально.

Далее введем понятие расходонапряженности потока частиц. Аналогично расходонапряженности газа или жидкости, этот параметр определяет отношение секундного массового расхода частиц к единице площади. Каждый кластер, проходящий через рассматриваемое сечение вносит индивидуальную составляющую в распределение расходонапряженности потока частиц. Данная составляющая для i - го кластера определяется по формуле:

$$q_{\text{ч}_i}(y, z) = p_{\text{ч}_i}(y, z) \cdot G_{\text{ч}_i}, \quad (7)$$

где $G_{\text{ч}_i}$ - массовый расход частиц для каждого кластера.

Суммарная расходонапряженность потока частиц в сечении будет определяться как совокупность $q_{\text{ч}_i}$ для всех кластеров, траектории которых пересекают рассматриваемое сечение проточного тракта:

$$q_{\text{пч}}(y, z) = \sum_{i=1}^{K_{\text{кл}}} q_{\text{ч},i,j}(y, z). \quad (8)$$

Предложенный алгоритм позволяет на базе рассчитанных с помощью комбинированного метода Лагранжа-Эйлера базовых траекторий движения кластеров построить непрерывное поле распределения расхода напряженности потока частиц.

Экспериментальная установка

Ранее в работе [23] авторами был разработан новый метод экспериментального исследования особенностей распределения частиц в высокоскоростном несущем потоке с использованием сверхзвуковой технологической установки для газодинамического напыления покрытий [24]. Суть предлагаемого метода основана на предположении о том, что конденсированная фаза при напылении на образец является индикатором структуры распределения частиц в поперечном сечении высокоскоростного двухфазного потока. Апробация экспериментального метода (с последующим численным моделированием эксперимента) была проведена для сверхзвукового потока продуктов сгорания спирт-кислородной смеси с полным давлением $p_{\text{пс}}^* = 0,7$ МПа и скоростным напором $q_{\text{пс}} = 200$ кПа. В качестве конденсированной фазы использовался порошок хром-никелевого сплава.

Проведенные исследования позволили установить, что минимальные отклонения формы и толщины пятна напыления, характеризуемых набором выбранных контрольных значений, для расчетного и экспериментального случаев достигаются при значении среднеквадратичного отклонения пространственной

локализации частиц (параметра σ) относительно траектории ее движения в диапазоне 4,7...5,5 мм (для частиц размером 15...40 мкм в сверхзвуковом несущем потоке при скоростях > 1500 м/с).

В рамках настоящей работы на основе ранее предложенной методики экспериментального исследования проводится анализ влияния относительного скоростного напора сдувающей струи на величину параметра σ .

Методика проведения эксперимента поясняется схемой, представленной на рисунке 2. В рассматриваемой экспериментальной установке генерация высокоскоростного двухфазного потока 3 осуществляется с помощью сверхзвуковой напылительной горелки 1. В качестве рабочего тела используется спирт-кислородная смесь, продукты сгорания (ПС) которой истекают через сверхзвуковой насадок 2. Для формирования двухфазного течения в газовый поток в сверхзвуковом насадке радиально осуществляется подача конденсированных частиц хром-никелевого сплава. Предполагается, что на выходе из сверхзвукового насадка двухфазный поток находится в скоростном и фазовом равновесии. Для имитации сносящего воздействия на двухфазный поток используется сопло 6, через которое с определенным расходом (соответствующим требуемому значению скоростного напора) осуществляется подвод воздуха. На расстоянии 250 мм от среза сверхзвукового насадка устанавливается образец в виде плоской металлической пластины 5, на которую напыляются частицы хром-никелевого сплава 4. Поскольку горелка находится в неподвижном положении, в процессе напыления на образце формируется своеобразный «холм», форма и

размеры которого определяются с помощью установки для трехмерного лазерного сканирования ABSOLUTE ARM 85 [25].

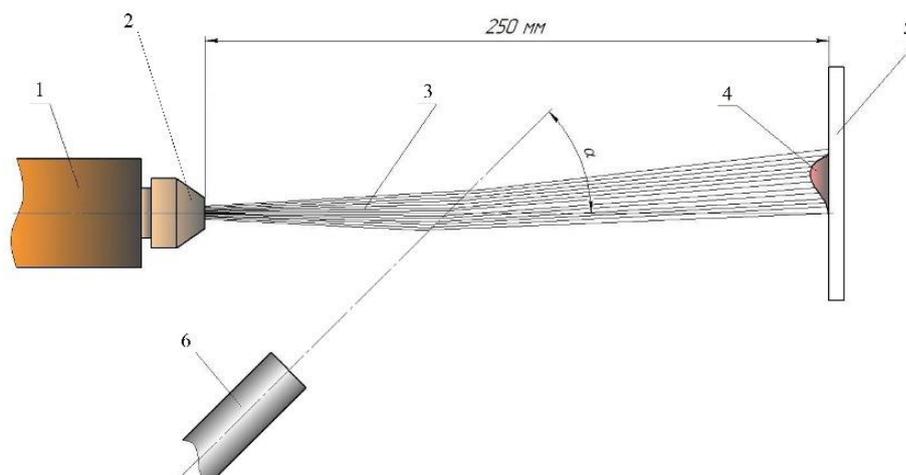


Рисунок 2 - Схема проведения эксперимента на ЭУ:

1 – горелка; 2 – сверхзвуковой насадок; 3 – двухфазный поток; 4 – напыляемая поверхность; 5 – металлическая пластина; 6 – сопло подвода воздуха

Основным допущением в данной методике является то, что форма напыленной поверхности соответствует расходонапряженности частиц и выполняется условие:

$$\frac{q_{\text{пч}}(y, z)}{G_{\text{кф}}} = \frac{\Delta(y, z)}{\iint_{y,z} \Delta(y, z) dydz}, \quad (9)$$

где $G_{\text{кф}}$ - массовый расход конденсированной фазы; $\Delta(y, z)$ - отклонение напыленной поверхности от плоской металлической пластины, полученная в результате обработки данных отсканированной поверхности образца.

Определение характерной величины параметра σ проводится на основе сравнения экспериментальных данных, полученных в результате проведенного исследования на экспериментальной установке, с результатами выполненного математического моделирования данного эксперимента.

Результаты эксперимента и математического моделирования

Экспериментальное исследование проведено при постоянных режимных параметрах работы сверхзвуковой горелки и переменных режимах подачи воздуха для оценки влияния относительного скоростного напора на значение параметра σ . Величина относительного скоростного напора определялась как $k = q_v / q_{пс}$, где q_v – скоростной напор воздуха на выходе из сопла подвода воздуха, $q_{пс}$ – скоростной напор ПС на выходе из сверхзвукового насадка горелки.

Режимные параметры проведенных экспериментов представлены в таблице 1. Здесь $p_{пс}^*$ - полное давление ПС в камере сгорания горелки, α - коэффициент избытка окислителя в КС, $G_{пс}$ - суммарный расход ПС.

Таблица 1. Параметры режимов

№	$p_{пс}^*$, МПа	α	$G_{пс}$, Г/с	$q_{пс}$, кПа	G_v , Г/с	q_v , кПа	k
1	0,7	1	12,2	200	67,3	463	2,3
2					83,8	558	2,8
3					100,2	674	3,4
4					116,6	803	4

В качестве конденсированной фазы для напыления используется порошок хром-никелевого сплава $Ni_{19}Cr_{18}Fe_3MoCoTi$ диаметром 11...45 мкм [26].

На рисунке 3 представлены фотографии образцов после напыления для разных режимов. Черный маркер на данных рисунках соответствует точке пересечения оси сверхзвукового насадка с плоскостью поверхности образца (далее точка 0).



Режим № 1 ($k = 2,3$)



Режим № 2 ($k = 2,8$)



Режим № 3 ($k = 3,4$)



Режим № 4 ($k = 4$)

Рисунок 3 - Внешний вид экспериментальных образцов после напыления

На основе обработки полученного после сканирования образцов массива данных были построены поля распределения относительной толщины напыления для экспериментальных образцов, представленные на рисунке 4 (черный маркер соответствует точке 0).

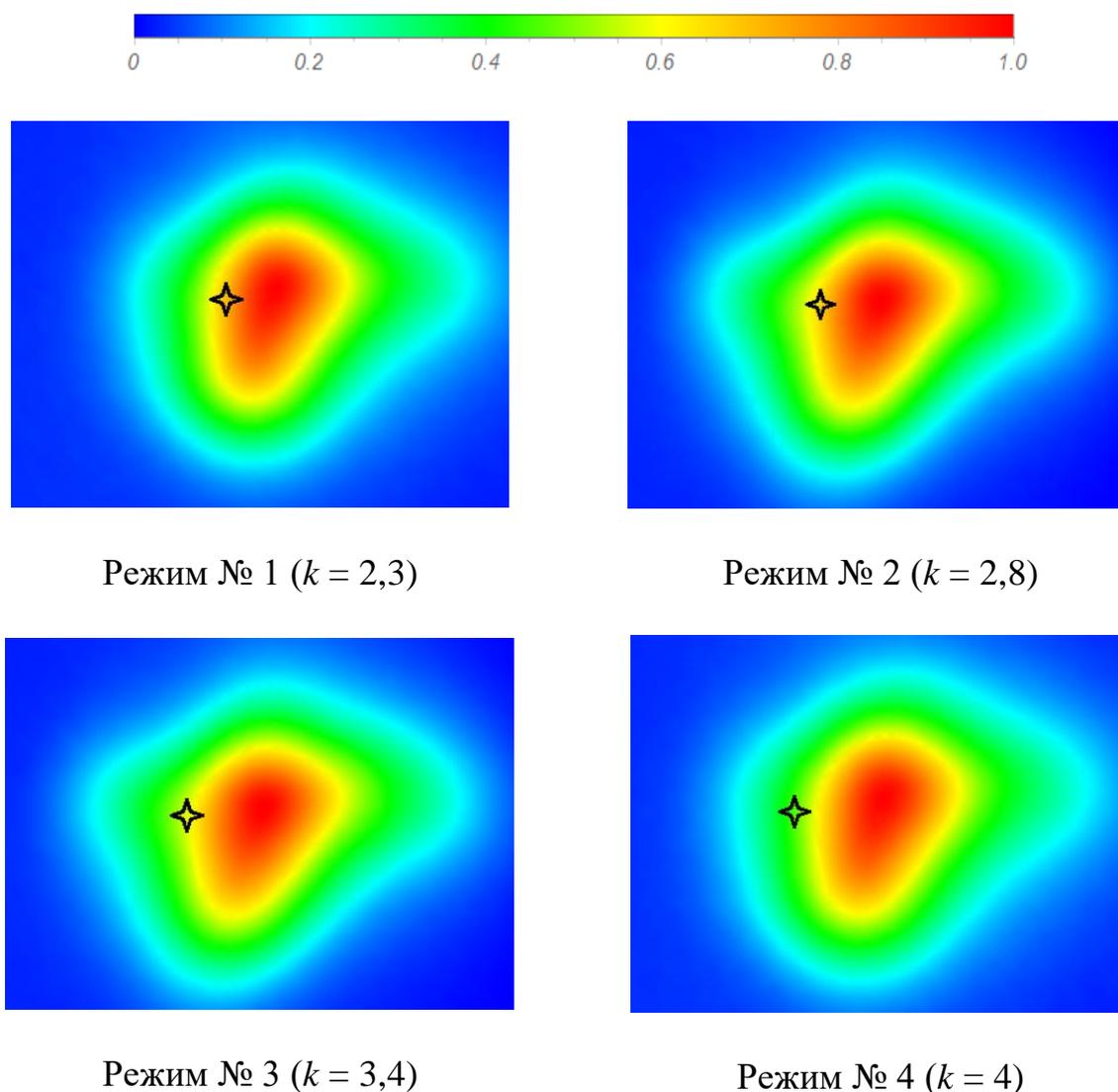


Рисунок 4 - Поле распределения относительной толщины напыления на экспериментальных образцах

На следующем этапе исследований, в соответствии с предложенной методикой, проводится сопоставление экспериментальных данных с результатами численного моделирования, в результате чего определяются характерные значения параметра σ .

Численное моделирование проводится для расчетной области, конфигурация которой по своим геометрическим характеристикам соответствует проточному тракту экспериментальной установки. Внешний вид расчетной области представлен на рисунке 5.

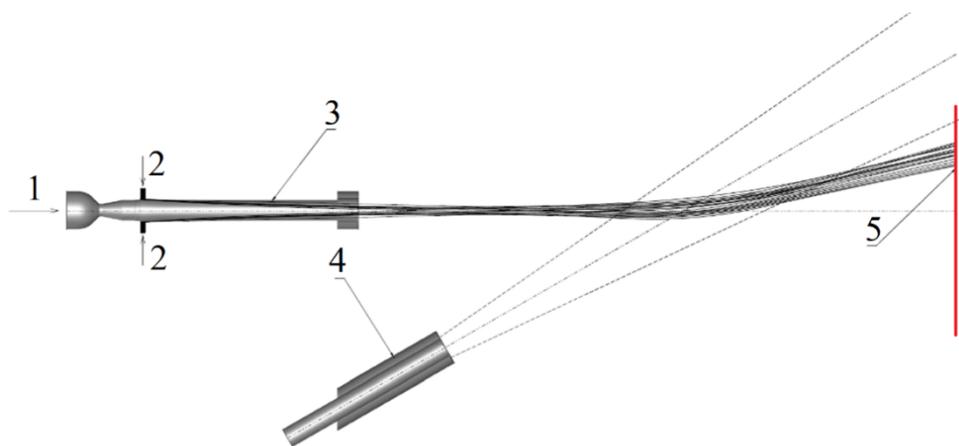


Рисунок 5 - Схема расчётной области:
 1 – подача ПС; 2 – подача частиц; 3 – сверхзвуковой насадок; 4 – сопло подвода воздуха; 5 – контрольное сечение

В соответствии с ранее проведенными исследованиями авторов [20-23] моделирование высокоскоростных двухфазных течений проводится с использованием комбинированного подхода Лагранжа-Эйлера, позволяющий детально просчитывать траекторию движения отдельных частиц во всем расчетном объеме. Соответственно траектория движения частиц описывается моделью дискретных фаз. Трехмерное течение потока газа описывается системой усредненных по Фавру уравнений Навье-Стокса [27]. Параметры турбулентности рассчитываются с использованием модели турбулентности $k-\omega$ [28].

Рассмотрим полученные результаты расчета и проведем их анализ. Для режимов, соответствующих экспериментальным (см. табл. 1), построены траектории движения частиц в координатах Лагранжа, представленные на рисунке 6. Из анализа представленных рисунков можно сделать вывод, что под воздействием сносящего воздушного потока траектории движения частиц искривляются и поперечное сечение дисперсного потока претерпевает деформацию.

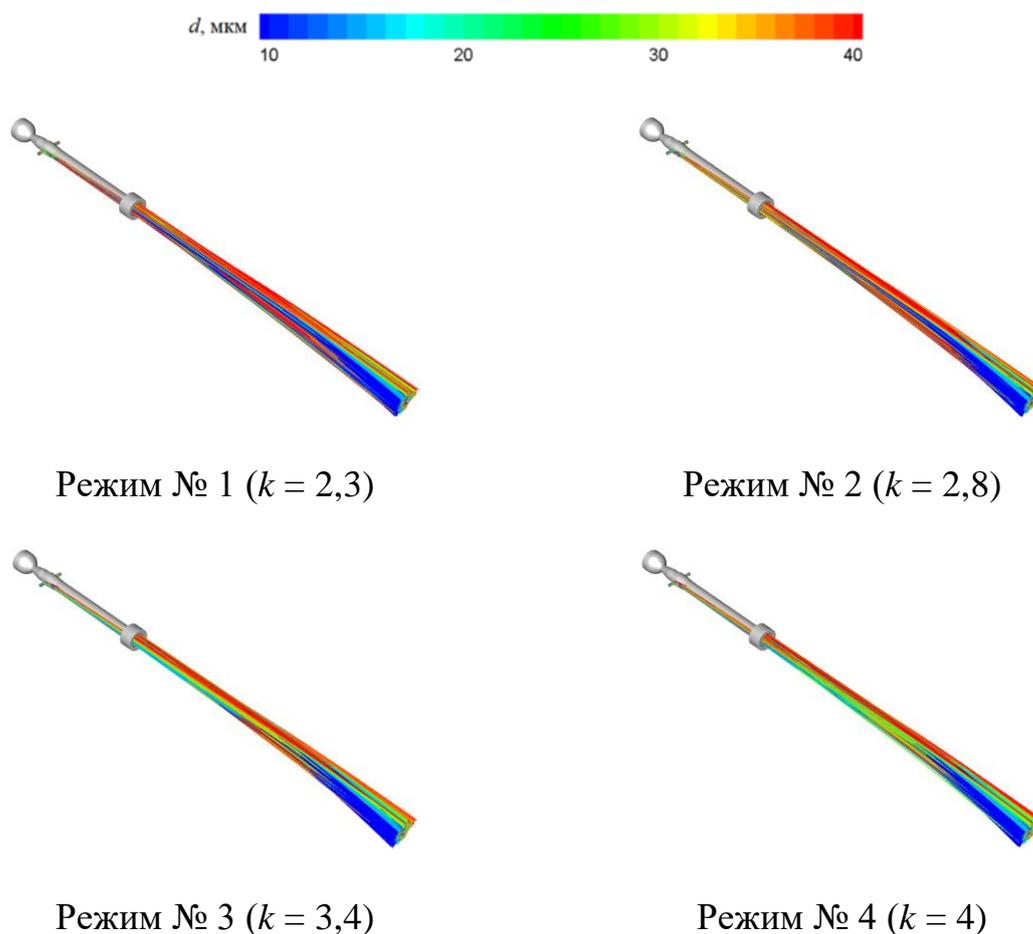


Рисунок 6 – Траектории движения конденсированной фазы (цвет соответствует диаметру частиц)

Полученные в результате математического моделирования координаты точек пересечения траекторий частиц с плоскостью контрольного сечения (далее – координаты траекторий частиц) представлены на рисунке 7 слева. С использованием методики обработки результатов математического моделирования для расчетного распределения координат траекторий частиц были построены поля распределения относительной толщины напыления при различных σ в диапазоне значений 3...6 мм. Примеры полученных полей распределений относительной толщины напыления для каждого из моделируемых экспериментальных режимов при значении $\sigma = 5$ мм представлены на рисунке 7 справа.

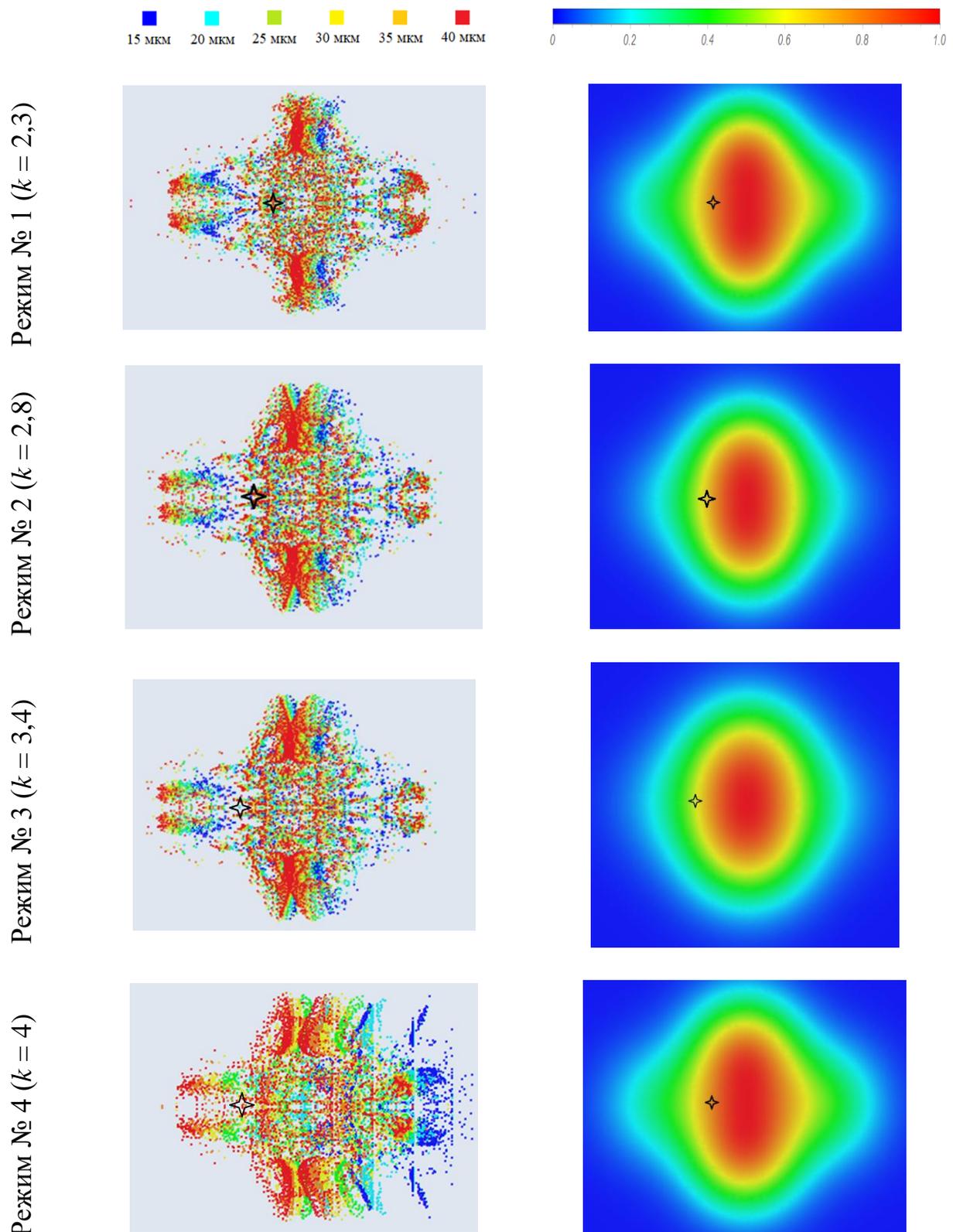


Рисунок 7 – Результаты численного моделирования эксперимента:
 слева - координаты траекторий частиц в контрольном сечении;
 справа - поле распределения относительной толщины напыления (при $\sigma = 5$
 мм)

Определение эмпирического значения параметра σ

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных основано на вычислении минимального отклонения значения r_{90} (радиус окружности с центром в точке 0, внутри которой оседает 90% частиц), полученного в результате численного моделирования от соответствующего экспериментального значения по следующей зависимости:

$$\delta_{90} = \left| 1 - \frac{r_{90, \text{расч}}}{r_{90, \text{эксп}}} \right| \cdot 100\% .$$

Представленные на рисунке 8 полученные зависимости $\delta_{90}(\sigma)$ позволяют определить диапазон характерных величин параметра дискретно-непрерывного преобразования функции раскодонапряженности потока конденсированных частиц σ .

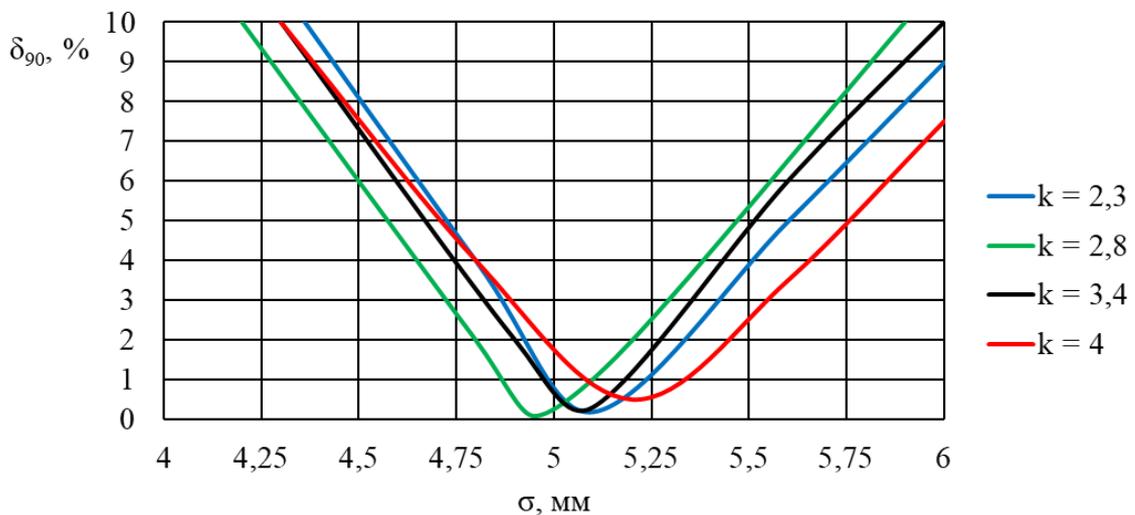


Рисунок 8 - Графики зависимостей $\delta_{90}(\sigma)$ для различных значений относительного скоростного напора сносящего воздушного потока

Зависимость рассчитанных значений параметра σ , обеспечивающих отклонение δ_{90} не выше 2%, от относительного скоростного напора k сносящего воздушного

потока приведена на рисунке 9. Исходя из анализа представленной зависимости $\sigma(k)$, можно сделать вывод, что σ находится в диапазоне 4,8...5,4 мм и практически не зависит от k .

Одновременно с этим, стоит отметить, что по результатам предыдущей работы авторов [23], что в случае отсутствия сносящего воздействия на высокоскоростной двухфазный поток минимальные отклонения формы и толщины пятна напыления для расчетного и экспериментального случаев достигаются при значении среднеквадратичного отклонения пространственной локализации частиц относительно траектории ее движения в диапазоне 4,7...5,5 мм.

Таким образом, обобщая результаты работы [23] и настоящего исследования, можно заключить, что для дисперсной фазы размером 15...40 мкм в сверхзвуковом (при скоростях > 1500 м/с) несущем потоке в условиях наличия или отсутствия воздействия сносящего потока при значении относительного скоростного напора вплоть до $k = 4$ среднеквадратичное отклонение пространственной локализации частиц относительно траектории ее движения будет лежать в диапазоне 4,8...5,4 мм.

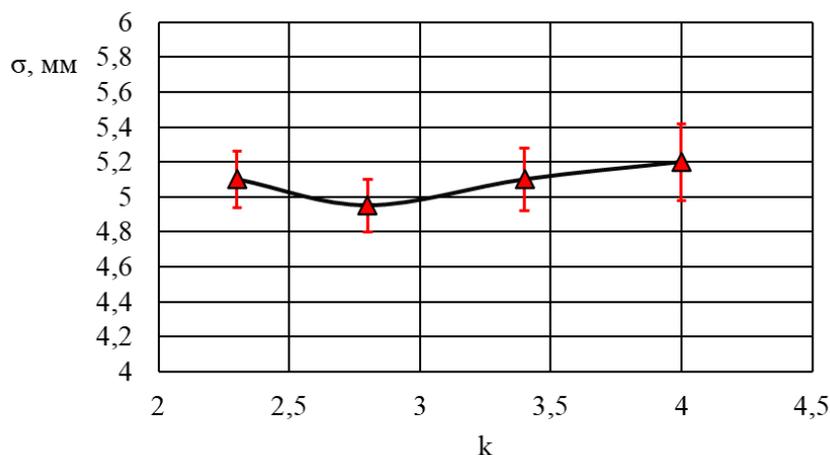


Рисунок 9 - График зависимости σ от относительного скоростного напора сносящего воздушного потока

Выводы

В результате проведенных расчетно-экспериментальных исследований влияния интенсивности сносящего потока на случайно-статистическое распределение частиц в двухфазном высокоскоростном потоке были получены следующие основные результаты.

1. Проведена серия экспериментов для сверхзвукового потока продуктов сгорания спирт-кислородной смеси с полным давлением 0,7 МПа и скоростным напором 200 кПа в условиях воздействия сносящего воздушного потока со скоростным напором в диапазоне $\approx 460 \dots 800$ кПа, позволяющая установить количественный показатель влияния случайных факторов на распределение частиц в потоке.

2. Обобщая результаты работы [23] и настоящего исследования, установлено, что для дисперсной фазы размером 15...40 мкм в сверхзвуковом (при скоростях > 1500 м/с) несущем потоке в условиях наличия или отсутствия воздействия сносящего потока (скоростной напор которого до 4 раз может превышать скоростной напор двухфазного потока) среднеквадратичное отклонение пространственной локализации частиц относительно траектории ее движения будет лежать в диапазоне 4,8...5,4 мм.

Список источников

1. Башарина Т.А., Шматов Д.П., Глебов С.Е., Акользин И.В. Исследование струйно-центробежной форсунки спринклерной системы атомной электростанции методом вычислительного эксперимента на основе математической модели с учетом

- дисперсной среды // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176844>
2. Савин Е.И., Миньков Л.Л. Исследование коэффициентов лобового сопротивления и параметров ракетного двигателя твердого топлива для анализа движения бикалиберного летательного аппарата ближней зоны действия // Труды МАИ. 2023. № 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174603>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-07](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-07)
3. Дикшаев А.И., Костяной Е.М. Определение рациональных параметров и алгоритма работы бикалиберной ракеты с ракетно-прямоточным двигателем // Труды МАИ. 2014. № 74. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=49300>
4. Вараксин А.Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 3. С. 421–455.
5. Kozul M. A scanning particle tracking velocimetry technique for high-Reynolds number turbulent flows // Experiments in Fluids, 2019, vol. 60, no. 137, pp. 255-266. DOI: [10.1007/s00348-019-2777-3](https://doi.org/10.1007/s00348-019-2777-3)
6. Barnkob R., Kahler C.J., Rossi M. General defocusing particle tracking // Lab on a Chip, 2015, no. 5, pp. 562-568. DOI: [10.1007/s00348-020-2937-5](https://doi.org/10.1007/s00348-020-2937-5)
7. Buist K.A., Jayaprakash P., Kuipers J.A.M. Magnetic Particle Tracking for Nonspherical Particles in a Cylindrical Fluidized Bed // AIChE Journal, 2017, vol. 63, no. 12, pp. 86-98. DOI: [10.1002/aic.15854](https://doi.org/10.1002/aic.15854)

8. Ge W., Sankaran R. An Adaptive Particle Tracking Algorithm for Lagrangian-Eulerian Simulations of Dispersed Multiphase Flows // Conference: AIAA Scitech 2019 Forum, 2019, no. 0728, pp. 582-691. DOI: [10.2514/6.2019-0728](https://doi.org/10.2514/6.2019-0728)
9. Khare P., Wang S., Yang V. Modeling of finite-size droplets and particles in multiphase flows // Chinese Journal of Aeronautics, 2015, vol. 28, no. 4, pp. 974 – 982. DOI: [10.1016/j.cja.2015.05.004](https://doi.org/10.1016/j.cja.2015.05.004)
10. Нигматулин Р.И., Губайдуллин Д.А. Влияние фазовых превращений в акустике полидисперсных туманов // Доклады РАН. 1996. Т. 347. № 3. С. 330.
11. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Burdukov A.P. et al. Local characteristics of upward gas-liquids flows // International Journal of Multiphase flow, 1981, vol. 7, pp. 63-81. DOI: [10.1016/0301-9322\(81\)90015-X](https://doi.org/10.1016/0301-9322(81)90015-X)
12. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. - 432 с.
13. Пеньков С.Н., Сухов А.В. Воспламенение и горение бора (единая модель) // Известия вузов. Серия: Машиностроение. 1980. № 1. С. 56-66.
14. Ягодников Д.А., Воронежский А.В., Сарабьев В.И. Воспламенение и горение пиротехнических составов на основе микро- и наночастиц диборида алюминия в воздушном потоке в двухзонной камере сгорания // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 3. С. 51-58.
15. Яненко Н.Н., Солоухин Р.И., Папырин А.Н. и др. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц. - Новосибирск: Наука, 1980. 160 с.

16. Рычков А.Д. Математическое моделирование газодинамических процессов в каналах и соплах. - Новосибирск: Наука, 1988. – 222 с.
17. Garg R., Narayanan C., Subramaniam S. A Numerically Convergent Lagrangian-Eulerian Simulation Method for Dispersed Two-Phase Flows // International Journal of Multiphase Flow, 2009, vol. 35, no. 4, pp. 376–388. DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.12.004](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.12.004)
18. Doisneau F., Arienti M., Oefelein J.C. A Semi-Lagrangian Transport Method for Kinetic Problems with Application to Dense-to-Dilute Polydisperse Reacting Spray Flows // Journal of Computational Physics, 2017, vol. 329, pp. 48–72. DOI: [10.1016/j.jcp.2016.10.042](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.10.042)
19. Edwards H.C. et al. Manycore performance-portability: Kokkos multidimensional array library // Scientific Programming, 2012, vol. 20, no. 2, pp. 89–114. DOI: [10.1155/2012/917630](https://doi.org/10.1155/2012/917630)
20. Воронецкий А.В., Арефьев К.Ю., Абрамов М.А. Расчетное исследование эффективности инъекции двухфазного потока горючего в цилиндрическую камеру дожигания с несимметричным подводом воздуха // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27. № 6. С. 833-851.
21. Воронецкий А.В., Арефьев К.Ю., Абрамов М.А. Параметрическое расчетное исследование влияния вероятностного характера отклонений траекторий частиц на неравномерность их локализации в модельном тракте // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021. № 8. С. 1-18. DOI: [10.18698/2308-6033-2021-8-2107](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-8-2107)

22. Воронецкий А.В., Арефьев К.Ю., Абрамов М.А. и др. Оптимизация инъекции двухфазных продуктов газификации энергетических конденсированных составов в модельную камеру сгорания малого удлинения // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60. № 1. С. 94-102.
23. Абрамов М.А., Арефьев К.Ю. Исследование движения дисперсных частиц в двухфазном потоке с учетом случайно-статистических отклонений от базовых траекторий // Всероссийская научно-техническая конференция «Ракетно-космические двигательные установки» (Москва, 19-20 октября 2023): сборник трудов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. С. 91.
24. Wielage B., Wank A., Pokhmurska H., et al. Development and Trends in HVOF Spraying Technology // Surface and Coatings Technology, 2006, vol. 201, no. 5, pp. 2032-2037. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2006.04.049](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.04.049)
25. Hawryluk M., Ziembra J., Dworzak L. Development of a Method for Tool Wear Analysis Using 3D Scanning // Metrology and Measurement Systems, 2017, vol. 24, no.4, pp. 739-757. DOI: [10.1515/mms-2017-0054](https://doi.org/10.1515/mms-2017-0054)
26. Alharbi N., Stokes J. Optimizing HVOF spray process parameters and post-heat treatment for Micro/Nano WC-12%Co, mixed with Inconel-625 Powders: A Critical Review // 32 International Manufacturing Conference, 2015, 13 p.
27. Бекетаева А.О., Найманова А.Ж. Численное исследование пространственного сверхзвукового течения совершенного газа при наличии поперечного вдува струи // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 6. С. 58-68.

28. Langtry R.B., Menter F.R. Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes // *AIAA Journal*, 2009, vol. 47, no. 12, pp. 2894–2906. DOI: [10.2514/1.42362](https://doi.org/10.2514/1.42362)

References

1. Basharina T.A., Shmatov D.P., Glebov S.E., Akol'zin I.V. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176844>
2. Savin E.I., Min'kov L.L. *Trudy MAI*, 2023, no. 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174603>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-07](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-07)
3. Dikshaev A.I., Kostyanoi E.M. *Trudy MAI*, 2014, no. 74. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=49300>
4. Varaksin A.Yu. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2013, vol. 51, no. 3, pp. 421–455.
5. Kozul M. A scanning particle tracking velocimetry technique for high-Reynolds number turbulent flows, *Experiments in Fluids*, 2019, vol. 60, no. 137, pp. 255-266. DOI: [10.1007/s00348-019-2777-3](https://doi.org/10.1007/s00348-019-2777-3)
6. Barnkob R., Kahler C.J., Rossi M. General defocusing particle tracking, *Lab on a Chip*, 2015, no. 5, pp. 562-568. DOI: [10.1007/s00348-020-2937-5](https://doi.org/10.1007/s00348-020-2937-5)
7. Buist K.A., Jayaprakash P., Kuipers J.A.M. Magnetic Particle Tracking for Nonspherical Particles in a Cylindrical Fluidized Bed, *AIChE Journal*, 2017, vol. 63, no. 12, pp. 86-98. DOI: [10.1002/aic.15854](https://doi.org/10.1002/aic.15854)

8. Ge W., Sankaran R. An Adaptive Particle Tracking Algorithm for Lagrangian-Eulerian Simulations of Dispersed Multiphase Flows, *Conference: AIAA Scitech 2019 Forum*, 2019, no. 0728, pp. 582-691. DOI: [10.2514/6.2019-0728](https://doi.org/10.2514/6.2019-0728)
9. Khare P., Wang S., Yang V. Modeling of finite-size droplets and particles in multiphase flows, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, vol. 28, no. 4, pp. 974 – 982. DOI: [10.1016/j.cja.2015.05.004](https://doi.org/10.1016/j.cja.2015.05.004)
10. Nigmatulin R.I., Gubaidullin D.A. Vliyanie fazovykh prevrashchenii v akustike polidispersnykh tumanov, *Doklady RAN*, 1996, vol. 347, no. 3, pp. 330.
11. Nakoryakov V.E., Kashinsky O.N., Burdukov A.P. et al. Local characteristics of upward gas-liquids flows, *International Journal of Multiphase flow*, 1981, vol. 7, pp. 63-81. DOI: [10.1016/0301-9322\(81\)90015-X](https://doi.org/10.1016/0301-9322(81)90015-X)
12. Yagodnikov D.A. *Vosplamnenie i gorenie poroshkoobraznykh metallov* (Ignition and Combustion of Metal Powders), Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2009, 432 p.
13. Pen'kov S.N., Sukhov A.V. *Izvestiya vuzov. Seriya: Mashinostroenie*, 1980, no. 1, pp. 56-66.
14. Yagodnikov D.A., Voronetskii A.V., Sarab'ev V.I. *Fizika goreniiya i vzryva*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 51-58.
15. Yanenko N.N., Soloukhin R.I., Papyrin A.N. et. al. *Sverkhzvukovye dvukhfaznye techeniya v usloviyakh skorostnoi neravnovesnosti chastits* (Supersonic two-phase flows under the conditions of particle velocity nonequilibrium), Novosibirsk, Nauka, 1980, 160 p.

16. Rychkov A.D. *Matematicheskoe modelirovanie gazodinamicheskikh protsessov v kanalakh i soplakh* (Mathematical modeling of gasdynamic processes in channels and nozzles), Novosibirsk, Nauka, 1988, 222 p.
17. Garg R., Narayanan C., Subramaniam S. A Numerically Convergent Lagrangian-Eulerian Simulation Method for Dispersed Two-Phase Flows, *International Journal of Multiphase Flow*, 2009, vol. 35, no. 4, pp. 376–388. DOI: [10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.12.004](https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2008.12.004)
18. Doisneau F., Arienti M., Oefelein J.C. A Semi-Lagrangian Transport Method for Kinetic Problems with Application to Dense-to-Dilute Polydisperse Reacting Spray Flows, *Journal of Computational Physics*, 2017, vol. 329, pp. 48–72. DOI: [10.1016/j.jcp.2016.10.042](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2016.10.042)
19. Edwards H.C. et al. Manycore performance-portability: Kokkos multidimensional array library, *Scientific Programming*, 2012, vol. 20, no. 2, pp. 89–114. DOI: [10.1155/2012/917630](https://doi.org/10.1155/2012/917630).
20. Voronetskii A.V., Aref'ev K.Yu., Abramov M.A. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2020, vol. 27, no. 6, pp. 833-851.
21. Voronetskii A.V., Aref'ev K.Yu., Abramov M.A. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2021, no. 8, pp. 1-18. DOI: [10.18698/2308-6033-2021-8-2107](https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-8-2107)
22. Voronetskii A.V., Aref'ev K.Yu., Abramov M.A. et al. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2022, vol. 60, no. 1, pp. 94-102.
23. Abramov M.A., Aref'ev K.Yu. *Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Raketno-kosmicheskie dvigatel'nye ustanovki»: sbornik trudov*. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2023, pp. 91.

24. Wielage B., Wank A., Pokhmurska H., et al. Development and Trends in HVOF Spraying Technology, *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 201, no. 5, pp. 2032-2037. DOI: [10.1016/j.surfcoat.2006.04.049](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.04.049)
25. Hawryluk M., Ziemba J., Dworzak L. Development of a Method for Tool Wear Analysis Using 3D Scanning, *Metrology and Measurement Systems*, 2017, vol. 24, no.4, pp. 739-757. DOI: [10.1515/mms-2017-0054](https://doi.org/10.1515/mms-2017-0054)
26. Alharbi N., Stokes J. Optimizing HVOF spray process parameters and post-heat treatment for Micro/Nano WC-12%Co, mixed with Inconel-625 Powders: A Critical Review, *32 International Manufacturing Conference*, 2015, 13 p.
27. Beketaeva A.O., Naimanova A.Zh. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2011, vol. 52, no. 6, pp. 58-68.
28. Langtry R.B., Menter F.R. Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes, *AIAA Journal*, 2009, vol. 47, no. 12, pp. 2894–2906. DOI: [10.2514/1.42362](https://doi.org/10.2514/1.42362)

Статья поступила в редакцию 01.12.2023

Одобрена после рецензирования 13.12.2023

Принята к публикации 27.02.2024

The article was submitted on 01.12.2023; approved after reviewing on 13.12.2023; accepted for publication on 27.02.2024