

УДК 614.849

***К ВОПРОСУ О СИСТЕМАХ ТЕПЛОГНЕЗАЩИТЫ ОБОРУДОВАНИЯ  
ГАЗОТУРБИННЫХ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ***

***Аксенов С.Г.***

*д-р э.н., профессор,  
ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,  
РФ, г. Уфа*

***Бикбулатов А.А.***

*студент,  
ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,  
РФ, г. Уфа*

**Аннотация.** В статье пишется о проблеме теплоогнезащиты оборудования газотурбинных теплоэлектростанций. Рассмотрены основные материалы для термобарьерных покрытий, включая диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия, и металлические подслои из жаропрочных сплавов. Проанализированы технологии нанесения, такие как плазменное напыление и электронно лучевое осаждение. Отдельное внимание уделено противопожарной защите с использованием углекислого газа и вспучивающихся составов. Описаны эксплуатационные факторы, влияющие на долговечность покрытий, а также экономическая эффективность их применения. Приведены перспективные направления развития, включая градиентные и самоисцеляющиеся покрытия.

**Ключевые слова:** теплоогнезащита, газотурбинная теплоэлектростанция, термобарьерное покрытие, жаропрочные сплавы.

***ON THE QUESTION OF THERMAL AND FIRE PROTECTION SYSTEMS  
FOR EQUIPMENT OF GAS TURBINE THERMAL POWER PLANTS***

***Aksyonov S.G.***

*Doctor of Economics, Professor,  
Ufa University of Science and Technology,  
Ufa, Russian Federation*

***Bikbulatov A.A.***

*Student,  
Ufa University of Science and Technology,  
Ufa, Russian Federation*

**Abstract.** This article addresses the issue of thermal and fire protection for gas turbine combined heat and power plant equipment. The main materials for thermal barrier coatings are considered, including yttria-stabilized zirconia and metallic sublayers of heat-resistant alloys. Application technologies, such as plasma spraying and electron beam deposition, are analyzed. Special attention is given to fire protection using carbon dioxide and intumescent coatings. The operational factors affecting the durability of coatings and the cost effectiveness of their application are described. Promising development areas are discussed, including gradient and self-healing coatings.

**Keywords:** thermal and fire protection, gas turbine combined heat and power plant, thermal barrier coating, heat-resistant alloys.

Современная энергетика всё больше опирается на использование газотурбинных теплоэлектроцентралей. Эти установки позволяют вырабатывать электрическую и тепловую энергию в комбинированном режиме, что даёт высокий коэффициент полезного действия. Однако оборудование таких станций работает в условиях экстремальных температур, которые могут достигать 1300 градусов Цельсия в проточной части турбины.

При таких значениях металлические детали подвергаются окислению, ползучести и ускоренному разрушению. Поэтому создание эффективных систем теплоогнезащиты становится необходимым условием для надёжной и долговременной эксплуатации газотурбинных теплоэлектроцентралей.

Основу современных термобарьерных покрытий составляет керамический материал на базе диоксида циркония. Этот материал стабилизируют оксидом иттрия для придания нужных тепловых и механических свойств. Керамический слой обладает очень низкой теплопроводностью и относительно высоким коэффициентом термического расширения. Это позволяет покрытию выдерживать многократные резкие изменения температуры без отслаивания. Под керамикой располагается металлический подслой из жаропрочного сплава на основе никеля или кобальта. Этот подслой защищает основной металл детали от высокотемпературной газовой коррозии и улучшает сцепление керамики с поверхностью. Такая двухслойная конструкция способна снизить температуру жаропрочного сплава на 100–150 кельвинов. В результате ресурс лопаток и камер сгорания увеличивается в полтора–два раза по сравнению с незащищёнными деталями [2,3].

Для нанесения теплоогнезащитных покрытий применяются различные технологические методы. Самым распространённым остаётся атмосферное плазменное напыление благодаря его высокой производительности и относительно невысокой стоимости оборудования. При этом методе порошок керамики подаётся в плазменную струю, где он расплавляется и разгоняется к поверхности детали. Более совершенным, но и более дорогим является метод электронно-лучевого физического осаждения из паровой фазы. Этот метод позволяет формировать покрытия со столбчатой микроструктурой, которая лучше сопротивляется термоциклическим нагрузкам. Существует также суспензионное плазменное напыление, при котором используется жидкая

суспензия мелких керамических частиц. Этот способ даёт возможность получать более тонкие и плотные покрытия, но требует точной дозировки суспензии. Каждый из перечисленных методов имеет свои достоинства и ограничения, поэтому выбор конкретной технологии зависит от геометрии детали и требований к её ресурсу [4].

Важнейшей составляющей теплоогнезащиты является противопожарная защита оборудования газотурбинных теплоэлектроцентралей. Внутри отсеков установки могут возникнуть возгорания масла, топлива или изоляционных материалов. Такие пожары развиваются очень быстро из-за высоких температур и наличия воздуха под давлением. Наиболее широко для тушения используется углекислый газ. Этот газ не повреждает электрооборудование и не оставляет после себя коррозионно-активных остатков. Однако он опасен для людей, поэтому перед его подачей должна включаться звуковая и световая сигнализация. В последние годы активно разрабатываются вспучивающиеся огнезащитные составы для пассивной защиты. При нагреве такие составы многократно увеличиваются в объёме, образуя толстый слой пористого кокса. Этот слой эффективно блокирует тепловой поток и не даёт пламени распространяться по поверхности оборудования. Время эффективной защиты такими материалами может достигать 15 и более минут, что вполне достаточно для срабатывания автоматических систем пожаротушения.

Эксплуатационные факторы оказывают сильное влияние на долговечность систем теплоогнезащиты. Помимо высокой температуры, на поверхности лопаток действуют эрозионные частицы, содержащиеся в продуктах сгорания. Эти частицы постепенно изнашивают керамический слой, особенно на входных кромках. Дополнительную проблему создаёт высокотемпературная коррозия, вызванная агрессивными соединениями серы, ванадия или натрия. Эти соединения проникают через поры покрытия и вступают в реакцию с металлическим подслоем. Изменение температуры

окружающей среды также вносит свой вклад. При повышении температуры воздуха мощность газотурбинной установки может упасть на 14-25 процентов, что меняет тепловой режим работы всех узлов. В результате покрытие испытывает дополнительные термоциклические напряжения, которые могут привести к его растрескиванию и отслаиванию. Поэтому современные покрытия разрабатываются с учётом всех перечисленных факторов и проходят испытания в условиях, максимально приближённых к реальным [5,6].

Экономическая эффективность внедрения теплоогнезащиты подтверждена многолетним опытом эксплуатации. Стоимость нанесения термобарьерного покрытия на лопатки турбины может быть достаточно высокой. Однако эта стоимость окупается за счёт увеличения межремонтного ресурса в полтора два раза. Вместо полной замены дорогостоящих лопаток из жаропрочных сплавов достаточно провести восстановление покрытия при плановом ремонте. Кроме того, использование теплоогнезащиты позволяет снизить расход охлаждающего воздуха. Меньшее количество охлаждающего воздуха означает, что больше воздуха участвует в рабочем процессе. Это повышает общий коэффициент полезного действия установки на несколько процентов, что даёт существенную экономию топлива за год. В долгосрочной перспективе уменьшаются затраты на запасные части и ремонтные работы. Также сокращается число внеплановых остановов станции из-за повреждения горячих деталей. Для владельцев газотурбинных теплоэлектроцентралей это означает повышение надёжности и конкурентоспособности на рынке электрической и тепловой энергии [7].

Перспективы развития теплоогнезащиты связаны с созданием многослойных градиентных покрытий. В таких покрытиях химический состав и структура плавно изменяются от поверхности к основному металлу. Это позволяет избежать резкой границы раздела между слоями и снизить термические напряжения. Активно ведутся исследования по использованию

оксидов редкоземельных металлов, например гафния, лантана или иттербия. Эти оксиды могут значительно повысить термостойкость и коррозионную стойкость керамического слоя. Ещё одним направлением является создание так называемых самоисцеляющихся покрытий. В состав таких покрытий вводятся специальные добавки, которые при возникновении микротрещин окисляются и запечатывают дефект. Также разрабатываются интеллектуальные системы контроля состояния покрытия в реальном времени. Эти системы могут использовать акустическую эмиссию или оптическую спектроскопию для обнаружения ранних стадий разрушения. Внедрение перечисленных технологий позволит поднять надёжность газотурбинных теплоэлектростанций на качественно новый уровень [1].

Нормативные требования к теплоогнезащите оборудования постоянно ужесточаются. В Российской Федерации действует ГОСТ Р 59182 2020, который устанавливает правила для газотурбинных установок мощностью свыше одного мегаватта. Этот документ регламентирует организационные и технические меры по обеспечению безопасной эксплуатации. В частности, в нём оговариваются максимальные температуры наружных поверхностей оборудования и требования к огнестойкости конструкций. Соблюдение этих норм обязательно для всех владельцев теплоэлектростанций. Поэтому при проектировании новой установки или модернизации существующей необходимо закладывать современные системы теплоогнезащиты. Это не только требование закона, но и условие для получения страховки и допуска к работе в энергосистеме [2].

Особую роль теплоогнезащита играет для мобильных и блочно-модульных газотурбинных теплоэлектростанций. Такие станции часто размещаются вблизи жилых районов или на территориях промышленных предприятий. В случае пожара или разрушения горячих деталей последствия могут быть катастрофическими. Поэтому для мобильных установок

применяются усиленные системы пассивной огнезащиты. Используются многослойные кожухи с керамической ватой и вспучивающимися покрытиями на внутренних поверхностях. Также предусматриваются автономные системы газового пожаротушения с быстрым временем срабатывания. Все эти меры позволяют свести к минимуму риск для людей и соседних объектов.

Следует отметить, что теплоогнезащита не решает всех проблем эксплуатации газотурбинных теплоэлектроцентралей. Она лишь снижает скорость деградации материалов, но не останавливает её полностью. Поэтому регулярный контроль состояния покрытий является обязательным. Наиболее распространённым методом контроля является визуальный осмотр с помощью эндоскопов через специальные отверстия в корпусе турбины. При обнаружении отслоений или трещин покрытия проводится его локальное или полное восстановление во время планового ремонта. Более совершенным методом является контроль на основе анализа тепловых полей с помощью инфракрасных камер. Этот метод позволяет выявить дефекты покрытия без остановки установки. Однако он требует высокой квалификации персонала и дорогого оборудования.

В мировой практике накоплен большой опыт эксплуатации газотурбинных теплоэлектроцентралей с термобарьерными покрытиями. Лидирующие позиции в этой области занимают компании из США, Германии, Японии и России. Российские разработки, в частности покрытия на основе диоксида циркония с никелевой плакировкой, показали высокую эффективность в суровых климатических условиях. Эти покрытия успешно работают при температурах до 800 градусов Цельсия и сохраняют целостность в течение тысяч часов наработки. Такой результат был достигнут благодаря оптимизации состава и режимов напыления. Можно уверенно говорить, что отечественная научная школа в области теплоогнезащиты находится на мировом уровне [5].

При выборе конкретной системы теплоогнезащиты для газотурбинной теплоэлектроцентрали необходимо учитывать несколько факторов. Во первых, это тип используемого топлива. Природный газ даёт относительно чистые продукты сгорания, а жидкое топливо может содержать много агрессивных примесей. Во вторых, это режим работы станции. Если установка часто пускается и останавливается, то покрытие должно выдерживать множество термоциклов. В третьих, это доступность ремонтной базы. Если рядом нет предприятия, способного наносить покрытия, то возможно, выгоднее использовать более простую защиту. Также важна стоимость оборудования и сроки его поставки. Оптимальный вариант находится обычно в результате технико экономического расчёта, в котором участвуют специалисты по газотурбинной технике и материаловеды [6].

Таким образом, теплоогнезащита оборудования газотурбинных теплоэлектроцентралей представляет собой комплексную научно техническую задачу. Её решение лежит на стыке материаловедения, теплофизики, технологии машиностроения и экономики. Применение современных термобарьерных покрытий в сочетании с эффективными огнезащитными составами позволяет значительно увеличить ресурс горячих деталей. Это повышает безопасность эксплуатации и снижает экономические издержки владельца. Дальнейшее развитие данной области будет определяться успехами в создании новых материалов и методов их нанесения. Также важную роль сыграет внедрение систем диагностики и мониторинга состояния покрытий в реальном времени. Только комплексный подход, учитывающий все факторы от конструкции установки до режимов её работы, способен обеспечить устойчивую и эффективную работу газотурбинных теплоэлектроцентралей в современных энергосистемах.

### **Библиографический список:**

1. Аксенов С.Г., Киселева Е.А. Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности газовой котельной // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2022, № 10. - С. 118-129.
2. Аксенов С.Г., Муртазин Д.А. Технология пожаротушения тонкораспыленной водой // Журнал прикладных исследований. 2024. № 10. С. 81-86.
3. Жуков В.В. Электрическая часть электростанций с газотурбинным и парогазовыми установками: учебное пособие для вузов. - М.: Издательский дом МЭИ, 2015. - 519 с.
4. Малков Е.С. Совершенствование режимов работы и схемы ПГУ-КЭС с применением камеры сжигания дополнительного топлива для теплофикации дис. канд. техн. наук: 05.14.14. - ИГЭУ, Иваново, 2014 - 142 с.
5. Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1989. -608 с.
6. Непомнящий В.А. Надежность оборудования энергосистем. - М.: издательство журнал «Электроэнергия. Передача и распределение», 2013. - 196 с.
7. Трубицын В.И. Надежность электростанций: Учебник для вузов. -М.: Энергоатомиздат, 1997. - 240 с.