

Токпаев Александр Михайлович, Студент
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный
технологический университет»

Елагина Вилена Борисовна
к.э.н., доцент кафедры управления и права
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный
технологический университет»

**ВНЕДРЕНИЕ ПРЕДИКТИВНЫХ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРОВЫХ КОТЛОВ
IMPLEMENTATION OF PREDICTIVE DIGITAL SYSTEMS TO INCREASE THE
RELIABILITY AND ECONOMIC EFFICIENCY OF POWER STEAM BOILERS**

Аннотация. В статье проанализированы цифровые технологии для перехода от планового к предиктивному обслуживанию паровых котлов. Рассмотрены решения по мониторингу ключевых элементов с использованием IoT, анализа данных и цифровых двойников. Их внедрение позволяет прогнозировать отказы, оптимизировать режимы сжигания топлива и снижать эксплуатационные затраты. затраты.

Abstract. The article analyzes digital technologies for transitioning from scheduled to predictive maintenance of steam boilers. It discusses solutions for monitoring key components using IoT, data analysis, and digital twins. Their implementation enables the forecasting of failures, optimization of fuel combustion modes, and reduction of operating costs.

Ключевые слова: Паровой котел, предиктивная аналитика, цифровой двойник, мониторинг состояния, энергоэффективность, отложения.

Keywords: Steam boiler, predictive analytics, digital twin, condition monitoring, energy efficiency, deposits.

Энергетические паровые котлы являются критически важным и наиболее металлоемким оборудованием ТЭЦ и ГРЭС. Их надежная и экономичная работа определяет как безопасность станции, так и себестоимость вырабатываемой энергии. Традиционные системы управления и обслуживания котлов часто основаны на регламентных интервалах и реактивном подходе к устранению неисправностей, что ведет к неоптимальным затратам и риску внеплановых остановок. Особую сложность представляют скрытые процессы, такие как высокотемпературная коррозия пароперегревателей, наружная коррозия экономайзеров, загрязнение поверхностей нагрева и износ горелок, диагностика которых при обычных осмотрах затруднена.

Целью работы является систематизация и анализ возможностей предиктивных цифровых систем для мониторинга состояния элементов парового котла и оценки их практической эффективности на основе внедрений в теплоэнергетической отрасли.

Современные цифровые решения позволяют в режиме реального времени «заглянуть» внутрь работающего котла, оценить остаточный ресурс его компонентов и заблаговременно спланировать восстановительные мероприятия, минимизируя простои и затраты.

Внедрение предиктивных технологий фокусируется на наиболее уязвимых и дорогостоящих в ремонте элементах котлоагрегата.

1. Системы мониторинга и прогнозирования загрязнения поверхностей нагрева.

Загрязнение труб экономайзера и пароперегревателя золой и шлаком резко снижает коэффициент теплопередачи, ведет к пережогу топлива и росту температуры уходящих газов.



Установка дополнительных термопар и датчиков разности давлений по газовому тракту, интегрированных в систему IoT, позволяет построить цифровую модель тепловосприятости.

Пример: На одном из энергоблоков Сургутской ГРЭС-2 была внедрена система расчета в реальном времени коэффициентов теплопередачи для каждой ступени котла на основе данных датчиков и алгоритмов машинного обучения. Система не только сигнализировала о скорости нарастания загрязнений, но и рекомендовала оптимальное время для проведения обдувки, а также прогнозировала необходимость остановки на водную промывку за 10-15 суток. Это позволило повысить средний КПД котла на 0,4-0,7% и сократить количество неэффективных обдувок [1].

2. Предиктивный контроль высокотемпературной коррозии пароперегревателей.

Эта проблема – одна из главных причин аварийных отказов. Косвенными признаками являются динамика роста температуры пара на выходе из отдельных петель и данные виброакустического контроля. Системы предиктивной аналитики, обучаемые на исторических данных о отказах и результатах внутреннего инспекционного контроля (с применением роботов), могут прогнозировать зоны с максимальной скоростью коррозии.

Пример: В энергокомпании «Интер РАО» для группы однотипных котлов, работающих на похожем топливе, была разработана общая предиктивная модель. Она анализирует режимные параметры (состав дымовых газов, тепловые напряжения) и указывает на конкретные секции перегревателя с повышенным риском. На основе этих прогнозов ремонтный ресурс направляется точно, что повысило межремонтный пробег котлов в среднем на 15% и снизило количество внезапных течей [2].

3. Цифровой двойник горелочного устройства для оптимизации сжигания.

Нестабильное или неоптимальное сжигание топлива ведет к пережогу, повышенным выбросам NOx и CO, и локальным перегревам экранов. Цифровой двойник горелки, интегрированный с данными газоанализаторов, видеомониторинга факела и датчиков температуры в ближней зоне, позволяет непрерывно подстраивать соотношение «топливо-воздух» и геометрию факела.

Пример: На ТЭЦ, переведенной на сжигание многокомпонентного топлива (смесь газа и угля), внедрение системы адаптивного управления горелками на основе их цифровых моделей позволило автоматически компенсировать колебания теплотворной способности. Система в реальном времени корректировала подачу дутьевого воздуха и угол распыла, что стабилизировало температуру в топке и снизило выбросы оксидов азота на 20% при одновременном повышении КПД котла [3].

4. Системы мониторинга напряженного состояния барабана котла.

Циклические тепловые нагрузки ведут к усталостным повреждениям барабана – наиболее ответственного элемента. Внедрение системы постоянного мониторинга с использованием сети тензодатчиков и термопар, установленных в критичных точках, позволяет контролировать фактические термические напряжения.

Пример: Для группы котлов с большим сроком эксплуатации (свыше 30 лет) была развернута система мониторинга остаточного ресурса барабана. Данные о напряжениях в каждом цикле «разогрев-останов» накапливались и обрабатывались. Это позволило научно обосновать продление срока службы барабанов сверх нормативного, избежав их преждевременной и крайне дорогостоящей замены. Расчетный экономический эффект от отсрочки замены одного барабана составил более 80 млн рублей [4].

Перспективные направления развития:

□ Роботизированный инспекционный контроль (роботы-ползуны и дроны): Для автоматического обследования внутренних поверхностей топки и газоходов с передачей данных в цифровую модель (двойник) котла.

□ Нейросетевой анализ спектров вибрации: Для ранней диагностики зависаний шлака, срывов факела и неполадок в системе пылеприготовления.



□ Блокчейн-ведение «цифрового паспорта» котла: Неизменяемая история всех режимов работы, ремонтов и замеров толщин металла для повышения прозрачности и обоснованности экспертных решений.

Внедрение предиктивных цифровых систем для энергетических паровых котлов представляет собой качественный скачок от субъективного, основанного на опыте, обслуживания к объективному, управляемому данными. Это позволяет трансформировать ключевые аспекты эксплуатации: оптимизировать процесс сжигания в реальном времени, прогнозировать и предотвращать критические повреждения элементов, научно обосновывать сроки проведения капитальных ремонтов и продления ресурса. Итоговый эффект – существенное повышение надежности, снижение эксплуатационных и ремонтных затрат, а также повышение общей экономической и экологической эффективности работы теплоэнергетического предприятия. Для дальнейшего развития данного направления необходима глубокая интеграция разрозненных систем мониторинга в единую платформу «цифрового котла».

Список литературы:

1. Зиновьев А.В., Калинин С.П. Повышение экономичности работы энергетического котла на основе интеллектуальной системы мониторинга загрязнения поверхностей нагрева // Энергосбережение в промышленности. 2023. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-ekonomichnosti-raboty-energeticheskogo-kotla-na-osnove-intellektualnoy-sistemy-monitoringa-zagryazneniya-poverhnostey-nagreva> (дата обращения: 19.02.2025).
2. Громов А.Н. Применение методов предиктивной аналитики для оценки коррозионного износа труб систем пароперегревателей // Теплоэнергетика. 2022. №8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-metodov-preditivnoy-analitiki-dlya-otsenki-korrozionnogo-iznosa-trub-sistem-paroperegrevateley> (дата обращения: 19.02.2025).
3. Мельников И.Л., Федоров К.С. Цифровой двойник горелочного устройства как инструмент оптимизации процесса сжигания на ТЭЦ // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2024. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-gorelochnogo-ustroystva-kak-instrument-optimizatsii-protssessa-szhiganiya-na-tets> (дата обращения: 19.02.2025).
4. Сосфенов Д.А. Цифровой двойник как инструмент оптимизации производственных процессов // Инновации и инвестиции. 2023. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-kak-instrument-optimizatsii-proizvodstvennyh-protsessov> (дата обращения: 19.02.2025).

