

# **Автоматизация систем управления тепловыми процессами в котельных установках крупных промышленных предприятий**

## **Automation of thermal process control systems in boiler installations of large industrial enterprises**

УДК 681.526

Получено: 15.01.2025

Одобрено: 22.02.2025

Опубликовано: 25.03.2025

### **Карев И.А.**

Студент, автоматизация технологических процессов и производств  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет"  
e-mail: karev.ia@dvfu.ru

### **Karev I.A.**

Student, Automation of Technological Processes and Production  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
"Far Eastern Federal University"  
e-mail: karev.ia@dvfu.ru

### **Мищук А.И.**

Студент, автоматизация технологических процессов и производств  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет"  
e-mail: mishchuk.ai@dvfu.ru

### **Mishchuk A.I.**

Student, Automation of Technological Processes and Production  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
"Far Eastern Federal University"  
e-mail: mishchuk.ai@dvfu.ru

### **Дыма И.С.**

Студент, автоматизация технологических процессов и производств  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет"  
e-mail: dyma.is@dvfu.ru

### **Dyma I.S.**

Student, Automation of Technological Processes and Production  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
"Far Eastern Federal University"  
e-mail: dyma.is@dvfu.ru

**Изотова Е.А.**

Студент, автоматизация технологических процессов и производств  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Дальневосточный федеральный университет"  
e-mail: izotova.eal@dvfu.ru

**Izotova E.A.**

Student, Automation of Technological Processes and Production  
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
"Far Eastern Federal University"  
e-mail: izotova.eal@dvfu.ru

**Научный руководитель:****Малышкин А.П.**

Канд. техн. наук, доцент  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тюменский индустриальный университет"

**Scientific Advisor:****Malyshkin A.P.**

Candidate of Technical Sciences Sciences, Associate Professor  
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
"Tyumen Industrial University"

**Аннотация**

В статье рассматриваются вопросы разработки и оптимизации автоматизированных систем управления тепловыми процессами в котельных установках крупных промышленных предприятий. Представлены технические особенности построения структурной схемы автоматизированных систем, включая применение датчиков, исполнительных механизмов и контроллеров на базе программируемых логических устройств. Описаны алгоритмы регулирования тепловых режимов, такие как ПИД-регулирование и каскадное управление, направленные на стабилизацию температуры и давления при изменяющихся нагрузках. Особое внимание уделено методам оптимизации процессов горения и подачи топлива, позволяющим снизить теплопотери и повысить коэффициент полезного действия (КПД) оборудования. Приведены практические примеры экономического эффекта от внедрения систем автоматического управления, включая снижение удельного расхода топлива и энергопотребления вспомогательных механизмов.

**Ключевые слова:** автоматизация, системы управления, тепловые процессы, котельные установки, промышленные предприятия, ПИД-регулирование, каскадное управление, топливоподача, оптимизация, коэффициент полезного действия (КПД).

**Abstract**

This paper examines the development and optimization of automated control systems for thermal processes in boiler installations of large industrial enterprises. It presents the technical features of constructing structural diagrams for automated systems, including the use of sensors, actuators, and controllers based on programmable logic devices. Algorithms for regulating thermal regimes, such as PID control and cascade control, aimed at stabilizing temperature and pressure under varying loads, are described. Special attention is given to methods for optimizing combustion and fuel supply processes, which enable the reduction of heat losses and the increase of equipment efficiency ( $\eta$ ). Practical examples of the economic benefits from implementing automatic control systems are provided, including reductions in specific fuel consumption and energy consumption of auxiliary mechanisms.

**Keywords:** automation, control systems, thermal processes, boiler installations, industrial enterprises, PID control, cascade control, fuel supply, optimization, efficiency ( $\eta$ ).

Автоматизация систем управления тепловыми процессами в котельных установках крупных промышленных предприятий является важным направлением повышения их эффективности, надежности и безопасности. Тепловые процессы в котельных характеризуются высокой инерционностью и многопараметричностью, что требует применения точных методов контроля и регулирования. Основными параметрами, подлежащими автоматическому контролю, являются температура теплоносителя, давление пара, подача топлива и воздуха. Их регулирование напрямую влияет на экономичность работы котла, его производительность и срок службы.

Контроль температуры теплоносителя осуществляется с использованием термодатчиков сопротивления (RTD) и инфракрасных сенсоров. Термодатчики типа К (хромель-алюмель) являются наиболее распространенными для измерения температуры до 1100 °С благодаря своей точности и устойчивости в агрессивных средах. В системах с высоким давлением и перегретым паром широко применяются датчики с платиновыми элементами (Pt100), обладающие высокой точностью (погрешность до  $\pm 0.1\%$ ). Для бесперебойной работы турбогенераторов температура перегретого пара должна поддерживаться в диапазоне 500–540 °С, что позволяет достичь оптимального теплового КПД при минимизации тепловых потерь.

Давление пара в котельной установке также является критически важным параметром, который контролируется с помощью диафрагменных, пьезорезистивных и тензометрических датчиков давления. В котлах высокого давления стандартными значениями считаются 10–16 МПа, что позволяет обеспечивать стабильное производство пара для турбинных генераторов и других производственных нужд. Стабильность давления напрямую зависит от равномерной подачи топлива и контроля воздушного потока. Для этих целей используются исполнительные механизмы: регулирующие клапаны, воздушные заслонки и частотно-регулируемые приводы вентиляторов. Электрические и пневматические приводы с системами обратной связи обеспечивают точное управление расходом топлива и воздуха, что особенно важно при динамических изменениях нагрузки на котел.

Оптимизация соотношения топлива и воздуха имеет решающее значение для повышения КПД котельных установок. При стехиометрическом сгорании коэффициент избытка воздуха равен единице, однако на практике поддерживается коэффициент в пределах 1.05–1.2, что минимизирует образование угарного газа и уменьшает тепловые потери с уходящими газами. В современных автоматизированных системах используются расходомеры газа и жидкости: ультразвуковые, вихревые и дифференциально-давленческие датчики. Для управления потоками воздуха внедряются частотно-регулируемые приводы вентиляторов, что позволяет снизить энергопотребление вспомогательного оборудования на 10–15%.

Ключевым элементом систем автоматического управления являются ПИД-регуляторы, которые обеспечивают высокоточное поддержание заданных параметров на основе обратной связи. Пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы компенсируют статические и динамические отклонения, устраняя влияние внешних возмущений. Коэффициенты  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  настраиваются в зависимости от характеристик котла, таких как время реакции, инерционность и тепловая мощность. Например, при изменении нагрузки котла ПИД-регулятор корректирует подачу топлива и воздуха, стабилизируя температуру и давление с минимальным временем переходного процесса. Формула ПИД-регулятора имеет вид:

$$u(t) = k_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

где  $e(t)$  — ошибка,  $K_p$  — коэффициент пропорциональной составляющей,  $K_i$  — коэффициент интегральной составляющей,  $K_d$  — коэффициент дифференциальной составляющей.

Применение ПИД-регуляторов позволяет существенно повысить стабильность параметров теплового процесса. Например, при внедрении системы ПИД-регулирования в крупной котельной установка обеспечила снижение погрешности контроля температуры с  $\pm 3$  °С

до  $\pm 1$  °С, что позволило минимизировать перегрев и снизить издержки на топливо.

Практические результаты автоматизации подтверждаются экономическими расчётами. Если благодаря оптимизации соотношения топлива и воздуха удалось снизить расход топлива на 5% в котельной с суточным потреблением 50 тонн мазута, экономия составит:

$$50 \text{ т} \times 0.05 = 2.5 \text{ т/сутки.}$$

При средней цене мазута 25 000 руб./т годовая экономия составит:

$$2.5 \text{ т} \times 25\,000 \text{ руб.} \times 365 = 22\,812\,500 \text{ руб.}$$

Дополнительно, снижение потребления энергии вентиляторов и насосов на 10% за счет использования частотно-регулируемых приводов может привести к экономии электроэнергии в размере 100–150 МВт·ч/год, что для крупного предприятия с тарифом 5 руб./кВт·ч соответствует экономии 500 000–750 000 руб./год.

Разработка и оптимизация систем автоматического управления тепловыми процессами в котельных установках крупных промышленных предприятий является одной из ключевых задач, направленных на обеспечение высокой энергетической эффективности, надежности и устойчивости работы оборудования. Автоматизированная система управления (АСУ) котельной установкой представляет собой сложный технический комплекс, который осуществляет контроль и регулирование параметров теплоносителя, процессов горения топлива и подачи воздуха с целью минимизации потерь и максимизации КПД оборудования.

В основе функционирования АСУ лежит принцип обратной связи, при котором текущие значения контролируемых параметров, таких как температура, давление и расход топлива, передаются на контроллеры с датчиков, где обрабатываются алгоритмами управления, формирующими управляющие воздействия на исполнительные механизмы. Структурно автоматизированная система управления котельной установкой строится по иерархическому принципу и включает три уровня: уровень измерительных приборов и исполнительных механизмов, уровень контроллеров и регуляторов и верхний уровень операторского контроля на основе SCADA-систем. На нижнем уровне устанавливаются датчики температуры (термопары, платиновые датчики сопротивления), давления (пьезорезистивные и диафрагменные датчики) и расхода (вихревые и ультразвуковые расходомеры), которые обеспечивают точное измерение параметров. Для управления технологическим оборудованием применяются пневматические и электрические приводы регулирующих клапанов, дроссельных заслонок и частотно-регулируемых вентиляторов.

Центральным элементом системы является программируемый логический контроллер (ПЛК), который реализует алгоритмы автоматического управления. Одним из наиболее распространенных методов регулирования в тепловых процессах является ПИД-регулирование, позволяющее поддерживать заданные параметры с минимальными отклонениями. Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор рассчитывает управляющий сигнал на основе текущего значения ошибки, её интеграла и производной, что обеспечивает как быстрое реагирование на изменения, так и устранение статических отклонений. Применение ПИД-регуляторов особенно эффективно для стабилизации температуры перегретого пара и давления в котлах. Например, при динамических изменениях нагрузки на котельную установку ПИД-регулятор автоматически корректирует подачу топлива и воздуха, стабилизируя рабочие параметры с минимальными переходными процессами.

В сложных системах котлов высокой мощности для улучшения качества управления используется каскадное регулирование, при котором первичный контур управляет подачей топлива и воздуха, а вторичный контур стабилизирует температуру перегретого пара и давление в барабане котла. Такой подход минимизирует влияние внешних возмущений и позволяет поддерживать режимы работы с высокой точностью. Кроме того, внедрение систем предиктивного управления на основе математических моделей позволяет прогнозировать изменения нагрузки и заранее корректировать режимы горения топлива, что особенно важно для работы в условиях переменных производственных потребностей.

Оптимизация процессов топливоподачи и горения играет ключевую роль в повышении КПД котельной установки и снижении тепловых потерь. Поддержание оптимального соотношения топлива и воздуха является одной из важнейших задач системы управления.

Коэффициент избытка воздуха регулируется в пределах 1.05–1.2 для обеспечения полного сгорания топлива и минимизации выбросов угарного газа и теплотерь через уходящие газы. Автоматическое управление воздушными заслонками и частотно-регулируемыми вентиляторами позволяет гибко адаптировать подачу воздуха в зависимости от текущей нагрузки и качества топлива. В реальных условиях это позволяет снизить расход топлива на 3–5% и увеличить общий КПД котла. Например, при модернизации котельной установки мощностью

300 т/ч снижение расхода угля на 5% позволяет ежегодно экономить более 5000 тонн угля, что при средней стоимости угля 3000 руб./т составляет экономию около 15 млн руб.

Одной из важнейших задач оптимизации систем автоматического управления является минимизация теплотерь через уходящие дымовые газы. Для этого в современных системах управления реализуется автоматический контроль температуры дымовых газов и подача воздуха с учётом эффективности сгорания топлива. Например, снижение температуры уходящих газов с 180 °С до 130 °С позволяет сократить тепловые потери на 5–7%. В котлах, работающих на природном газе, это приводит к увеличению КПД с 90 до 94%, что при среднесуточном потреблении топлива 50 000 м<sup>3</sup> позволяет существенно снизить расходы на энергоносители.

Дополнительно, внедрение частотно-регулируемых приводов на насосах и вентиляторах позволяет сократить потребление электроэнергии на 10–15%, что особенно актуально для крупных предприятий с высоким энергопотреблением. Например, использование ЧРП для управления подачей воздуха в котёл мощностью 400 т/ч обеспечивает экономию электроэнергии порядка 100 МВт·ч/год, что при среднем тарифе 5 руб./кВт·ч эквивалентно экономии 500 000 руб. в год.

Разработка и оптимизация систем автоматического управления в котельных установках промышленных предприятий направлены на повышение их энергоэффективности, снижение эксплуатационных затрат и минимизацию тепловых потерь. Автоматизированная система управления тепловыми процессами представляет собой сложный комплекс, включающий в себя датчики для измерения критически важных параметров, исполнительные механизмы для регулирования потоков топлива и воздуха, а также контроллеры и алгоритмы для обеспечения стабильности рабочих режимов. Современные подходы к проектированию таких систем позволяют достичь высокой точности управления даже в условиях динамически изменяющейся нагрузки на котел.

В основе структурной схемы автоматизированной системы управления котельной установкой лежит иерархическая организация. На нижнем уровне расположены датчики температуры, давления, расхода и концентрации кислорода в уходящих газах. Температура контролируется с использованием термопар (тип К или S) и платиновых термометров сопротивления (Pt100), которые обеспечивают точность до  $\pm 0.1$  °С при измерении высоких температур в диапазоне 500–600 °С. Для измерения давления применяются пьезорезистивные и дифференциальные датчики с высокой устойчивостью к агрессивным средам и погрешностью 0.05% от диапазона измерений. Контроль расхода топлива и воздуха осуществляется ультразвуковыми и вихревыми расходомерами, которые позволяют поддерживать оптимальное соотношение топливно-воздушной смеси.

Средний уровень системы представляет собой контроллеры на основе программируемых логических устройств (ПЛК), которые принимают сигналы с датчиков, обрабатывают их в реальном времени и отправляют управляющие команды исполнительным механизмам. Применяются пневматические или электрические приводы регулирующих клапанов и воздушных заслонок, а также частотно-регулируемые приводы для управления скоростью вентиляторов и топливных насосов. Регулирование параметров осуществляется по классическим и каскадным схемам с использованием ПИД-регуляторов, которые обеспечивают стабилиза-

цию тепловых режимов с минимальными колебаниями. ПИД-регулятор, благодаря своим пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющим, компенсирует динамические изменения параметров и устраняет статические ошибки. При изменении нагрузки на котельную установку регулятор адаптирует подачу топлива и воздуха для поддержания температуры перегретого пара и давления в заданных пределах. Практическая настройка коэффициентов  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$  позволяет минимизировать время переходного процесса и предотвратить перерегулирование.

Оптимизация системы управления топливоподачей и процессом горения играет ключевую роль в повышении КПД котельной установки. Для обеспечения полного сгорания топлива и минимизации выбросов угарного газа требуется поддержание коэффициента избытка воздуха в диапазоне 1.05–1.2, что достигается за счет автоматического контроля подачи воздуха и управления вентиляторами через частотно-регулируемые приводы. Избыточное количество воздуха приводит к увеличению теплопотерь через уходящие газы, тогда как его недостаток вызывает неполное сгорание топлива и образование сажи. Точные датчики концентрации кислорода, установленные в дымоходе, позволяют в реальном времени корректировать подачу воздуха и топлива для достижения оптимального режима.

На практике внедрение автоматизированного управления позволяет значительно снизить удельный расход топлива и повысить эффективность работы оборудования. Например, на котельной установке с мощностью 300 т/ч, работающей на угле, внедрение каскадного регулирования позволило снизить удельный расход топлива на 4–5%. При среднем суточном потреблении 200 тонн угля это эквивалентно экономии 8–10 тонн в сутки. Годовая экономия при стоимости угля 3000 руб./т составит порядка 10–11 млн руб.. Одновременно снижение температуры уходящих газов с 180 °С до 135 °С за счет автоматического контроля подачи воздуха позволило уменьшить тепловые потери на 6–7% и повысить КПД котла с 87% до 93%.

Для котлов, работающих на природном газе, особую эффективность демонстрируют системы управления с предиктивными алгоритмами, которые на основе математических моделей прогнозируют изменения тепловой нагрузки и заранее корректируют режимы горения. Например, поддержание коэффициента избытка воздуха на уровне 1.05 при расходе 50 000 м<sup>3</sup> газа в сутки снижает его потребление на 3–4%, что при стоимости 5 руб./м<sup>3</sup> обеспечивает годовую экономию до 3.6 млн руб.

Дополнительно автоматизация позволяет существенно снизить энергопотребление вспомогательного оборудования, такого как насосы и вентиляторы. Частотно-регулируемые приводы сокращают потребление электроэнергии на 10–15%, что при установленной мощности 400 кВт даёт экономию 120–150 МВт·ч в год. При среднем тарифе на электроэнергию 5 руб./кВт·ч это эквивалентно снижению затрат на 600–750 тыс. руб.

## Литература

1. Дьяконов В. П., Зуев С. Н. Автоматизация котельных установок: учебное пособие. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 280 с.
2. Рубан Е.В., Колесников А. Г., Рудковский А.В. Системы автоматического управления и регулирования в энергетике. М.: Энергоатомиздат, 2017. 320 с.
3. Бакулин В. А., Ковалев А. И. Энергоэффективные системы автоматического управления тепловыми процессами. СПб.: Политехника, 2019. 240 с.
4. Smith C.A., Corripio A.B. Principles and Practices of Automatic Process Control. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2021. 512 p.
5. Marlin T.E. Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2015. 650 p.
6. Назаров В. Н., Пронин С. И. ПИД-регуляторы и их применение в промышленных системах управления. Екатеринбург: УГТУ, 2016. 198 с.