

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.45.037

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА
С СЕПАРАЦИЕЙ АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ© 2025 г. С. С. Попов¹, И. Н. Кравченко^{2,*}¹Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. Героя Советского
Союза А. К. Серова, Краснодар, Россия²Институт машиноведения им. А. А. Благодравова РАН, Москва, Россия
*e-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.12.2024 г.

После доработки 26.01.2025 г.

Принята к публикации 20.02.2025 г.

В статье рассматриваются вопросы эксплуатации осевых компрессоров газотурбинных двигателей в агрессивных климатогеографических условиях, а также изучается характерный для этих условий эрозионный износ, приводящий к ухудшению характеристик всего двигателя в целом. Обоснована необходимость использования нового способа предотвращения эрозионного износа осевых компрессоров, основанного на сепарации абразивных частиц на основе базовых уравнений Навье—Стокса, используемых в вычислительной гидродинамике с моделью турбулентности $k-\omega$ SST (модель Ментера), дополненной дискретно-фазовой моделью движения. Представлены результаты моделирования основных газодинамических характеристик осевого компрессора с сепарацией абразивных частиц, позволяющие определить влияние этой сепарации на характеристики осевых компрессоров.

Ключевые слова: абразивные частицы, моделирование, осевой компрессор, экспериментальная установка, эрозионный износ

DOI: 10.31857/S0235711925030107, **EDN:** GNCAWT

Осевые компрессоры (ОК) авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных наземных установок (ГТУ) имеют достаточно широкий спектр применения как в авиации, так и в промышленности. Условия эксплуатации ГТД и ГТУ зачастую подвержены негативным климатическим воздействиям окружающей среды, выражающимся в попадании в проточную часть двухфазного воздушного потока, содержащего абразивные частицы (песок, пыль, вулканический пепел, морская соль, различные органические соединения, аэропланктон и т. п.). При этом абразивные частицы оказывают наиболее сильное воздействие на компрессорный узел, вызывая эрозионный износ его конструктивных элементов, в большей степени рабочих лопаток, лопаток направляющего аппарата и уплотнительных колец радиальных зазоров. Это, естественно, приводит к снижению газодинамических характеристик компрессора, потере мощности и увеличению удельного расхода топлива двигателя в целом. Проблема эрозионного износа изучена достаточно широко и подробно отражена в работах [1–3], в которых описаны его механизм, причины возникновения в компрессорах и двигателях и последствия.

В настоящее время широко применяются различные способы защиты ОК от эрозионного износа: пылезащитные устройства инерционного и циклонного типа, панели, сетки, износостойкие покрытия, комплексная защита ОК [4–6] и т. п. Однако опыт эксплуатации показал, что они недостаточно эффективны, а ошибки в их эксплуатации могут привести лишь к ухудшению защиты. В связи с этим возникает необходимость поиска и разработки нового эффективного способа предотвращения эрозионного износа компрессоров ГТД и ГТУ.

Способ предотвращения эрозионного износа ОК. В статье предлагается использовать способ, основанный на применении технического решения [7], представляющего собой ОК с интегрированным в корпус пылеуловителем (сепаратором) инерционного типа, расположенным в районе средних ступеней (рис. 1).

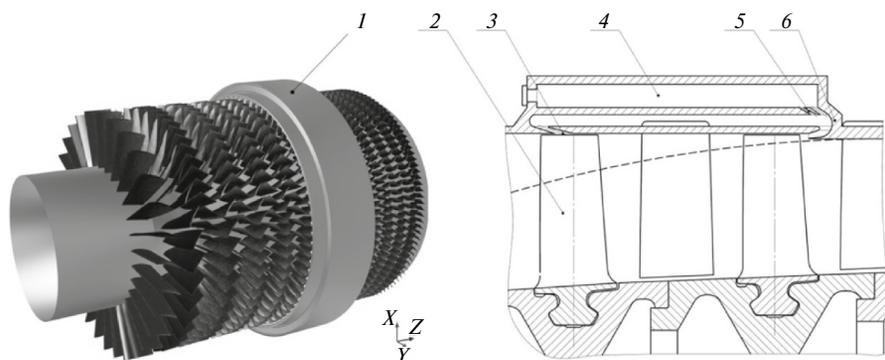


Рис. 1. Пылеуловитель инерционного типа.

Отделение абразивной фазы от основного потока в ОК осуществляется в пылеуловителе 1 через ряды перфорационных отверстий 5, расположенных в закругленной стенке 6, путем поворота потока в обратном направлении и последующего вдувания в область радиального зазора 3 рабочей лопатки 2 одной из предыдущих ступеней, тем самым возвращая очищенный поток в проточную часть ОК, при этом осаждение отсепарированных абразивных частиц осуществляется в ресивере-пылесборнике 4.

Подход к выбору места размещения сепаратора определяется рядом исследований [8, 9] в области механизма распределения частиц по проточной части лопаточных машин, которые показали смещение абразивных частиц к периферии корпуса компрессора по мере удаления от входа в проточную часть, где уже в начале средних ступеней формируется интенсивный пристеночный абразивный концентрат, приводящий к сильному износу концевой части профиля пера рабочих лопаток средних и особенно последних ступеней компрессора. Кроме того, как отмечено в работе [2], рабочие лопатки с малой толщиной профиля пера могут быть разрезаны абразивными частицами.

Проведенное численное моделирование подтверждает механизм износа (рис. 2а), а также распределение частиц по высоте проточной части (рис. 2в) на примере двенадцатиступенчатого ОК вертолетного ГТД. Профили распределения частиц (рис. 2в) свидетельствуют об их интенсификации на периферии корпуса исследуемого ОК по мере продвижения по проточной части уже в районе 4-й ступени, тем самым вызывая значительный износ концевой части пера рабочих лопаток (рис. 2б). Характер профиля (рис. 2в) позволяет также определить рациональную высоту входного канала пылеуловителя для максимального удаления абразивных частиц из ОК, которая составляет примерно 15% от высоты проточной части. Выбор размещения пылеуловителя в районе средних ступеней ОК обоснован проведенным моделированием.

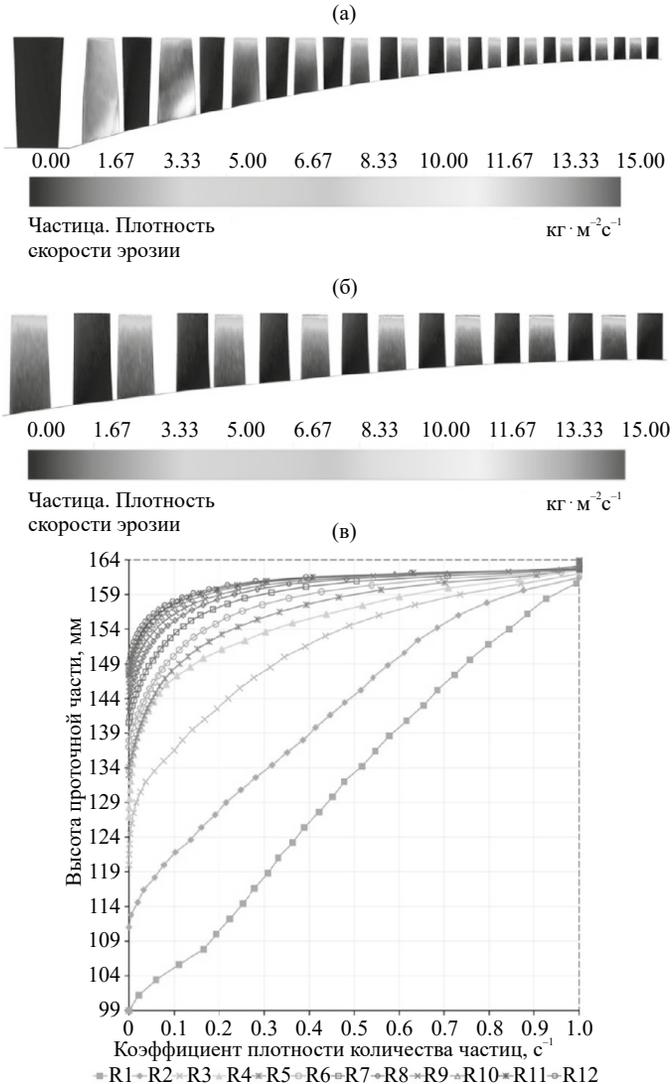


Рис. 2. Механизм эрозионного износа: (а) – эрозия по всей поверхности пера лопаток ОК вертолетного ГТД; (б) – эрозия с R5 по R12 ступени; (в) – профили распределения частиц по высоте проточной части с R1 по R12 ступени.

В связи с этим возникает необходимость в разработке математической модели ОК с сепарацией абразивных частиц на основе предложенного способа с целью исследования влияния сепарации на характеристики ОК.

Разработка математической модели ОК с сепарацией абразивных частиц. Теоретический метод исследования базируется на различных математических моделях (аналитических, имитационных, логических, графических и др.) [10]. Например, в работе [11] представлены основные способы применения математических моделей: аналитическое исследование процессов, исследование процессов численными методами с использованием современных вычислительных возможностей, моделирование процессов на вычислительных машинах непрерывного действия (аналоговых или моделирующих машинах) и специальных моделирующих установках (стендах),

моделирование процессов на цифровых вычислительных машинах (машинах дискретного действия).

В теории моделирования лопаточных машин известны и широко используются различные методы расчета характеристик ОК, в основе которых лежат математические модели, и их подразделяют в основном на одномерные, двумерные, трехмерные, суммарные, а также применяют методы имитационного моделирования.

Одномерные и двумерные методы расчета применяются в основном для определения требуемой геометрии лопаточных венцов и проточной части компрессора, по сути представляя собой решение обратной задачи. В этих методах отсутствует структура пространственного течения газового потока. Одномерный метод основан на обобщении характеристик экспериментально полученных решеток профилей ОК или его ступеней с последующим их суммированием для получения характеристики всего многоступенчатого компрессора. Двумерный метод основан на применении струй тока с кольцевыми поперечными сечениями, которые заменяют реальный поток газа и рассматриваются как течения в кольцевой струе на среднем радиусе через ступень или через весь венец ОК. Изменения параметров потока по радиусу лопаточных венцов определяется с помощью уравнения радиального равновесия. Суммарные методы основаны на обобщении большого числа характеристик многоступенчатых ОК с различными расчетными параметрами, полученными экспериментальным путем.

Кроме того, применяются различные методы имитационного моделирования осевых компрессоров. Так, в работе [12] авторами отмечено, что система имитационного моделирования представляет собой дальнейшее развитие одной или двух методик, т. е. перенос методик на ЭВМ, среди которых можно выделить известные программные комплексы, например ЦИАМ, ГРАД, DWIGwp, GasTurb, GSP, NPSS и др.

В настоящее время наибольшую актуальность получили трехмерные численные методы расчета газодинамики ОК, т. к. они являются наиболее информативными и точными. Так, в работе [13] отмечено, что наиболее информативным и достоверным является расчет пространственного нестационарного течения вязкого газа в межлопаточном канале для всех лопаточных венцов ОК на различных режимах работы с учетом осевых и радиальных зазоров. Трехмерные численные методы расчета называются пакетами вычислительной гидрогазодинамики, или CFD (Computational Fluid Dynamics), и реализованы в различных программных продуктах, но наиболее известны ANSYS, NUMECA, COMSOL, FLOWVISION, FlowER и др.

Математическая модель газодинамики ОК. В основе численного метода положена система интегрально-дифференциальных или дифференциальных уравнений, в том числе Навье–Стокса, в частных производных с граничными условиями, для решения которой необходимо описать ламинарный поток с помощью математической модели [14, 15].

Известно, что течение газа в лопаточной машине носит турбулентный характер, что обуславливает необходимость учета явлений нестационарности (флуктуаций и пульсаций) параметров газового потока в трехмерном поле течения (скорости, давления, температуры и т. д.). По этой причине уравнения Навье–Стокса заменяют уравнениями, осредненными по Рейнольдсу, где значения параметров газа определяются за короткий промежуток времени как средние и имеют вид

$$\begin{aligned} u_i &= \bar{u}_i + u'_i, \\ \varphi_i &= \bar{\varphi} + \varphi', \end{aligned} \quad (1)$$

где \bar{u}_i и u'_i – средняя во времени и пульсирующая (флуктуирующая) составляющие скорости (разложение Рейнольдса); φ – скалярная величина, обозначающая давление или переменные другого рода (u, ρ, p, T).

Тогда для несжимаемых потоков газа с учетом разложения Рейнольдса (1) система уравнений Навье–Стокса в декартовой тензорной форме принимает вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j) = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i u_j} + \delta_{ij} p - \tau_{ij,eff}) = 0, \quad i = 1, 2, 3; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_j E}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{\rho u_j h} - \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + \bar{u}_i \tau_{ij,eff} \right) = 0; \quad (4)$$

$$p = \rho RT, \quad (5)$$

где ρ – плотность жидкости или газа, кг/м³; $u_j = u_1, u_2, u_3$ – компоненты вектора скорости, м/с; $x_j = x_1, x_2, x_3$ – компоненты радиуса вектора; δ_{ij} – символ Кронекера; p – давление, МПа; E – полная внутренняя энергия, Дж/кг; h – энтальпия, Дж; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура, К; R – газовая постоянная; $\tau_{ij,eff}$ – эффективная вязкость, определяемая из выражения

$$\tau_{ij,eff} = \tau_{ij} - \overline{\rho u_i u_j} = (\mu_t + \mu) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij},$$

где τ_{ij} – тензор вязких напряжений, МПа; μ_t – коэффициент турбулентной вихревой вязкости; μ – молекулярная вязкость газа; k – турбулентная кинетическая энергия; $-\overline{\rho u_i u_j}$ и $\overline{\rho u_j h}$ – дополнительные эффекты турбулентности (турбулентное трение и энергия), которые выражаются через связь напряжений со средними градиентами скорости деформаций – подход Буссинеска [16] и разрешаются путем введения дополнительных уравнений модели турбулентности.

Таким образом, математические модели, положенные в основу трехмерного метода расчета, базируются на численном решении уравнения неразрывности (2), уравнений движения вязкого газа (импульса) (3) – осредненные по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS – Reynolds-averaged Navier–Stokes), уравнений полной энергии (4) и уравнений состояния “идеального” газа (5) совместно с уравнениями модели турбулентности и заданными граничными условиями позволяют в полной мере определить характер и параметры газодинамики в ОК. В этом случае важным преимуществом моделей, осредненных по Рейнольдсу, является то, что они практически идентичны исходной системе уравнений Навье–Стокса [17].

Выбор модели турбулентности. Математическая модель газодинамики ОК включает двухпараметрическую низкорейнольдсову модель SST (Shear-Stress Transport) переноса касательных напряжений Ментера [18], которая наиболее достоверно описывает турбулентный пограничный слой, возникающий в пристеночной области лопаточных венцов ОК. Модель является модификацией стандартной Standard k – ω -модели турбулентности, предложенной Уилкоксом [19] (k – турбулентная кинетическая энергия; ω – удельная скорость диссипации кинетической энергии) и имеет следующие особенности: 1) обеспечивает плавный переход от низкорейнольдсовой k – ω -модели в пристеночной области пограничного слоя к его внешней части высокорейнольдсовой k – ε -модели; 2) суммирует k – ω - и k – ε -модели путем введения функции смешивания (принимает значение единицы в пристеночной области – активирует стандартную k – ω -модель и ноль – вдали от поверхности – активирует преобразованную

k - ε -модель); 3) вводит в уравнение ω член производной затухающей перекрестной диффузии; 4) модифицирует уравнение турбулентной вязкости с целью учета эффектов переноса основного турбулентного напряжения сдвига, что позволяет наилучшим образом описать срыв потока с поверхности.

Представленные отличия k - ω -модели SST Менгера делают ее точной и надежной в области моделирования аэродинамики обтекания профилей, трансзвуковых течений, сопровождающихся ударными волнами, в случаях неблагоприятных градиентов давления и т. п., даже по сравнению с предлагаемой более новой Standard k - ω -моделью Уилкокса [20].

Так, согласно работе [21], SST k - ω -модель состоит из уравнений для кинетической турбулентной энергии k и удельной скорости ее диссипации ω , которые имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + Y_k + S_k + G_b,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega + Y_\omega + S_\omega + G_{\omega b},$$

где Γ_k и Γ_ω – эффективный коэффициент диффузии для k и ω соответственно; G_k – генерация кинетической энергии турбулентности k вследствие градиентов средней скорости; Y_k – диссипация кинетической энергии турбулентности k ; S_k и S_ω – параметры, определяемые пользователем; G_b и $G_{\omega b}$ – влияние плавучести на турбулентность (при моделировании не учитывалось), G_ω – генерация удельной скорости диссипации ω ; Y_ω – диссипация ω .

Объединение двух моделей k - ε и k - ω , на которых основана модель SST k - ω , согласно работе [18], основано на преобразовании стандартной k - ε -модели в уравнения, основанные на k и ω , что приводит к введению в уравнение переноса для ω члена перекрестной диффузии D_ω , который является составной частью выражения в Γ_ω и записывается как

$$D_\omega = 2(1 - F_1) \rho \frac{1}{\omega \sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j},$$

где F_1 – функция смешивания; $\sigma_{\omega,2}$ – константа, принимаемая равной 1.168.

Математическая модель динамики абразивных частиц в ОК. В вычислительной гидродинамике существует несколько подходов к моделированию двухфазных (многофазных) течений, однако наибольшее распространение получили эйлерово–эйлеровый и эйлерово–лагранжевый подходы [22, 23]. Их различия заключаются в соотношении объемных долей моделируемых фаз в потоке. Таким образом, если обе фазы находятся примерно в равных соотношениях, то математическая модель задается в эйлерово–эйлеровой постановке (системе отчета) – каждая фаза рассматривается как несущая среда – и решается системой уравнений Навье–Стокса. Если вторая фаза находится в малой или незначительной связи с основной фазой, то математическая модель задается в эйлерово–лагранжевой формулировке (системе отчета) – основная фаза решается системой уравнений Навье–Стокса, а вторая фаза определяется как движение материальных точек с массой в поле течения основной фазы (второй закон Ньютона).

Для определения траектории движения абразивных частиц в ОК выбрана математическая модель, использующая эйлерово–лагранжевый подход, которая записывается как сумма баланса сил, действующих на частицу в потоке

$$m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = \sum \vec{F},$$

где m_p – масса частицы, кг; \vec{U}_p – скорость частицы, м/с; \vec{F} – силы, действующие на частицу, Н; $F_D = m_p(\vec{U} - \vec{U}_p) / \tau_r$ – сила сопротивления частицы в потоке, Н; τ_r – время релаксации частицы – количественная характеристика процесса установления термодинамического равновесия в какой-либо физической системе, состоящей из большого числа частиц:

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_D \text{Re}},$$

где ρ_p – плотность частицы, кг/м³; d_p – диаметр частицы, мм; Re – число Рейнольдса; C_D – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы, который согласно подходу, представленному в работе [24], определяется как

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

где $\text{Re}_{sph} = \frac{\rho d_p |\vec{U}_p - \vec{U}|}{\mu}$ – относительное число Рейнольдса для частицы; $b_1 - b_4$ – по-

линомиальные коэффициенты, определенные сложением наименьших квадратов ошибок измерений и зависящие от коэффициента формы частицы (сферичности) $\psi = s/S$; s – площадь сферы равной по объему несферической частицы; S – реальная площадь поверхности частицы.

Из выражения (6) видно, что $C_D = f(\text{Re}_{sph}, \psi)$ – важный показатель, которым нельзя пренебрегать при задании исходных данных для расчета модели, чтобы получить адекватное описание траектории движения частиц.

$F_B = m_p \vec{g}(\rho_p - \rho) / \rho_p$ – выталкивающая сила, или сила плавучести, которая возникает под действием силы тяжести – эквивалентна весу объема газа, вытесненному частицей (здесь \vec{g} – ускорение свободного падения, м/с²; ρ – плотность газа, кг/м³).

$F_R = m_p (-2\Omega U_p - \Omega \Omega r_p)$ – суперпозиция сил Кориолиса и центробежных сил, возникающих во вращающихся системах отсчета (компрессора, турбины, насосы и т. п.), здесь Ω – угловая скорость вращающейся системы отсчета, рад/с; r_p – радиус вектора частицы, м.

$F_{RL} = \frac{1}{2} A_p C_{RL} \rho_f |\vec{V}| / |\vec{\Omega}| (\vec{V} \cdot \vec{\Omega})$ – подъемная сила Магнуса, вызванная перепадом давления вокруг поверхности частицы вследствие ее вращения (здесь A_p – проекция площади поверхности частицы; C_{RL} – коэффициент подъемной силы вследствие вращения; \vec{V} – скорость частиц относительно газа, м/с; $\vec{\Omega}$ – угловая скорость вращения частицы относительно газа, рад/с).

Основная задача – это расчет газодинамических характеристик ОК с сепарацией абразивных частиц и установление их зависимостей, которая сводится к определению степени повышения давления $\pi_{\text{к.сеп}}^*$, степени повышения температуры $\tau_{\text{к.сеп}}^*$, коэффициента полезного действия (КПД) $\eta_{\text{к.сеп}}^*$, расхода воздуха через ОК $G_{\text{в.сеп}}$ при посто-

янных оборотах $n = \text{const}$ на различных режимах работы ОК и установлении зависимостей $\pi_{\text{к.сеп}}^*, \eta_{\text{к.сеп}}^* = f(G_{\text{в.сеп}}, n)$.

Определение эффективности очистки пылеуловителя $\eta_{\text{сеп}}$ зависит от его геометрических параметров, таких как: высота входного канала $h_{\text{сеп}}$, кривизна закругленной стенки $R_{\text{ст.сеп}}$, количество рядов $N_{\text{ряд}}$ и отверстий в них $n_{\text{отв}}$, диаметра отверстий $d_{\text{отв}}$, т. е. $\eta_{\text{сеп}} = f(h_{\text{сеп}}, R_{\text{ст.сеп}}, N_{\text{ряд}}, n_{\text{отв}}, d_{\text{отв}})$, а также кинематических и газодинамических параметров (компоненты скорости, давления и т. п.) на входе в него.

Граничные условия задаются с учетом выбранной модели турбулентности и основных газодинамических параметров воздуха, полученных экспериментально в ходе исследования физической либо натурной модели. Валидация результатов численного моделирования с экспериментальными данными не должна превышать значение погрешности более 5%, в противном случае возникает необходимость в уточнении задаваемых в модели исходных данных, граничных условий, настройки решателя. Таким образом, геометрические, газодинамические и кинематические параметры пылеуловителя совместно с газодинамикой двухфазного потока, содержащего абразивные частицы с задаваемыми их физико-химическими свойствами, являются новыми граничными условиями (входными данными) разработанной математической модели ОК с сепарацией абразивных частиц, схема которой представлена на рис. 3.

Реализацию модели осуществляли в программном модуле вычислительной гидрогазодинамики CFX программного комплекса ANSYS [16, 25]. В качестве объекта моделирования выбран двенадцатиступенчатый ОК вертолетного ГТД ВК-2500, экспериментальные характеристики которого с координатами профилей лопаток и проточной части для синтеза 3D-геометрии и описания меридиональных обводов лопаточных венцов модели предоставлены ОДК “Климов”.

Интеграция пылеуловителя в домен вращающегося венца за рабочей лопаткой 6-й ступени расчетной модели ОК потребовала создания дополнительных сеточных GGI (General Grid Interface – основной сеточный интерфейс) интерфейсов, которые позволяют вычислять на неконформных областях сопряжения границ с разной плотностью расчетных сеток (рис. 4).

Исходные данные для расчета: вид анализа – стационарная постановка; тип машины – ОК; основная несущая фаза – воздух, “идеальный” газ; опорное давление принималось равным нулю; режим работы ОК – $19\,500 \text{ мин}^{-1}$, что соответствует приведенной частоте вращения $n = 1$.

В качестве граничных условий принималось полное давление и температура на входе и статическое давление на выходе: давление на входе (P-Total) 101.302 кПа; давление на выходе (P-Static) 200 кПа и задавалось методом подбора статического давления снизу вверх с постепенным повышением шага; полная температура на входе 288.1 К; направление потока на входе – по нормали к поверхности входа.

Расчет модели выполнялся с высокой схемой адвекции и вычисления турбулентности (High Resolution), применением неявного нестационарного метода и автоматическим шагом по времени – $1/\omega$, где ω – угловая скорость вращения ротора выраженная, рад/с. Окружное осреднение потока через интерфейсы доменов модели задавалось без учета неравномерности и нестационарности течения – Stage (Mixing-Plane), а также учитывалась осевая симметрия с условием периодичности границ в окружном направлении.

Определение основных газодинамических зависимостей в ОК осуществлялось на языке CEL (CFX Expression Language) в модуле CFX-Pre, имеющем собственный синтаксис записи выражений. Далее с использованием известных формул определения характеристик компрессоров [13, 26] уточнены следующие выражения:

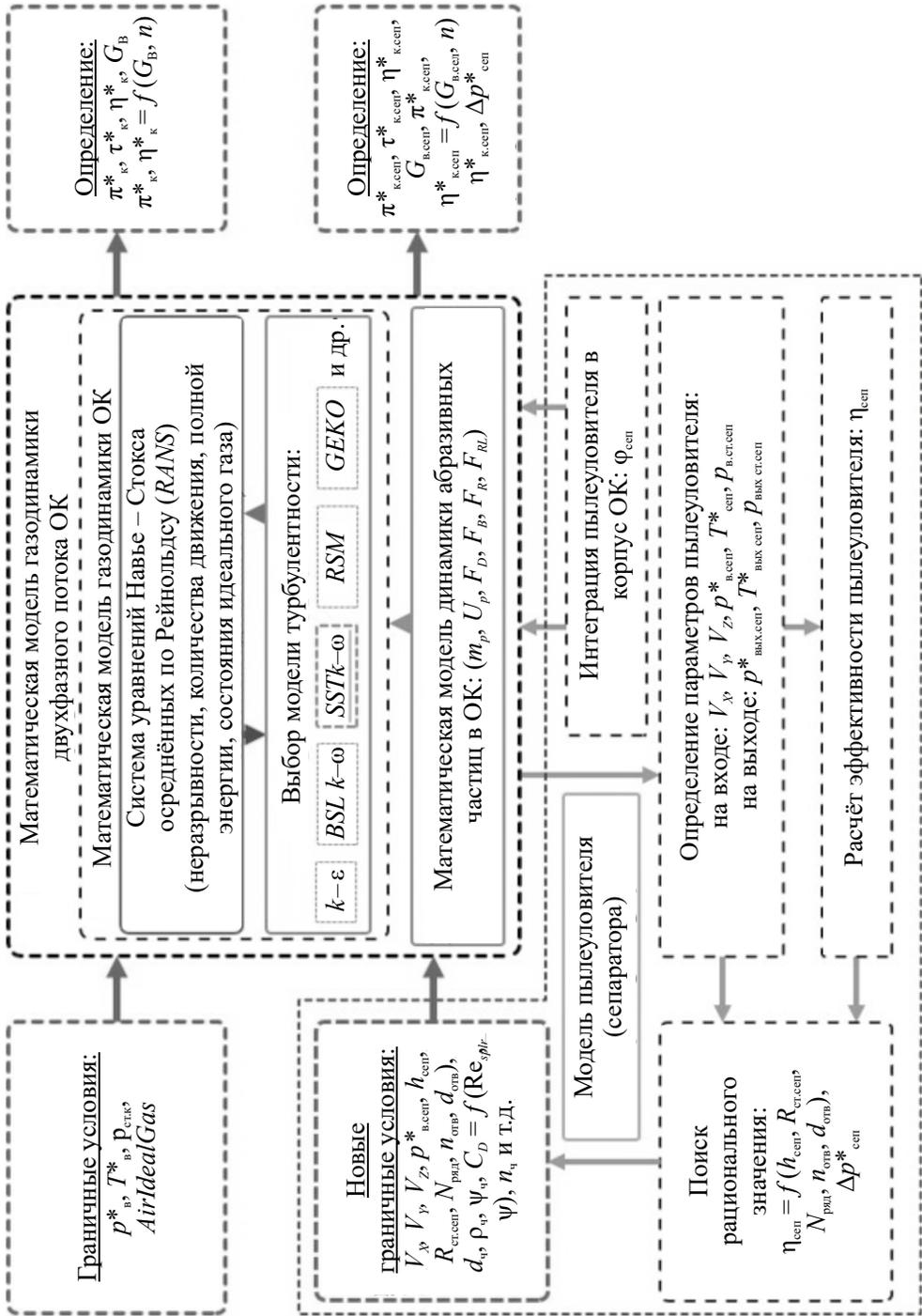


Рис. 3. Схема математической модели ОК с сепарацией абразивных частиц.

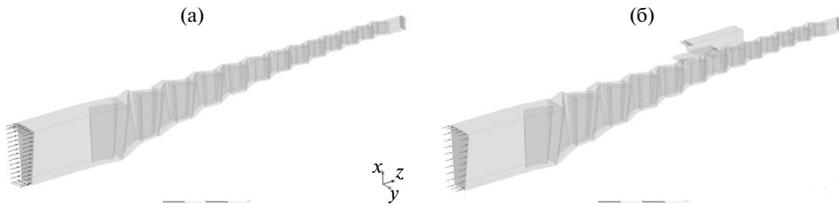


Рис. 4. Расчетная модель ОК в CFX-Pre: (а) – исходная; (б) – с пылеуловителем.

$$G_{в.сеп}, MassFlowInlet (Outlet) = massFlow (...) @Inlet (Outlet)Z(-Z);$$

$$\pi_{к.сеп}^* = \frac{P_{к.сеп}^*}{P_B}, PRatio = massFlowAve (...) @Outlet / massFlowAve (...) @Inlet;$$

$$\tau_{к.сеп}^* = \frac{T_{к.сеп}^*}{T_B}, TRatio = massFlowAve (...) @Outlet / massFlowAve (...) @Inlet;$$

$$\eta_{к.сеп}^* = \frac{\left(\pi_{к.сеп}^*\right)^{k-1} - 1}{\tau_{к.сеп}^* - 1}, Efficiency = (PRatio^{0.2857} - 1) / (TRatio - 1).$$

В полученных выражениях вместо многоточия задается искомая величина (давление, температура и т. п.) с указанием двух- или трехмерной локации на расчетной модели (p – давление, Pa, T – температура, K, k – показатель адиабаты, z – количество лопаток на венце).

Критериями сходимости расчета принимались установившиеся значения $\pi_{к.сеп}^*$, $\tau_{к.сеп}^*$, $\eta_{к.сеп}^*$ и дисбаланса расходов $G_{в.сеп}$. Таким образом, после 150–250 итераций величины принимали установившиеся значения, а после 300 итераций расчет завершался их регистрацией в автоматическом режиме. Расчет проводился по разработанной авторами методике [27]. Полученные результаты представлены на рис. 5.

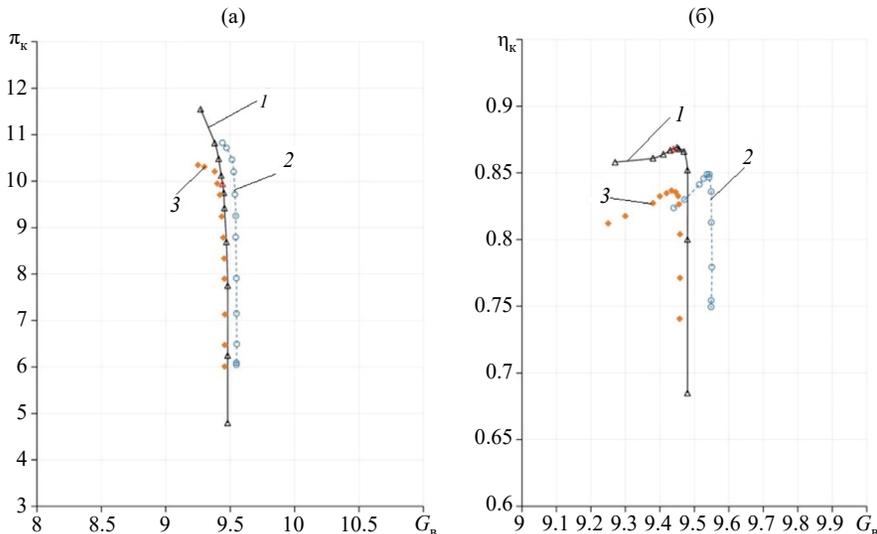


Рис. 5. Полученные газодинамические характеристики ОК без пылеуловителя (а) и с интегрированным пылеуловителем (б): 1 – экспериментальные характеристики ВК 2500; 2 – численным методом; 3 – численным методом с пылеуловителем.

Погрешность моделирования δ газодинамических характеристик, полученных численным методом на основе экспериментальных данных, оценивалась с использованием выражений

$$\delta_{\pi} = \frac{|\pi_{\text{мод}} - \pi_{\text{эксп}}|}{\pi_{\text{эксп}}} \cdot 100\%;$$

$$\delta_{\eta} = \frac{|\eta_{\text{мод}} - \eta_{\text{эксп}}|}{\eta_{\text{эксп}}} \cdot 100\%,$$

где $\pi_{\text{мод}}$, $\eta_{\text{мод}}$ — степень повышения давления и КПД, полученные в результате моделирования; $\pi_{\text{эксп}}$, $\eta_{\text{эксп}}$ — те же показатели экспериментальных данных.

Результаты анализа полученных данных показывают, что погрешность составила не более 1.5%. Это полностью удовлетворяет поставленной задаче моделирования численным методом.

Заключение. 1. Разработанная математическая модель ОК с сепарацией абразивных частиц позволяет проводить исследования в области определения степени влияния сепарации на основные газодинамические характеристики ОК и ГТД в целом. **2.** Полученные результаты показывают: отсутствие деградации характеристик ОК, значения степени повышения давления не меняют своего значения по всей напорной кривой, наблюдается незначительное смещение значений расхода воздуха в сторону его уменьшения на 1.23%, что свидетельствует о наличии циркуляционного процесса в пылеуловителе; возможность применения математической модели, составляющей основу научно-методического аппарата в области оценки влияния сепарации абразивных частиц в ОК на их характеристики; проведение дальнейших исследований аналогичных типов пылеуловителей непосредственно в авиационных ГТД с использованием моделей эрозии с целью обоснования способа предотвращения износа.

Финансирование. Работа финансировалась за счет средств федерального бюджета в рамках FFGU-2024-0024 по результатам исследований, выполненных с использованием оборудования центра коллективного пользования ИМАШ РАН.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шальман Ю. И. Износ и изменение параметров осевой и центробежной ступеней при работе на запыленном воздухе // Сборник статей “Вертолетные газотурбинные двигатели”. М.: Машиностроение, 1966. С. 163–199.
2. Перельман Р. Г. Эрозионная прочность деталей двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1980. 245 с.
3. Григорьев В. А., Зрелов В. А., Игнаткин Ю. М. и др. Вертолетные газотурбинные двигатели / под общ. ред. В. А. Григорьева и Б. А. Пономарева. М.: Машиностроение, 2007. 491 с.
4. Еникеев Г. Г. Комплексная защита газотурбинного двигателя, эксплуатирующегося в запыленной атмосфере и морской среде // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2013. Т. 17. № 3(56). С. 41–48.
5. Королев С. Д., Демьянюк С. А., Меркушкин Е. В. РФ Патент 2638692. Пылезащитное устройство двигателя (варианты), 2017.
6. Ситницкий Ю. Я., Ситницкий А. Ю. РФ Патент 2742697. Воздухозаборное устройство для вертолетного газотурбинного двигателя, удаляющее из воздуха частицы песка и пыли, 2021.
7. Попов С. С., Черкасов А. Н., Беловодский Ю. П. РФ Патент 2801253. Осевой компрессор, 2023.
8. Grant G., Tabakoff W. Erosion Prediction in Turbomachinery Resulting from Environmental Solid Particles // Journal of Aircraft. 1975. V. 12(5). P. 471–478.

9. *Кривошеев И. А., Струговец С. А., Камаева Р. Ф.* Анализ влияния частиц пыли на параметры ступеней осевого компрессора // Вестник воронежского государственного технического университета. 2011. № 3(26). Т. 1. С. 50–55.
10. *Советов Б. Я., Яковлев С. А.* Моделирование систем: учебник. 7-е изд. М.: Юрайт, 2021. 343 с.
11. *Бусленко Н. П.* Моделирование сложных систем. 2-е изд., перераб. М.: Наука, 1978. 399 с.
12. *Потапов В. А., Санько А. А.* Моделирование характеристик многоступенчатого осевого компрессора турбовального газотурбинного двигателя с учетом нелинейности эрозионного износа его лопаток // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2020. Т. 23. № 5. С. 39–53.
<https://doi.org/10.26467/2079-0619-2020-23-5-39-53>
13. *Федоров Р. М.* Характеристики осевых компрессоров: монография. Воронеж: Научная книга, 2015. 220 с.
14. *Молчанов А. М.* Математическое моделирование задач газодинамики и тепломассообмена. М.: МАИ, 2013. 206 с.
15. *Буров А. С., Глебов Г. А.* Численное и экспериментальное исследование двухфазного закрученного течения в прямоточном циклоне. Часть II // Труды Академэнерго. 2016. № 1. С. 7–19.
16. *Thorat G. V., Mangate L. D.* Comparison of Ansys CFX and Ansys Fluent solver for compressor assembly // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. 2018. V. 5 (7). P. 315–318.
17. *Молчанов А. М.* Термофизика и динамика жидкости и газа. Специальные главы. М., 2019. 152 с.
<https://doi.org/10.31219/osf.io/ydp9t>
18. *Menter F. R.* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. 1994. V. 32 (8). P. 1598–1605.
<https://doi.org/10.2514/3.12149>
19. *Wilcox D. C.* Turbulence Modeling for CFD. Inc. La Canada, California: DCW Industries, 2006. 515 p.
20. *Wilcox D. C.* Formulation of the k-w Turbulence Model Revisited // AIAA Journal. 2008. V. 46 (11). P. 2823–2838.
<https://doi.org/10.2514/1.36541>
21. *Юн А. А.* Моделирование турбулентных течений. 2-е изд., испр. и доп. М.: Либроком, 2010. 349 с.
22. *Нугматулин Р. И.* Динамика многофазных сред. Ч. I. М.: Наука, 1987. 464 с.
23. *Liu Q., Luo Z.-H.* CFD-VOF-DPM simulations of bubble rising and coalescence in low hold-up particle-liquid suspension systems // Powder Technology. 2018. V. 339. P. 459–469.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.041>
24. *Haider A., Levenspiel O.* Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Non-spherical Particles // Powder Technology. 1989. V. 58. P. 63–70.
[https://doi.org/10.1016/0032-5910\(89\)80008-7](https://doi.org/10.1016/0032-5910(89)80008-7)
25. *Янышев Д. С., Быков Л. В., Молчанов А. М.* Сеточные модели для решения инженерных теплофизических задач в среде ANSYS. М.: Ленанд, 2018. 264 с.
26. *Нечаев Ю. Н., Федоров Р. М., Котовский В. Н., Полев А. С.* Теория авиационных двигателей: Учебник. Ч. 1. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2005. 366 с.
27. *Черкасов А.Н., Попов С. С.* Методика оценивания влияния сепарации абразивных частиц в осевых компрессорах на характеристики газотурбинных двигателей // XLVIII Академические чтения по космонавтике. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2024. С. 218.