

Научная статья

УДК 533.6.011.5

doi: 10.17223/19988621/86/4

Численное моделирование обтекания конгломератов высокотемпературным потоком газа

Иван Владимирович Еремин¹, Кирилл Владимирович Костюшин²,
Сергей Александрович Рашковский³,
Константин Николаевич Жильцов⁴

^{1, 2, 3, 4} Томский государственный университет, Томск, Россия

³ Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,
Москва, Россия

¹ iveremin@niipmm.tsu.ru

² kostushink@niipmm.tsu.ru

³ rash@ipmnet.ru

⁴ konstantin@niipmm.tsu.ru

Аннотация. Моделируется движение конгломерата в равномерном и ускоряющемся потоках газа. Перемещение конгломерата осуществляется под действием сил давления. Эффекты теплопередачи между газом и конгломератом, горение и разрушение конгломерата не учитываются. Проведены численные исследования характеристик движения сферической частицы и трех типов конгломератов различной компоновки, эквивалентных по массе. Показано, что при движении в равномерном потоке асимметричные конгломераты значительно отклоняются от оси симметрии, при движении в ускоряющемся потоке конгломераты стабилизируются в ее окрестности, в том числе в случае отклонения исходного положения конгломерата от оси симметрии.

Ключевые слова: математическое моделирование, сопловой блок, частицы, конгломерат

Благодарности: Работа выполнена за счет гранта РНФ (проект № 21-19-00541).

Для цитирования: Еремин И.В., Костюшин К.В., Рашковский С.А., Жильцов К.Н. Численное моделирование обтекания конгломератов высокотемпературным потоком газа // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 86. С. 55–69. doi: 10.17223/19988621/86/4

Numerical modelling of conglomerates flowing by high-temperature gas flow

Ivan V. Eremin¹, Kirill V. Kostyushin²,
Sergey A. Rashkovskiy³, Konstantin N. Zhil'tsov⁴

^{1, 2, 3, 4} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

³ Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

¹ iveremin@niipmm.tsu.ru

² kostushink@niipmm.tsu.ru

³ rash@ipmnet.ru

⁴ konstantin@niipmm.tsu.ru

Abstract. In this paper, the modeling of conglomerate motion in a uniform and accelerating gas flow is carried out. The gas is viscous, compressible, and heat-conducting. Conglomerate motion is induced by pressure forces. The gas-to-conglomerate heat transfer and the combustion and destruction of the conglomerate are not taken into account. The mathematical model of the motion of conglomerates in the flow of combustion products is based on three-dimensional Navier–Stokes equations and the $k-\omega$ SST turbulence model. The system of equations is solved numerically using Godunov-type schemes. The problem solution is obtained by means of technologies and calculation algorithms based on dynamic grids. In the developed methodology, the computational grid is constructed according to the Overset method. Numerical simulation of the motion of non-spherical particles in the nozzle block of a solid-fuel rocket engine is performed using the ANSYS Fluent software package. The conglomerate motion in the computational domain is specified by user-defined functions.

Numerical studies of the motion characteristics of one spherical particle and three types of conglomerates, which are equivalent in mass and number of particles, in a uniform and accelerating gas flow have been performed. It has been found that when moving in a uniform flow, asymmetric conglomerates deviate significantly from the symmetry axis, and when moving in an accelerating flow, the conglomerates are stabilized in the vicinity of the symmetry axis, even if the initial position of the conglomerates deviates from the axis.

Keywords: mathematical simulation, nozzle block, particles, conglomerate

Acknowledgments: This work was partially supported by the Russian Scientific Foundation (project No. 21-19-00541).

For citation: Eremin, I.V., Kostyushin, K.V., Rashkovskiy, S.A., Zhil'tsov, K.N. (2023) Numerical modelling of conglomerates flowing by high-temperature gas flow. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 86. pp. 55–69. doi: 10.17223/19988621/86/4

Введение

Задача увеличения энергетических характеристик твердотопливных зарядов применительно к энергоустановкам ракетно-космической техники является одним из приоритетных направлений развития. Путем введения в состав энергетических

добавок на основе магния, алюминия и бора можно добиться увеличения температуры сгорания, теплопроизводительности, степени газообразования и т.д. Содержание алюминия до 15% может обеспечить увеличение температуры сгорания до 3 000 К и плотности смесевых топлив более 2.0 г/см³ [1]. Перспективным направлением решения задачи повышения эффективности металлизированных горючих в составе высокоэнергетических материалов является полная или частичная замена алюминия на борсодержащие компоненты, обладающие высокой удельной энергией окисления в процессе горения.

В камере сгорания частицы высокоэнергетических добавок проходят ряд физико-химических превращений, что приводит к формированию двухфазного потока продуктов сгорания, смеси газа и одиночных частиц или конгломератов. Движение конгломератов под действием газодинамических сил в зависимости от геометрических характеристик частиц и конгломератов представляет интерес с точки зрения понимания процессов их горения.

Описанию обтекания частиц конденсированной фазы в потоке посвящено множество монографий и научных статей российских и зарубежных исследователей. Так, в работе [2] анализируются результаты численных расчетов обтекания сферы сверхзвуковым потоком газа при значениях числа Маха, превышающих $M = 1.5$. Ряд модельных задач о движении мелких сферических частиц в газовом потоке рассмотрен в [3]. В работе [4] авторы предлагают реализовать подход к моделированию обтекания составной частицы капли алюминия и присоединенного к ней оксида с учетом скольжения оксида по поверхности основной частицы. В результате исследований получают сведения о коэффициентах сопротивления и теплоотдачи конгломерата несферической формы. Авторами работы [5] рассмотрено двухфазное течение в до-, транс- и сверхзвуковых частях сопла при больших числах Рейнольдса с учетом взаимного влияния газа и твердых частиц. Движение частиц описывалось с помощью подхода Лагранжа (т.е. рассчитывались параметры каждой частицы или кластера частиц). Изучено влияние формы контура дозвуковой части сопла, коэффициента загрузки частиц и их диаметра на характеристики потока частиц. В работе [6] рассматривается взаимодействие частиц конденсированной фазы с высокоэнтропийным потоком воздуха в прямой камере сгорания с учетом горения конденсированных частиц. Для моделирования двухфазного потока авторы используют комбинированный подход Лагранжа–Эйлера с учетом процесса горения частиц. Рассмотрены случаи подачи частиц как со стенки камеры сгорания, так и по оси потока. Авторами установлено, что при подаче частиц со стенки (в отличие от осевой подачи частиц) распределение их траекторий в камере сгорания сильно зависит от их дисперсности.

Обзор литературы показывает, что в большинстве физико-математических моделей движения частиц конденсированной фазы принимается допущение о том, что частица имеет сферическую форму, а геометрический пересчет несферических частиц к сферическим приводит лишь к получению оценочного результата, который будет являться достаточно грубым приближением.

Задача моделирования движения отдельных частиц и конгломератов сложной несимметричной формы очень часто сводится к построению качественной расчетной сетки, учитывающей и режим течения, и геометрические особенности конгломератов. Базовые методики построения сеток – применение адаптивных сеток, деформируемых сеток или сеток с перекрытиями. При использовании ме-

тодик, основанных на применении адаптивных сеток, в каждый момент времени генерируется новая геометрия, соответствующая положению объекта в текущий момент времени. При этом изменяется как количество ячеек, граней и узлов, так и топология связей [7, 8]. Альтернативой данной методике может служить подход, основанный на применении алгоритмов деформации сетки с сохранением топологии связей [9]. В таком случае число геометрических элементов расчетной модели сохраняется, изменяются только координаты узлов. Методики, основанные на применении деформируемых сеток, значительно экономят вычислительные ресурсы, однако могут использоваться только в тех случаях, когда обтекаемый объект изменяет свое положение незначительно. Альтернативным подходом для решения задач моделирования движения конгломератов в потоке продуктов сгорания является использование методики с применением многообластных сеток с перекрытиями [10]. Данная модель позволяет проводить расчеты с объектами,двигающимися под действием как внешних сил, так и сил, определяемых самой системой газ–частица.

Цель данной работы – изучение характеристик движения совокупности сферических частиц (конгломератов) конденсированной фазы в потоке газа в условиях камеры сгорания и ускоряющегося потока, вплоть до сверхзвуковых скоростей.

Физико-математическая постановка задачи

Рассматривается задача о моделировании движения конгломерата в равномерном или ускоряющемся газовом потоке. Газ является вязким, сжимаемым, теплопроводным. Не учитываются эффекты теплообмена между газом и частицами, а также горение и разрушение конгломерата частиц. Расчеты проводились для продуктов сгорания модельного топлива. Пространственная постановка нестационарного течения вязкого сжимаемого газа описывается системой уравнений Навье–Стокса, которая дополняется уравнением неразрывности и уравнением энергии [11]. Подробное описание системы уравнений приведено в работе [12]. Система уравнений дополнительно замыкается моделью турбулентности SST $k-\omega$ (Menter's Shear Stress Transport), которая является гибридом $k-\omega$ - и $k-\varepsilon$ -моделей, позволяя точнее разрешать движение потока на стенке и вдали от нее [13]. При обдуве конгломератов потоком газа он ускоряется под действием приложенных сил давления к их поверхности. Интегралы сил давления и их моменты записываются в виде:

$$\vec{F}_A = \vec{F}_A^{\text{тп}} + \vec{F}_A^p, \quad \vec{M}_C = \oint_S \vec{r} \times \tau_w \vec{n} + p \cdot \vec{n} \, dS = \sum_i \vec{r}_i \times \vec{F}_{A_i}, \quad (1)$$

где

$$\vec{F}_A^p = \oint_S p \cdot \vec{n} \, dS = \sum_i \vec{n}_i \cdot p_i \cdot dS_i = \sum_i \vec{F}_{A_i}^p, \\ \vec{F}_A^{\text{тп}} = \sum_i \tau_w \vec{n}_i \cdot dS_i = \sum_i - \left[\nabla \vec{U}_i \right] \vec{n}_i \cdot \mu_i \cdot dS_i = \sum_i \vec{F}_{A_i}^{\text{тп}}.$$

Поступательная и угловая скорости конгломерата определяются как

$$\vec{V} = \vec{V}' + \vec{a}_i \cdot dt, \quad (2)$$

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}' + \vec{b}_i \cdot dt, \quad (3)$$

где $\vec{V}'$ и $\vec{\omega}'$ – поступательная и угловая скорости на предыдущем шаге по времени, $\vec{a}_i$ и $\vec{b}_i$ – ускорение составляющих скорости соответственно. В проекции на оси пространственной системы координат ускорение запишется в виде:

$$a_x = \frac{1}{m} F_x; \quad a_y = \frac{1}{m} F_y; \quad a_z = \frac{1}{m} F_z;$$

$$b_x = \frac{M_x}{I_{xx}}; \quad b_y = \frac{M_y}{I_{yy}}; \quad b_z = \frac{M_z}{I_{zz}}.$$

Начальные условия в расчетной области соответствуют распределению скорости V , давления P и температуры T . В случае ускоряющегося потока начальные распределения соответствуют параметрам установившегося течения в сопле. На входной границе для равномерного потока фиксируются постоянные давление P и скорость потока V ; для ускоряющегося потока P и T . На твердых стенках соблюдаются условия непротекания и прилипания, на твердых поверхностях частиц, составляющих конгломерат – аналогичные граничные условия. На выходной границе ставятся «мягкие» граничные условия.

Методика решения задачи

Для численного моделирования использовались программный пакет ANSYS Fluent и технология динамических расчетных сеток типа «Химера» (модуль Overset). На рис. 1 представлены основная расчетная сетка и расчетная сетка для конфигурации конгломерата частиц. Численное решение системы уравнений по пространству проводится со 2-м порядком точности, а по времени с 1-м порядком, поскольку алгоритм модуля Overset не позволяет рассчитывать уравнения схемами высшего порядка.

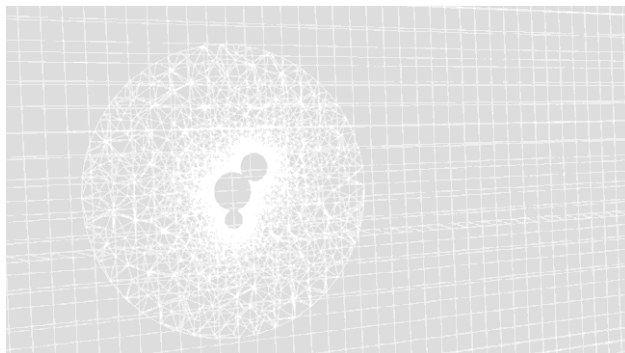


Рис. 1. Пример построения расчетной сетки с перекрытием
Fig. 1. An example of constructing a computational grid with overlap

Пересчет динамики движения частиц реализуется при помощи программного кода, компилируемого в оболочку в виде UDF-функции (User-Defined Functions). Данный код реализует решение методом Гаусса системы линейных алгебраических уравнений Эйлера для поступательной и вращательной скоростей в связанной с частицей (конгломератом) системе координат. Решение этих уравнений позво-

ляет определить поступательную и угловую скорости относительного движения частиц на каждом временном шаге. Скорость движения подсеточной области конгломерата совпадает со скоростью движения центра масс конгломерата.

В качестве входных данных решатель, используемый в представленной методике, принимает геометрию конгломерата, сетку с перекрытием в основной расчетной области, координаты центра масс, собственные моменты и массу конгломерата. Полученное решение системы уравнений Эйлера определяет силы и моменты, действующие на частицы, угловые скорости и ускорение, координаты и углы вращения конгломерата.

Разработанная методика на каждом шаге по времени состоит из следующих этапов решения: сначала рассчитывается газодинамическое поле течения; происходит расчет интеграла сил давления, действующих на конгломерат; рассчитываются моменты сил, действующих на конгломерат; определяются дополнительные динамические характеристики (поступательная / угловая скорость, ускорения и т.д.); происходит пересчет положения центра масс и углов поворота; изменение положения перекрывающихся расчетных сеток; запись файлов с данными и передача данных о новом положении частиц конгломерата в газодинамический решатель. Приведенный алгоритм позволяет рассчитывать характеристики сложного движения конгломератов в потоке газа с собственными моментами инерции менее чем 10^{-8} .

Геометрические параметры конгломератов

Название	Масса, 10^{-12} кг	Число частиц	Диаметр частицы, мкм	$I_{xx} \cdot 10^{-23}$	$I_{yy} \cdot 10^{-23}$	$I_{zz} \cdot 10^{-23}$
Сфера	1.06184	1	11.75	1.468071	1.468071	1.468071
Тип 1		13	5	1.873402	1.873404	1.897228
Тип 2				2.854207	2.957781	1.879009
Тип 3				1.957979	2.436632	2.013638

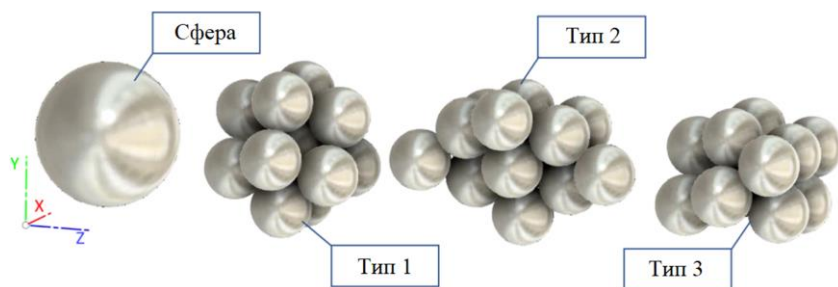


Рис. 2. Геометрия конгломератов
Fig. 2. Geometry of conglomerates

В работе исследованы характеристики движения несферических конгломератов, основные характеристики которых приведены в таблице. Формы конгломератов представлены на рис. 2.

Исследование характеристик движения конгломератов в равномерном потоке

В случае равномерного газового потока расчетная область представляла собой цилиндр диаметром $d = 0.55$ мм и длиной $l = 7.5$ мм. В момент времени $t = 0$ с конгломерат помещался на оси симметрии на расстоянии 0.3 мм от входа в расчетную область. Геометрия расчетной области показана на рис. 3. Фоновая расчетная сетка является гексаэдральной и состоит из 500 тысяч ячеек. Перекрывающая расчетная сетка является тетраэдральной и состоит из 250 тысяч ячеек. Шаг по времени составляет $5 \cdot 10^{-9}$ с. В соответствии с физической постановкой задачи в области задаются следующие начальные условия: $V = 100$ м/с, $P = 50$ атм и $T = 2500$ К. Давление и скорость на входной границе $P = 50$ атм, $V = 100$ м/с. На рис. 4. показаны векторы скорости в плоскости XY для момента времени $t = 2.0 \cdot 10^{-5}$.

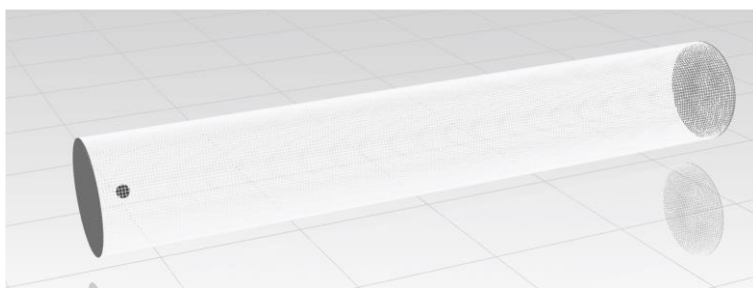


Рис. 3. Геометрия расчетной области для расчетов в равномерном потоке
Fig. 3. Geometry of a computational domain for calculations in a uniform flow

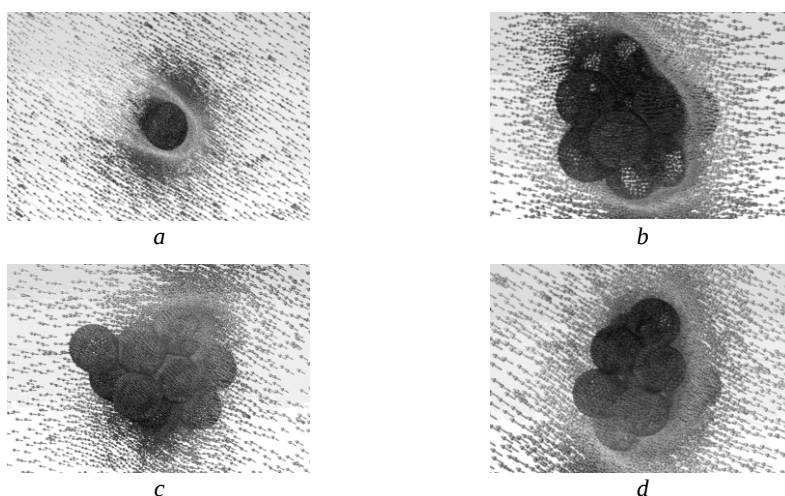


Рис. 4. Обтекание конгломератов потоком газообразных продуктов сгорания:
 a – сфера; b – тип 1; c – тип 2; d – тип 3

Fig. 4. Flow of combustion gases around conglomerates:
(a) sphere, (b) type 1, (c) type 2, and (d) type 3

На рис. 5. показаны траектории исследованных конгломератов в равномерном потоке. Видно, что траектории движения конгломератов «Тип 1» и «Тип 2» имеют существенное отклонение относительно начального расположения конгломерата на оси в плоскости XU , а конгломерат «Тип 3» – в плоскости XU и YZ . Наибольшую угловую скорость достигают конгломераты «Тип 2» и «Тип 3», что связано с существенной несимметричностью их форм.

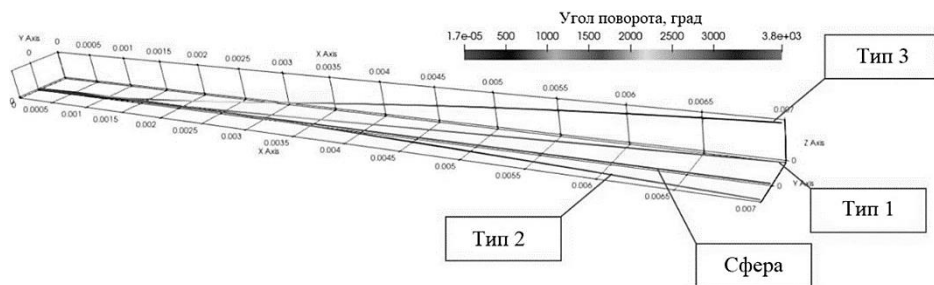


Рис. 5. Траектория движения конгломератов в равномерном потоке

Fig. 5. Trajectory of conglomerates moving in a uniform flow

На рис. 6. показано изменение модуля вектора скорости конгломератов, на рис. 7, 8 – компоненты вектора скорости конгломератов V_y и V_z . В момент времени $t = 2 \cdot 10^{-5}$ с между конфигурациями «Сфера» и «Тип 2» наблюдается максимальная разница по величине скорости – примерно 26%. Такой эффект обусловлен большей площадью поверхности обдува конгломерата «Тип 2». Стоит отметить, что компоненты вектора скорости V_z для конфигураций, отличных от «Тип 3», имеют малую величину, при этом компоненты скорости V_y для трех конфигураций конгломератов имеют амплитуду, сильно отличную от нуля. В момент времени, соответствующий покиданию конгломератом расчетной области, максимальное отличие скоростей конгломератов составляет не более 1.75%.

На рис. 9–11 показано изменение углов наклона конгломератов относительно осей Z , X и Y . Сфера и конгломераты «Тип 1» и «Тип 2» практически не вращаются относительно осей Y и Z . Существенная закрутка относительно оси Z наблюдается только у конгломерата «Тип 3». При этом все конгломераты активно вращаются относительно оси X . Такое поведение связано со смещением центра масс конгломерата относительно центра давления.

Исследование характеристик движения конгломератов в ускоряющемся потоке

При моделировании движения в ускоряющемся потоке расчетная область представляла собой сопло с радиусом входного сечения $R_{вх} = 1$ мм; радиусом критического сечения $R_{кр} = 0.35$ мм и удлиненной дозвуковой частью длиной $l_{дз} = 7$ мм. Конгломерат помещался на расстоянии 0.3 мм от входа в расчетную область. Геометрия расчетной области показана на рис. 12. Фоновая расчетная сетка является гексаэдральной и состоит из 850 тысяч ячеек. Перекрывающая расчетная сетка является тетраэдральной и состоит из 200–400 тысяч ячеек. Шаг по времени составляет 10^{-9} с.

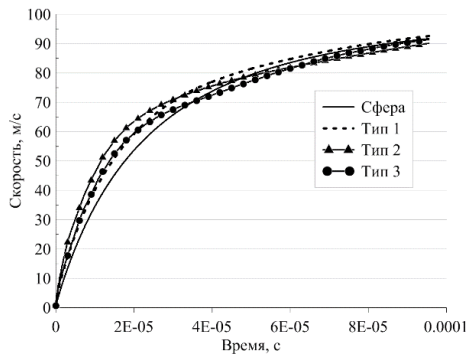


Рис. 6. Модуль вектора скорости конгломерата
Fig. 6. The modulus of the conglomerate velocity vector

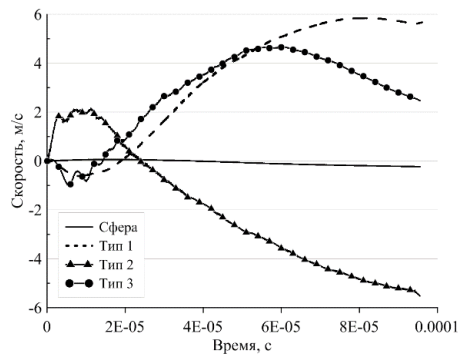


Рис. 7. Компонента V_y вектора скорости конгломерата
Fig. 7. Component V_y of the conglomerate velocity vector

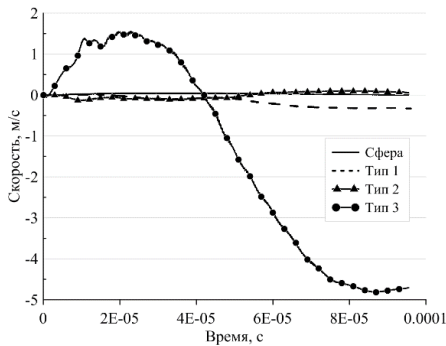


Рис. 8. Компонента V_z вектора скорости конгломерата
Fig. 8. Component V_z of the conglomerate velocity vector

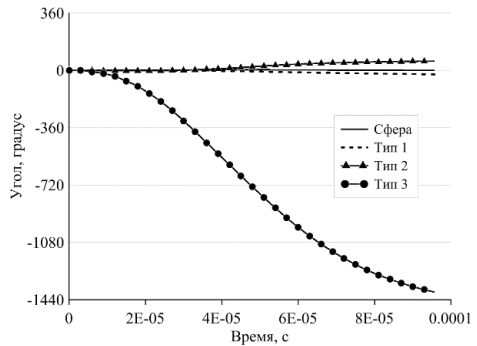


Рис. 9. Угол поворота конгломерата относительно оси Z
Fig. 9. The angle of the conglomerate rotation around Z-axis

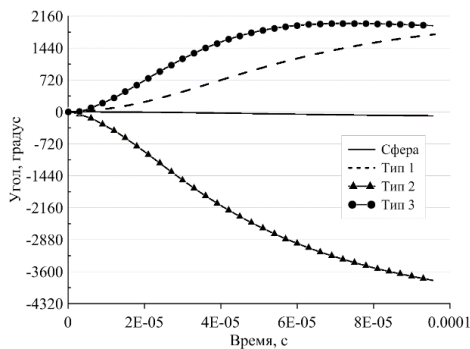


Рис. 10. Угол поворота конгломерата относительно оси X
Fig. 10. The angle of the conglomerate rotation around X-axis

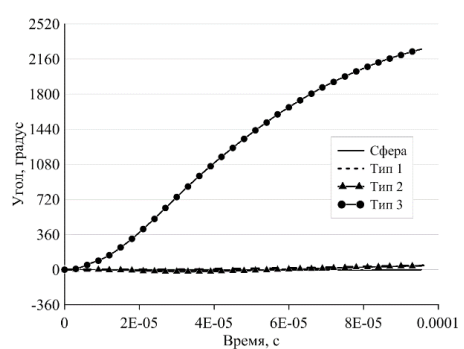


Рис. 11. Угол поворота конгломерата относительно оси Y
Fig. 11. The angle of the conglomerate rotation around Y-axis

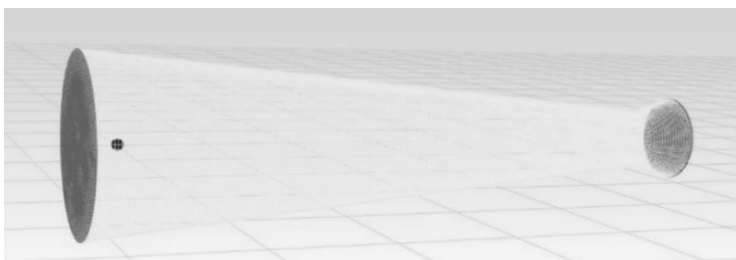


Рис. 12. Геометрия расчетной области для расчетов в ускоряющемся потоке
Fig. 12. Geometry of the computational domain for calculations in an accelerating flow

В качестве начальных условий использовалось установившееся течение в сопле. Граничные и начальные условия аналогичны случаю для описанного выше равномерного потока. Здесь рассмотрено два варианта начального положения конгломератов: на оси сопла и на удалении от оси сопла – вдоль оси Y на расстоянии 0.35 мм. Для конгломерата «Тип 2» численного эксперимента для ускоряющегося потока не проводилось.

Расположение конгломерата на оси сопла

Конгломерат помещался на оси симметрии на расстоянии 0.3 мм от входа в расчетную область. На рис. 13 показано изменение модуля вектора скорости конгломератов, на рис. 14, 15 – компоненты вектора скорости V_y и V_z конгломератов в ускоряющемся потоке. Скоростные характеристики частицы и конгломератов показывают, что частицы значительно ускоряются по мере приближению к соплу. При этом конгломерат «Тип 3» испытывает сильные колебания в плоскости осей Y и Z . На рис. 16–18 показано изменение углов вращения конгломератов относительно осей Z , X и Y . Видно, что по оси X вращение всех исследуемых типов частиц небольшое. Для осей Z и Y характерно сильное вращение конгломерата «Тип 3». Данный результат объясняется его несимметричной формой и соответствующим расположением центра масс и собственных моментов инерции.

Расположение конгломерата на удалении от оси сопла

Для исследования характеристик движения конгломератов в сужающемся сопле конгломерат помещался на удалении от оси симметрии – на расстоянии 0.35 мм вдоль оси Y . На рис. 19 показано изменение модуля вектора скорости конгломератов, на рис. 20, 21 – компоненты вектора скорости V_y и V_z конгломератов в ускоряющемся потоке. На рис. 22–24 показано изменение углов наклона конгломератов относительно осей Z , X и Y . Видно, что в сравнении с положением на оси симметрии максимальная поступательная скорость конгломератов упала. При этом поступательные скорости по другим осям резко возрастают по мере приближения к оси, а для конгломерата «Тип 3» частота колебаний сильно уменьшилась. Углы вращения для рассмотренных конфигураций сильно уменьшились только для конфигурации «Тип 3», для остальных конфигураций остались в тех же диапазонах. На рис. 25 показано изменение Y -координаты вдоль оси сопла, что говорит о приближении конгломератов к оси сопла в процессе движения.

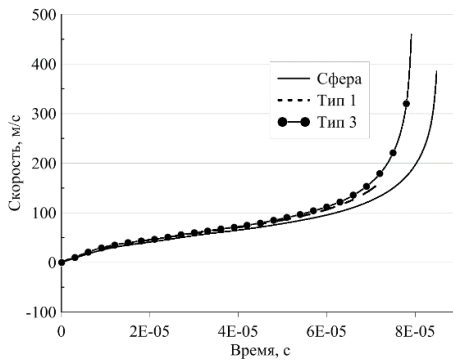


Рис. 13. Модуль вектора скорости конгломерата
Fig. 13. The modulus of the conglomerate velocity vector

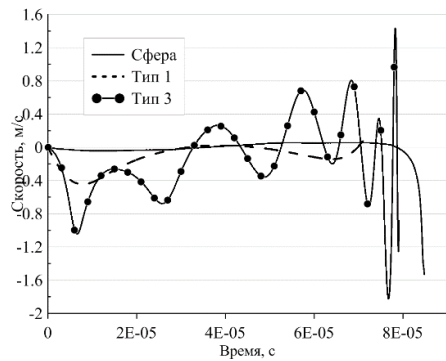


Рис. 14. Компонента V_y вектора скорости конгломерата
Fig. 14. Component V_y of the conglomerate velocity vector

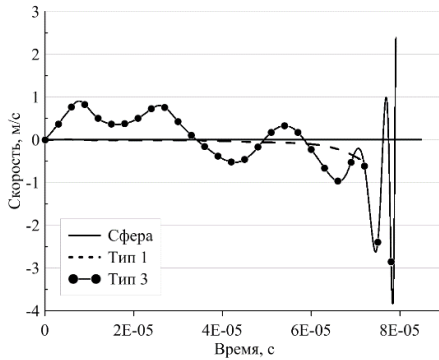


Рис. 15. Компонента V_z вектора скорости конгломерата
Fig. 15. Component V_z of the conglomerate velocity vector

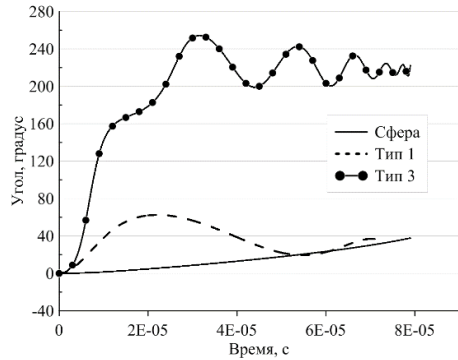


Рис. 16. Угол поворота конгломерата относительно оси Z
Fig. 16. The angle of the conglomerate rotation around Z-axis

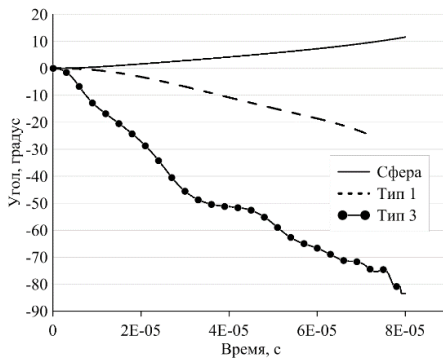


Рис. 17. Угол поворота конгломерата относительно оси X
Fig. 17. The angle of the conglomerate rotation around X-axis

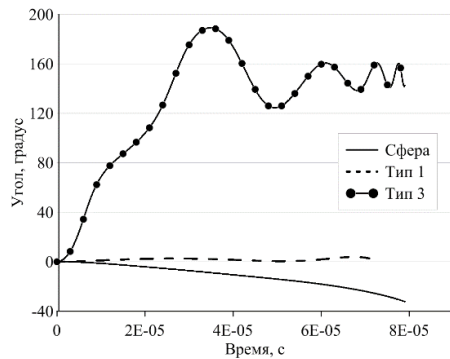


Рис. 18. Угол поворота конгломерата относительно оси Y
Fig. 18. The angle of the conglomerate rotation around Y-axis

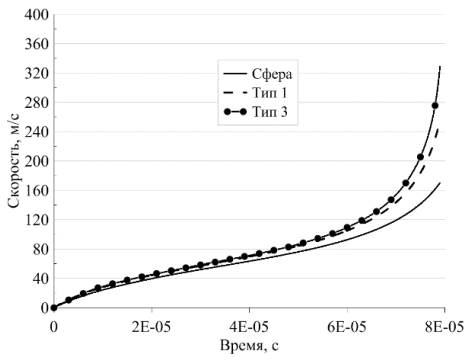


Рис. 19. Модуль вектора скорости конгломерата
Fig. 19. The modulus of the conglomerate velocity vector

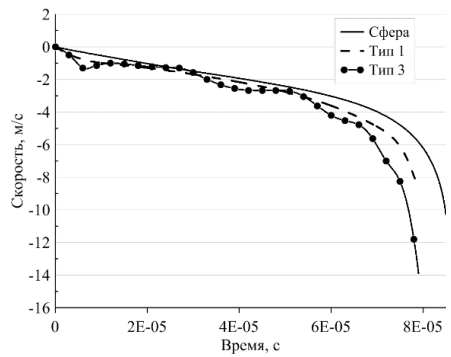


Рис. 20. Компонента V_y вектора скорости конгломерата
Fig. 20. Component V_y of the conglomerate velocity vector

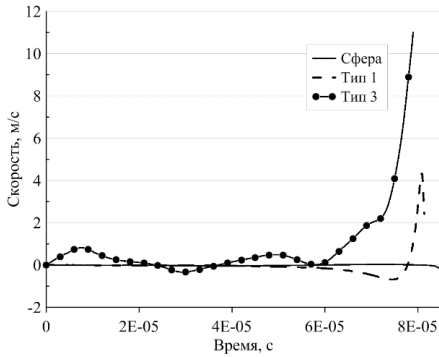


Рис. 21. Компонента V_z вектора скорости конгломерата
Fig. 21. Component V_z of the conglomerate velocity vector

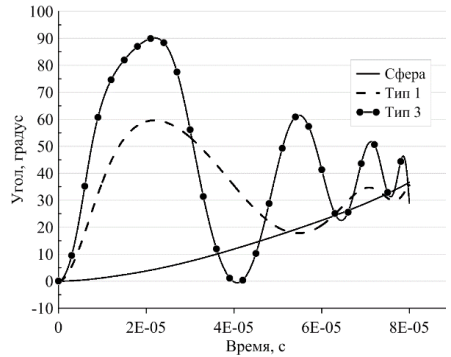


Рис. 22. Угол поворота конгломерата относительно оси Z
Fig. 22. The angle of the conglomerate rotation around Z-axis

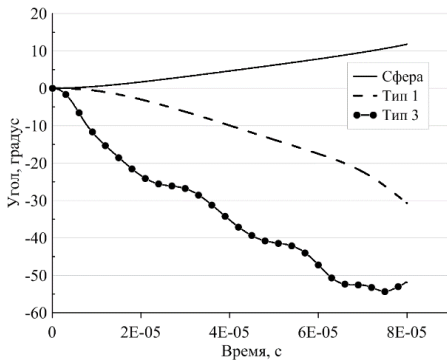


Рис. 23. Угол поворота конгломерата относительно оси X
Fig. 23. The angle of the conglomerate rotation around X-axis

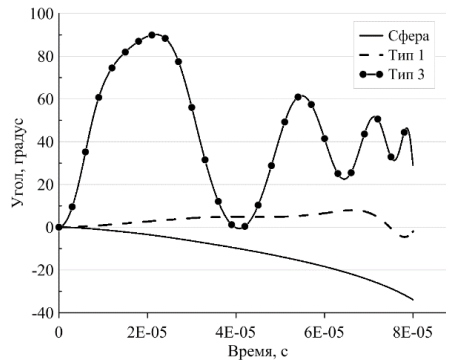


Рис. 24. Угол поворота конгломерата относительно оси Y
Fig. 24. The angle of the conglomerate rotation around Y-axis

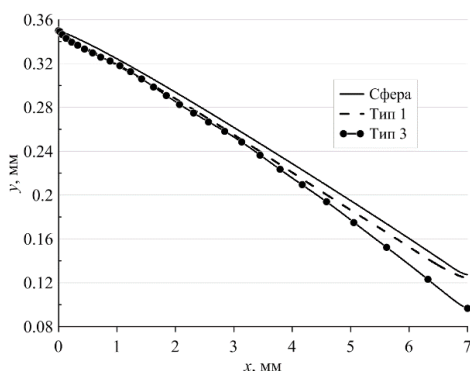


Рис. 25. Изменение Y-координаты вдоль оси сопла
Fig. 25. Variation in Y-coordinate along the nozzle axis

Заключение

В результате проведенного исследования по изучению характеристик движения совокупности сферических частиц (конгломератов) конденсированной фазы в потоке газа в условиях камеры сгорания и ускоряющегося потока предложена методика расчета движения конгломератов частиц конденсированной фазы произвольной формы. Проведено моделирование движения произвольных конфигураций конгломератов в равномерном потоке и в ускоряющемся потоке при различных начальных положениях конгломератов относительно оси сопла.

Показано, что движение в ускоряющемся потоке смещает конгломераты к оси сопла и частично демпфирует вращение конгломератов. Для конфигураций конгломератов со смещенным центром масс относительно центра давления наблюдаются затухающие колебания угловой скорости конгломерата по мере возрастания скорости потока продуктов сгорания. Несимметричные конгломераты в равномерном потоке существенно отклоняются от оси симметрии, а скорость конгломератов с большей площадью обдува в отдельные моменты времени возрастает.

Представленная методика расчета позволяет решать частную задачу движения конгломератов в потоке газа и построить общую физико-математическую модель с учетом процессов химического, механического и теплового взаимодействия частиц друг с другом и с продуктами сгорания при их движении в камере сгорания и сопловом блоке.

Список источников

1. Штхер М.С. Топлива и рабочие тела ракетных двигателей. М. : Машиностроение, 1976. 167 с.
2. Базжин А.П., Благосклонов В.И., Минайло А.Н., Пирогова С.В. Обтекание сферы сверхзвуковым потоком совершенного газа // Ученые записки ЦАГИ. 1971. № 3. С. 95–100.
3. Гродзовский Г.Л. О движении мелких частиц в газовом потоке // Ученые записки ЦАГИ. 1974. № 2. С. 80–89.
4. Емельянов В.Н., Тетерина И.В., Волков К.Н. Сопротивление и теплообмен металлоксидных агломератов в потоке продуктов сгорания твердого топлива // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2020. Т. 21 (1). С. 1–23. doi: 10.33257/PhChGD.21.1.893

5. Ветлущий В.Н., Ганимедов В.Л., Мучная М.И. Исследование потока газа с твердыми частицами в сверхзвуковом сопле // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т. 46, № 6. С. 65–77.
6. Воронетский А.В., Смоляга В.И., Арефьев К.Ю., Гусев А.А., Абрамов М.А. Параметрическое исследование взаимодействия частиц конденсированной фазы с высокоэнтальпийным потоком воздуха в прямоточной камере сгорания // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 8 (68). С. 1–18. doi: 10.18698/2308-6033-2017-8-1663
7. Гильманов А.Н. Методы адаптивных сеток в задачах газовой динамики. М. : МАИК Наука / Интерпериодика, 2000. 247с.
8. Лебедев А.С., Лисейкин В.Д., Хакимзянов Г.С. Разработка методов построения адаптивных сеток // Вычислительные технологии. 2002. Т. 7, № 3. С. 29–43.
9. Зайцев Д.К., Щур Н.А. Применение деформируемых сеток для численного моделирования течений в областях с подвижными границами // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2006. № 5-1. С. 15–22.
10. Козелков А.С., Ефремов В.Р., Куркин А.А., Тарасова Н.В., Уткин Д.А., Тятюшкина Е.С. Моделирование движения тел в вязкой несжимаемой жидкости // Сибирский журнал вычислительной математики. 2019. Т. 22, № 3. С. 261–280. doi: 10.15372/SJNM20190302
11. Пирогов В.Б., Северинов Л.И. О расчете внутренних течений вязкого теплопроводного газа // ВИНТИ. 1977. № 3359-77. Деп.
12. Червакова А.В., Костюшин К.В. Исследование характеристик движения несферических частиц конденсированной фазы в потоке продуктов сгорания // Перспективы развития фундаментальных наук : сб. науч. тр. XIX Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск, 2022. № 3. С. 36–38.
13. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST Turbulence model // Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence. Heat and Mass Transfer. West Redding : Begell House Inc., 2003. P. 625–632.

References

1. Shtekher M.S. (1976) *Topliva i rabochie tela raketnykh dvigateley* [Rocket engine propellants and working bodies]. Moscow: Mashinostroyeniye.
2. Bazzhin A.P., Blagosklonov V.I., Minaylos A.N., Pirogova S.V. (1971) Obtekanie sfery sverkhzvukovym potokom sovershennogo gaza [Streamline of a sphere by a supersonic flow of a perfect gas]. *Uchenye zapiski TSAGI – TsAGI Science Journal*. 3. pp. 95–100.
3. Grodzovskiy G.L. (1974) O dvizhenii melkikh chastits v gazovom potoke [On the motion of small particles in a gas flow]. *Uchenye zapiski TSAGI – TsAGI Science Journal*. 2. pp. 80–89.
4. Emel'yanov V., Teterina I., Volkov K. (2020) Soprotivlenie i teploobmen metalloksidnykh aglomeratov v potoke produktov sgoraniya tverdogo topliva [Drag and heat transfer of metal and oxide agglomerates in flow of combustion products of solid propellant]. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike – Propellant Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*. 21(1). pp. 1–23. doi: 10.33257/PhChGD.21.1.893
5. Vetlutskiy V.N., Ganimedov V.L., Muchnaya M.I. (2005) Investigation of a gas flow with solid particles in a supersonic nozzle. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 46(6). pp. 824–834. doi: 10.1007/s10808-005-0140-3
6. Voronetskiy A.V., Smolyaga V.I., Aref'ev K.Yu., Gusev A.A., Abramov M.A. (2017) Parametricheskoe issledovanie vzaimodeystviya chastits kondensirovannoy fazy s vysokoent'p'nyym potokom vozdukh v pryamotochnoy kamere sgoraniya [Parametric study of condensed phase particles interaction with a high-enthalpy air flow in a co-current combustion chamber]. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii – Engineering Journal: Science and Innovation*. 8(68). pp. 1–18. doi: 10.18698/2308-6033-2017-8-1663
7. Gil'manov A.N. (2000) *Metody adaptivnykh setok v zadachakh gazovoy dinamiki* [Methods of adaptive meshes in problems of gas dynamics]. Moscow: MAIK Nauka/Interperiodika.

8. Lebedev A.S., Liseykin V.D., Khakimzyanov G.S. (2002) Razrabotka metodov postroeniya adaptivnykh setok [Development of methods for constructing adaptive meshes]. *Vychislitel'nye tekhnologii – Computational Technologies*. 7(3). pp. 29–43.
9. Zaytsev D.K., Shchur N.A. (2006) Primenenie deformiruemykh setok dlya chislennoy modelirovaniya techeniy v oblastiakh s podvizhnymi granitsami [Application of deformable meshes for numerical modeling of flows in regions with moving boundaries]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGTU – Saint Petersburg Polytechnical University Journal*. 5(1). pp. 15–22.
10. Kozelkov A.S., Efremov V.R., Kurkin A.A., Tarasova N.V., Utkin D.A., Tyatyushkina E.S. (2019) Simulation of body motion in viscous incompressible fluid. *Numerical Analysis and Applications*. 12(3). pp. 219–233. doi: 10.15372/SJNM20190302
11. Pirogov V.B., Severinov L.I. (1977) O raschete vnutrennikh techeniy vyazkogo teploprovodnogo gaza [On the calculation of internal flows of viscous heat-conducting gas]. *VINITI*. №3359-77
12. Chervakova A.V., Kostyushin K.V. (2022) Issledovanie kharakteristik dvizheniya nesfericheskikh chastits kondensirovannoy fazy v potoke produktov sgoraniya [Investigation of the characteristics of the motion of non-spherical condensed phase particles in the flow of combustion products]. *Sbornik nauchnykh trudov XIX Mezhdunarodnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk*. 3. pp. 36–38.
13. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. (2003) Ten years of industrial experience with the SST Turbulence model. *Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence. Heat and Mass Transfer*. West Redding: Begell House Inc. pp. 625–632.

Сведения об авторах:

Еремин Иван Владимирович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией 101 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: iveremin@niipmm.tsu.ru

Костюшин Кирилл Владимирович – младший научный сотрудник лаборатории 101 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: kostushink@niipmm.tsu.ru

Рашковский Сергей Александрович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории термодинамики и горения Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (Москва, Россия); ведущий научный сотрудник лаборатории проектирования рабочих элементов ракетно-космической техники Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: rash@ipmnet.ru

Жильцов Константин Николаевич – научный сотрудник лаборатории 101 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: konstantin@niipmm.tsu.ru

Information about the authors:

Eremin Ivan V. (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: iveremin@niipmm.tsu.ru

Kostyushin Kirill V. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: kostushink@niipmm.tsu.ru

Rashkovskiy Sergey A. (Doctor of Physics and Mathematics, Principal Researcher, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: rash@ipmnet.ru

Zhil'tsov Konstantin N. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: konstantin@niipmm.tsu.ru

Статья поступила в редакцию 09.10.2023; принята к публикации 04.12.2023

The article was submitted 09.10.2023; accepted for publication 04.12.2023