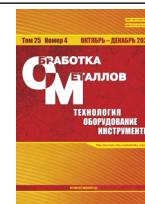




# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Моделирование эрозионного износа титанового сплава высокоскоростным потоком частиц

Евгений Строкач <sup>a, \*</sup>, Глеб Кожевников <sup>b</sup>, Алексей Пожидаев <sup>c</sup>, Сергей Добровольский <sup>d</sup>

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, г. Москва, 125993, Россия

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5376-1231>, [evgenij.strokatsch@mai.ru](mailto:evgenij.strokatsch@mai.ru); <sup>b</sup> <https://orcid.org/0009-0001-4622-7476>, [kozhevnikov.mai@yandex.ru](mailto:kozhevnikov.mai@yandex.ru);  
<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7667-5392>, [pozhideaev.mai@xmail.ru](mailto:pozhideaev.mai@xmail.ru); <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1884-1882>, [dobrovolskiy\\_s@mail.ru](mailto:dobrovolskiy_s@mail.ru)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 620.191, 629.017

#### История статьи:

Поступила: 15 сентября 2023  
Рецензирование: 29 сентября 2023  
Принята к печати: 28 октября 2023  
Доступно онлайн: 15 декабря 2023

#### Ключевые слова:

Эрозионный износ  
Численное моделирование  
Твердые частицы  
Ansys FLUENT  
Shape factor  
Ti6Al4V  
CFD  
Эродирование твердыми частицами  
GEKO  
Эрозия сплава  
Модель турбулентности

#### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, тема FSFF-2023-0006.

#### Благодарности

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнауки № 13.ЦКП.21.0034).

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Прогнозирование износа деталей твердыми частицами в газовом потоке и управление его интенсивностью требует построения полноценной методики моделирования. Это связано с проведением большого количества частных исследований чувствительности и влияния параметров моделей разных физических процессов и последующей верификации результатов. **Целью работы** являлась разработка такой методики для частного случая – нормального натекания высокоскоростного потока твердых частиц кварца с неравномерным распределением по размерам на поверхность образца из сплава Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V с помощью CFD-методов. **Методы.** Течение газа описывалось уравнениями Навье – Стокса, осредненными по Рейнольдсу, где частицы, согласно Эйлер-Лагранжевой постановке, представлялись математическими точками с соответствующими свойствами. В работе исследовалось влияние двух параметрических моделей турбулентности, k-epsilon standard и RNG k-epsilon, а также относительно новой модели GEKO и ее параметров. На примере Oka и DNV оценивалось влияние моделей эрозии на интегральную скорость эродирования. В ходе исследования был затронут вопрос влияния формы частиц на профиль износа и итоговую скорость эродирования. Результаты моделирования сравнивались со специально проведенным лабораторным экспериментом, который позволил определить профиль износа и скорость уноса материала (скорость эродирования). **Результаты и обсуждение.** Результаты показали, что ни расчетный профиль износа, ни расчетная скорость эродирования не зависят от рассмотренных моделей турбулентности и их настроек. Наоборот, расчетная скорость износа ожидаемо существенно зависит от выбора полуэмпирической модели эрозии и калибровки коэффициентов. Интересным оказалось влияние коэффициента формы на расчетную картину износа и итоговую расчетную скорость эродирования. При увеличении лобового сопротивления за счет изменения формы частиц снижалась скорость эрозии, а профиль износа перестраивался вслед за частицами к форме кратера, сходной с экспериментальной. Ожидается, что наблюдаемые результаты будут полезны не только для прогнозирования износа в деталях и механизмах различных видов техники, но и при управлении износом, режимами обработки поверхностей для дробеударного упрочнения и формообразования.

**Для цитирования:** Моделирование эрозионного износа титанового сплава высокоскоростным потоком частиц / Е.А. Строкач, Г.Д. Кожевников, А.А. Пожидаев, С.В. Добровольский // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 4. – С. 268–283. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-268-283.

## Введение

Известно, что эрозия твердыми частицами (в частности, в газовом потоке) является пространственной проблемой в аэрокосмической, энергетической, автомобильной и других областях. К настоящему моменту изучение этого

#### \*Адрес для переписки

Строкач Евгений Александрович, к.т.н., ведущий инженер  
Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет),  
Волоколамское шоссе, 4,  
125993, г. Москва, Россия  
Тел.: +7 (916) 338-63-66, e-mail: [evgenij.strokatsch@mai.ru](mailto:evgenij.strokatsch@mai.ru)

явления породило массу экспериментальных работ для разных материалов частиц, материалов поверхности и покрытий, условий натекания, характеристик частиц и т. п. [1–9] Создано, применяется и перманентно уточняется множество эмпирико-аналитических подходов для инженерной оценки скорости эродирования: методы на базе подходов Finnie, Bitter, Oka, Tabakoff и др. В последнее время активно развивались численные методы моделирования как на базе методов CFD (computational fluid dynamics, вычислительной гидрогазодинамики), применимых для инженерного повседневного анализа, так и на основе FEA (Finite element analysis) и SPH (Smooth particle hydrodynamics) и его производных, позволяющих изучить процессы на микроуровне [1, 9–14].

Ранее был представлен небольшой обзор тенденций в методах моделирования эрозии на примере некоторых работ, применяющих CFD и FEA [8]. Одним из самых популярных тестов для моделирования и верификации служила система из одного и более изогнутых под  $90^\circ$  каналов, где под действием несущей фазы (чаще всего воздуха) частицы разгонялись и эродировали поверхность [2, 3, 15]. В работах с CFD для моделирования движения частиц, как правило, используется подход Эйлера – Лагранжа, представляющий группы частиц математическими точками с заданными массой, материалом и размерами [16–18]. В публикациях авторы сравнивают и рекомендуют разные модели турбулентности (как правило, расчеты проводятся на основе системы осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса) и полуэмпирические модели эрозии в зависимости от задачи.

Большую обзорную работу в части применения CFD и эмпирико-аналитических зависимостей провели Shinde и др. [1]. Авторы подтверждают применимость CFD по точности для широкого круга задач и подчеркивают, что все еще требуется разработка новых эмпирико-аналитических зависимостей, а также важность оценки угла падения частиц, который зачастую зависит от несущей фазы.

Выводы, полученные при анализе эрозионного износа частицами в потоке несжимаемой жидкости (slurry erosion), применимы и для эродирования в газовой среде. Так, Н. Arabnejad [19] и А. Mansouri [20], представители группы

Е/CRC, разработали и верифицировали эмпирико-аналитические зависимости на основе разделения деформационного и абразивного типа износа, как ранее предлагал Bitter [6, 7]. Эти модели включают большое количество параметров, связанных с формой частиц, условиями натекания и материалом поверхности. В целом указанные зависимости имеют высокий потенциал применения и для моделирования эрозии в газообразной среде.

Современный анализ работ с FEA- и SPH-моделированием эрозии частицами также реализовался в ряд обзоров за авторством R. Tarodiya и A. Levy, A. Krella, V. Bonu и Н. Barshilia, A. Fardan [9–12]. За счет возможности в явном виде смоделировать столкновение частиц с поверхностью современные работы направлены на уточнение подходящих моделей материалов, описывающих их пластичное поведение и условия разрушения; влияние температуры образца; оценки эффективности покрытий; изучение влияния формы и размера частиц в явном виде, а также условий натекания частиц: скоростей, взаимного столкновения, углов падения, вращения частиц [21–28].

Несмотря на большие усилия по построению методики моделирования эрозии твердыми частицами для групп материалов или условий, к настоящему моменту не только не удалось сформировать обобщенную методику, включающую в себя микро- и макроуровень описания процесса, но продолжают исследования частных явлений и влияния настроек математических моделей процессов, важных в конкретном случае.

Внимание в настоящей работе уделено моделированию эродирования поверхности популярного титанового сплава  $Ti_6Al_4V$  потоком частиц  $SiO_2$  в воздушной среде. Такое моделирование в первую очередь требует точного описания течения газа и, в случае применения наиболее распространенного подхода – осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS), делает необходимым выбор модели турбулентности. Моделирование эрозии с помощью CFD также связано с использованием метода оценки скорости уноса материала поверхности в зависимости от условий падения частиц. В этом качестве, как правило, выступают эмпирико-аналитические методы, которые опираются на эмпирически обоснованные коэффициен-

ты для узкого круга условий. Эти коэффициенты зачастую требуют настройки и оценки чувствительности модели к их варьированию.

Как было отмечено, многие авторы при CFD-моделировании процесса эродирования частицами исследовали влияние моделей турбулентности. Однако большинство этих работ выполнены для невысоких скоростей натекания гетерогенной смеси на поверхность (менее 150–200 м/с) и не включали в себя относительно новой модели Generalized equation k-omega (GEKO) [29–31], которая может быть откалибрована несколькими коэффициентами для моделирования конкретной задачи без потери ее связности и физичности. Поэтому в настоящей работе уделено отдельное внимание модели GEKO в сравнении с распространенными k-epsilon standard и RNG.

Кроме того, в основном в имеющихся публикациях рассматривается эрозия частицами одного диаметра или узкого диапазона. Учет неравномерности распределения может существенно влиять на формирование гетерогенной струи, в итоге меняя и профиль износа на поверхности. В данном исследовании частицы имеют диапазон 2–63 мкм со смещением в сторону мелких диаметров.

Таким образом, **целью работы** являлось изучение подхода к CFD-моделированию частного случая натекания высокоскоростной гетерогенной струи с существенно неравномерным размерным распределением частиц на образец из  $Ti_6Al_4V$ . В связи с ограниченным объемом статьи поставленные задачи охватывали исследование влияния на расчетную скорость износа выбора моделей турбулентности и их настроек; выбора модели эрозии и их настроечных коэффициентов; формы частиц. Кроме того, для оценки работоспособности выбранного подхода сравнивались интегральные значения расчетной и экспериментальной скоростей эродирования, сопоставлялись расчетные профили удельной скорости эрозии и экспериментальный профиль уноса материала.

Ожидается, что выводы могут быть полезны для формирования не только части методики моделирования процесса эродирования, но и технологических процессов обработки сплавов – в первую очередь поверхностного упрочнения и дробеударного формообразования.

## Методика исследований

### Эксперимент

В работе использовался лабораторный экспериментальный стенд для исследования эрозии поверхности при воздействии гетерогенного потока. Принцип работы состоял в подаче частиц кварца в смесительную камеру, где смесь газа (в данном случае воздуха) и частиц подавалась в ускоритель, представляющей собой сопло Лаваля, в котором гетерогенный поток под действием разницы давлений разгонялся и попадал на неподвижно закрепленный образец. Основными параметрами, характеризующими экспериментальную точку, были давление на входе в ускоритель и исходная температура газа. Такая постановка позволяет исследовать износ для разных углов натекания частиц, температур и скоростей. Оцениваемыми результатами испытаний являлись форма кратера и унос материала образца, позволяющий оценить скорость износа.

Расход частиц на каждой экспериментальной точке составлял  $7,64 \times 10^{-6}$  кг/с в течение 5 минут, температура – 140 °С, давление в ускорителе – 5,75 бар. Срез ускорителя располагался на расстоянии 20 мм от образца, закрепленного под углом 90° к положению ускорителя. Распределение частиц  $SiO_2$  по размерам представлено на рис. 1. В спектре преобладали очень мелкие фракции, а максимальный эквивалентный диаметр частиц составлял 63 мкм.

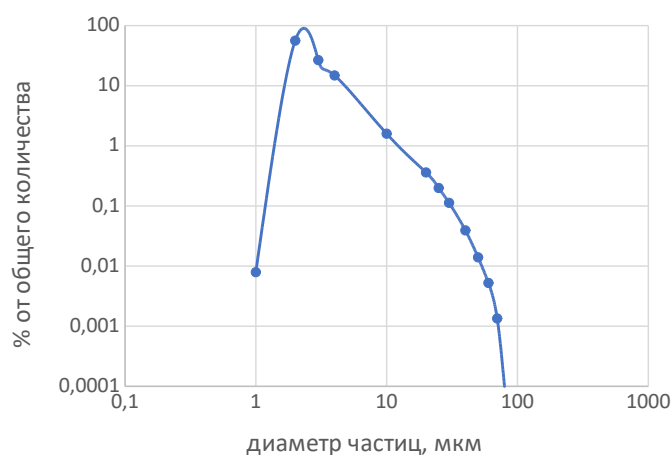


Рис. 1. Распределение частиц по размерам (количественное)

Fig. 1. Particle size distribution

### Постановка и геометрическая модель

Из-за отсутствия экспериментальных данных о распределении скоростей потока и частиц в областях ускорителя при натекании на образец, для их учета при оценке скорости эродирования требовалось моделирование всего ускорителя, что привело к формированию цельной расчетной области внутри ускорителя и между срезом сопла трубки и эродируемой поверхностью. Общий вид трубки ускорителя с соплом представлен на рис. 2. Двухфазный поток частиц и воздуха поступает в сопло Лаваля, ускоряется и через трубку истекает на образец из титанового сплава  $Ti_6Al_4V$ .

Исходя из осесимметричности задачи, область движения двухфазного потока можно представить в двумерной осесимметричной постановке, что повышает устойчивость расчета и экономит вычислительные ресурсы. Полноценная модель расчетной области строилась из

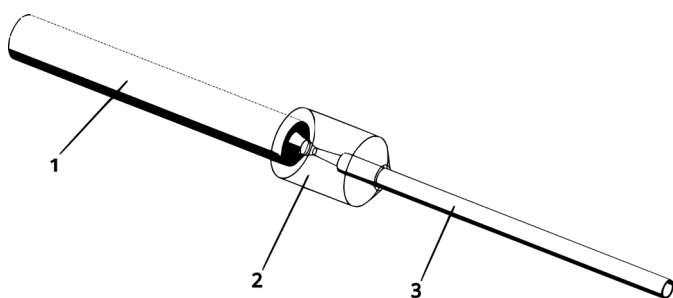


Рис. 2. Модель ускорителя:

1 – смеситель; 2 – сужающийся участок ускорителя;  
3 – расширяющийся участок ускорителя

Fig. 2. Flow accelerator model:

mixer (1); converging part (2); diverging part (3)

двух сеточных областей – ускорителя и области течения между ускорителем и образцом. В пакете ICEM CFD строилась структурированная блочная сетка с относительно высоким безразмерным расстоянием  $y^+$  около эродируемой поверхности, что связано с применением масштабированной функции стенки для моделирования пограничного слоя. Схема с обозначением типов граничных условий (ГУ) представлена на рис. 3.

### Физические модели / исследование сеточной сходимости

Рассматриваемая модель основана на применении уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу, для описания движения несущей фазы – воздуха (идеального газа). Осреднение требует учета турбулентных явлений через модель турбулентности, выбор которой может существенно влиять на результаты, а также требуется специальная оценка чувствительности самих моделей и их коэффициентов. Далее рассмотрено влияние моделей на основе уравнений для турбулентной кинетической энергии  $k$ , ее скорости диссипации  $\epsilon$  и моделей на основе  $k$  и удельной скорости диссипации  $\omega$ : k-epsilon standard, k-epsilon RNG, Generalized equation k-omega (GEKO) [29–31]. Модель k-epsilon standard выбрана как база для многих моделей турбулентности, направленных на описание явлений в ядре потока; RNG – как модель, которая, как считается, дает большую точность для течений с высокими градиентами скоростей, закрученных течений [30]. GEKO является относительно новой моделью на основе  $k$  и  $\omega$ , полная документация которой до сих пор не открыта, а ее осо-

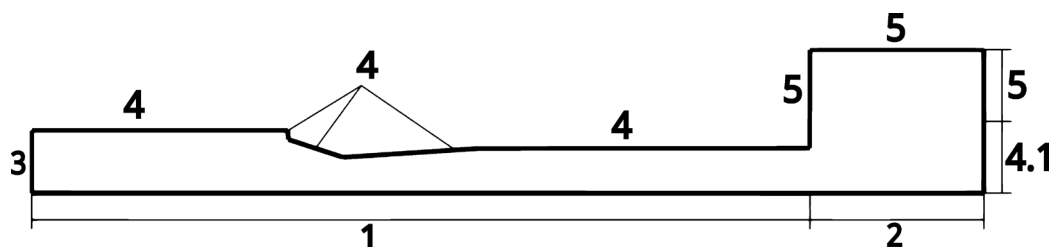


Рис. 3. Схема расчетной области:

1 – область ускорителя; 2 – область свободного истечения на образец; 3 – ГУ входа (смесь газа с частицами); 4 – стенка; 4.1 – область стенки, соответствующая образцу; 5 – ГУ выхода

Fig. 3. 2d axisymmetrical schematic diagram and boundary conditions:

accelerator area (1); outflow from accelerator to sample (2); inlet boundary condition (air + particle initialization area) (3); wall boundary condition (4); sample wall BC (4.1); pressure outlet boundary condition (5)



бенность состоит в сохранении целостности при изменении настроечных коэффициентов. Другими словами, пользователь может менять поведение модели в широком диапазоне решений, не опасаясь за физичность результатов. Основные уравнения выглядят следующим образом.

Уравнения модели GEKO из [29–32]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - C_{p,k} \rho k \omega; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + P_k C_{\omega 1} F_1 \frac{\omega}{k} - F_2 C_{\omega 2} \rho \omega^2 + C D F_3 \rho, \quad (2)$$

где доступные для варьирования коэффициенты  $C_{nw}$ ,  $C_{sep}$ ,  $C_{nw}$  имплементированы через функции  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$  [29–31]. Коэффициент  $C_{nw}$ , по словам авторов, направлен на изменение поведения модели в пограничном слое и в целом в пристенке. Ожидается, что его влияние будет невелико из-за применения пристеночной функции стенки. Коэффициент  $C_{jet}$ , как указано в документации, не является главным параметром для улучшения работы модели, но может быть преимущественным для закругленных концентрических потоков. С учетом цилиндрического сопла ускорителя этот коэффициент может иметь влияние в заданных условиях. Наконец,  $C_{sep}$  считается наиболее влияющим коэффициентом, направленным на улучшение работы при существенных обратных градиентах давления и разрешения областей с ламинарно-турбулентным переходом. Стоит отметить, что ранее для случая реагирующего течения [32]  $C_{sep}$  оказался наиболее важным коэффициентом по критериям давления и теплового потока, а снижение  $C_{sep}$  приближало работу GEKO к k-epsilon-модели. Ранее для течения гетерогенного потока с относительно малыми скоростями в трубе модель GEKO и варьирование ее параметров также показали слабое влияние на скорость и картину износа в колене трубы [33].

Для моделирования твердых частиц использовался Эйлер-Лагранжев подход, хорошо зарекомендовавший себя в таких задачах [2, 3, 8, 15–19]. При расчетах на ГУ входа ускорителя задавались давление и температура, соответ-

ствующие экспериментальным для исследуемой точки, а также ввод твердых частиц с расходом 7,65e–6 кг/с экспериментальным распределением по количеству и нулевой скоростью (допущение модели из-за отсутствия информации о скорости частиц в докритическом участке ускорителя). Для частиц задавалось условие равенства скорости частиц скорости потока, а также закон лобового сопротивления, основанный на сферичности частиц. При CFD-моделировании износа частицами требуется применение модели эрозии, задаваемой на эродируемой поверхности. Часто используют эмпирико-аналитические модели, которые увязывают скорость уноса материала с параметрами натекающих частиц (в разных случаях их размером, скоростями и углом падения). При этом они имеют несколько эмпирических коэффициентов, как правило, подобранных для некоторых типов материалов. Среди распространенных коммерческих продуктов, в том числе Ansys FLUENT, одной из самых популярных моделей является Ока [34]. Она использовалась как базовая для исследования сеточной сходимости и влияния моделей турбулентности.

Для исследования сеточной сходимости были проведены расчеты на пяти сетках разной размерности на базе Ока, модели турбулентности k-epsilon Standard Shear-stress transport и с турбулентным числом Прандтля 0,85. Использовалась расчетная точка 5,75 бар, 140 °С.

Исходя из критерия суммарной удельной эрозии для области между ускорителем и образцом была выбрана сетка с общим количеством в 1,65 млн гексаэдральных ячеек. Для оценки сетки в ускорителе был выбран критерий профиля скорости в области истечения. Финальная расчетная сетка области ускорителя включала в себя 190 тыс. ячеек.

## Результаты и их обсуждение

Очевидно, скорость эродирования поверхности будет напрямую зависеть от распределения скоростей частиц и углов их падения, что связано с профилем скорости при истечении из ускорителя. Характерная картина течения при истечении из ускорителя и обтекании поверхности для модели турбулентности k-epsilon представлена на рис. 4. При нормальном направлении

высокоскоростного потока в непосредственной близости от стенки скорость резко снижается, но образуется локальная область ускорения потока, обтекающего область торможения. Высокая скорости струи, формируемой ускорителем гетерогенного потока, способствует эжекции спутного воздушного потока и ускоряет его. В результате образуется область обратных токов, которая уже не может влиять на процесс эродирования, так как находится далеко от эродируемой поверхности (на рис. 4 – внизу в центре высокоскоростной струи).

Для построения картины скоростей эродирования и сравнения моделей использовался критерий удельного эрозионного износа, рассчитываемого в каждой ячейке на поверхности образца (область 4.1 на рис. 3) как отношение унесенной массы к массе частиц в этой ячейке. На рис. 5 представлено влияние модели турбулентности по длине образца вдоль радиуса пятна износа (точка 0 мм соответствует центру пятна).

Заметно слабое влияние модели турбулентности. Очевидно, что это связано с близким распределением скоростей течения и турбулентной вязкости (которую определяет модель турбу-

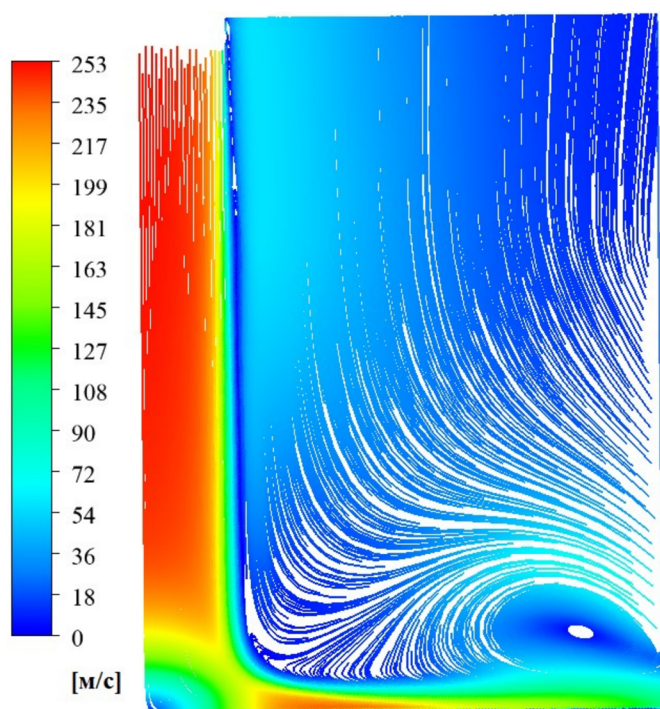


Рис. 4. Картина натекания высокоскоростного потока после истечения из ускорителя на поверхность образца

Fig. 4. High-velocity flow impacting sample surface

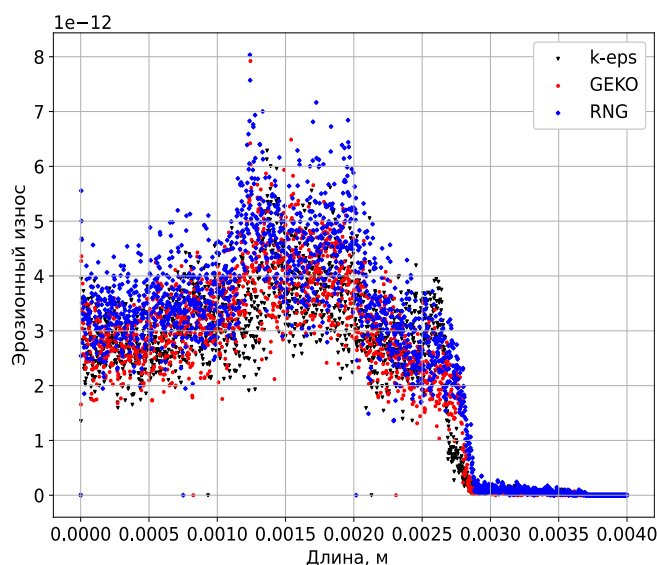


Рис. 5. Влияние моделей турбулентности

Fig. 5. The effect of turbulence models

лентности), что было показано ранее для реагирующего течения [32].

Как было отмечено, модель GEKO дает особые возможности в части варьирования коэффициентов модели. На рис. 6–8 представлено влияние настроечных параметров модели GEKO –  $C_{sep}$ ,  $C_{nw}$  и  $C_{jet}$ .

Видно, что основные настроечные коэффициенты модели GEKO не влияют или слабо влияют на эрозионный износ при варьировании в относительно широком пределе даже по сравнению с влиянием модели турбулентности в целом.

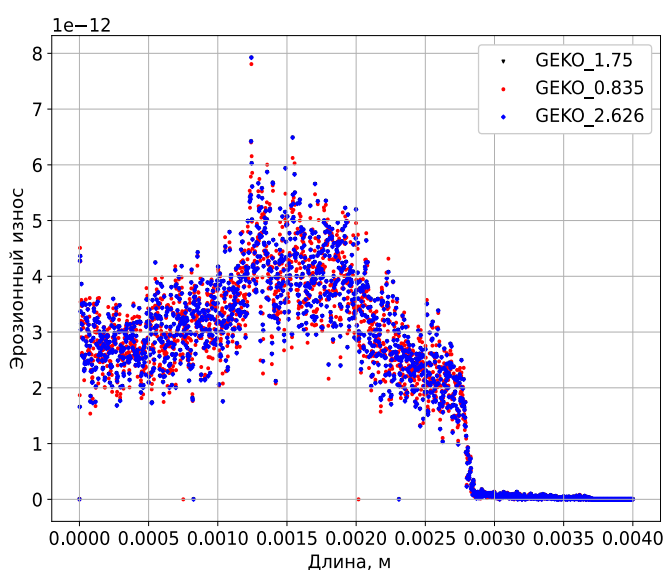


Рис. 6. Влияние коэффициента  $C_{sep}$  модели GEKO

Fig. 6. The effect of  $C_{sep}$  GEKO coefficient

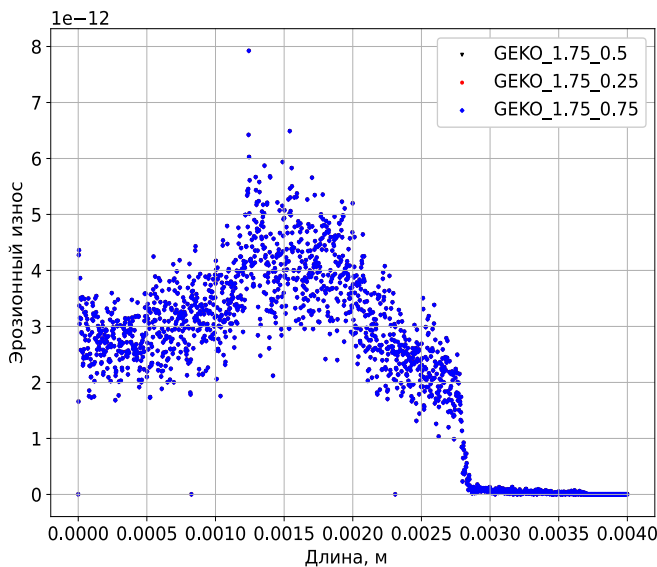


Рис. 7. Влияние коэффициента  $C_{nw}$  при  $C_{sep}$  1,75 модели GEKO

Fig. 7. The effect of  $C_{nw}$  GEKO coefficient at  $C_{sep}$  1.75

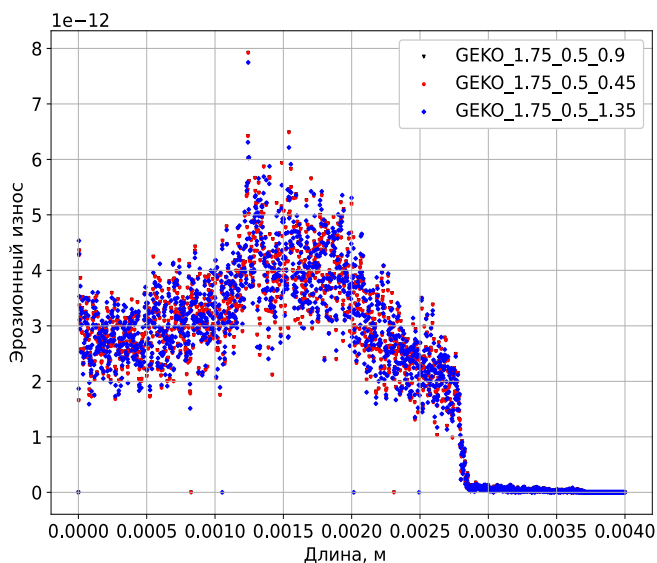


Рис. 8. Влияние коэффициента  $C_{jet}$  при  $C_{sep}$  1,75 и  $C_{nw}$  0,5 модели GEKO

Fig. 8. The effect of  $C_{jet}$  GEKO coefficient at  $C_{sep}$  1.75 and  $C_{nw}$  0.5

Оценка влияния модели эрозии проводилась на примере двух самых распространенных моделей – Ока [30, 34] и DNV [30, 35].

Модель Ока:

$$E = E_{90} \left( \frac{V}{V_{ref}} \right)^{k_2} \left( \frac{d}{d_{ref}} \right)^{k_3} f(\gamma), \quad (3)$$

где  $E_{90}$  – референсная скорость эродирования при угле падения частиц  $90^\circ$ ;  $V$  – скорость ча-

стиц;  $v_{ref}$  – референсная скорость;  $d$  – диаметр частиц;  $d_{ref}$  – референсный диаметр;  $k_2$  и  $k_3$  – коэффициенты модели;  $f(\gamma)$  – функция угла, определяемая как

$$f(\gamma) = (\sin \gamma)^{n_1} (1 + H_v (1 - \sin \gamma))^{n_2}, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – угол падения частицы (в радианах);  $H_v$  – коэффициент твердости по Виккерсу (ГПа);  $n_1$  и  $n_2$  – константы.

Модель DNV:

$$E = \dot{m}_p K U_p^n f(\alpha), \quad (5)$$

где  $\dot{m}_p$  – расход частиц эродента;  $K$ ,  $n$  – констан-

ты; функция  $f(\alpha) = \sum -1^{i+1} A_i \left( \frac{\alpha\pi}{180} \right)^i$ , а ее коэф-

фициенты представлены в табл. 1.

Константы этих эмпирико-аналитических моделей зависят от материала и условий проведения эксперимента. Для исследования чувствительности независимых параметров модели Ока коэффициенты вычислялись исходя из микротвердости эродируемого материала по Виккерсу и согласно [36], а подбираемым и настраиваемым коэффициентом является  $E_{90}$ . В табл. 2 и на рис. 9, 10 представлено исследование влияния коэффициента  $E_{90}$  и степенного коэффициента  $k_3$ , а расчетная скорость эродирования  $ER_{расч}$  сравнивается с экспериментальной  $ER_{эксп}$ , полученной для двух опытов с одинаковыми условиями. Коэффициент  $k_3$  взят как стоящий при приведенном диаметре, при этом очевидно, что  $k_2$ , стоящий при приведенной скорости, и функция угла будут иметь существенное влияние.

Видно, что влияние коэффициента  $k_3$  мало в сравнении с  $E_{90}$  ( $E_{ref}$ ) и сопоставимо с влиянием модели турбулентности.

Параметры модели DNV для  $Ti_6Al_4V$  (аналога  $Ti_6Al_4V$ ) взяты из работы [37]. В табл. 3 и на рис. 11, 12 представлено влияние линейного коэффициента  $K$  и показателя степени  $n$ .

Видно, что, как и в случае Ока, линейный коэффициент имеет значительно большее влияние по сравнению со степенным коэффициентом.

Таблица 1

Table 1

**Коэффициенты модели DNV**  
**DNV model coefficients**

$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$	$A_8$
9,37	42,295	110,864	175,804	170,137	98,398	31,211	4,17

Таблица 2

Table 2

**Влияние параметров модели Ока**  
**The effect of Oka parameters**

$N$	Oka								$ER_{\text{расч}}$
	$T_{90}$	$HV$ (GPa)	$n_1$	$n_2$	$k_2$	$k_3$	$D_{\text{ref}}$	$V_{\text{elref}}$	
1	6,154e-4	0,35	0,613	6,439	2,21	0,19	0,00326	104	6,322e-4
2	3,077e-4	0,35	0,613	6,439	2,21	0,19	0,00326	104	3,161e-4
3	9,231e-4	0,35	0,613	6,439	2,21	0,19	0,00326	104	1,057e-3
4	6,154e-4	0,35	0,613	6,439	2,21	0,16	0,00326	104	6,88e-4
5	6,154e-4	0,35	0,613	6,439	2,21	0,21	0,00326	104	5,977e-4
6	4e-3	0,35	0,613	6,439	2,21	0,19	0,00326	104	4,239e-3
7	8e-3	0,35	0,613	6,439	2,21	0,19	0,00326	104	8e-3
8	5e-3	0,35	0,613	6,439	2,21	0,19	0,00326	104	5,046e-3
$ER_{\text{эксп}}$									4,43e-03
									3,16e-03

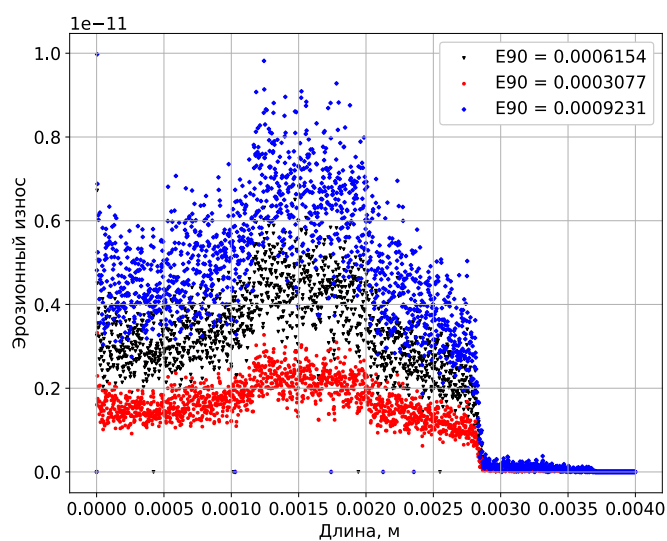
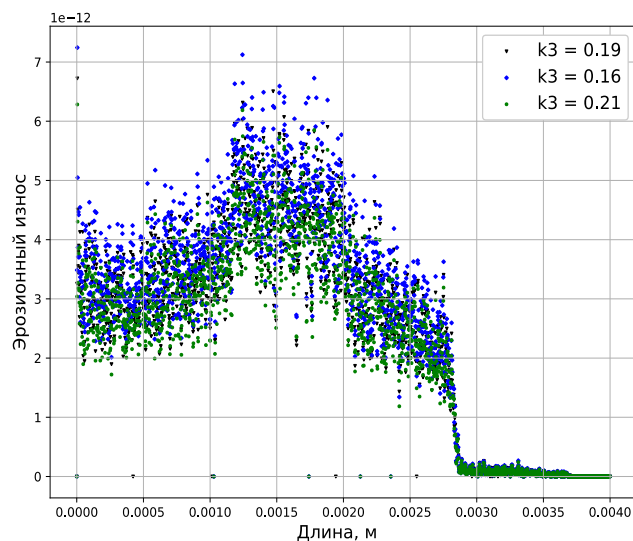
Рис. 9. Влияние коэффициента  $E_{90}$ Fig. 9. The effect of  $E_{90}$  coefficientРис. 10. Влияние коэффициента  $k_3$ Fig. 10. The effect of  $k_3$  coefficient



Таблица 3

Table 3

Влияние параметров модели DNV

The effect of DNV parameters

N	DNV		$ER_{\text{расч}}$
	$K$	$n$	
1	$2e-9$	2,6	$5,919e-4$
2	$1e-9$	2,6	$2,959e-4$
3	$3e-9$	2,6	$8,878e-4$
4	$2e-9$	3,9	$7,044e-4$
$ER_{\text{эксп}}$			$4,43e-03$
			$3,16e-03$

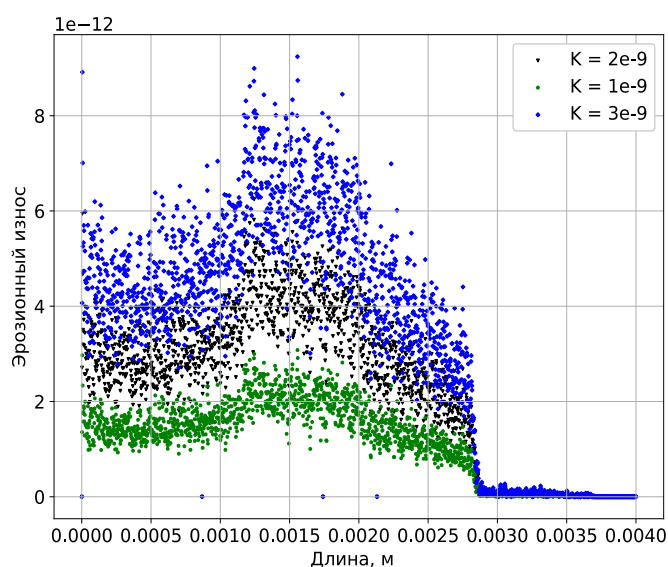


Рис. 11. Влияние коэффициента  $K$  по длине образца

Fig. 11. The effect of  $K$  coefficient along the sample

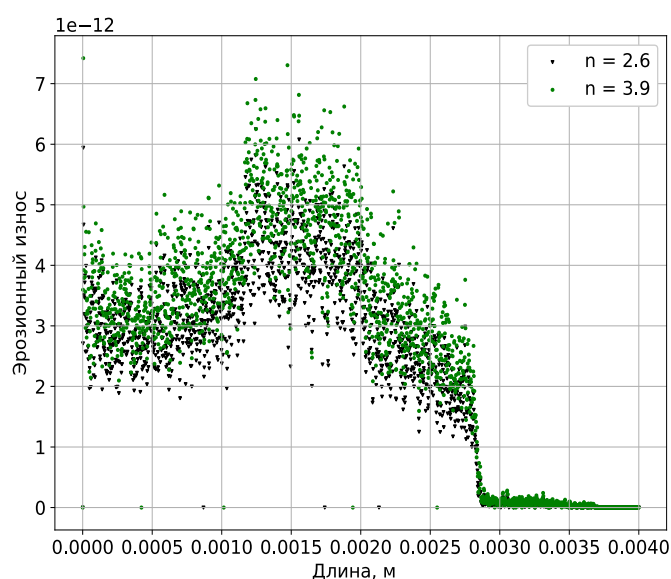


Рис. 12. Влияние коэффициента  $n$  по длине образца

Fig. 12. The effect of  $n$  coefficient along the sample

Видно также, что заметные значения износа достигаются на расстоянии до приблизительно 2,7 мм от центра пятна износа, далее идет резкое падение интенсивности износа и постепенный переход к нулевым значениям на расстоянии приблизительно 3,7 мм. Подобная площадь износа (рис. 13) наблюдается на образцах после испытаний, что качественно подтверждает точность моделирования. С другой стороны, заметно несоответствие между положением по длине образца максимальной скорости эрозии в расчетном профиле и экспериментальной формой кратера. Этот вопрос будет рассмотрен ниже.

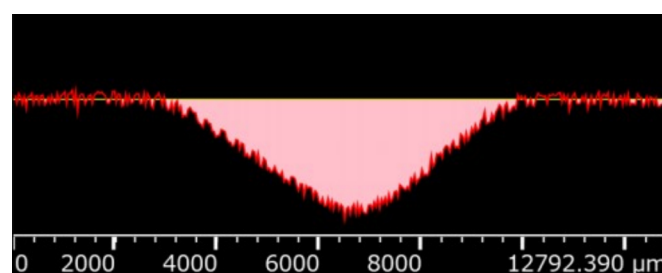


Рис. 13. Характерная область износа после испытаний

Fig. 13. Typical wear surface after testing

Движение частицы в воздухе задается равнодействующей сил, прилагаемых к ней. Важнейшей составляющей является лобовое сопротивление, которое зависит от среды, скорости частицы, ее размера и формы. Используемая модель позволяет учесть несферичность частиц за счет введения коэффициента формы (shape factor,  $SF$ ). Если первые несколько параметров заданы в нашем случае исходя из условия задачи и моделирования, то форма частицы и ее задание дополнительным коэффициентом остается открытым вопросом.

В модели несферичность частиц при расчете коэффициента лобового сопротивления влияет согласно Haider и Levenspiel [30, 38]:

$$C_D = \frac{24}{Re_{sph}} \left( 1 + b_1 Re_{sph}^{b_2} \right) + \frac{b_3 Re_{sph}}{b_4 + Re_{sph}}, \quad (6)$$

где

$$b_1 = \exp(2,3288 - 6,4581\varphi + 2,4486\varphi^2);$$

$$b_2 = 0,0964 + 0,5565\varphi;$$

$$b_3 = \exp(4,905 - 13,8944\varphi + 18,4222\varphi^2 - 10,2599\varphi^3);$$

$$b_4 = \exp(1,4681 + 12,2584\varphi - 20,7322\varphi^2 + 15,8855\varphi^3);$$

$\varphi$  – коэффициент формы (несферичности),

$\varphi = \frac{s}{S}$ , где  $s$  – площадь поверхности эквивалентной сферы с объемом, равным объему частицы;  $S$  – площадь поверхности частицы.

В свою очередь, коэффициент лобового сопротивления сферических частиц определялся согласно Morsi и Alexander [30, 39]:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2},$$

где  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$  – константы.

Для оценки влияния  $SF$  на форму износа и скорость эрозии было проведено дополнительное исследование с моделью Ока, представленное на рис. 14.

Интересно, что более «вытянутые» частицы с малым коэффициентом формы (0,25–0,5) дают качественно отличный профиль от частиц, близких к сферической форме (1–0,75). Количе-

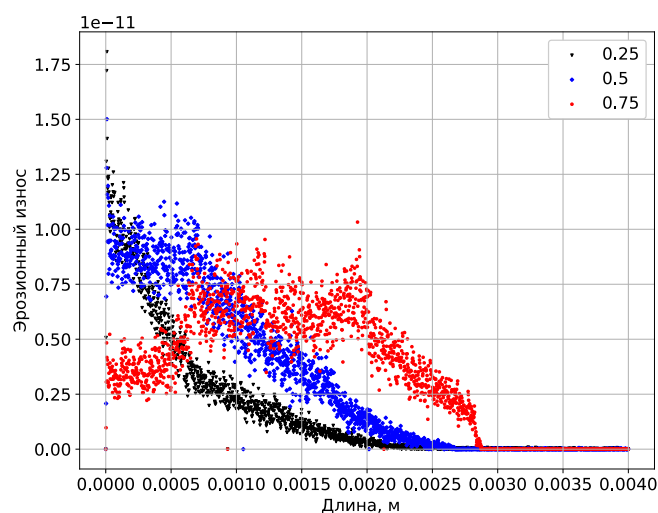


Рис. 14. Влияние «shape factor» на форму и значение удельного эрозионного износа по длине образца (для коэффициентов Ока  $E_{90} = 0,004$ ;  $n_1 = 0,613$ ;

$$n_2 = 6,439; k_2 = 2,21; k_3 = 0,19)$$

Fig. 14. The effect of the “shape factor” (for Oka coefficients  $E_{90} = 0.004$ ;  $n_1 = 0.613$ ;  $n_2 = 6.439$ ;  $k_2 = 2.21$ ,  $k_3 = 0.19$ )

ственно это также отражается на интегральном значении эрозионного износа, представленного в табл. 4. Очевидно, что такая же степень зависимости будет соблюдаться для других моделей эрозии.

Таблица 4

Table 4

«Shape factor» и расчетная скорость эродирования (ER)

“Shape factor” and erosion rate (ER)

Shape factor	ER
0,25	0,00349
0,5	0,0055466
0,75	0,0061866

Такое влияние связано с изменением профиля скоростей частиц и перераспределения частиц разного диаметра вдоль радиуса пятна контакта частиц с поверхностью из-за увеличения лобового сопротивления. На рис. 15, 16 представлены распределения скоростей частиц и диаметров, осредненных по ячейкам, для  $SF$  0,25, 0,5 и 0,75 около стенки образца. Видно, что со снижением  $SF$  сначала слабо (для  $SF = 0,5$ ), а для  $SF = 0,25$  значительно снижается величина абсолютной скорости частиц по радиусу износа, что соответствует снижению интегральной скорости эрозии. Заметно меняется и форма профиля: для  $SF = 0,25$  наблюдается резкое падение скорости на участке 0,25 мм по сравнению с относительно плавным снижением и даже локальным высоким ростом скорости (для  $SF = 0,75$ ). С уменьшением  $SF$  растет средний диаметр в области центра пятна, как и различие по средним диаметрам между центральной и периферийной областью пятна, что ведет одновременно к снижению влияния локальных максимумов средних диаметров для  $SF = 0,75$  и  $SF = 0,5$ .

На рис. 17 представлено фото абразивного порошка. Можно допустить, что для большинства частиц, несмотря на угловатость и коагулированную структуру крупных формирований, это отношение составит в основном не более 0,4–0,5, если оценивать по критерию aspect ratio (отношению двух ортогональных максимальных расстояний между точками контура). Оценка в ПО ImageJ [40] показала значение  $\approx 0,35$  для отношения периметра круга с эквивалентной пло-

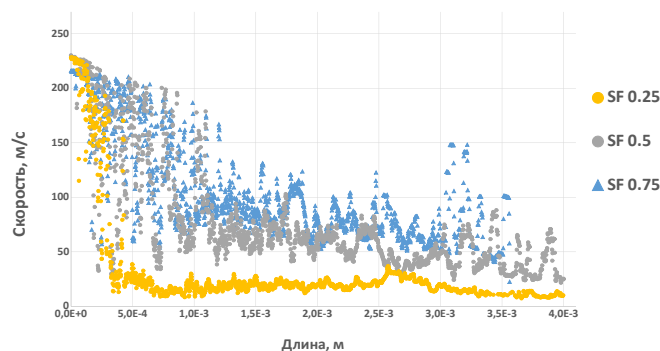


Рис. 15. Скорость частиц около стенки образца

Fig. 15. Particle velocity near the sample wall along its length

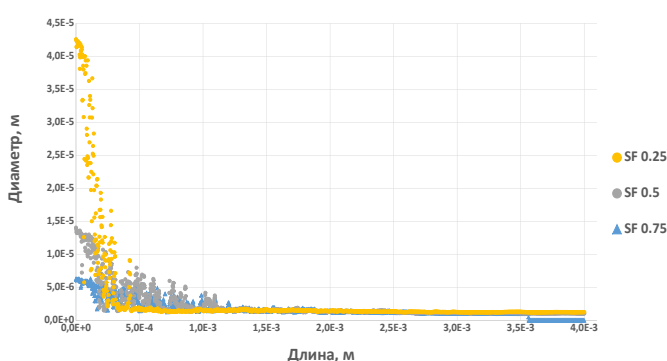


Рис. 16. Распределение средних диаметров около стенки образца

Fig. 16. Average particle diameter distribution near the sample wall along its length

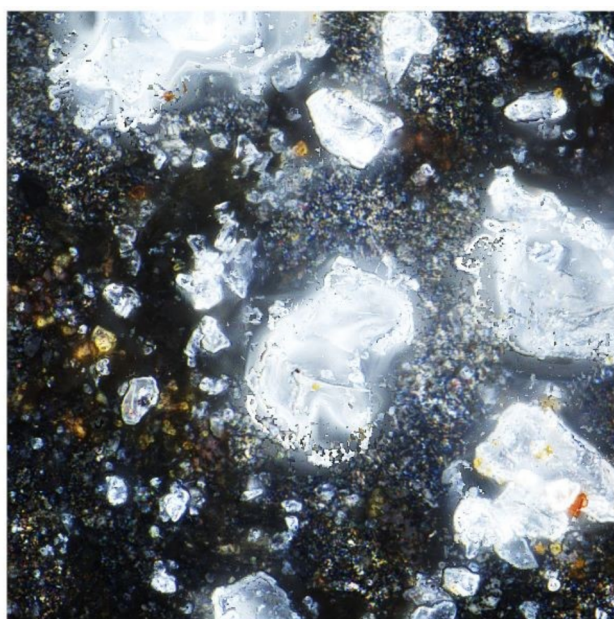


Рис. 17. Фото частиц кварца

Fig. 17. A micrograph of erodent particles (quartz particles)

щадью к суммарному периметру частиц. Интересно и качественное соответствие области точек скорости эрозионного износа с коэффициентами несферичности 0,5 и менее экспериментальному профилю износа поверхности. Таким образом, по интегральной величине скорости эрозии (табл. 2) и профилю уноса материала (рис. 13) самые близкие к экспериментальным значения могут быть получены для модели Ока с  $E_{90} = 0,004$ ;  $n_1 = 0,613$ ;  $n_2 = 6,439$ ;  $k_2 = 2,21$ ;  $k_3 = 0,19$  и с  $SF = 0,25$ .

Отсутствие чувствительности скорости эрозии к моделям турбулентности и их коэффициентам и, наоборот, высокая зависимость от формы частиц показывают необходимость большего внимания (по крайней мере для сопоставимых условий натекания) к параметрам частиц, а не несущей фазы. В дальнейшем отдельного исследования требуют эффекты вращения частиц, другие формы распределения по размерам, угловатость частиц, а также изучение взаимодействия частиц между собой – столкновений, слипания и дробления.

Моделирование эрозии с помощью CFD с учетом параметров частиц может позволить не только прогнозировать, но и управлять скоростью эрозии и положением ее максимума на обрабатываемой поверхности, как показало влияние коэффициента формы частиц. Это может быть полезно как для формирования областей минимальной и максимальной эрозии за счет изменения формы, состава и распределения частиц, так и при обработке металлов и сплавов – дробеударном упрочнении и формообразовании.

Наконец, дальнейшие работы разумно проводить в связке с FEA-моделированием, что позволит в явном виде рассмотреть процессы взаимодействия частиц с поверхностью и между частицами и учесть детальные свойства материалов. Такие исследования будут необходимы и при оценке эрозионной стойкости разных видов покрытий.

## Выводы

Проведенное численное исследование позволило определить следующее.

1. Рассмотренный подход позволяет получить хорошее совпадение с экспериментом как качественно – по профилю уноса материала, так и ко-





личественно – по интегральной скорости эрозии для рассмотренных условий и настроек моделей.

2. Расчетная скорость износа поверхности при нормальном воздействии высокоскоростным потоком частиц слабо зависит от выбранной модели турбулентности, в том числе GEKO и ее настроек.

3. Наоборот, расчетная скорость износа существенно зависит от применяемой модели эрозии, а также ее настроечных коэффициентов.

4. Профиль расчетной скорости износа и интегральное значение существенно зависят от формы частиц; при увеличении коэффициента лобового сопротивления (снижении коэффициента формы, shape factor,  $SF$ ) интегральная скорость эродирования снижается. Для исследованных условий качественная и количественная близость результатов расчета и эксперимента достигается при низких  $SF \approx 0,25$ .

### Список литературы

1. Analysis of micro and nano particle erosion by analytical, numerical and experimental methods: A review / S.M. Shinde, D.M. Kawadekar, P.A. Patil, V.K. Bhojwani // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2019. – Vol. 33 (5). – P. 2319–2329. – DOI: 10.1007/s12206-019-0431-x.
2. Computational fluid dynamics (CFD) based erosion prediction model in elbows / H.D. Hadziahmetovic, N. Hodzic, D. Kahrmanovic, E. Dzaferovic // *Tehnicki vjesnik = Technical Gazette*. – 2014. – Vol. 21 (2). – P. 275–282.
3. Sun K., Lu L., Jin H. Modeling and numerical analysis of the solid particle erosion in curved ducts // *Abstract and Applied Analysis*. – 2013. – Vol. 2013. – Art. 245074. – DOI: 10.1155/2013/245074.
4. Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles // *Wear*. – 1960. – Vol. 3 (2). – P. 87–103. – DOI: 10.1016/0043-1648(60)90055-7.
5. Grant G., Ball R., Tabakoff W. An experimental study of the erosion rebound characteristics of high-speed particles impacting a stationary specimen: Report No. 73-36. – Cincinnati University Ohio, Department of Aerospace Engineering, 1973.
6. Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena: Part I // *Wear*. – 1963. – Vol. 6 (1). – P. 5–21. – DOI: 10.1016/0043-1648(63)90003-6.
7. Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena: Part II // *Wear*. – 1963. – Vol. 6 (3). – P. 169–190. – DOI: 10.1016/0043-1648(63)90073-5.
8. Строкач Е.А., Кожевников Г.Д., Пожидаев А.А. Численное моделирование процесса эродирования твердыми частицами в газовом потоке (обзор) // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. – 2021. – № 67. – С. 56–69. – DOI: 10.15593/2224-9982/2021.67.06.
9. Tarodiya R., Levy A. Surface erosion due to particle-surface interactions – A review // *Powder Technology*. – 2021. – Vol. 387. – P. 527–559. – DOI: 10.1016/j.powtec.2021.04.055.
10. Krella A. Resistance of PVD coatings to erosive and wear processes: A review // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10. – P. 921. – DOI: 10.3390/coatings10100921.
11. Fardan A., Berndt C.C., Ahmed R. Numerical modelling of particle impact and residual stresses in cold sprayed coatings: A review // *Surface and Coatings Technology*. – 2021. – Vol. 409. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126835.
12. Bonu V., Barshilia H.C. High-temperature solid particle erosion of aerospace components: its mitigation using advanced nanostructured coating technologies // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12. – P. 1979. – DOI: 10.3390/coatings12121979.
13. Erosion due to solid particle impact on the turbine blade: experiment and simulation / B. Taherkhani, A.P. Anaraki, J. Kadkhodapour, N.K. Farahani, H. Tu // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. – 2019. – Vol. 19 (6). – P. 1739–1744. – DOI: 10.1007/s11668-019-00775-y.
14. Khoddami A.S., Salimi-Majd D., Mohammadi B. Finite element and experimental investigation of multiple solid particle erosion on Ti–6Al–4V titanium alloy coated by multilayer wear-resistant coating // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 372 (2). – P. 173–189. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.05.042.
15. Numerical modeling of sand particle erosion at return bends in gas-particle two-phase flow / A. Farokhipour, Z. Mansoori, M. Saffar-Avval, G. Ahmadi // *Scientia Iranica*. – 2018. – Vol. 25 (6). – P. 3231–3242. – DOI: 10.24200/sci.2018.50801.1871.
16. Numerical analysis of particle erosion in the rectifying plate system during shale gas extraction / S. Peng, Q. Chen, C. Shan, D. Wang // *Energy Science & Engineering*. – 2019. – Vol. 7 (5). – P. 1838–1851. – DOI: 10.1002/ese3.395.
17. Prediction of particle erosion in the internal cooling channels of a turbine blade / D. Anielli, D. Borello, F. Rispoli, A. Salvagni, P. Venturini // 11th European Turbomachinery Conference, 23 March 2015, Madrid, Spain. – Madrid, 2015. – P. 1–11.
18. Numerical study of erosion due to solid particles in steam turbine blades / A. Campos-Amezcuca, Z. Mazur, A. Gallegos-Muñoz, A. Romero-Colmenero, J. Manuel Riesco-Ávila, J. Martín Medina-Flores // *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. – 2008. – Vol. 53 (6). – P. 667–684. – DOI: 10.1080/10407780701453933.



19. *Arabnejad H.* Development of erosion equations for solid particle and liquid droplet impact. Ph.D. diss. / Department of Mechanical Engineering, The University of Tulsa. – Tulsa, 2015. – 161 p.
20. *Mansouri A.* A combined CFD-experimental method for developing an erosion equation for both gas-sand and liquid-sand flows. Ph.D. diss. / Department of Mechanical Engineering, The University of Tulsa. – Tulsa, 2016. – 217 p.
21. Effect of morphology, impact velocity and angle of the  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  (CMAS) particle on the erosion behavior of thermal barrier coatings (TBCs): a finite element simulation study / Y. Liu, Z. Cao, J. Yuan, X. Sun, H. Su, L. Wang // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12 (5). – P. 576. – DOI: 10.3390/coatings12050576.
22. Finite element simulations on erosion and crack propagation in thermal barrier coatings / Z.S. Ma, L.H. Fu, L. Yang, Y.C. Zhou, C. Lu // *High Temperature Materials and Processes*. – 2015. – Vol. 34 (4). – P. 387–393. – DOI: 10.1515/htmp-2014-0068.
23. Finite element analysis of erosive wear for offshore structure / Z.G. Liu, S. Wan, V.B. Nguyen, Y.W. Zhang // 13th International Conference on Fracture, 16–21 June 2013, Beijing, China. – Beijing, China, 2013. – P. 461–468.
24. *Oviedo F., Valarezo A.* Residual stress in high-velocity impact coatings: parametric finite element analysis approach // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2020. – Vol. 29 (6). – P. 1268–1288. – DOI: 10.1007/s11666-020-01026-5.
25. *Bing Wu, Fengfang Wu, Jinjie Li.* Finite element modeling of correlating mechanical properties with erosion wear rate // *Proceedings of the 2018 3rd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2018)*, June 2018. – Atlantis press, 2018. – P. 273–276. – DOI: 10.2991/eame-18.2018.57.
26. *Singh P.K., Hota A.R., Mishra S.B.* Finite element modelling of erosion parameters in Bing boiler components // *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*. – 2018. – Vol. 7 (2). – P. 12–16. – DOI: 10.51983/ajeat-2018.7.2.964.
27. Modeling, simulation, and analysis of the impact(s) of single angular-type particles on ductile surfaces using smoothed particle hydrodynamics / X. Dong, Z. Li, L. Feng, Z. Sun, C. Fan // *Powder Technology*. – 2017. – Vol. 318. – P. 363–382. – DOI: 10.1016/j.powtec.2017.06.011.
28. FVPM numerical simulation of the effect of particle shape and elasticity on impact erosion / S. Leguizamón, E. Jahanbakhsh, S. Alimirzazadeh, A. Maertens, F. Avellan // *Wear*. – 2019. – Vol. 430–431. – P. 108–119. – DOI: 10.1016/j.wear.2019.04.023.
29. *Menter F., Lechner R., Matyushenko A.* Best practice: generalized K- $\omega$  two-equation turbulence model in ANSYS CFD (GEKO): Technical Report ANSYS. – Nurnberg, Germany, 2019. – 32 p.
30. ANSYS Fluent Theory Guide. – Canonsburg, PA: ANSYS Inc, 2019. – 1080 p.
31. *Menter F., Matyushenko A., Lechner R.* Development of a generalized K- $\omega$  two-equation turbulence model // *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*. – 2018. – Vol. 142. – P. 101–109. – DOI: 10.1007/978-3-030-25253-3\_10.
32. Simulation of a GOx-gch4 rocket combustor and the effect of the GEKO turbulence model coefficients / E. Strokach, V. Zhukov, I. Borovik, A. Sternin, O.J. Haidn // *Aerospace*. – 2021. – Vol. 8 (11). – P. 341. – DOI: 10.3390/aerospace8110341.
33. *Pozhidaev A., Kozhevnikov G., Strokach E.* Numerical study of turbulence model effect on solid particle erosion in gaseous flow // *AIP Conference Proceedings*. – 2023. – Vol. 2549 (1). – P. 030003. – DOI: 10.1063/5.0130489.
34. The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact / Y.I. Oka, H. Ohnogi, T. Hosokawa, M. Matsumura // *Wear*. – 1997. – Vol. 203–204. – P. 573–579. – DOI: 10.1016/s0043-1648(96)07430-3.
35. Sand erosion of wear resistant materials: Erosion in choke valves / K. Haugen, O. Kvernfold, A. Ronold, R. Sandberg // *Wear*. – 1995. – Vol. 186–187. – P. 179–188. – DOI: 10.1016/0043-1648(95)07158-X.
36. The role of inter-particle collisions on elbow erosion / C.A. Duarte Ribeiro, F. Souza, R. Salvo, V. Santos // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2016. – Vol. 89. – P. 1–22. – DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.001.
37. Recommended practice RP O501 Erosive wear in piping systems. Revision 4.2-2007 (DNV RP O501 – Revision 4.2-2007). – Det Norske Veritas, 2007. – 43 p.
38. *Haider A., Levenspiel O.* Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles // *Powder Technology*. – 1989. – Vol. 58 (1). – P. 63–70. – DOI: 10.1016/0032-5910(89)80008-7.
39. *Morsi S.A., Alexander A.J.* An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1972. – Vol. 55, pt. 2. – P. 193–208. – DOI: 10.1017/s0022112072001806.
40. ImageJ. Image Processing and Analysis in Java. – URL: <https://imagej.net/ij/index.html> (accessed: 31.10.2023).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



# Obrabotka metallov -

## Metal Working and Material Science









Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Numerical study of titanium alloy high-velocity solid particle erosion

Evgeniy Strokach <sup>a, \*</sup>, Gleb Kozhevnikov <sup>b</sup>, Aleksey Pozhidaev <sup>c</sup>, Sergey Dobrovolsky <sup>d</sup>

Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-5376-1231>,  [evgenij.stroksch@mai.ru](mailto:evgenij.stroksch@mai.ru); <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0009-0001-4622-7476>,  [kozhevnikov.mai@yandex.ru](mailto:kozhevnikov.mai@yandex.ru);  
<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7667-5392>,  [pozhidaev.mai@xmail.ru](mailto:pozhidaev.mai@xmail.ru); <sup>d</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-1884-1882>,  [dobrovolskiy\\_s@mail.ru](mailto:dobrovolskiy_s@mail.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 15 September 2023

Revised: 29 September 2023

Accepted: 28 October 2023

Available online: 15 December 2023

##### Keywords:

Erosion wear

Numerical simulation

Solid particles

Ansys FLUENT

Shape factor

Ti6Al4V

CFD

Solid particle erosion

GEKO

Turbulence model

RANS erosion study

##### Funding

The research was funded by the ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant number FSFF-2023-0006.

##### Acknowledgements

Research was partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

#### ABSTRACT

**Introduction.** Predicting solid particle erosion (SPE) in gaseous flow and managing its intensity is still a relevant problem in mechanical engineering. It requires the development of a general modeling methodology, which also depends upon many special cases studying various physical processes. Such studies should also include verification analysis, process parameters and model sensitivity studies. Mainly computational fluid dynamics and finite element analysis (and mesh-free methods such as smooth particle hydrodynamics or similar) are used to simulate the erosion process. Papers focused on CFD simulation of solid particle erosion of metal alloys are widely presented, but most of it is associated with relatively low or medium particle velocities (< 100–150 m/s) and is close to uniform diameter distribution. This paper presents a CFD study of  $Ti_6Al_4V$  titanium alloy SPE at relatively high particle velocities and sufficiently non-uniform unimodal particle diameter distribution. The paper also studies the turbulence model influence and particle shape effect which appears as a "shape factor" coefficient in the particle drag model. **Methods.** The heterogenous flow simulation was based on the *Reynolds-averaged Navier-Stokes* formulation, where the particles, according to *Euler-Lagrange* formulation, were simulated as mathematical points with corresponding properties. The influence of turbulence models, such as *k*-epsilon standard, *RNG k*-epsilon, and a relatively new Generalized equation *k*-omega (*GEKO*) model and its coefficients were also studied. *Oka* and *DNV* erosion models were also compared based on the general sample mass loss and more specific erosion intensity profile criterions. The simulation results were compared to the lab-scale experimental results. **Results and discussion.** It is shown that neither erosion intensity profile or sample mass loss do not depend upon the turbulence model choice or *GEKO* parameters variation. As expected, erosion is dependent on the erosion model and its coefficients. A notable influence of the shape factor is shown. As the drag coefficient increased due to the particle shape, the erosion intensity decreased and the erosive profile on the surface also changed due to the changing velocity and diameter distribution of the heterogenous flow. It is expected that such results would be useful not only for erosion prediction in all areas of mechanical engineering, but also for wear management in mechanical assemblies and shot peening / shot peen forming management and simulation.

**For citation:** Strokach E.A., Kozhevnikov G.D., Pozhidaev A.A., Dobrovolsky S.V. Numerical study of titanium alloy high-velocity solid particle erosion. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 4, pp. 268–283. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.4-268-283. (In Russian).

#### References

1. Shinde S.M., Kawadekar D.M., Patil P.A., Bhojwani V.K. Analysis of micro and nano particle erosion by analytical, numerical and experimental methods: A review. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, vol. 33 (5), pp. 2319–2329. DOI: 10.1007/s12206-019-0431-x.

##### \* Corresponding author

Strokach Evgeniy A., Ph.D. (Engineering), leading engineer  
 Moscow Aviation Institute (National Research University),  
 4, Volokolamskoe shosse,  
 125993, Moscow, Russian Federation  
 Tel.: +7 (916) 338-63-66, e-mail: [evgenij.stroksch@mai.ru](mailto:evgenij.stroksch@mai.ru)

2. Hadziahmetovic H.D., Hodzic N., Kahrimanovic D., Dzaferovic E. Computational fluid dynamics (CFD) based erosion prediction model in elbows. *Tehnicki vjesnik = Technical Gazette*, 2014, vol. 21 (2), pp. 275–282.
3. Sun K., Lu L., Jin H. Modeling and numerical analysis of the solid particle erosion in curved ducts. *Abstract and Applied Analysis*, 2013, vol. 2013, art. 245074. DOI: 10.1155/2013/245074.
4. Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles. *Wear*, 1960, vol. 3 (2), pp. 87–103. DOI: 10.1016/0043-1648(60)90055-7.
5. Grant G., Ball R., Tabakoff W. *An experimental study of the erosion rebound characteristics of high-speed particles impacting a stationary specimen*. Report No. 73-36. Cincinnati University Ohio, Department of Aerospace Engineering, 1973.
6. Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena: Part I. *Wear*, 1963, vol. 6 (1), pp. 5–21. DOI: 10.1016/0043-1648(63)90003-6.
7. Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena: Part II. *Wear*, 1963, vol. 6 (3), pp. 169–190. DOI: 10.1016/0043-1648(63)90073-5.
8. Strokach E.A., Kozhevnikov G.D., Pozhidaev A.A. Chislennoe modelirovanie protsessa erodirovaniya tverdymi chastitsami v gazovom potoke (obzor) [Numerical simulation of solid particle erosion in a gaseous flow (review)]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika = PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2021, no. 67, pp. 56–69. DOI: 10.15593.2224-9982.2021.67.06.
9. Tarodiya R., Levy A. Surface erosion due to particle-surface interactions – A review. *Powder Technology*, 2021, vol. 387, pp. 527–559. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.04.055.
10. Krella A. Resistance of PVD coatings to erosive and wear processes: A review. *Coatings*, 2020, vol. 10, p. 921. DOI: 10.3390/coatings10100921.
11. Fardan A., Berndt C.C., Ahmed R. Numerical modelling of particle impact and residual stresses in cold sprayed coatings: A review. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 409. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2021.126835.
12. Bonu V., Barshilia H.C. High-temperature solid particle erosion of aerospace components: its mitigation using advanced nanostructured coating technologies. *Coatings*, 2022, vol. 12, p. 1979. DOI: 10.3390/coatings12121979.
13. Taherkhani B., Anaraki A.P., Kadkhodapour J., Farahani N.K., Tu H. Erosion due to solid particle impact on the turbine blade: experiment and simulation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2019, vol. 19 (6), pp. 1739–1744. DOI: 10.1007/s11668-019-00775-y.
14. Khoddami A.S., Salimi-Majid D., Mohammadi B. Finite element and experimental investigation of multiple solid particle erosion on Ti–6Al–4V titanium alloy coated by multilayer wear-resistant coating. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 372 (2), pp. 173–189. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.05.042.
15. Farokhipour A., Mansoori Z., Saffar-Avval M., Ahmadi G. Numerical modeling of sand particle erosion at return bends in gas-particle two-phase flow. *Scientia Iranica*, 2018, vol. 25 (6), pp. 3231–3242. DOI: 10.24200/sci.2018.50801.1871.
16. Peng S., Chen Q., Shan C., Wang D. Numerical analysis of particle erosion in the rectifying plate system during shale gas extraction. *Energy Science & Engineering*, 2019, vol. 7 (5), pp. 1838–1851. DOI: 10.1002/ese3.395.
17. Anielli D., Borello D., Rispoli F., Salvagni A., Venturini P. Prediction of particle erosion in the internal cooling channels of a turbine blade. *11th European Turbomachinery Conference*, 23 March 2015, Madrid, Spain, pp. 1–11.
18. Campos-Amezcu A., Mazur Z., Gallegos-Muñoz A., Romero-Colmenero A., Manuel Riesco-Ávila J., Martín Medina-Flores J. Numerical study of erosion due to solid particles in steam turbine blades. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2008, vol. 53 (6), pp. 667–684. DOI: 10.1080/10407780701453933.
19. Arabnejad H. *Development of erosion equations for solid particle and liquid droplet impact*. Ph.D. diss. Department of Mechanical Engineering, The University of Tulsa, 2015. 161 p.
20. Mansouri A. *A combined CFD-experimental method for developing an erosion equation for both gas-sand and liquid-sand flows*. Ph.D. diss. Department of Mechanical Engineering, The University of Tulsa, 2016. 217 p.
21. Liu Y., Cao Z., Yuan J., Sun X., Su H., Wang L. Effect of morphology, impact velocity and angle of the CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (CMAS) particle on the erosion behavior of thermal barrier coatings (TBCs): a finite element simulation study. *Coatings*, 2022, vol. 12 (5), p. 576. DOI: 10.3390/coatings12050576.
22. Ma Z.S., Fu L.H., Yang L., Zhou Y.C., Lu C. Finite element simulations on erosion and crack propagation in thermal barrier coatings. *High Temperature Materials and Processes*, 2015, vol. 34 (4), pp. 387–393. DOI: 10.1515/http-2014-0068.
23. Liu Z.G., Wan S., Nguyen V.B., Zhang Y.W. Finite element analysis of erosive wear for offshore structure. *13th International Conference on Fracture*, 16–21 June 2013, Beijing, China, pp. 461–468.

24. Oviedo F., Valarezo A. Residual stress in high-velocity impact coatings: parametric finite element analysis approach. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2020, vol. 29 (6), pp. 1268–1288. DOI: 10.1007/s11666-020-01026-5.
25. Bing Wu, Fengfang Wu, Jinjie Li. Finite element modeling of correlating mechanical properties with erosion wear rate. *Proceedings of the 2018 3rd International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2018)*, June 2018. Atlantis press, 2018, pp. 273–276. DOI: 10.2991/eame-18.2018.57.
26. Singh P.K., Hota A.R., Mishra S.B. Finite element modelling of erosion parameters in Bing boiler components. *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*, 2018, vol. 7 (2), pp. 12–16. DOI: 10.51983/ajeat-2018.7.2.964.
27. Dong X., Li Z., Feng L., Sun Z., Fan C. Modeling, simulation, and analysis of the impact(s) of single angular-type particles on ductile surfaces using smoothed particle hydrodynamics. *Powder Technology*, 2017, vol. 318, pp. 363–382. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.06.011.
28. Leguizamón S., Jahanbakhsh E., Alimirzazadeh S., Maertens A., Avellan F. FVPM numerical simulation of the effect of particle shape and elasticity on impact erosion. *Wear*, 2019, vol. 430–431, pp. 108–119. DOI: 10.1016/j.wear.2019.04.023.
29. Menter F., Lechner R., Matyushenko A. *Best practice: generalized K- $\Omega$  two-equation turbulence model in ANSYS CFD (GEKO)*. Technical Report ANSYS. Nurnberg, Germany, 2019. 32 p.
30. *ANSYS Fluent Theory Guide*. Canonsburg, PA, ANSYS Inc, 2019. 1080 p.
31. Menter F.R., Matyushenko A., Lechner R. Development of a generalized K- $\omega$  two-equation turbulence model. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, 2018, vol. 142, pp. 101–109. DOI: 10.1007/978-3-030-25253-3\_10.
32. Strokach E., Zhukov V., Borovik I., Sternin A., Haidn O.J. Simulation of a GOx-gch4 rocket combustor and the effect of the GEKO turbulence model coefficients. *Aerospace*, 2021, vol. 8 (11), p. 341. DOI: 10.3390/aerospace8110341.
33. Pozhidaev A., Kozhevnikov G., Strokach E. Numerical study of turbulence model effect on solid particle erosion in gaseous flow. *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2549 (1), p. 030003. DOI: 10.1063/5.0130489.
34. Oka Y.I., Ohnogi H., Hosokawa T., Matsumura M. The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact. *Wear*, 1997, vol. 203–204, pp. 573–579. DOI: 10.1016/s0043-1648(96)07430-3.
35. Haugen K., Kvernfold O., Ronold A., Sandberg R. Sand erosion of wear resistant materials: Erosion in choke valves. *Wear*, 1995, vol. 186–187, pp. 179–188. DOI: 10.1016/0043-1648(95)07158-X.
36. Duarte Ribeiro C.A., Souza F., Salvo R., Santos V. The role of inter-particle collisions on elbow erosion. *International Journal of Multiphase Flow*, 2016, vol. 89, pp. 1–22. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.001.
37. *Recommended practice RP O501 Erosive wear in piping systems*. Revision 4.2-2007 (DNV RP O501 – Revision 4.2-2007). Det Norske Veritas, 2007. 43 p.
38. Haider A., Levenspiel O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. *Powder Technology*, 1989, vol. 58 (1), pp. 63–70. DOI: 10.1016/0032-5910(89)80008-7.
39. Morsi S.A., Alexander A.J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, vol. 55, pt. 2, pp. 193–208. DOI: 10.1017/s0022112072001806.
40. *ImageJ. Image Processing and Analysis in Java*. Available at: <https://imagej.net/ij/index.html> (accessed 31.10.2023).

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).