

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЭРОЗИИ ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ НА УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

Расчислова С.А.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Республика Татарстан

Научный руководитель: Зинуров В.Э. – к. т. н., доцент, заведующий кафедрой ИГ

Аннотация. В работе численно исследовано влияние эрозии твердыми частицами компрессора на удельный расход топлива газовой турбины методом сопряжённого CFD и термодинамического моделирования. Локализованная шероховатость вызывает более существенную деградацию характеристик. Установлены рост удельного расхода топлива на 0,73% и повышение температуры на входе в турбину на 21,1 К.

Ключевые слова: Газовая турбина, эрозия твердыми частицами, удельный расход топлива, вычислительная гидрогазодинамика, термодинамический цикл, численное моделирование.

Введение. Современная авиационная и энергетическая отрасль сталкивается с необходимостью обеспечения высокой надёжности и экономичности силовых установок в различных климатических условиях. Эксплуатация газотурбинных двигателей в регионах с повышенной запылённостью атмосферы создаёт существенные риски для целостности проточной части. Инородные твёрдые частицы, попадающие в тракт двигателя, способны вызывать необратимые изменения геометрии лопаточного аппарата, что приводит к нарушению газодинамической устойчивости и снижению коэффициента полезного действия. Актуальность темы обусловлена тем, что деградация аэродинамических характеристик компрессора вследствие эрозионного износа напрямую влияет на топливную эффективность и ресурс двигателя, однако количественная связь между локальным повреждением лопаток и глобальными параметрами цикла изучена недостаточно. Традиционные методы оценки износа часто рассматривают шероховатость как равномерно распределённый параметр, что не соответствует реальной физике процесса взаимодействия частиц с поверхностью. В реальности эрозия носит локализованный характер, концентрируясь в зонах наибольшего воздействия потока. Игнорирование пространственного распределения износа может приводить к существенным погрешностям при прогнозировании остаточного ресурса и планировании технического обслуживания. Эрозия, вызванная твёрдыми частицами, доказана как серьёзная угроза безопасности и надёжности работы турбины [1]. Целью данной работы является численная оценка влияния эрозии твердыми частицами на удельный расход топлива газовой турбины посредством комплексного моделирования аэродинамических и термодинамических процессов с учётом локализации зон повреждения.

Основная часть. Исследование базируется на моделировании двигателя, сконфигурированного на базе энергоэффективного агрегата, включающего вентилятор и первые две ступени компрессора низкого давления. Для прогнозирования траекторий частиц и зон эрозионного воздействия применён метод Эйлера-Лагранжа с односторонней связью фаз, что позволяет учитывать инерционные свойства частиц кварцевого песка диаметром 20–80 мкм без существенных вычислительных затрат. Модель эрозии Табакоффа-Гранта использована для определения интенсивности износа материала лопаток, после чего данные о распределении эрозии были трансформированы в карты локализованной шероховатости поверхности. Такой подход позволяет воспроизвести физику взаимодействия абразивных частиц с материалом лопаток, что критически важно для точности прогноза, особенно при учёте температурных эффектов, влияющих на свойства материала.

Термодинамический анализ деградации цикла выполнен с использованием специализированного программного кода, позволяющего варьировать параметры компрессора в соответствии с результатами расчётов потока. Сравнительный анализ трёх сценариев выявил, что неравномерное распределение износа в критических зонах оказывает

непропорционально большое влияние на потери давления. В частности, наиболее уязвимыми зонами являются передние кромки лопаток, области у втулки и периферии, где скорость взаимодействия частиц с поверхностью максимальна. Конкретные результаты показали, что для случая локализованной эрозии снижение изобарического КПД компрессора достигает 10,1%, что трансформируется в рост удельного расхода топлива на 0,73% и увеличение температуры перед турбиной на 21,1 К относительно номинального режима [2].

Игнорирование пространственной локализации эрозии при оценке ресурса двигателя приводит к занижению прогноза топливных потерь. Модель равномерной шероховатости демонстрирует меньшую деградацию параметров при той же интегральной интенсивности износа, что связано с различным влиянием на пограничный слой. Локализованная шероховатость вызывает более ранний отрыв потока и утолщение пограничного слоя в критических сечениях профиля, что приводит к увеличению коэффициента сопротивления и снижению пропускной способности каскада. Это согласуется с данными о том, что даже незначительные изменения геометрии входных кромок могут существенно влиять на угол атаки и условия обтекания профиля.

Дополнительно следует отметить влияние эрозии на температурное поле двигателя. Повышение температуры на входе в турбину является следствием снижения степени повышения давления в компрессоре при сохранении требуемой тяги. Для компенсации потерь система управления двигателем увеличивает подачу топлива, что ведёт к росту температурной напряжённости лопаток турбины. Это создаёт дополнительные риски для ресурса горячей части, так как жаропрочные сплавы чувствительны к превышению рабочих температур. В долгосрочной перспективе это может привести к ускоренному ползучестному разрушению материалов и необходимости внепланового ремонта. Применение эрозионностойких покрытий способно значительно снизить потери топлива и обеспечить экономию в диапазоне 2–5% [3].

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что проблема эрозии актуальна не только для песчаных частиц, но и для других абразивных сред, включая вулканический пепел и капли влаги. Различные модели взаимодействия частиц с потоком показывают, что размер и концентрация инородных включений играют ключевую роль в формировании паттернов износа. Частицы меньшего диаметра склонны следовать за линиями тока и могут проникать глубже в проточную часть, вызывая износ последующих ступеней. В то же время крупные частицы обладают большей инерцией и воздействуют преимущественно на входные направляющие аппараты и первые рабочие колёса. Моделирование траекторий песчаных частиц в трансзвуковых ступенях вентилятора подтверждает критическую роль углов соударения и локальной геометрии в формировании зон максимального износа [4].

Важным аспектом является также влияние шероховатости на характеристики следов за лопатками. Увеличение шероховатости приводит к расширению зон пониженного импульса за каскадом, что ухудшает условия работы последующих ступеней. Это явление носит кумулятивный характер: деградация первых ступеней компрессора низкого давления влияет на параметры потока на входе в компрессор высокого давления, вызывая каскадный эффект снижения общей эффективности двигателя. Численные эксперименты подтверждают, что локализованное воздействие на первые ступени может иметь более серьёзные последствия для цикла, чем равномерный износ последних ступеней, из-за влияния на начальные параметры сжатия.

Экономическая эффективность эксплуатации газотурбинных двигателей представляет собой критический параметр, напрямую коррелирующий со степенью деградации проточной части. Выявленное увеличение удельного расхода топлива при масштабировании на совокупный парк авиационной техники обуславливает существенный рост эксплуатационных затрат. Дополнительно, зафиксированное повышение температуры рабочего тела перед турбиной приводит к сокращению межремонтного ресурса горячих частей вследствие интенсификации процессов ползучести и термическая усталость материалов. Таким образом, применение методов численного прогнозирования эрозионного износа предоставляет

возможность оптимизации стратегий технического обслуживания и целевого внедрения эрозионностойких покрытий в наиболее критических зонах лопаточного аппарата, что способствует минимизации стоимости жизненного цикла изделия.

Закключение. В результате исследования установлено, что эрозия твердыми частицами компрессора вызывает значительное ухудшение экономических характеристик газовой турбины, выражающееся в росте удельного расхода топлива и температуры рабочего тела. Установлено, что методология учёта локализованной шероховатости обеспечивает более точную оценку деградации цикла по сравнению с моделями равномерного износа. Полученные данные применимы для оптимизации графиков технического обслуживания двигателей, эксплуатируемых в аридных регионах, и имеют ценность для повышения точности прогнозов ресурса горячих частей турбины. Результаты исследования подтверждают необходимость интеграции аэродинамического и термодинамического моделирования для комплексной оценки влияния внешних факторов на эффективность газотурбинных двигателей.

Исследование выполнено в рамках гранта Академии Наук Республики Татарстан на поддержку программ развития передовых инженерных школ республиканского значения «ТурбоПИШ», соглашение 1РПИШ от 19.12.2025 г.

Список литературы

1. Zhang J., Liu H. *Effect of solid particles on performance and erosion characteristics of a high-pressure turbine* //Energy. – 2023. – Т. 272. – С. 127185.
2. Alqallaf J., Teixeira J. A. *Numerical study of effects of solid particle erosion on compressor and engine performance* //Results in Engineering. – 2022. – Т. 15. – С. 100462.
3. Bonu V., Barshilia H. C. *High-temperature solid particle erosion of aerospace components: its mitigation using advanced nanostructured coating technologies* //Coatings. – 2022. – Т. 12. – №. 12. – С. 1979.
4. Ghenaïet A. *Modeling and simulation of sand particle trajectories and erosion in a transonic fan stage* //Journal of Turbomachinery. – 2025. – Т. 147. – №. 7. – С. 071012.

UDC 621.438:620.193.27

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF SOLID PARTICLE EROSION ON THE SPECIFIC FUEL CONSUMPTION OF A GAS TURBINE

Raschislova S.A.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan

Zinurov V.E. – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of EG

Annotation. The paper numerically studies the effect of compressor erosion by solid particles on the specific fuel consumption of a gas turbine using coupled CFD and thermodynamic modeling. Localized roughness causes a more significant degradation of the characteristics. The specific fuel consumption increases by 0.73%, and the inlet temperature of the turbine increases by 21.1 K.

Keywords: Gas turbine, solid particle erosion, specific fuel consumption, computational fluid dynamics, thermodynamic cycle, and numerical modeling.