

Е.А. Строкач, Г.Д. Кожевников, А.А. Пожидаев

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭРОДИРОВАНИЯ ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ В ГАЗОВОМ ПОТОКЕ (ОБЗОР)

Рассмотрено современное состояние вопроса оценки скорости эродирования твердыми частицами в газовом потоке с помощью методов численного моделирования на примере наиболее представительных зарубежных и отечественных публикаций. Показано, что задача численного моделирования эродирования решается в основном с помощью двух подходов: при использовании методов вычислительной гидрогазодинамики (CFD) и методов конечно-элементного моделирования (FEM). Обзор показал, что в подходах на основе CFD успешно применяются как двухпараметрические модели турбулентности (k - ϵ и k - ω shear stress transport), так и модели напряжений Рейнольдса (Reynolds stress models). Однако выбор полуэмпирической модели эрозии, несмотря на большое количество уже разработанных подходов, до сих пор неочевиден и существенно зависит от применения. FEM-методы за счет решения задачи в явной постановке позволяют успешно оценивать фундаментальную картину разрушения материала поверхности для различных материалов и служить базой для дальнейших углубленных исследований и построения новых аналитических моделей эродирования, в то время как методики на базе CFD решают более «инженерные» задачи, в качестве граничных и начальных условий принимающие системные параметры. Несмотря на имеющиеся объективные предпосылки, на данный момент отсутствуют публикации по успешной разработке «сквозной» методики моделирования, которая позволяла бы на основе предварительных FEM-расчетов и построения аналитических эрозионных моделей для ряда материалов поверхности, скоростей и углов падения частиц использовать эти модели при инженерных CFD-расчетах. Отмечается, кроме прочего, меньшее внимание в отечественном научном поле (по сравнению с зарубежным) к проблеме эродирования твердыми частицами в газовом потоке.

Ключевые слова: эрозионный износ, численное моделирование, литературный обзор, метод конечных элементов, газовый поток, Ansys CFD, Abaqus, модели эрозии, износ, твердые частицы.

E.A. Strokach, G.D. Kozhevnikov, A.A. Pozhidaev

Moscow Aviation Institute (national Research University), Moscow, Russian Federation

NUMERICAL SIMULATION OF SOLID PARTICLE EROSION IN A GASEOUS FLOW (REVIEW)

The paper studies the contemporary state of the numerical simulation of erosive wear by solid particles in gaseous flow based on representative publications in Russian and foreign journals. It is shown that erosion is primarily numerically studied using two approaches: computational fluid dynamics based techniques and finite-element modeling based techniques. The review has also revealed that, depending on the application, CFD-based methodologies successfully utilize popular eddy viscosity models such as k - ω shear stress transport, standard k - ϵ models etc., and reynolds-stress models. However, the choice of semi-empirical or analytic erosion models applicable for CFD-based methodologies is still ambiguous and subject to specific application. FEM-based methodologies due to usage of an explicit dynamics solver allow for successful estimation of fundamental wear processes of the surface for various materials and can serve as a framework for further deep research and development of new analytical models. Opposite, CFD-based techniques are suitable for engineering tasks, and receive general system parameters as boundary and initial conditions. Regardless of these propitious conditions, currently no studies are published concerning the development of an entire technique which would allow the use of CFD approach based on the erosion models, pre-developed for a range of surface materials, particle velocities, impingement angles, etc. Such methodology, hence, is proposed for development and validation in future studies.

Keywords: erosive wear, numerical modeling, literature review, finite element method, gas flow, Ansys CFD, Abaqus, erosion models, wear, solid particles.

Введение

К настоящему времени история экспериментального и теоретического исследования проблемы эродирования твердыми частицами

в газовом и жидкостном потоках, а также жидкими частицами в газовом потоке насчитывает целые десятилетия. Несмотря на это, из-за большого количества параметров, относящихся к характеристикам конкретной задачи, т.е.

конструкции, используемым материалам и режимам воздействия, постоянное совершенствование методов и методик оценки показателей эродирования остается актуальным. В аэрокосмической отрасли эрозия твердыми частицами, как правило, происходит в газовом потоке и является критически важным явлением с точки зрения оценки ресурса деталей и узлов, поэтому в данной работе основное внимание уделено эрозии в газовом потоке. Современное состояние развития методов численного моделирования и прикладных программных пакетов позволяет оценивать процесс износа материала как в составе инженерной модели агрегата / детали, так и на «микроуровне» непосредственно материала поверхности. Таким образом, в научно-инженерной среде наиболее часто применяют один из двух подходов: на базе методов вычислительной гидрогазодинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD) и конечно-элементных методов (Finite Element Analysis – FEM). Первый позволяет явно учитывать геометрию и рабочие условия рассматриваемой детали, применяя полуэмпирические, аналитические и комбинированные зависимости для оценки скорости эродирования, которые имеют настроечные коэффициенты, ограничивающие область применения таких методов. Методы на базе явной динамики (Explicit FEM) позволяют учесть структуру материала, оценить напряжения и деформации при каждом ударе частицы о поверхность, что преимущественно для анализа стойкости материала к продолжительному воздействию. Таким образом, CFD-моделирование наилучшим образом подходит для повседневного инженерного применения, а методы явной динамики – для углубленного анализа процессов в материале. Несмотря на свою актуальность, современное состояние вопроса редко представляется в виде обзорного материала, включающего наиболее представительные недавние публикации, тем более в русскоязычных источниках.

Основным критерием, характеризующим процесс эрозии материала, является скорость эродирования, часто обозначаемая в зарубежной литературе ER (Erosion Ratio), которая, как правило, представляет собой отношение унесенной массы материала к массе

эродирующих частиц за время воздействия. Другим показателем, напрямую связанным со скоростью эродирования, является удельная глубина эродирования, выраженная в единицах длины к массе внесенных частиц, которая является более частным критерием оценки эрозии. На сегодняшний день существует ряд работ посвященных теме уменьшения скорости эродирования путем создания на образцах и деталях покрытий [1].

Поскольку именно научно-исследовательская инженерная практика определяет итоговый вид конструкции и рабочие условия, в данной работе основное внимание уделено работам и моделям, связанным с CFD-моделированием. Кроме того, намеренно приведены в основном современные подходы и работы, в явном виде связывающие параметры рабочего процесса (скорость движения среды, скорость / расход частиц, массу частиц, угол падения, форму частиц, материал частиц, их сгруппированность и т.д.) и скорость эродирования. Далее представлены некоторые полуэмпирические и аналитические модели, а также наиболее распространенные модели эрозии, использующиеся в современных CFD-пакетах.

Полуэмпирические и аналитические модели эрозии

На сегодняшний день существует ряд моделей, описывающих процесс эрозии частицами в газовом или жидкостном потоке. Однако из-за большого количества воздействующих параметров в конкретных задачах применимость этих моделей ограничена, и на данный момент не существует универсальной модели эрозии, применимой к большинству задач.

Finnie

Эмпирические модели в основной массе, как и многие механистические модели, базируются на предложенной в 1960 г. модели Finnie [2], выражающей скорость эродирования в форме

$$E = K \cdot V_p^n \cdot f(\gamma),$$

где E – безразмерная величина эрозии; K – масштабный коэффициент, зависящий от пары взаимодействующих материалов; V_p –

скорость частицы до столкновения со стенкой; n – эмпирический степенной коэффициент; $f(\gamma)$ – функция угла падения частиц, которая учитывает тип деформации – износ абразивного типа при низких углах натекания частиц и усталостный (в зарубежной литературе – деформационный (deformational)) при высоких углах натекания частиц.

Модель эрозии Finnie лучше всего подходит для пластичных материалов, в которых эрозия существенно зависит от угла столкновения частицы со стенкой и ее скорости.

Bitter

Данная модель расширяет представление Finnie, используя закон сохранения энергии [3, 4]. Автор показал, что абразивный и усталостный износы материала происходят одновременно, и выделил износ при высоких углах падения частиц, когда преобладает разрушение за счет усталостного механизма, и при малых углах, когда основную роль играет абразивный износ. Для усталостного износа была предложена формула

$$E_d = \frac{1}{2} \frac{M(V_p \sin \Theta - V_n)^2}{\varepsilon_b}, \quad (1)$$

где E_d – объемный унос материала при усталостном (в зарубежной литературе – деформационном) механизме; M – полная масса частиц; V_n – нормальная компонента скорости, ниже которой не происходит эрозионного износа за счет этого механизма; ε_b – энергия, необходимая для уноса единицы объема материала при усталостном износе (коэффициент усталостного износа).

Для абразивного износа он предложил следующие выражения:

$$E_{c1} = \frac{1}{2} \frac{MV_p (V_p \sin \Theta - V_n)^2}{(V_p \sin \Theta)^{\frac{1}{2}}} \times$$

$$\times \left(V_p \cos \Theta - \frac{C(V_p \sin \Theta - V_n)^2}{(V_p \sin \Theta)^{\frac{1}{2}}} \right) \Theta \leq \Theta_{p0};$$

$$E_{c2} = \frac{1}{2} \frac{M \left(V_p^2 \cos^2 \Theta - K_1 (V_p \sin \Theta - V_n)^{\frac{3}{2}} \right)}{\varphi},$$

где φ – энергия, необходимая для уноса единицы объема материала при абразивном износе (коэффициент абразивного износа); Θ_{p0} – угол, при котором тангенциальная составляющая скорости становится равной нулю при отскоке частицы от поверхности, другие коэффициенты – константы. Автор также предложил находить общую скорость эродирования суммой скоростей усталостного (deformational) и абразивного (cutting) износов:

$$ER_t = ER_d + ER_c.$$

Nielson и Gilchrist

Продолжая работу над моделью Bitter, Nielson и Gilchrist [5] упростили ее и привели к следующему виду:

$$E_t = \frac{1}{2} \frac{MV_p^2 \cos^2(\Theta) \sin(\Theta n)}{\varphi} +$$

$$+ \frac{M(V_p \sin \Theta - V_n)^2}{2\varepsilon_b} \quad \Theta \leq \Theta_{p0};$$

$$E_t = \frac{1}{2} \frac{MV_p^2 \cos^2 \Theta}{\varphi} + \frac{M(V_p \sin \Theta - V_n)^2}{2\varepsilon_b} \quad \Theta \geq \Theta_{p0}.$$

Grant – Tabakoff

Grant и Tabakoff [6] указали на то, что частицы песка, которые они рассматривали, воздействуют на поверхность многократно и коэффициент восстановления (т.е. коэффициент, учитывающий смену угла отражения из-за деформации поверхности) должен быть введен в расчет эродирования. Они получили следующие уравнения для алюминиевого сплава 2024 (зарубежный аналог отечественного сплава Д16Т):

$$\varepsilon = K_1 \left\{ 1 + C \left[K_2 \sin \left(\frac{90^\circ}{\alpha_0} \alpha \right) \right] \right\}^2 \times$$

$$\times V^2 \cos^2 \alpha (1 - R_T) + K_3 (V \sin \alpha)^4;$$

$$R_T = 1 - 0,0016 (V \sin \alpha),$$

где R_T – коэффициент восстановления; ε – скорость эродирования, остальные составляющие – эмпирические коэффициенты.

Det Norske Veritas (DNV)

Haugen и другие [7] из организации Det Norske Veritas (DNV) провели ряд экспери-

ментов и привели модель на базе Finnie, где функция угла падения частиц имеет полиномиальную зависимость:

$$f(\Theta) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} A_i \left(\frac{\Theta\pi}{180} \right)^i.$$

В табл. 1 представлены значения коэффициентов.

Таблица 1

Значения коэффициентов
в функции угла падения

A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
9,370	42,295	110,864	175,804	170,137	98,398	31,211	4,17

Ока

В своей работе Ока и Yoshida [8] рассмотрели влияние на эрозию еще большего количества факторов и предложили следующую зависимость:

$$ER = g(\Theta)E_{90};$$

$$g(\Theta) = (\sin \Theta)^{n_1} (1 + Hv(1 - \sin \Theta))^{n_2};$$

$$E_{90} = K(Hv)^{k_1} \left(\frac{V_p}{V'} \right)^{k_2} \left(\frac{D_p}{D'} \right)^{k_3};$$

$$n_1 = s_1(Hv)^{q_1};$$

$$n_2 = s_2(Hv)^{q_2};$$

$$k_2 = 2,3(Hv)^{0,038},$$

где E_{90} – скорость эродирования при максимальном угле падения частиц; $g(\Theta)$ – скорость эродирования при произвольном угле Θ ; Hv – твердость по Виккерсу; V_p и V' – скорость частиц и их «референсная» скорость, являющаяся константой; D_p и D' – диаметр частиц и их референсный диаметр, являющийся константой.

Применение методов вычислительной гидрогазодинамики (CFD)

Наиболее часто в литературе, посвященной описанию эродирования частицами в газовом потоке, используется метод, в основе которого лежит взаимодействие CFD (вычислительной гидрогазодинамики) и эмпири-

ко-аналитических моделей эрозии, в которых скорость эродирования является функцией угла столкновения частицы с исследуемой поверхностью, ее скорости, массы (массового расхода частиц в потоке), а также твердости поверхности. На современном уровне развития методов расчета двухфазных течений можно выделить два основных подхода: в первом обе фазы – «эйлеровы» жидкости, разрешается граница фаз или область около этой границы, и для обеих жидкостей решается вся система уравнений Навье – Стокса. Во втором подходе одна фаза рассматривается как несущая, а вторая – как дисперсная, для которой не решается система уравнений Навье – Стокса, и для описания движения частиц используются уравнения движения, получаемые из баланса сил, действующих на частицу. В этом случае, называемом Эйлер – Лагранжевым подходом, взаимодействие фаз происходит через источниковые дополнительные члены в уравнениях для обеих фаз. Благодаря меньшей ресурсоемкости и относительной точности при рассмотрении полидисперсных частиц именно этот метод получил широкое распространение. Далее рассмотрены работы, использующие этот подход.

В своей работе Н. Hadžiahmetović и другие [9] исследовали работу Эйлер – Лагранжевого подхода для моделирования эрозионного износа частицами песка в изгибе алюминиевой трубы на базе имеющихся экспериментальных данных. Используя модель турбулентности на основе решения уравнений для напряжений Рейнольдса (Reynolds stress model) и модель Finnie для оценки скорости эродирования поверхности с заданием модифицированной функции угла падения частиц, авторы определили, что выбранный подход хорошо описывает скорость эродирования, а также что большой вклад в результаты расчета вносит верный учет движения частиц до непосредственного столкновения со стенкой, а также что на компоненты скорости частиц имеет существенное влияние шероховатость поверхности.

В исследовании Ke Sun и других [10] изучено эродирование в изогнутом под углом 90° канале. Для моделирования использовался метод Эйлера – Лагранжа с различными ско-

ростями ввода и диаметрами частиц, для моделирования турбулентности – также модель Рейнольдсовых напряжений. Особого внимания заслуживает использованный авторами подход учета взаимодействия частиц со стенкой на базе коэффициентов восстановления нормальной и тангенциальной компонент скорости.

D. Borello и другие [11] исследовали скорость эродирования в каналах охлаждения лопаток турбин. Использовался подход Эйлера – Лагранжа на базе собственного кода в купе с моделью турбулентности $k\text{-}\epsilon\text{-}\zeta\text{-}f$. Выбранная модель позволила учесть анизотропию турбулентности около стенок, а также частично влияние кривизны линий тока на турбулентное течение. Дополнительные нестационарные расчеты позволили частично воссоздать спектр турбулентности. Для моделирования эродирования поверхности использовалась модель Tabakoff. Авторы показали, что траектории наименьших частиц следовали линиям тока, а скорости эродирования также существенно зависели от угла падения. Механизм воздействия на стенку крупных частиц главным образом зависел от сил инерции.

S. Peng и другие [12] изучали влияние скорости частиц (5–30 м/с), массового расхода, параметров частиц – диаметра и формы – на базе эксперимента, поставленного в Талсе, США, в центре исследования коррозии и эрозии (E/CRC) для изучения эродирования ректификационной системы при экстракции сланцевого газа. Для моделирования течения двухфазной смеси использовался подход Эйлера – Лагранжа, для моделирования турбулентности – модель $k\text{-}\epsilon$, для моделирования эрозии – модель Bitter. Авторы выяснили, что влияние исследованных параметров может быть не только количественным, но и качественным. Скорость газа может влиять на положение максимума скорости эродирования, различные диаметры капель приводят к разным формам эродирования.

Farokhipour и другие [13] исследовали влияние различных параметров моделей на скорость эродирования песком в обратных изогнутых каналах. Для моделирования двухфазного течения твердых частиц в газе использовался метод Эйлера – Лагранжа, для

учета турбулентности применялась модель $k\text{-}\omega$ SST. Оценивалось влияние различных моделей эрозии при разных массовых расходах и диаметрах частиц. Исследовались три модели эрозии: Zhang [14], DNV, Oka. Результаты показали, что модель Ока лучше согласуется с данными, полученными экспериментально другими авторами.

В диссертации Hadi Arabnejad [15] разработал и верифицировал аналитико-эмпирическую модель скорости эродирования для воздействия твердыми частицами в газовом потоке и жидкими частицами. Особенность работы в том, что на основе подхода Finnie [16] и принципа разделения скорости эродирования «режущего» (cutting) и деформационного (deformational) механизмов автор получил уравнения модели скорости эродирования, где для «режущего» механизма определяющую роль играет угол падения частицы, в зависимости от которого применяется одно из двух уравнений этого механизма. Итоговая форма уравнения выглядит следующим образом:

$$ER = ER_c + ER_d;$$

$$ER_c = \begin{cases} C_1 F_s \frac{U^{2,41}(\Theta)[2K \cos \Theta - \sin \Theta]}{2K^2}, & \Theta < \tan^{-1}(K), \\ C_1 F_s \frac{U^{2,41} \cos^2(\Theta)}{2}, & \Theta > \tan^{-1}(K), \end{cases}$$

$$ER_d = C_2 F_s \frac{(U \sin \Theta - U_{tsh})^2}{2},$$

где U – скорость частиц, Θ – угол падения частиц, F_s – коэффициент заостренности частиц, U_{tsh} – коэффициент, являющийся скоростью, ниже которой деформационный механизм эрозии мал, C_1, C_2 – константы. Еще одним важным результатом работы стало определение формы связи между скоростью эродирования и твердостью материала.

Базируясь на серии экспериментов, автор пришел к выводу, что при «режущем» механизме скорость эродирования обратно пропорциональна квадратному корню от твердости:

$$ER_c \propto \frac{1}{\sqrt{Hv}}. \quad (2)$$

Работа представляет серьезный интерес как с аналитической, так и с экспериментальной точки зрения, а разработанная модель имеет высокие перспективы применения.

А. Mansouri в своей диссертации [17] расширил разработанную Arabnejad модель для использования в течениях с твердыми частицами, где несущей является жидкая фаза. Кроме того, было проведено сравнение моделей Oka, Arabnejad и обобщенной модели при использовании CFD для случая течения частиц в жидкости. Показано, что все три модели дают хорошие результаты.

В публикации Zhang и других [18] исследовалось влияние модельных параметров на скорость эродирования изгибной части трубы твердыми частицами в газовом потоке. Изучались модели турбулентности, модели эрозии, а также виды сопряжения частиц и основного течения при применении Эйлер – Лагранжевого подхода. Авторы делают вывод, что одностороннее сопряжение, которое не учитывает влияния частиц на течение, не применимо в таких расчетах. Среди SST, $k - \omega$, Standart $k - \varepsilon$, RNG $k - \varepsilon$, RSM моделей наибольшую точность показала Standart $k - \varepsilon$, хотя профиль скорости в конкретных областях изгибной части, свойственный вторичным течениям, рассчитывается всеми моделями хорошо. Из четырех исследованных моделей эрозии – Oka, Tabakoff и Grant, DNV и E/CRC – авторы выделяют Tabakoff и Grant.

Моделирование на основе метода конечных элементов (FEM)

Несмотря на большое количество публикации работ по моделированию скорости эрозии частицами в газовом и жидкостном потоках на базе методов вычислительной гидродинамики в связке с аналитическими и эмпирико-аналитическими подходами, выделяется еще один класс подходов к моделированию эрозии – на основе метода конечных элементов (МКЭ). Для решения таких задач используется метод явного анализа, при котором частицы взаимодействуют с образцом, разбитым на конечные элементы. В качестве

граничных условий задаются скорости частиц, размер, угол падения и т.п. Частицы «выбивают» конечное число элементов при ударе так, что возможно определить массу унесенного материала, что позволяет определить профиль эродирования при достаточно большой статистике. Наиболее часто для этих целей используются пакеты с явными методами численного решения – LS-Dyna, Abaqus и т.д. Особенность этого подхода в том, что он позволяет напрямую рассмотреть механизм и природу эродирования материалов разного состава, материалов с покрытиями, композитных материалов при различных скоростях, форме, размерах, свойствах частиц эродирующего потока. Далее представлены только наиболее представительные публикации для этого метода.

В своей работе В. Takerkhanі и другие [19] исследовали эродирование твердыми частицами поверхности турбинной лопатки в пакете Abaqus. Критерием скорости эродирования выступала сумма элементов с деформацией более 0,2 %. Частица представлялась абсолютно твердым телом с диаметром и скоростью. Авторы отметили увеличение скорости эродирования при увеличении обоих параметров, что подтверждается результатами теоретической модели.

Khoddami и другие [20] провели широкую работу по изучению наилучшей конфигурации титано-никелевых покрытий сплава Ti – 6Al4V (BT6). Авторы использовали подход Johnson – Cook для описания нелинейной зависимости между девиаторными напряжениями и деформациями. Вторым уравнением, необходимым для описания реакции материала, стало уравнение состояния Mie – Grüneisen. Воздействие частиц моделировалось на выделенном участке «общей» модели, имеющем периодические условия на стенках, что за счет снижения ресурсоемкости решения позволяет оценивать многочисленные удары частиц по поверхности.

Работа модели была верифицирована для сплава BT6, находящегося под воздействием частиц диаметром ок. 100 мкм, скорости ок. 10–25 м/с, углов падения 25°–90°. Результаты показывают хорошее совпадение расчета и эксперимента. Критерием для оптимизации

конфигурации структуры покрытий служило максимальное напряжение растяжения. Конфигурация покрытий описывалась несколькими параметрами: толщиной покрытия, модулем упругости покрытий, количеством слоев, составом слоев. Были получены существенные результаты: 1) оптимальной выбрана конфигурация с TiAlN; 2) была обнаружена прямая зависимость между сопротивлением эрозии и толщиной покрытия; 3) в некоторых случаях многослойное покрытие оказывало меньшее сопротивление эродированию, чем однослойное; 4) результаты показали, что максимальная скорость эродирования для чистого ВТ6 наблюдается при угле падения частиц 45° , а для сплава с покрытием – 90° , что объясняется более высокой твердостью покрытий.

Bing Wu и другие [21] исследовали механические свойства однослойных покрытий при однократном воздействии твердыми частицами в пакете Abaqus. Исследовались четыре вида покрытий для отсека влияния других факторов. Модель учитывала влияние таких механических параметров, как микротвердость, модуль упругости и комбинация микротвердости и модуля упругости. Для моделирования нитридного покрытия использовали линейно-упругую модель материала. Среди различных комбинаций свойств покрытия две привели к снижению скорости эродирования – $\frac{H^3}{E^2}$ и $\frac{H}{E}$, где H – твердость материала; E – модуль упругости.

В работе Y.V. Petrov и других [22] экспериментально и численно исследовался эрозийный износ сплава ВТ6. Экспериментальное исследование сплава показало, что поверхность ВТ6 может иметь различное сопротивление износу при воздействии высокоскоростным потоком частиц, которые производят короткие удары при времени воздействия < 1 мкс. Наиболее важным выводом стал вывод нескольких критериальных параметров, доступных из эксперимента, которые необходимы для предсказания динамических прочностных свойств материала.

Отечественные публикации

В отечественном поле публикаций присутствуют опыт и связки CFD и эмпирико-аналитических моделей и механистического

и эмпирико-аналитического решений задачи расчета скорости эродирования. Больше внимания уделено подходам на базе CFD, что позволяет с удовлетворительной точностью решать задачи проектирования узлов для техники различного применения.

В диссертации М.М. Буляккулова [23] с помощью комплекса Ansys CFX рассматривалось взаимодействие твердых частиц с конструкцией летательного аппарата. Была произведена попытка разработки аналитико-механистического подхода расчета этого взаимодействия, предложены модели расчета и произведен расчет натекания высокоскоростного гетерогенного потока на препятствие (поверхность ЛА). Были оценены скорости уноса массы различных видов композиционных материалов при воздействии потока с частицами. Показано, что скорость уноса массы УУКМ-1 (углерод-углеродного композиционного материала) интенсивно возрастает при температуре более 1500 К, а также что она зависит от дисперсности частиц и скорости. Показано также, что увеличение угла атаки повышает скорость эрозии более чем в 2 раза для графита В-1, по сравнению с нулевым углом атаки. В итоге автором предложена математическая модель для решения задачи натекания гетерогенного потока на участок ЛА конической формы, притупленной сферой.

В работе Г.Е. Масленникова, Ю.А. Марчковой и других [24] проведено обзорное исследование (что является редкостью для отечественных публикаций) имеющихся аналитических моделей эрозии, которые в настоящее время активно используются в связке с CFD-методами расчета гетерогенных потоков. Приведены достоинства и недостатки самых распространенных моделей: Finnie, Tabakoff и Grant, модели E/CRC (исследовательского центра коррозии и эрозии) и т.п. Показано, что модели, имеющие малое количество настроечных параметров, применимы в узком кругу задач, а модели, чье применение является более широким (модели Tabakoff и Grant, Oka, E/CRC), включают слишком большое количество параметров и поэтому не всегда удобны для использования. Авторы выбрали для дальнейшей работы модель Tabakoff и Grant, так как она, по предпринятому ими анализу литературы, показала хорошие результаты для круга задач износа поверхностей газохладителей.

В работе Г.Е. Масленникова, Ю.А. Марчковой и других [25] проводилось моделирование эрозионного износа входных поверхностей конвективного газоохладителя парогазовой установки в классической постановке связки CFD и аналитической модели, в роли которой выступила модель Tabakoff – Grant. Используемый подход помог авторам разработать рекомендации к улучшению конструкции установки.

А.В. Гумеров и Р.Г. Акмалетдинов [26] исследовали в основном не сам процесс эродирования, а влияние геометрии изношенной лопатки компрессора на газодинамические параметры течения. Кроме того, авторы изучили скорость эродирования в представительной постановке, имитирующей участок кольцевого канала с параметрами двухфазной среды, соответствующими четвертой ступени компрессора. В работе они использовали подход Эйлера – Лагранжева описания течения с моделью эрозии Tabakoff и Grant, и по результатам расчета удалось выделить необходимые аспекты для правильной постановки эксперимента.

В дипломной работе В.С. Гурина [27] рассматривалось воздействие твердых частиц на поверхность с применением пакета Ansys. Задача решалась с помощью метода конечных элементов, с учетом ее нелинейности, контактных взаимодействий, других особенностей. Выбранный метод был применен к анализу про-

цесса эродирования реальной геометрии лопатки компрессора двигателя TWD-10B/PZL-10S вертолета Sokol. Значение радиуса частиц песка лежало в пределах 100–400 мкм. В качестве материала лопатки использовался EI-961. Результатом работы стало определение пороговых значений скорости частиц для различных значений радиуса частиц.

Представленные работы показывают имеющийся интерес к процессу эродирования твердыми частицами в газовом потоке, но имеют один общий минус – недостаток эмпирических и теоретических знаний об этом процессе, что могло бы позволить обобщить выводы частных исследований процесса эродирования и прийти к некоторой универсальной форме оценки скорости эродирования для различных приложений. Кроме того, видно, что на текущий момент наиболее подходящий для инженерного применения метод – связка CFD и аналитических (механистических) моделей в отечественных исследованиях применяется все чаще, но все еще реже, чем в зарубежных публикациях, что, как и разница в общем объеме публикаций по теме, свидетельствует о некотором отставании в распространении изучения вопроса расчетно-теоретическими методами для техники, подверженной эрозии частицами. В табл. 2 представлен обзор рассмотренных здесь наиболее представительных публикаций.

Таблица 2

Выбор подходов для моделирования скорости эродирования

Публикация	Объект и материал	ПК	Модель турбулентности	Модель эрозии	Результат
1	2	3	4	5	6
Н. Hadžiahmetović и др. [9]	Колено алюминиевой трубы 25,4 мм. Частицы диаметром 150 мкм	CFD (Fluent)	RSM	Finnie	Апробация модифицированной модели функции угла падения частиц
Ke Sun и др. [10]	Прямое колено трубы 100 мм. Частицы размером 1, 3, 7, 16, 30, 60, 100 и 200 мкм	CFD (Fluent)	RSM	Алгебраическая модель столкновения частиц со стенкой	Оценка влияния скорости частиц, размера частиц и коэффициентов восстановления при взаимодействии со стенкой на скорость эрозионного износа
D. Borello и др. [11]	Канал охлаждения лопаток турбин. Частицы – 5 и 20 мкм		k-eps-zeta-f	Tabakoff	Оценка влияния размеров частиц и угла падения
S. Peng и др. [12]	Стальное колено трубы. Частицы размером 100–150 мкм	CFD (Fluent)	k-epsilon	Bitter	Влияние скорости частиц, массового расхода, параметров частиц

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6
Farokhipour и др. [13]	Обратные изгибные каналы – 76,2 мм, частицы размером 300 мкм	CFD (Fluent)	k-omega SST	Zhang, DNV, Oka	Влияние различных моделей эрозии. Ока лучше всего подтверждала экспериментальные данные
Диссертация Hadi Arabnejad [15]	Сопло (диаметром 7,6 мм) с пластиной (37,5 × 25 мм). Размер частиц 53–710 мкм	Ansys CFD Fluent	RSM	Arabnejad (модифицированная модель Finnie)	Разработка и верификация аналитико-эмпирической модели скорости эродирования
Диссертация А. Mansouri [17]	Сопло (диаметром 7,6 мм) с пластиной (37,5 × 25 мм). Размер частиц 53–710 мкм	Ansys CFD Fluent	RSM	Mansuri (расширенная Arabnejad) Oka, Arabnejad	Сравнение моделей эрозии для случая течения частиц в жидкости
Zhang и др. [18]	Колено алюминиевой и стальной трубы. Размеры частиц – 150, 450 мкм	CFX	SST k-omega, Standart k-epsilon, RNG k-epsilon, RSM	Oka, Tabakoff Grant, DNV, E/CRC	Исследовалось влияние модельных параметров на скорость эродирования. Из моделей эрозии авторы выделяют – Tabakoff и Grant
В. Takerkhani и др. [19]	Турбинная лопатка, размеры частиц – 1–5 мм	Abaqus/Explicit	FEM	FEM	Влияние размера частиц и скорости удара на скорость эродирования
Khoddami и др. [20]	Ti–Ni-покрытия на Ti-6Al-4V (аналог ВТ-6)	Abaqus/Explicit	FEM	FEM	Определили максимальные углы эродирования для материала ВТ-6, определена зависимость скорости эрозии и толщины покрытия, оценена скорость работы однослойного и многослойного покрытий
Bing Wu и др. [21]	–	Abaqus	FEM	FEM	Оценка влияния микротвердости, модуля упругости и их комбинации
Y.V. Petrov и др. [22]	ВТ-6, частицы диаметром 109 и 230 мкм		FEM	FEM	Изучили связь между высокоскоростной деформацией образца и эрозионной деформацией поверхности
Гумеров и Акмалетдинов [26]	Изношенная лопатка компрессора	Ansys CFX	–	Tabakoff и Grant	Результатами расчета являлось выделение необходимых аспектов для дальнейшего расчета
Y. Dong и др. [28]		CFD (Fluent)	k-epsilon	Grant-Tabakoff/Huang	Изменение скорости эрозии модели Huang с сеточной адаптацией
Dragan и Grad [29]	Вертолетный винт	CFD (Fluent)	k-omega SST	Wallace	Верификация экспериментальных данных
Campos-Amezua и др. [30]	Лопатки первой ступени паровой турбины	Ansys CFD Fluent	–	DNV-Haugen, Neilson – Gilchrist, Tulsa – Ahlert и Tabakoff – Wakeman	Влияние расхода пара, параметров частиц, угла падения, скорости и распределения частиц на скорость эродирования
Рябов и др. [31]	Прямое колено трубы, угловой штуцер. Диаметр части 100–250 мкм	STAR-CCM+ Abaqus	RSM	Oka	Верификация моделей по экспериментальным данным

Может быть видно, что подходы на базе CFD позволяют решать непосредственно инженерные задачи выбора конструкции, в то время как подходы конечно-элементного анализа, как правило, направлены на изучение частных зависимостей поведения материала поверхности от параметров частиц. В связи с этим требуется построение «сквозной» методики, которая могла бы учесть «микроэффекты» в материале при воздействии частиц на основе заранее рассчитанных распределений размеров и скоростей («макропараметров») натекающих твердых частиц. Такая методика может быть построена на основе выявления зависимостей для большого числа условий натекания на «микроуровне» с помощью FEM-расчетов в явной постановке, построения зависимостей, для чего может быть применен как регрессионный анализ, так и методы машинного обучения, и с помощью применения данных зависимостей вместо полуэмпирических и аналитических формул при гидрогазодинамических расчетах.

Также заметно использование популярных двухпараметрических моделей турбулентности (SST, k-epsilon и их вариаций), а также моделей, использующих уравнения для непосредственно рейнольдсовых напряжений. Частое применение моделей на базе рейнольдсовых напряжений, по-видимому, связано с необходимостью учета анизотропии турбулентности и кривизны течения в изогнутых каналах и других элементов конструкций, часто подверженных влиянию частиц. Выбор полуэмпирических моделей эрозии существенно зависит от рассматриваемой задачи, и сделать вывод о преобладании или универсальности одной из моделей нельзя.

Выводы

1. К настоящему моменту создано множество эмпирико-аналитических моделей для определения скорости эродирования твердыми частицами в газовом потоке, имеется экспериментальная база для верификации расчетов. Однако полностью универсальной и точной модели и методики расчета не только для материалов с покрытиями, композитных материалов, но и для классических однородных материалов до сих пор не выработано.

2. Современные исследовательские и инженерные методы расчета эрозии основываются на методах численного моделирования. Их можно разделить на две принципиальные группы: методики на базе связки методов вычислительной гидрогазодинамики (CFD) и эмпирико-аналитических моделей и методики на базе метода конечных элементов, в основном использующие методы явной динамики для расчета скорости эродирования.

3. Подходящими для инженерного применения выглядят методики, построенные на связке методов CFD и эмпирико-аналитических моделей. Они позволяют учесть поведение частиц, находящихся под воздействием несущей фазы, а также не являются слишком требовательными к вычислительным ресурсам. Конечный результат их применения, однако, существенно зависит от применяемой модели эрозии, выбор параметров которой может существенно отличаться для разных пар материалов эродент-поверхность, а также для различных условий натекания частиц. В связи с этим предлагается дальнейшую работу в области численного исследования эрозии твердыми частицами направить на построение «сквозной» методики, которая позволит нивелировать недостатки CFD- и FEM-подходов, комбинируя результаты их применения.

4. Отечественные публикации, несмотря на наличие работ, отражающих опыт применения и CFD-, и FEM-подходов в современных источниках, не представлены в большом количестве и для различных задач. Несмотря на актуальность проблемы и наличие обзорных и специальных прикладных работ по тематике, не наблюдается широкого исследования чувствительности моделей для разных приложений, почти отсутствуют публикации по разработке новых эмпирико-аналитических моделей для применения в связке с методами вычислительной гидродинамики.

5. Только в малом количестве публикаций рассматривается эродирование поверхностей, усиленных противэрозионными покрытиями. Моделирование таких задач актуально и перспективно. Кроме того, в открытом доступе критически мало работ с использованием моделей, учитывающих температуру поверхности, в то время как высокие температуры

могут иметь существенное влияние на процесс эродирования. Кроме того, малое количество работ по моделированию описывает эродирование с высокими скоростями, приближенными к скоростям натекания частиц в компрессорах авиационных двигателей или на обечайках воздухозаборников, носовых обтекателях летательных аппаратов. Среди моделей турбулентности, как и полуэмпирических моделей эрозии, нельзя выделить одну, обладающую точностью и универсальностью.

Однако показано, что в большинстве работ успешно используются распространенные двухпараметрические модели турбулентности, а также модели рейнольдсовых напряжений для разного круга CFD-расчетов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России, тема № FSFF2020-0014.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

1. Research of the AK4-1 alloy microarc oxidation modes effect on the composite ceramic coatings erosion resistance / L.N. Lesnevskiy [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. – 2019. – Vol. 1281, no. 1. – P. 012048.
2. Finnie I. Erosion of Surfaces by Solid Particles // Wear. – 1960. – Vol. 3, no. 2. – P. 87–103.
3. Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena part I // Wear. – 1963. – Vol. 6. – P. 5–21.
4. Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena: Part II // Wear. – 1963. – Vol. 6. – P. 169–190.
5. Neilson J.H., Gilchrist A. Erosion by a Stream of Solid Particles // Wear. – 1968. – Vol. 11, no. 2. – P. 111–122.
6. Grant G., Ball R., Tabakoff W. An Experimental Study of the Erosion Rebound Characteristics of High-Speed Particles Impacting a Stationary Specimen / Cincinnati University Ohio Department of Aerospace Engineering. – Ohio, 1973. – No. 73–36.
7. Sand erosion of wearresistant materials: Erosion in choke valves / K. Haugen, O. Kvernfold, A. Ronold, R. Sandberg // Wear. – 1995. – Vol. 186–187. – P. 179–188.
8. 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. – P. 573–579.
9. Computational Fluid Dynamics (CFD) Based Erosion Prediction Model In Elbows / D. Halima Hadziahmetovic, N. Hodzic, D. Kahrimanovic, E. Dzaferovic // Technical Gazette. – 2014. – Vol. 21, 2. – P. 275–282.
10. 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. – 8 p.
11. Prediction of particle erosion in the internal cooling channels of a turbine blade / D. Anielli, D. Borello, F. Rispoli, A. Salvagni, P. Venturini // European Turbomachinery Conference. – Madrid, Spain, 2015. – 23 March 2015. – 11 p.
12. Numerical analysis of particle erosion in the rectifying plate system during shale gas extraction / S. Peng, Q. Chen, C. Shan, D. Wang // Energy Sci Eng. – 2019. – Vol. 7. – P. 1838–1851.
13. 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. – P. 3231–3242.
14. Comparison of Computed and Measured Particle Velocities and Erosion in Water and Air Flows / Y. Zhang, E.P. Reuterfors, B.S. McLaury, S.A. Shirazi, E.F. Rybicki // Wear. – 2007. – Vol. 263, no. 1-6. – P. 330–338.
15. Arabnejad H. Development of erosion equations for solid particle and liquid droplet impact: Ph.D. thesis / Department of Mechanical Engineering, The University of Tulsa. – Tulsa. – 2015. – 161 p.
16. Finnie I., McFadden D.H. On the Velocity Dependence of the Erosion of Ductile Metals by Solid Particles at Low Angles of Incidence // Wear. – 1978. – Vol. 48. – P. 181–190.
17. Mansouri A.A combined CFD-experimental method for developing an erosion equation for both gas-sand and liquid-sand flows / Department of Mechanical Engineering, The University of Tulsa. – Tulsa. – 2016. – 217 p.
18. Zhang R., Liu H. Numerical simulation of solid particle erosion in a 90 degree bend for gas flow // Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Vol. 6A: Pipeline and Riser Technology. San Francisco, California, USA. June 8–13, 2014. – San Francisco, California, USA, 2014. V06AT04A044. ASME.

19. Erosion Due to Solid Particle Impact on the Turbine Blade: Experiment and Simulation / B. Taherkhani, A.P. Anaraki, J. Kadkhodapour [et al.] // *J Fail. Anal. and Preven.* – 2019. – Vol. 19. – P. 1739–1744.
20. 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 // *Surf. Coat. Technol.* – 2019. – Vol. 372. – P. 173–189.
21. Wu B., Wu F., Li J. 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)*. Xi'an, China. – 2018. – June 24–25. – P. 273–276.
22. Experimental and numerical analysis of the high-speed deformation and erosion damage of the titanium alloy VT-6 / Y.V. Petrov, A.M. Bragov, N.A. Kazarinov [et al.] // *Phys. Solid State.* – 2017. – Vol. 59. – P. 93–97.
23. Буляккулов М.М. Взаимодействие высокоскоростного гетерогенного потока с элементами конструкции ЛА: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2017. – 156 с.
24. Марчкова Ю.А. Анализ механизмов эрозии в газоохладителе ПГУ-ВЦГ // *Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы междунар. науч.-практ. конф. студ., аспирантов и молодых ученых, посв. памяти проф. Н.И. Данилова (1945–2015) – Даниловских чтений; г. Екатеринбург, 11–15 декабря 2017 г.* – Екатеринбург, 2017. – С. 270–273.
25. Масленников Г.Е. CFD моделирование износа летучей золой конвективного газоохладителя ПГУ-ВЦГ схемы Shell // *Физика. Технологии. Инновации: сб. материалов VI Междунар. молодеж. науч. конф., посв. 70-лет. основания Физико-технологич. ин-та УрФУ; г. Екатеринбург, 20–24 мая 2019 г.* – Екатеринбург, 2019. – С. 163–175.
26. Гумеров А.В., Акмалетдинов Р.Г. Моделирование эрозионного износа лопатки компрессора // *Вестник Самар. ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение.* – 2011. – Т. 10, № 3-2. – С. 233–239.
27. Гурин В.Г. Исследование процессов разрушения при высокоскоростной эрозии материалов. – СПб., 2017. – URL: https://dspace.spbu.ru/bitstream/11701/10536/1/tekst_diploma.pdf (дата обращения: 02.01.2021).
28. A Novel method for the prediction of erosion evolution process based on dynamic mesh and its applications / Y. Dong, Z. Qiao, F. Si, B. Zhang, C. Yu, X. Jiang // *Catalysts.* – 2018. – Vol. 8. – P. 432.
29. Dragan, V., Grad, D. An iterative method for estimating airfoil deformation due to solid particle erosion // *INCAS Bulletin.* – 2014. – Vol. 6, Special iss. 1. – P. 51–58.
30. 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.
31. Численные исследования эрозии и прочности элементов газопроводов / А.А. Рябов, А.Ю. Кудрявцев, О.В. Воронков, С.Н. Меньшиков, И.В. Мельников, А.Н. Харитонов, М.Н. Киселев, Ю.А. Архипов // *Проблемы прочности и пластичности.* – 2015. – Т. 77, № 3. – С. 253–265.

References

1. Lesnevskiy L. N. et al. Research of the AK4-1 alloy microarc oxidation modes effect on the composite ceramic coatings erosion resistance. *Journal of Physics: Conference Series.* – IOP Publishing, 2019, Vol. 1281, no. 1, pp. 012048.
2. Finnie I. Erosion of Surfaces by Solid Particles, *Wear*, 1960, vol. 3, no. 2, pp. 87-103.
3. Bitter J.G.A., 1963a, A study of erosion phenomena part I, *Wear*, vol. 6, pp. 5-21.
4. Bitter J.G.A., 1963b, A study of erosion phenomena: Part II, *Wear*, vol. 6, pp. 169-190.
5. Neilson J.H., Gilchrist A. Erosion by a Stream of Solid Particles, *Wear*, 1968, vol. 11, no. 2, pp. 111–122.
6. Grant G., Ball R., Tabakoff W. An Experimental Study of the Erosion Rebound Characteristics of High-Speed Particles Impacting a Stationary Specimen // *Cincinnati University Ohio Department of Aerospace Engineering*. 1973, no. 73-36.
7. Haugen K., Kvernfold O., Ronold A., Sandberg R. Sand erosion of wearresistant materials: Erosion in choke valves, *Wear*, 1995, vol. 186-187, pp. 179-188.
8. 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, pp. 573-579.

9. Hadziahmetovic D. Halima, Hodzic N., Kahrimanovic D., Dzaferovic E. Computational Fluid Dynamics (CFD) Based Erosion Prediction Model In Elbows, *Technical Gazette* 21, 2(2014), 275-282.
10. 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, 8 p.
11. Anielli D., Borello D., Rispoli F., Salvagni A., Venturini P. Prediction of particle erosion in the internal cooling channels of a turbine blade, *European Turbomachinery Conference*, Madrid, Spain, 2015, 23 March 2015, 11 p.
12. Peng S., Chen Q., Shan C., Wang D. Numerical analysis of particle erosion in the rectifying plate system during shale gas extraction. *Energy Sci Eng.* 2019; 7: 1838–1851.
13. Farokhipour Z., Mansoori M., Saffar-Avval G. Ahmadi, Numerical modeling of sand particle erosion at return bends in gas-particle two-phase flow, *Scientia Iranica*, 25 (2018) 3231-3242.
14. Zhang Y., Reuterfors E.P., McLaury B.S., Shirazi S.A., Rybicki E.F. Comparison of Computed and Measured Particle Velocities and Erosion in Water and Air Flows, *Wear*, 2007, vol. 263, no. 1-6, pp. 330-338.
15. Arabnejad H., Development of Erosion Equations for Solid Particle and Liquid Droplet Impact, Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of Tulsa, 2015, 161 p.
16. Finnie I., McFadden D.H., On the Velocity Dependence of the Erosion of Ductile Metals by Solid Particles at Low Angles of Incidence, *Wear*, 1978, vol. 48, pp. 181-190.
17. Mansouri A.A. combined CFD-experimental method for developing an erosion equation for both gas-sand and liquid-sand flows. Department of Mechanical Engineering, The University of Tulsa, 2016, 217 p.
18. Zhang R., Liu H. Numerical Simulation of Solid Particle Erosion in a 90 Degree Bend for Gas Flow. Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 6A: Pipeline and Riser Technology. San Francisco, California, USA. June 8–13, 2014. V06AT04A044. ASME.
19. Taherkhani B., Anaraki A.P., Kadkhodapour J. *et al.* Erosion Due to Solid Particle Impact on the Turbine Blade: Experiment and Simulation. *J Fail. Anal. and Preven.* 19, 1739–1744 (2019).
20. 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. *Surf. Coat. Technol.*, 372 (2019), pp. 173-189.
21. Wu B., Wu F., Li J. 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), Xi'an, China, 2018, June 24–25, pp. 273–276.
22. Petrov Y.V., Bragov A.M., Kazarinov N.A. *et al.* Experimental and numerical analysis of the high-speed deformation and erosion damage of the titanium alloy VT-6. *Phys. Solid State* 59, 93–97 (2017).
23. Bulyakkulov M.M. Vzaimodeystviye vysokoskorostnogo geterogennogo potoka s elementami konstruktssii LA, Diss. Kand. tekhn. nauk, Moscow, 2017, 156 c.
24. Marchkova Yu.A. Analiz mekhanizmov erozii v gazoohladitele PGU-VTSG, Energo- i resursosberezhniye. Energoobespecheniye. Netraditsionnyye i vozobnovlyayemyye istochniki energii: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, posvyashchennoy pamyati professora Danilova N.I. (1945–2015) – Danilovskikh chteniy (Yekaterinburg, 11–15 dekabrya 2017 g.), Yekaterinburg, 2017, pp. 270-273.
25. Maslennikov G.Ye. CFD modelirovaniye iznosa letuchey zoloy konvektivnogo gazoohladitelya PGU-VTSG skhemy Shell. Fizika. Tekhnologii. Innovatsii: sbornik materialov VI Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 70-letiyu osnovaniya Fiziko-tekhnologicheskogo instituta UrFU (Yekaterinburg, 20–24 maya 2019 g.), Yekaterinburg, 2019. pp. 163-175.
26. Gumerov A.V., Akmaletdinov R.G. Modelirovaniye erozionnogo iznosa lopatki kompressora // Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye, 2011, vol. 10, no. 3-2, pp. 233-239.
27. Gurin V.G. Issledovaniye protsessov razrusheniya pri vysokoskorostnoy erozii materialov, Vyp. rabota spets., S.-Peterburg, 2017. https://dspace.spbu.ru/bitstream/11701/10536/1/tekst_diploma.pdf (accessed 02 January 2021).
28. Dong Y., Qiao Z., Si F., Zhang B., Yu C., Jiang X. A Novel Method for the Prediction of Erosion Evolution Process Based on Dynamic Mesh and Its Applications. *Catalysts* 2018. no. 8, pp. 432.
29. Dragan V., Grad D. An Iterative Method for Estimating Airfoil Deformation due to Solid Particle Erosion, *INCAS Bulletin*, vol. 6, Special iss. 1/ 2014, pp. 51-58.

30. Campos-Amezcuа A., Mazur Z., Gallegos-Muñoz A., Romero-Colmenero A., Riesco-Ávila J. Manuel, Medina-Flores J. Martín, 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.

31. Ryabov A.A., Kudryavtsev A.Yu., Voronkov O.V., Men'shikov S.N., Mel'nikov I.V., Kharitonov A.N., Kiselev M.N., Arkhipov Yu.A. Chislennyye issledovaniya erozii i prochnosti elementov gazoprovodov. Problemy prochnosti i plastichnosti, 2015, vol. 77, no. 3, pp. 253-265.

Об авторах

Строкач Евгений Александрович (Москва, Россия) – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Ракетные двигатели» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4, e-mail: evgenij.strokatsch@mai.ru).

Кожевников Глеб Денисович (Москва, Россия) – студент кафедры «Технология производства двигателей летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4, e-mail: zg.kozhevnikov@gmail.com).

Пожидаев Алексей Алексеевич (Москва, Россия) – студент кафедры «Технология производства двигателей летательных аппаратов» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (125993, г. Москва, Волоколамское ш., д. 4, e-mail: leksey954@gmail.com).

About the authors

Evgeny A. Strokach (Moscow, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Senior Lecture of Rocket Engine Department, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4, Volokolamskoe sh., Moscow, 125993, e-mail: evgenij.strokatsch@mai.ru).

Gleb D. Kozhevnikov (Moscow, Russian Federation) – student of Manufacturing technology of aircraft engines Department, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4, Volokolamskoe sh., Moscow, 125993, e-mail: zg.kozhevnikov@gmail.com).

Aleksey A. Pozhidaev (Moscow, Russian Federation) – student of Manufacturing technology of aircraft engines Department, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4, Volokolamskoe sh., Moscow, 125993, e-mail: leksey954@gmail.com).

Получено 18.10.2021

Принято 04.12.2021

Опубликовано 28.01.2022