

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СЕПАРАЦИИ АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ В ОСЕВЫХ КОМПРЕССОРАХ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ: МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕПАРАЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

С.С. Попов¹

sergey_stv1983@bk.ru

А.Н. Черкасов²

gliden@inbox.ru

Д.С. Клепиков²

klepikov_denis@mail.ru

¹ Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков,
г. Краснодар, Российская Федерация

² ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Воронеж, Российская Федерация

Аннотация

Приведены методика оценивания влияния сепарации абразивных частиц в осевых компрессорах на характеристики авиационных газотурбинных двигателей и полученные расчетным путем характеристики экспериментальной установки осевого компрессора с интегрированным сепаратором абразивных частиц. Показано влияние сепаратора на расход, степень повышения давления и коэффициент полезного действия. Получены новые граничные условия для модели сепаратора. Расчетная сетка области течения в сепараторе преобразована в высокопроизводительную полиэдрическую сетку, применяемую в модуле Fluent программного комплекса ANSYS, с сеточной сходимостью по критерию эффективности очистки сепаратором. Для расчетов принята модель турбулентности из рассмотренных основных моделей, осредненных по Рейнольдсу. Рассмотрены подходы к моделированию движения дискретной фазы, реализованные в пакетах вычислительной гидродинамики. На основе выбранной дискретно-фазовой модели приведено ее математическое описание и численное моделирование двухфазного течения в сепараторе. Получены и проанализированы результаты моделирования полей давления, скорости, трекинга частиц, а также определена эффективность очистки сепаратором. Заданы дальнейшие направления в исследовании влияния сепарации абразивных частиц в осевых компрессорах на характеристики газотурбинных двигателей

Ключевые слова

Компрессор, газотурбинный двигатель, сепаратор, установка, CAD, ANSYS, CFD, Fluent

Поступила 11.03.2024

Принята 14.05.2024

© Автор(ы), 2025

Введение. По результатам численного моделирования газодинамики однофазного потока экспериментальной установки одноступенчатого осевого компрессора (ОК) на всех режимах работы определены основные газодинамические характеристики [1]: степени повышения давления $\pi_{ст}^*$ и температуры $\tau_{ст}^*$, коэффициент полезного действия $\eta_{ст}^*$ и расход воздуха G_B .

Учитывая результаты проведенных исследований, на следующих этапах методики оценивания влияния сепарации абразивных частиц в ОК на характеристики авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) предполагается:

- интегрировать разработанный сепаратор [2] в состав узла экспериментальной установки ОК;
- определить новые граничные условия (составляющие скоростей V_X, V_Y, V_Z , полное и статическое давления на входе, статическое давление на выходе из сепаратора);
- определить эффективность η очистки сепаратором ОК от абразивных частиц, перепад давления $\Delta P_{сеп}$ на входе и выходе из сепаратора, расход воздуха $G_{B,сеп}$, отобранного сепаратором;
- выполнить верификацию модели сеточной сходимостью с анализом моделей турбулентности;
- исследовать влияние сепарации абразивных частиц на характеристики экспериментальной установки ОК с интегрированным сепаратором, сопоставить результаты с характеристиками установки без сепаратора;
- исследовать влияние сепарации абразивных частиц в ОК на характеристики авиационного ГТД с интегрированным сепаратором в составе компрессорного узла.

Определение характеристик экспериментальной установки ОК с интегрированным сепаратором. Для определения влияния сепаратора на характеристики экспериментальной установки ОК синтезирована геометрическая 3D-модель и сгенерирована расчетная сетка домена потока в сепараторе. В местах интеграции сепаратора на домене вращающегося венца расчетной модели экспериментальной установки ОК созданы дополнительные сеточные интерфейсы GGI (General Grid Interface, основной сеточный интерфейс), которые позволяют проводить вычисления на неконформных областях сопряжения границ с разной плотностью расчетных сеток (рис. 1).

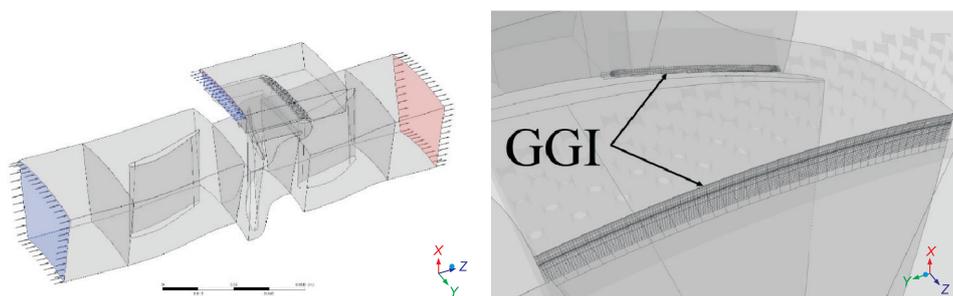


Рис. 1. Интеграция сепаратора с сеточным интерфейсом GGI

С принятыми исходными данными и граничными условиями в ANSYS CFX по подходам [3, 4] определения основных газодинамических характеристик ОК проводился расчет экспериментальной установки ОК с интегрированным сепаратором абразивных частиц. По результатам расчета экспериментальной установки ОК с сепаратором и без сепаратора абразивных частиц при $n = 8070 \text{ мин}^{-1}$ зависимости параметров $\pi_{\text{ст}}^*$, $\eta_{\text{ст}}^* = f(G_{\text{в}}, n)$ от расхода воздуха принимают вид, приведенный на рис. 2.

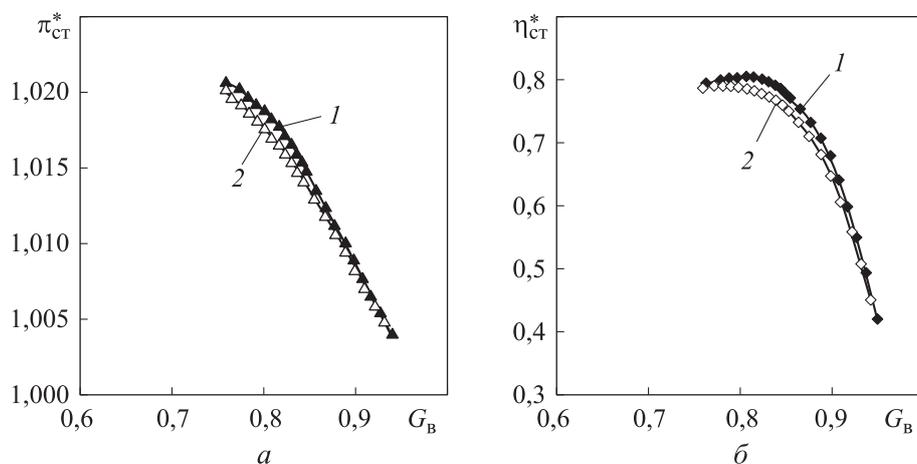


Рис. 2. Зависимости $\pi_{\text{ст}}^*$, $\eta_{\text{ст}}^* = f(G_{\text{в}}, n)$ (а, б) экспериментальной установки ОК с сепаратором (1) и без сепаратора (2) абразивных частиц при $n = 8070 \text{ мин}^{-1}$

В постобработке результатов CFD-Post посредством калькулятора функций для определения переменных рассчитывали значения составляющих (треугольника) скоростей V_X, V_Y, V_Z , полного и статического давлений на входе и выходе из сепаратора для задания в качестве новых

граничных условий при расчете сепаратора на эффективность очистки η от абразивных частиц.

Моделирование сепаратора. Как следует из [5–7], для расчета многофазных течений широкое применение в настоящее время получил CFD-модуль Fluent программного комплекса ANSYS, который включает в себя различные подходы к моделированию дискретной фазы (DPM, DDPM, VOF, mixture и др.). Для исследования эффективности очистки сепаратором расчет газодинамики двухфазного потока и трекинга абразивных частиц проводился в модуле Fluent [8].

Расчетная сетка сепаратора преобразована в модуле Fluent и состоит из 290 тыс. полиэдрических элементов с 1,7 млн узлов. Из-за сложной пространственной геометрии измельчение сетки проводилось в местах поворота потока, перфорационных отверстий сепарации и вдува (размер ячеек $\sim 0,1$ мм). В пристеночных местах пограничного слоя призмы (15 слоев) суммарный размер ячеек пограничного слоя $\sim 0,01$ мм. В остальной дискретизированной пространственной области домена потока размер ячеек равен 1 мм (рис. 3, а). Преимуществом расчетов на полиэдрической сетке является большее число узлов на элемент по сравнению с тетра- и гексаэдрическими сетками [9].

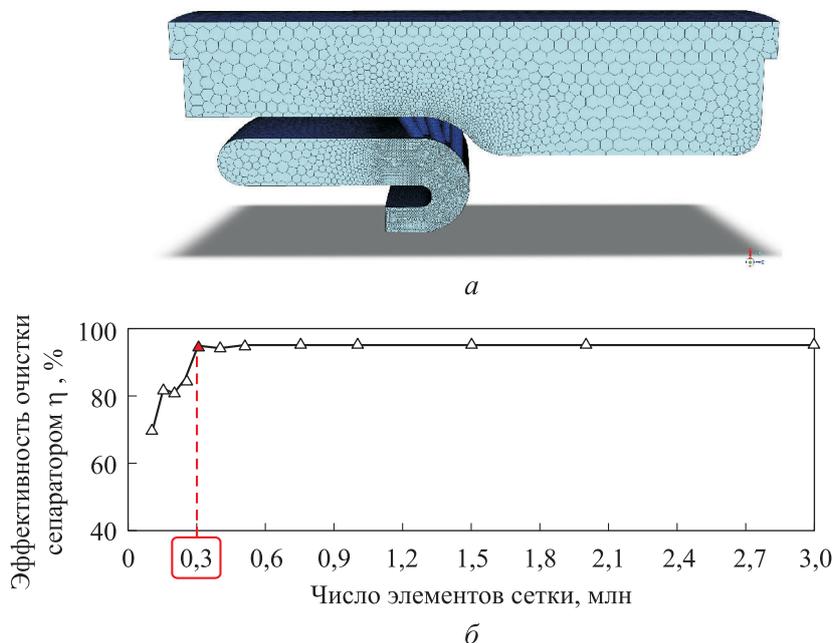


Рис. 3. Расчетная полиэдрическая сетка в модуле Fluent (а) и сеточная сходимость по эффективности очистки сепаратором в зависимости от числа элементов сетки (б)

Для получения точных результатов моделирования выполнены расчеты сепаратора при различной плотности расчетной сетки в целях верификации расчетной модели сеточной сходимостью (рис. 3, б). В качестве критерия, удовлетворяющего числу ячеек на расчетный домен, принята эффективность η очистки сепаратором, рассчитанная по формулам [10, 11]:

$$\eta = \frac{n_0 - n_1}{n_0} \cdot 100 \% \text{ или } \eta = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где n_0 (m_0) и n_1 (m_1) — число частиц или треков (масса частиц) на входе и выходе сепаратора.

Таким образом, прекращение изменений результата эффективности η очистки сепаратором достигалось при значении числа ячеек ~ 300 тыс. на расчетный домен (см. рис. 3, б). В целях обеспечения достаточной точности определения эффективности η очистки сепаратором и меньшей требовательности к вычислительным мощностям, в дальнейших расчетах модели принимали сетку размерностью 300 тыс. ячеек.

При выборе основной модели турбулентности [12, 13] из осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса (RANS, Reynolds-Averaged Navier — Stokes) проведены расчеты газодинамики по полному давлению в проточной части сепаратора по различным RANS-моделям (рис. 4).

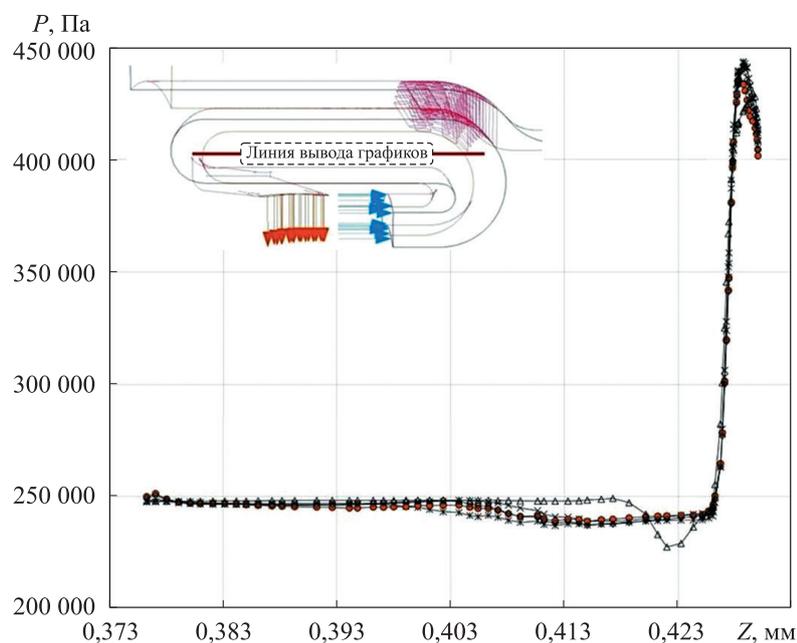


Рис. 4. Полное давление в проточной части сепаратора по RANS-моделям:

× — Realizable $k-\varepsilon$; * — RNG $k-\varepsilon$; • — SST $k-\omega$; ◊ — Transition SST;
◄ — RSM (Stress Omega)

Все модели турбулентности показали одинаковые значения полного давления по проточной части, погрешности на уровне численного метода незначительны, поэтому в расчетах принята низкорейнольдсовая SST (Shear-Stress Transport) модель переноса сдвиговых напряжений Ментера [14], как и при расчете экспериментальной установки ОК.

В CFD-модуле существует два основных подхода для численного расчета многофазных течений: эйлерово-эйлеровый и эйлерово-лагранжевый [13, 15]. Суть подходов заключается в особенностях расчета для различных соотношений объемных долей фаз в потоке. Если наличие обеих фаз существенно либо они приблизительно в равных объемных долях, то математическую модель задают, применяя эйлерово-эйлеровый подход, где каждая фаза рассматривается как сплошная несущая среда, рассчитываемая уравнениями Навье — Стокса. Если объемная доля второй фазы незначительна относительно основной несущей фазы, то математическую модель задают, применяя эйлерово-лагранжевый подход, где основная фаза, являясь сплошной средой, решается уравнениями Навье — Стокса, а движение второй фазы (частиц) моделируется, согласно второму закону Ньютона, как движение материальных точек, имеющих массу, по траекториям в расчетном поле течения основной фазы.

В качестве математической модели для расчета двухфазного потока выбрана дискретно-фазовая модель (DPM — Discrete Phase Model), использующая эйлерово-лагранжевый подход с учетом двухстороннего межфазного воздействия частиц на поток и воздействия потока на частицы.

Модель движения частиц дискретной фазы. Модель движения частиц рассчитывается как определение траектории частиц (жидких или твердых) дискретной фазы путем интегрирования баланса сил на частицу, которая записывается в лагранжевой системе отсчета [16, 17]. Этот баланс сил приравнивает инерцию частицы к силам, действующим на частицу:

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}.$$

Здесь m_p и \vec{u}_p — масса и скорость частицы; \vec{u} — скорость потока основной фазы; $m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r}$ — сила аэродинамического сопротивления; $m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$ — сила плавучести (или выталкивающая сила), равная

массе объема жидкости/газа, вытесненного частицей; \vec{g} — ускорение свободного падения; ρ_p — плотность частицы; ρ — плотность жидкости/газа; \vec{F} — дополнительные силы, действующие на частицу;

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

— время релаксации частицы (d_p — диаметр частицы; μ — молекулярная вязкость жидкости/газа);

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

— коэффициент лобового (аэродинамического) сопротивления частицы [18]; $b_1 - b_4$ — коэффициенты, представляющие собой полиномы, подобранные путем суммирования наименьших квадратов ошибок и зависящие от коэффициента формы частицы (коэффициента сферичности) [18] $\phi = s/S$ (s — площадь сферы, равной объему несферической частицы, S — реальная площадь поверхности частицы).

Коэффициент лобового (аэродинамического) сопротивления частицы C_D зависит от относительного числа Рейнольдса $Re = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu}$ и коэффициента формы ϕ частицы: $C_D = f(Re, \phi)$. Это важный критерий, которым нельзя пренебрегать при задании исходных данных расчета модели.

В качестве дополнительных сил и моментов, действующих на частицу при ее движении в потоке по сепаратору, в модель введены сила гравитации и крутящий момент инерции частицы, обусловленный ее вращением при движении. Крутящий момент инерции I_p определяется выражением баланса для углового момента частицы (баланс момента инерции и крутящего момента):

$$I_p \frac{d\vec{\omega}_p}{dt} = \frac{\rho_f}{2} \left(\frac{d_p}{2} \right)^5 C_\omega |\vec{\Omega}| \cdot \vec{\Omega} = \vec{T},$$

где $\vec{\omega}_p$ — угловая скорость частицы; ρ_f — плотность жидкости/газа; d_p — диаметр частицы; C_ω — коэффициент сопротивления вращению; \vec{T} — крутящий момент, приложенный к частице в области жидкости/газа. Относительная угловая скорость частицы жидкости/газа имеет вид

$$\vec{\bar{\Omega}} = \frac{1}{2} \nabla \cdot \vec{u}_f - \vec{\bar{\omega}}_p,$$

если у частицы сферическая геометрическая форма, то $I_p = (\pi/60)\rho_p d_p^5$; подъемная сила Магнуса, возникающая вследствие вращения частицы и вызванная перепадом давления вокруг поверхности частицы,

$$F_{RL} = \frac{1}{2} A_p C_{RL} \rho_f \frac{|\vec{V}|}{|\vec{\bar{\Omega}}|} (\vec{V} \cdot \vec{\bar{\Omega}}),$$

где A_p — проецируемая площадь поверхности частицы; C_{RL} — коэффициент подъемной силы вследствие вращения; \vec{V} — скорость частиц относительно жидкости/газа; $\vec{\bar{\Omega}}$ — угловая скорость частиц относительно жидкости/газа.

Коэффициент C_{RL} может быть определен с помощью различных подходов. Так, в ANSYS Fluent Theory Guide указано, что коэффициент определяется либо как зависимость от вращательного числа Рейнольдса Re_ω и числа Рейнольдса Re_p частицы (справедливо и подтверждено экспериментальными данными до чисел $Re_p = 2000$), либо как функция, зависящая от параметра вращения S частицы (широко используется с достоверностью до $Re_p < 1600$), при $S \geq 1$ $C_{RL} = 0,4$, при $S < 1$ $C_{RL} = (0,4 \pm 0,1) S$,

$$S = \frac{|\vec{\bar{\omega}}_p| d_p}{2 |\vec{u}_f - \vec{u}_p|},$$

а также может быть линейно пропорционален параметру вращения S : $C_{RL} = 2S$.

Для случая гладких и ровных частиц при $\varphi = 1$ сила лобового сопротивления имеет сферический закон коэффициента лобового (аэродинамического) сопротивления

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

где $a_1 - a_3$ — константы, применимые к различным диапазонам значений числа Re .

Задание граничных условий, принятые ограничения и допущения, полученные результаты. Исходные данные для расчета: основная несущая фаза — идеальный газ; дискретная твердая фаза — кварцевый песок (SiO_2) плотностью 2650 кг/м^3 , согласно [18, 19], коэффициент формы

частиц $\varphi = 0,75$; диаметр частиц определяется по ГОСТ 30630.2.7–2013¹ (максимальный 850 мкм, минимальный 0,1 мкм).

Допущения, принятые для расчета модели сепаратора: течение стационарное; частицы примеси твердые; частицы между собой не взаимодействуют; на стенках задано условие «отскока» частиц (без прилипания); температуры газа и частиц одинаковы; теплообмены между газом и стенками сепаратора и между газом и частицами отсутствуют.

Граничные условия принимались следующими: полное давление на входе в сепаратор 102 281 Па; статическое давление 101 935 Па; статическое давление на выходе 100 570 Па; составляющие скоростей потока и частиц на входе: $V_X = 1,433$ м/с, $V_Y = 17,666$ м/с, $V_Z = 19,857$ м/с; граница выхода из сепаратора на вдув — область улавливания частиц (trap, для оценки числа частиц, пропущенных на предыдущих ступенях); стенки сепаратора — область отражения частиц (reflect) с параллельным и перпендикулярным коэффициентом реституции (восстановления), равным 0,8, для оценки числа частиц, попавших в пылесборник.

Число итераций, заданное для расчета, равно 1000, падение невязок менее уровня 10^{-3} , прекращение их изменений (сообщение Convergence) после 436 итераций.

На картинах полей полного давления и тангенциальной скорости (рис. 5, а, б) видно отсутствие перетоков, возвратных течений на входе в сепаратор и в районе области выхода потока. Распределение давления по сепаратору с уменьшением его в области перфорационных отверстий вдува на предыдущие ступени свидетельствует о наличии перепада давления ΔP по сепаратору.

Физическая картина распределения дискретной фазы по сепаратору (рис. 5, г) наглядно показывает трекинг частиц с их улавливанием через перфорационные отверстия в область пылесборника, что свидетельствует о сепарации абразивных частиц двухфазного потока воздуха. Тем не менее часть частиц, минуя перфорационные отверстия, попадает на вдув в радиальный зазор ОК. Для оценки числа неотсепарированных частиц получено значение интегральной характеристики их распределения по диаметру и числу на заданной плоскости выхода из сепаратора в область вдува в ОК (рис. 6). На выход из сепаратора (рис. 5, в) попали в основном частицы малого диаметра (0,2...0,4 мкм), что обусловлено их движением возле верх-

¹ ГОСТ 30630.2.7–2013. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. М., Стандартинформ, 2014.

ней стенки входного домена и их малой массой. Около верхней стенки характерно преобладание сил вязкости над силами инерции частиц, в результате они не движутся вблизи закругленной стенки и не попадают в перфорационные отверстия для сепарации. Решить эту проблему можно оптимизацией поворотной проточной части и выбором числа перфорационных отверстий сепарации.

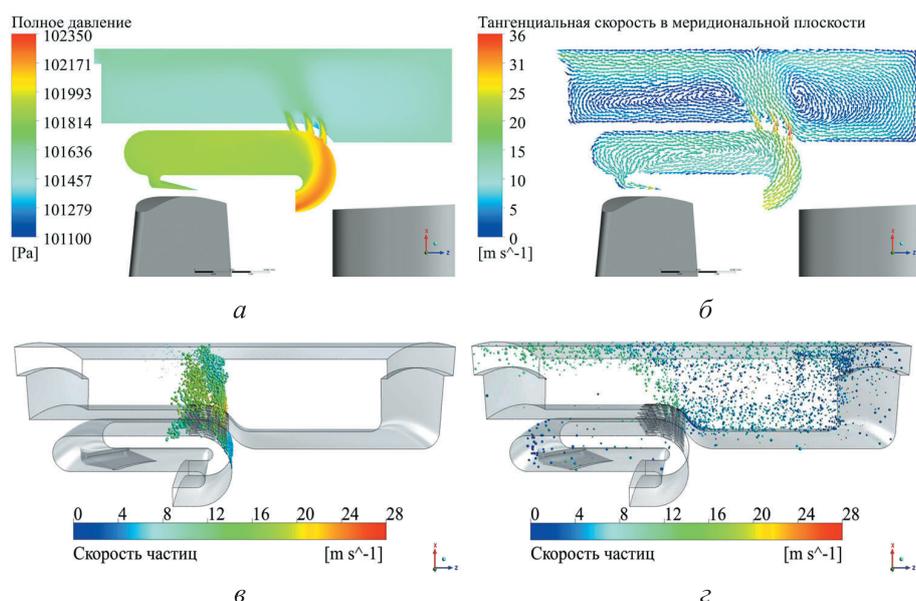


Рис. 5. Скриншот полей полного давления (а) и тангенциальной скорости (б) частиц на выходе (в) и по сепаратору (г)

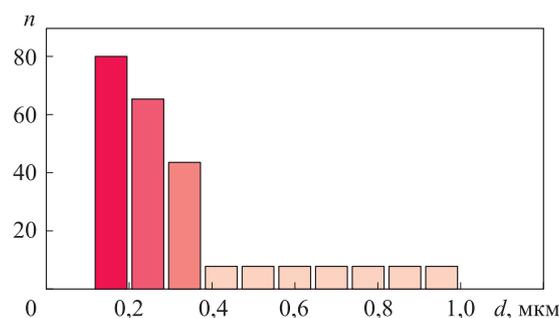


Рис. 6. Гистограмма распределения числа частиц в зависимости от их диаметра на плоскости выхода из сепаратора в область вдува в ОК

Полученные результаты дают представление о числе треков частиц, поступивших в сепаратор. Трек содержит информацию о совокупности подобного рода частиц (размер, форма, масса, плотность и др.), задаваемых в граничных условиях при моделировании либо через поверхность входа, либо равномерное их распределение по выбранной поверхности, либо

по одному из выбранных для них законов распределения. Ввод треков частиц осуществляется из центра каждой ячейки, заданной на поверхности. Для оценки числа самих частиц, поступивших и отсепарированных через сепаратор, можно использовать формулу $N_{\Sigma} = \dot{m} / (\rho_p V_p)$, где \dot{m} — массовый расход входящих частиц; ρ_p — плотность частицы; V_p — объем частицы, который можно найти по формуле объема сферы $V_p = (4/3)\pi r_p^3$ (r_p — радиус частицы, равный половине ее диаметра d).

После определения общего числа частиц необходимо разделить их на число ячеек поверхности ввода или треков для представления группы частиц в треке.

Полученные данные моделирования трекинга частиц следующие: число введенных треков через поверхность входа 3120; число уловленных треков 138; число неопределенных треков (не достигших ни одной границы) 2982.

По формуле (1) можно определить эффективность очистки сепаратором:

$$\eta = \frac{3120 - 138}{3120} \cdot 100 \% = 95,57 \%$$

Полученные результаты моделирования дают представление о влиянии интегрированного сепаратора на характеристики экспериментальной установки ОК. Так, деградации характеристик не происходит, видно незначительное их локальное увеличение в зоне оптимальных режимов работы. Тем не менее, при максимальном значении $\eta_{\text{ст}}^*$ наблюдается незначительное (на 0,00032) уменьшение $\pi_{\text{ст}}^*$ и смещение расхода воздуха $G_{\text{в}}$ в сторону увеличения:

$\pi_{\text{ст}}^* = 1,01912$, $\eta_{\text{ст}}^* = 0,7902$, $G_{\text{в}} = 0,7750$ кг/с — экспериментальная установка без сепаратора;

$\pi_{\text{ст}}^* = 1,0188$, $\eta_{\text{ст}}^* = 0,80355$, $G_{\text{в}} = 0,80046$ кг/с, $G_{\text{в.сеп}} = 0,0067$ кг/с — экспериментальная установка с сепаратором.

Расход воздуха на сепарацию по всей окружности экспериментальной установки ОК $G_{\text{в.сеп}} = 0,0067$ кг/с, что свидетельствует о минимальных затратах при отборе воздуха на сепарационные нужды устройства.

Последующее определение характеристик всего авиационного ГТД для оценивания влияния на него сепарации абразивных частиц можно проводить по методикам и подходам из [20–22] или применяя современные программные продукты, например ПК ThermoGTE, который позволяет осуществить расчет ГТД.

Очевидно, что при выборе рациональных геометрических параметров и размещения сепаратора на корпусе ОК необходимо добиться минимального его влияния на газодинамические характеристики и нельзя допустить их деградации, а также важно достичь наилучшей очистки от абразивных частиц.

Структура методики оценивания влияния сепарации абразивных частиц в ОК на характеристики авиационных ГТД с учетом выполненных частных задач приведена на рис. 7.

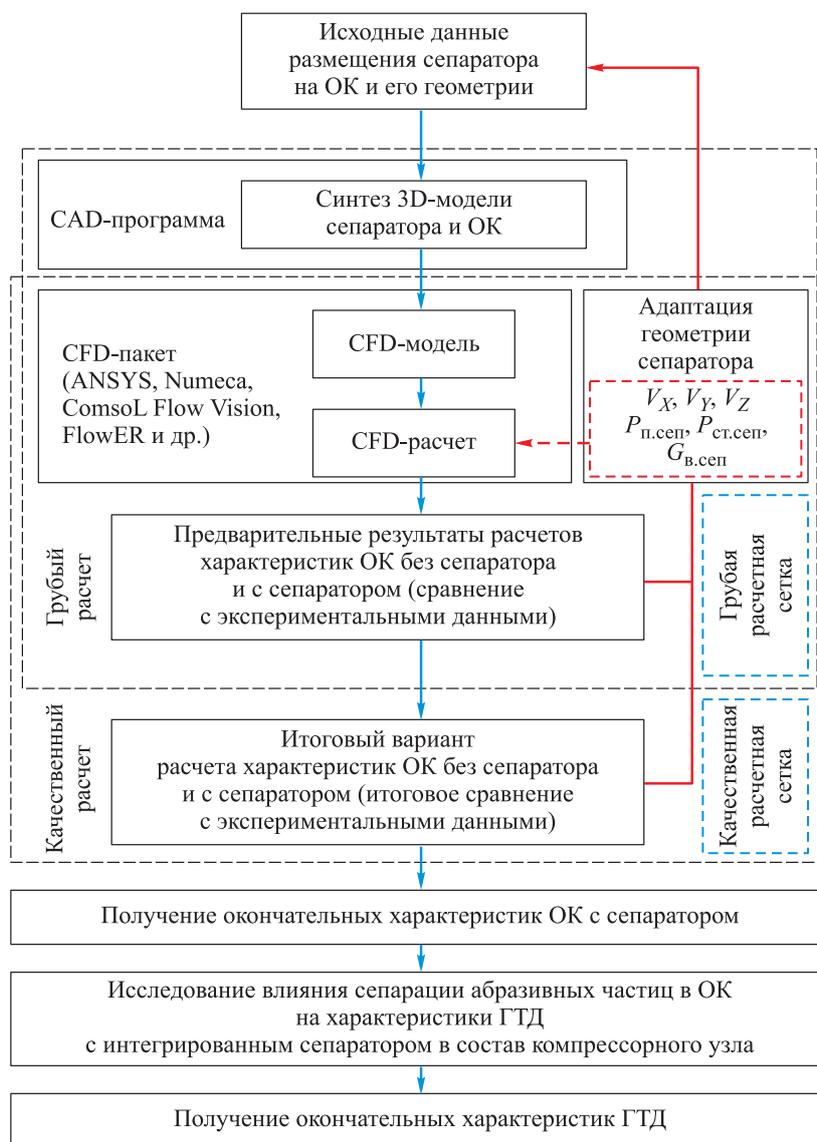


Рис. 7. Структура методики оценивания влияния сепарации абразивных частиц в ОК на характеристики ГТД

Заключение. В результате теоретического исследования численными методами, лежащими в основе разработанной методики оценивания влияния сепарации абразивных частиц в ОК на характеристики авиационных ГТД, выявлено следующее.

Эффективность η очистки сепаратором от абразивных частиц кварцевого песка SiO_2 размером 850...0,1 мкм в устройстве составляет ~ 95 %.

Разработанная геометрическая 3D-модель позволяет выбирать рациональные параметры сепаратора и размещать его на корпусе компрессора без разрушения топологии для обеспечения наилучшей эффективной очистки. Тем не менее 5 % частиц размером 0,2...0,4 мкм не попадают в перфорационные отверстия сепаратора, что свидетельствует о целесообразности проведения дальнейших исследований в области выбора рациональных параметров его геометрии.

Существенного влияния на характеристики экспериментальной установки сепаратор не оказывает, наблюдается незначительное локальное изменение характеристик в области оптимальных режимов работы установки в сторону их увеличения.

Возможно применять методику оценивания влияния сепарации абразивных частиц в ОК для исследования подобных сепарационных устройств непосредственно в авиационных ГТД.

Предложенную методику оценивания влияния сепарации абразивных частиц в ОК авиационных ГТД на их характеристики с применением моделей эрозии можно использовать для обоснования способа предотвращения эрозионного износа в ОК авиационных ГТД.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Федоров Р.М. Характеристики осевых компрессоров. Воронеж, Научная книга, 2015.
- [2] Попов С.С., Черкасов А.Н., Беловодский Ю.П. Осевой компрессор. Патент РФ 2801253. Заявл. 21.12.2022, опубл. 04.08.2023.
- [3] Ахмедзянов Д.А., Кишалов А.Е., Суханов А.В. и др. Применение ANSYS CFX для получения характеристик осевых компрессоров ГТД. *Вестник УГАТУ*, 2012, т. 16, № 8, с. 15–22. EDN: PXAKUB
- [4] Ахмедзянов Д.А., Ахметов Ю.М., Михайлова А.Б. Разработка подходов к оценке влияния неравномерности потока на входе на характеристики компрессоров авиационных ГТД на основе численного моделирования в ANSYS CFX. *Вестник УГАТУ*, 2017, т. 21, № 1, с. 63–71. EDN: YLYCHB

- [5] Лобода Ю.А. Численное моделирование траекторий капель ВУТ в ANSYS Fluent. *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы. Матер. XXVIII Междунар. симп.* Томск, ИОА СО РАН, 2022, с. В307–В310.
DOI: <https://doi.org/10.56820/ОАОРА.2022.29.79.001>
- [6] Рахимов А.Х., Балэкуа-Мадзо Б., Мпика-Эшер Х.Т. и др. Анализ течения двухфазного потока в пылезащитном устройстве. *Молодежный вестник УГАТУ*, 2021, № 1, с. 43–46. EDN: HLCCAR
- [7] Monachan B., Rijo J.T., Deepak S., et al. Simulation of stratified two-phase flow regime using air-water model in ANSYS fluent. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1355, no. 1, art. 012014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1355/1/012014>
- [8] Matsson J.E. An introduction to ANSYS Fluent 2023. Mission, SDC Publ., 2023.
- [9] Balafas G. Polyhedral mesh generation for CFD-analysis of complex structures. München, Sofistik AG, 2014.
- [10] Вальдберг А.Ю., Исянов Л.М., Тарат Э.Я. Технология пылеулавливания. Л., Машиностроение, 1985.
- [11] Андреев Е.А., Бобров А.Н., Максимов С.Ф. Эффективность применения сепарирующих устройств в энергетических установках на металлизированных топлицах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 4.
DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-4-703>
- [12] Исаев А.И., Скоробогатов С.В. Гидродинамическая верификация и валидация численных методов расчета течения в камере сгорания газотурбинного двигателя. *Труды МАИ*, 2017, № 97. EDN: YMIGQC
- [13] Буров А.С. Численное исследование двухфазного закрученного течения в прамоточном циклоне. Дис. ... канд. техн. наук. Казань, КНИТУ, 2016.
- [14] Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- [15] Liu Q., Luo Z.-H. CFD-VOF-DPM simulations of bubble rising and coalescence in low hold-up particle-liquid suspension systems. *Powder Technol.*, 2018, vol. 339, pp. 459–469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.041>
- [16] Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. М., Мир, 1975.
- [17] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М., Наука, 1987.
- [18] Haider A., Levenspiel O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and non-spherical particles. *Powder Technol.*, 1989, vol. 58, pp. 63–70.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(89\)80008-7](https://doi.org/10.1016/0032-5910(89)80008-7)
- [19] Наумов В.А. Зависимость силы гидродинамического сопротивления твердых частиц от показателя их несферичности. *Вестник науки и образования Северо-Запада России*, 2015, т. 1, № 1, с. 95–104. EDN: VKEDLZ
- [20] Котовский В.Н. Расчет параметров и характеристик авиационных ГТД. М., Академия Жуковского, 2022.

[21] Кажаяев В.П., Киселев Д.Ю., Киселев Ю.В. Диагностическая модель вертолетного турбовального двигателя. *Известия Самарского научного центра РАН*, 2023, т. 25, № 1, с. 99–106. DOI: <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-1-99-106>

[22] Кривошеев И.А., Кожин Д.Г. Развитие методов моделирования и автоматизированного проектирования газотурбинных двигателей. *Вестник СамГАУ*, 2014, № 5-3, с. 9–18. EDN: SGBXVK

Попов Сергей Сергеевич — преподаватель кафедры конструкции и эксплуатации авиационной техники Краснодарского высшего военного авиационного училища летчиков (Российская Федерация, 350090, г. Краснодар, ул. Дзержинского, д. 135).

Черкасов Александр Николаевич — канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры авиационных двигателей ВУНЦ ВВС «ВВА» (Российская Федерация, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А).

Клепиков Денис Сергеевич — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры авиационных двигателей ВУНЦ ВВС «ВВА» (Российская Федерация, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54А).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Попов С.С., Черкасов А.Н., Клепиков Д.С. Методика оценивания влияния сепарации абразивных частиц в осевых компрессорах на характеристики авиационных газотурбинных двигателей: моделирование сепарации и результаты. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2025, № 3 (154), с. 36–53. EDN: NMFQFZ

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE ABRASIVE PARTICLES SEPARATION EFFECT IN AXIAL COMPRESSORS ON THE AVIATION GAS TURBINE ENGINE CHARACTERISTICS: SIMULATING SEPARATION AND RESULTS

S.S. Popov¹

A.N. Cherkasov²

D.S. Klepikov²

sergey_stv1983@bk.ru

gliden@inbox.ru

klepikov_denis@mail.ru

¹ Krasnodar Air Force Institute for Pilots, Krasnodar, Russian Federation

² MERC AF “AFA”, Voronezh, Russian Federation

Abstract

The paper presents a methodology for assessing the abrasive particles separation effect in axial compressors on the aviation gas turbine engine characteristics, and considers computational characteristics of the axial

Keywords

Compressor, gas turbine engine, separator, setup, CAD, ANSYS, CFD, Fluent

compressor experimental setup with an integrated abrasive particle separator. It demonstrates the separator effect on the flow rate, pressure increase ratio, and efficiency. New boundary conditions are obtained for specifying in the separator model. Computational grid of the flow region in the separator is transformed into a high-performance polyhedral grid used in the Fluent package; the grid is converged using the separator cleaning efficiency criterion. The turbulence model from the considered main Reynolds-averaged models is applied in computation. The paper analyzes approaches to simulating the discrete phase motion implemented in the computational fluid dynamics packages. Based on the selected discrete-phase model, it presents the phase mathematical description and numerical simulation of a two-phase flow in the separator. Results of simulating the pressure fields, velocities, and particles tracking are obtained and analyzed, and the separator cleaning efficiency is identified. The paper determines further approaches to studying the abrasive particles separation effect in the axial compressors on characteristics of the gas turbine engines

Received 11.03.2024

Accepted 14.05.2024

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Fedorov R.M. Kharakteristiki osevykh kompressorov [Characteristics of axial compressors]. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2015.
- [2] Popov S.S., Cherkasov A.N., Belovodskiy Yu.P. Osevoy compressor [Axial compressor]. Patent RU 2801253. Appl. 21.12.2022, publ. 04.08.2023 (in Russ.).
- [3] Akhmedzyanov D.A., Kishalov A.E., Sukhanov A.V., et al. ANSYS CFX application for GTE axial compressors characterization. *Vestnik UGATU*, 2012, vol. 16, no. 8, pp. 15–22 (in Russ.). EDN: PXAKUB
- [4] Akhmedzyanov D.A., Akhmetov Yu.M., Mikhaylova A.B. Effect of inlet distorted flow on the performance of an axial compressor stage using CFD-software ANSYS CFX. *Vestnik UGATU*, 2017, vol. 21, no. 1, pp. 63–71 (in Russ.). EDN: YLYCHB
- [5] Loboda Yu.A. [Numerical modeling of VUT droplet trajectories in ANSYS Fluent]. *Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery. Mater. XXVIII Mezhdunar. Simp.* [Optics of the Atmosphere and Ocean. Atmospheric Physics. Proc. XXVIII Int. Symp.]. Tomsk, IOA SO RAN Publ., 2022, pp. B307–B310 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.56820/OAOPA.2022.29.79.001>
- [6] Rakhimov A.Kh., Balekua-Madzo B., Mpika-Esher Kh.T., et al. Study the effectiveness of the dust devices. *Molodezhnyy vestnik UGATU* [Youth Bulletin of the USATU], 2021, no. 1, pp. 43–46 (in Russ.). EDN: HLCCAR

- [7] Monachan B., Rijo J.T., Deepak S., et al. Simulation of stratified two-phase flow regime using air-water model in ANSYS fluent. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1355, no. 1, art. 012014. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1355/1/012014>
- [8] Matsson J.E. An introduction to ANSYS Fluent 2023. Mission, SDC Publ., 2023.
- [9] Balafas G. Polyhedral mesh generation for CFD-analysis of complex structures. Munchen, Sofistik AG, 2014.
- [10] Valdberg A.Yu., Isyanov L.M., Tarat E.Ya. Tekhnologiya pyleulavlivaniya [Dust collection technology]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1985.
- [11] Andreev E.A., Bobrov A.N., Maksimov S.F. Operating efficiency of separating devices in the power plants which use metallized fuels. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 4 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-4-703>
- [12] Isaev A.I., Skorobogatov S.V. Hydrodynamic verification and validation of numerical methods of the flow calculation in combustion chamber of a gas turbine engine. *Trudy MAI*, 2017, no. 97 (in Russ.). EDN: YMIGQC
- [13] Burov A.S. Chislennoe issledovanie dvukhfaznogo zakruchennogo techeniya v pryamotchnom tsyklone. Dis. kand. tekhn. nauk [Numerical study of two-phase swirling flow in a direct-flow cyclone. Cand. Sc. (Eng.). Diss.]. Kazan, KNITU, 2016.
- [14] Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- [15] Liu Q., Luo Z.-H. CFD-VOF-DPM simulations of bubble rising and coalescence in low hold-up particle-liquid suspension systems. *Powder Technol.*, 2018, vol. 339, pp. 459–469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.041>
- [16] Boothroyd R.G. Flowing gas-solids suspensions. London, Chapman & Hall, 1971.
- [17] Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznykh sred [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987.
- [18] Haider A., Levenspiel O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. *Powder Technol.*, 1989, vol. 58, pp. 63–70. DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(89\)80008-7](https://doi.org/10.1016/0032-5910(89)80008-7)
- [19] Naumov V.A. Dependence of hydrodynamic drag force of solids on the non-sphericity index. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii* [Journal of Science and Education of North-West Russia], 2015, vol. 1, no. 1, pp. 95–104 (in Russ.). EDN: VKEDLZ
- [20] Kotovskiy V.N. Raschet parametrov i kharakteristik aviatsionnykh GTD [Calculation of parameters and characteristics of aviation gas turbine engines]. Moscow, Akademiya Zhukovskogo Publ., 2022.
- [21] Kazhaev V.P., Kiselev D.Yu., Kiselev Yu.V. Diagnostic model of helicopter turboshaft engine. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia RAS SamSC], 2023, vol. 25, no. 1, pp. 99–106 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-1-99-106>

[22] Krivosheev I.A., Kozhinov D.G. Development of methods of modeling and computer aided design of gas turbine engines. *Vestnik SamGAU* [Vestnik of the Samara State Aerospace University], 2014, no. 5-3, pp. 9–18 (in Russ.). EDN: SGBXVK

Попов S.S. — Lecturer, Department of Design and Operation of the Aviation Equipment, Krasnodar Air Force Institute for Pilots (Dzerzhinskogo ul. 135, Krasnodar, 350090 Russian Federation).

Черкасов A.N. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Head of the Department of Aviation Engines, MERC AF “AFA” (Starykh Bolshevikov ul. 54A, Voronezh, 394064 Russian Federation).

Клепиков D.S. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer, Department of Aviation Engines, MERC AF “AFA” (Starykh Bolshevikov ul. 54A, Voronezh, 394064 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Popov S.S., Cherkasov A.N., Klepikov D.S. Methodology for assessing the abrasive particles separation effect in axial compressors on the aviation gas turbine engine characteristics: simulating separation and results. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2025, no. 3 (154), pp. 36–53 (in Russ.). EDN: NMFQFZ