

ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО, ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ФАКЕЛА В ТОПКЕ НА РЕЖИМ РАБОТЫ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО КОТЛА

© 2024 г. И. А. Рыжий^а *, А. В. Штегман^а, Д. В. Сосин^а, А. С. Натальин^а

^аВсероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

*e-mail: ryzhy1987@mail.ru

Поступила в редакцию 14.09.2023 г.

После доработки 27.10.2023 г.

Принята к публикации 29.11.2023 г.

Максимальная автоматизация работы оборудования современных ТЭС становится все более актуальной задачей. Для котлов, сжигающих уголь, особенно важным является создание систем управления топочным режимом. Значительные различия в характеристиках поступающего на сжигание угля оказывают сильное влияние на режим работы котла и его технико-экономические показатели. Существенные изменения режима горения зачастую приводят к проблемам, связанным с колебаниями температуры газов на выходе из топки, с поддержанием стабильной температуры перегретого пара, шлакованием поверхностей нагрева, снижением эффективности сжигания и др. Для оценки влияния свойств угля на режим работы котла Е-210-13.8КТ (заводская маркировка БКЗ-210-140) Томской ГРЭС-2 проведены расчетные исследования с использованием программы Boiler Designer температуры газов на выходе из топки. При существенном изменении характеристик угля расчетные значения температуры менялись от 1103 до 1150°С при 100%-ной нагрузке и от 910 до 948°С при 50%-ной нагрузке. Регулирование направления факела на выходе из горелки на $\pm 15^\circ$ позволило изменять значения температуры газов на выходе из топки на примерно 90°С. При внедрении системы регулирования направления факела появилась бы возможность в большой степени решить описанные проблемы эксплуатации котла. Разработан алгоритм автоматической корректировки режима горения, при реализации которого можно повысить надежность работы элементов котельной установки, снизить риск интенсивного шлакования поверхностей нагрева, поддерживать стабильную температуру перегретого пара в различных режимах работы котла. Ключевым элементом системы сжигания должна стать вихревая поворотная горелка, обеспечивающая изменение направления факела на выходе из горелки в пределах $\pm 15^\circ$.

Ключевые слова: колебания свойств угля, температура газов на выходе из топки, программа Boiler Designer, регулирование вектора факела на выходе из горелки по высоте топки, алгоритм автоматической корректировки режима горения, вихревая поворотная горелка

DOI: 10.56304/S0040363624040052

Для развития современной энергетики характерна тенденция максимально автоматизировать процесс производства электроэнергии. Однако функции систем управления топочным режимом котла, в котором сжигается твердое топливо, остаются крайне ограниченными ввиду сложности алгоритмизации и контроля горения пылеугольного факела.

Для угольных котлов автоматическое управление топочным режимом особенно важно. Работа котла регламентируется режимной картой, составленной по итогам опытного сжигания угля, и обычно в ней не учитывается возможное изменение характеристик поставляемого топлива. В действительности, такие изменения происходят довольно часто [1], что ведет к возникновению различных проблем при работе котла в штатных режимах.

Необходимость автоматической корректировки топочного режима в зависимости от показателей работы котла и свойств топлива особенно актуальна для котлов Е-210-13.8КТ Томской ГРЭС-2. Это связано с тем, что проектное топливо для этой ГРЭС – кузнецкий уголь марки Д, характеризующийся довольно широким диапазоном изменения основных показателей: влажности, зольности, теплоты сгорания. В результате при эксплуатации котлов возникают следующие проблемы:

чрезмерное колебание уровня температур газов в топке и, как следствие, сложности с поддержанием номинального значения температуры перегретого пара;

шлакование поверхностей нагрева (причем при различных условиях работы котла шлакованию могут быть подвержены как экраны топки,

так и пароперегревательные поверхности в соединительном газоходе);

снижение эффективности работы котла в переходных режимах (повышенные потери с механическим недожогом и высокие концентрации оксидов азота NO_x в дымовых газах).

Внедрение на котле системы автоматической корректировки режима горения с возможностью регулировать положение факела в топке по высоте позволит в значительной мере решить обозначенные проблемы. Однако автоматизация топочных процессов сопряжена с необходимостью решить несколько довольно сложных задач:

установить на котле дополнительные средства контроля и регулирования;

создать алгоритм управления системой сжигания в зависимости от изменения характеристик угля и режима работы котла;

разработать и внедрить малоэмиссионные поворотные горелки.

Паровой котел Е-210-13.8КТ – однобарабанный, вертикально-водотрубный с естественной циркуляцией, предназначен для выработки пара при сжигании каменных и бурых углей с твердым шлакоудалением. В качестве резервного топлива применяются природный газ и мазут.

Компоновка котла П-образная (рис. 1), газоплотная с цельносварными экранами. Топка является первым (восходящим) газоходом, во втором (горизонтальном) газоходе расположен пароперегреватель. В третьем (нисходящем) газоходе расположены экономайзер и трубчатый воздухоподогреватель, установленные врассечку.

Котел оборудован пылесистемами с шаровой барабанной мельницей и промежуточным бункером пыли (рис. 2). Паропроизводительность котла составляет 210 т/ч, давление перегретого пара – 13.8 МПа, температура перегретого пара – 560°C, температура питательной воды – 230°C.

Топка котла оснащена шестью пылеугольными вихревыми горелками, расположенными встречно в два яруса (две горелки в первом ярусе, четыре – во втором ярусе) треугольником вниз на боковых стенах топки.

ОЦЕНКА КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ ТЕМПЕРАТУР В ТОПКЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СВОЙСТВ УГЛЯ

По результатам экспресс-испытаний и сбора исходных данных проведено численное моделирование с использованием программы Boiler Designer работы котла БКЗ-210-13.8 на угле при 100%-ной нагрузке. Исходными данными служили проектные показатели котла с учетом корректировок некоторых показателей по режимной карте и экспресс-испытаниям. Характеристики

сжигаемого угля приняты по результатам усреднения основных показателей за продолжительный период времени (уголь с данными характеристиками условно обозначен как базовый). Были рассчитаны варианты работы котла при нагрузке 100 и 50%. Результаты расчета основных показателей (скоростей газов, температур по трактам, КПД котла и др.), полученные при моделировании, довольно хорошо коррелируют с проектными и опытными значениями соответствующих параметров. Так, расчетная температура газов на выходе из топки составила около 1150°C, температура уходящих газов – 161°C, КПД котла – 91.02%, расход топлива – 28.61 т/ч.

Далее были выполнены расчеты теплового баланса котла при использовании угля марки Д двух видов с существенно различающимися свойствами, которые были приняты в результате анализа статистики максимальных колебаний характеристик топлива. При этом полагалось, что при реализации разрабатываемой автоматизированной системы управления можно будет сжигать уголь с характеристиками, изменяющимися в диапазонах 5–20% по зольности и 10–25% по влажности.

Для расчета были выбраны два крайних вида угля: “улучшенный” (зольность и влажность минимальны) и “ухудшенный” (зольность и влажность максимальны). Все прочие характеристики, включая теплоту сгорания, пересчитывали по новой влажности и зольности на основе базового угля. Характеристики трех рассматриваемых углей представлены в табл. 1.

В табл. 2 приведены основные показатели работы котла при 100%-ной нагрузке, полученные в результате расчета в программе Boiler Designer для базового, “улучшенного” и “ухудшенного” топлив.

Результаты расчетов температуры газов на выходе из топки при сжигании трех исследуемых углей на нагрузках 100 и 50% сведены в табл. 3. Для углей с разными свойствами температура газов на выходе из топки менялась: на 104°C при 100%-ной нагрузке и на 81°C при 50%-ной нагрузке котла. Столь значительные колебания температуры газов при отсутствии дополнительных средств регулирования положения факела по высоте топки оказывают существенное влияние на температуру перегретого пара.

Допустимое значение температуры газов на выходе из топки определяется шлакующими свойствами сжигаемого угля. При этом характеристики углей Кузнецкого бассейна могут изменяться в широком диапазоне даже в пределах одного разреза [2]. Таким образом, уголь одной и той же марки может обладать совершенно разными шлакующими свойствами. Например, в [3] представлены характеристики угля марки ДР разреза Моховский, близкого по нескольким по-

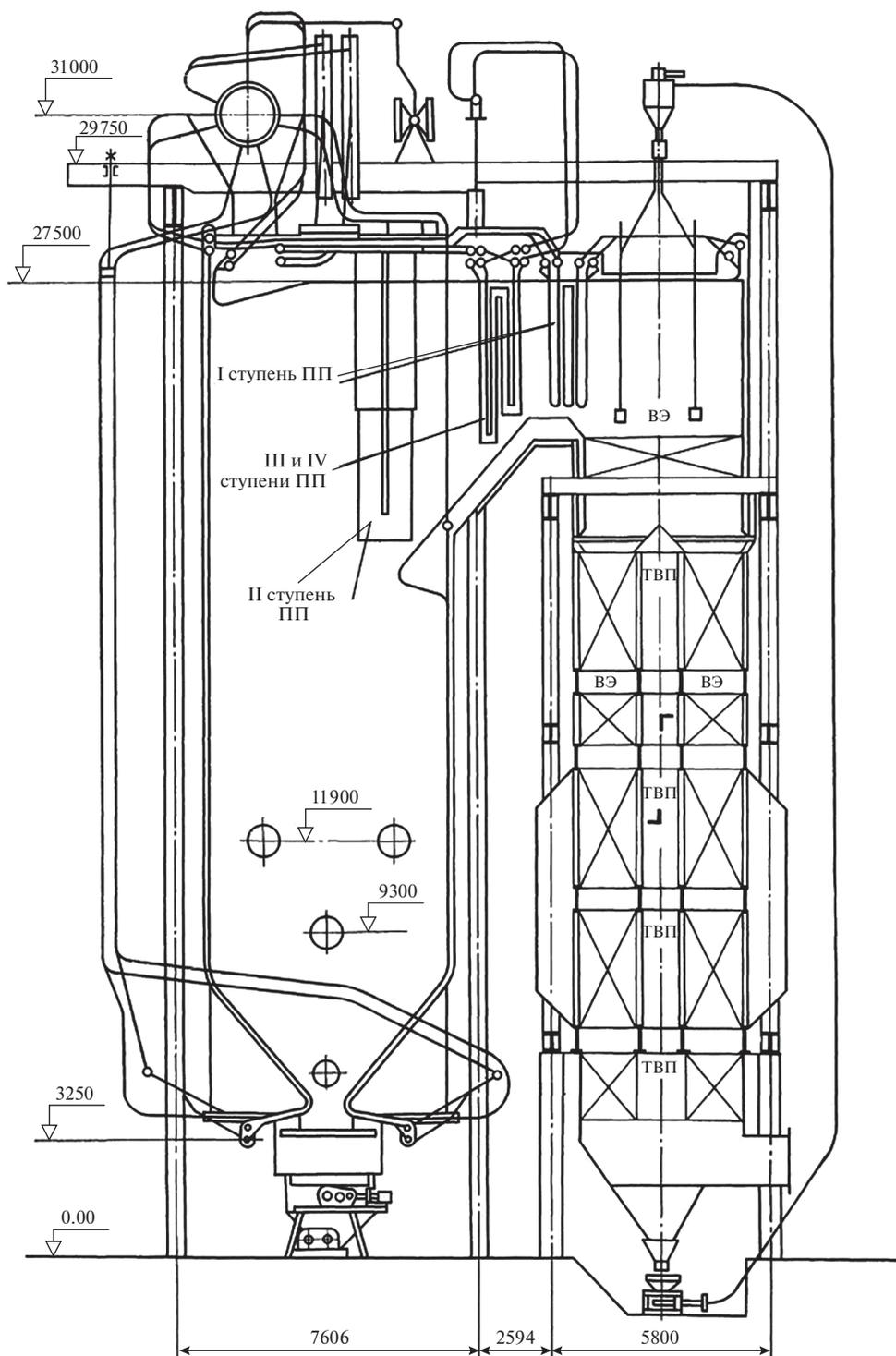


Рис. 1. Продольный разрез котла БК3-210-13.8.

ВЭ – воздушный экономайзер; ТВП – трубчатый воздухоподогреватель; ПП – пароперегреватель

казателям углю, используемому на Томской ГРЭС-2. Для данного угля температуры начала шлакования $t_{\text{шл}}$ колеблются в диапазоне от 980 до 1040°C. Однако существуют угли и с большим диапазоном колебания $t_{\text{шл}}$ (разность температур

составляет 100°C и более). При сжигании углей со значительным диапазоном изменения $t_{\text{шл}}$ допустимое значение температуры газов на выходе из топки по условиям шлакования также будет меняться в широких пределах. В подобных случа-

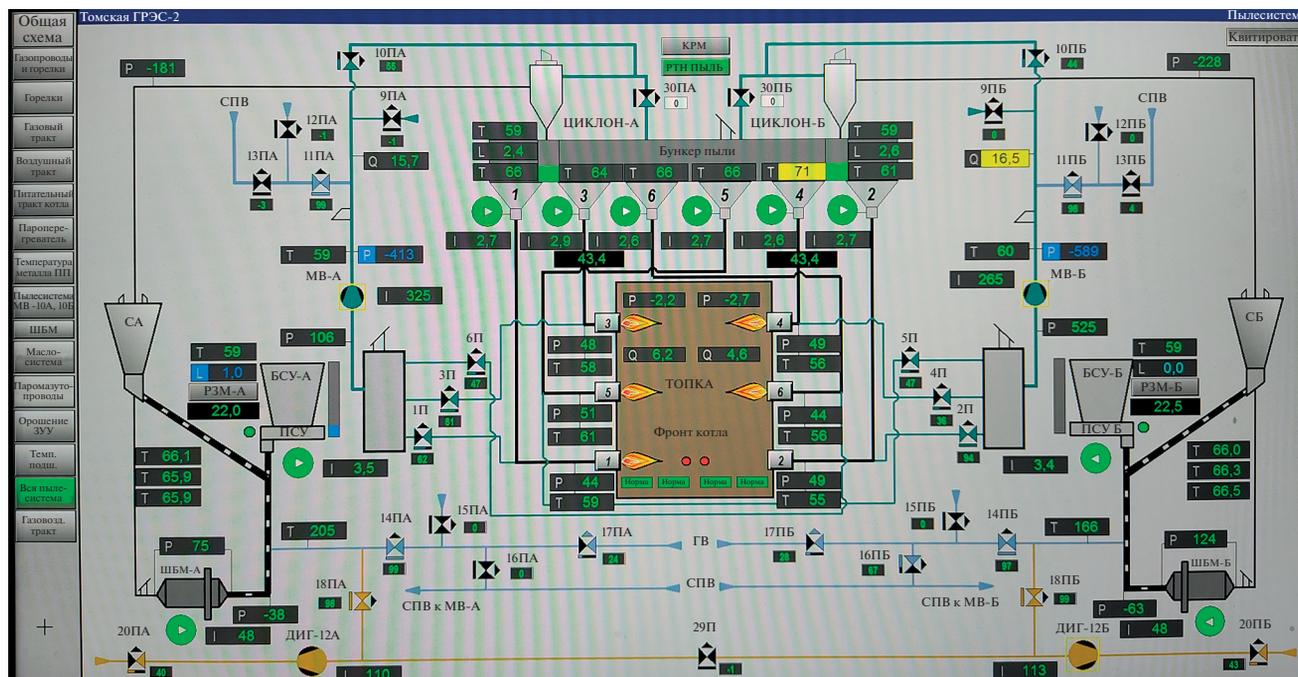


Рис. 2. Схема системы пылеприготовления котла БКЗ-210-13.8.

ШБМ – шаровая барабанная мельница; ДИГ – дымосос инертных газов; БСУ – бункер сырого угля; СА, СБ – сепараторы по сторонам А и Б; ПСУ – питатель сырого угля; МВ – мельничный вентилятор; ГВ – горячий воздух; СПВ – слабодогретый воздух; КРМ – котельный регулятор мощности; РТН – регулятор тепловой нагрузки; РЗМ – регулятор загрузки мельницы; ЗУУ – золоулавливающая установка

Таблица 1. Характеристики трех исследуемых углей

Показатель	Уголь		
	базовый	“улучшенный”	“ухудшенный”
Влажность на рабочую массу, %	18.71	10.0	25.0
Зольность на рабочую массу, %	10.99	5.0	20.0
Низшая рабочая теплота сгорания, МДж/кг (ккал/кг)	20.14 (4810)	24.66 (5889)	15.50 (3703)

Таблица 2. Основные показатели работы котла при 100%-ной нагрузке по результатам расчета в программе Boiler Designer для трех вариантов углей

Показатель	Уголь		
	базовый	“улучшенный”	“ухудшенный”
Коэффициент избытка воздуха:			
на выходе из топки	1.338	1.280	1.338
в уходящих газах	1.457	1.414	1.445
Температура, °С:			
на выходе из топки	1150	1207	1103
уходящих газов	161	159	165
горячего воздуха	367	367	366
перегретого пара	560	560	560
КПД котла, %	91.02	91.72	90.42
Расчетный (учитывающий потери с механическим недожогом) расход топлива, т/ч	28.61	23.20	37.42
Суммарный расход конденсата на впрыск, т/ч	6.80	8.91	4.83

Таблица 3. Результаты расчета температуры газов, °С, на выходе из топки при сжигании разных углей

Нагрузка, %	Уголь		
	базовый	“улучшенный”	“ухудшенный”
100	1150	1207	1103
50	948	991	910

ях чрезвычайно важно иметь возможность оперативно регулировать топочный режим, что позволит обеспечить необходимую температуру газов на выходе из топки.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ФАКЕЛА НА ТЕМПЕРАТУРУ ГАЗОВ НА ВЫХОДЕ ИЗ ТОПКИ

Высота положения ядра факела в топке котла при расчетах характеризуется параметром M , который определялся в соответствии с рекомендациями [4]. На котле Е-210-13.8КТ Томской ГРЭС-2 горелки установлены по схеме треугольником вниз. При одинаковом расходе топлива на все горелки значение параметра M составило 0.394. Расчет этого параметра выполнен также для поднятых и опущенных горелок (в этом случае учитывалась дополнительная поправка на угол поворота горелок Δx), который изменялся в диапазоне $\pm 15^\circ$.

Далее определялась температура газов на выходе из топки при разных значениях Δx (при дальнейших расчетах в качестве топлива был принят базовый уголь, нагрузка – 100%). Для базового угля выполнены расчеты в соответствии с рекомендациями [4] в программе Boiler Designer (табл. 4). Приведенные в этой таблице данные показывают, что изменение угла поворота (УП) горелки в диапазоне $\pm 15^\circ$ позволяет регулировать температуру газов на выходе из топки, при этом разность температур составляет около 90°C . Это соответствует диапазону колебаний температур для углей с разными свойствами. Таким образом, можно сделать вывод, что возможность регулирования направления факела на начальном его участке по высоте топки на $\pm 15^\circ$ позволит в значительной степени решить проблемы эксплуатации котла Е-210-13.8КТ, описанные ранее.

Увеличивать углы регулирования нецелесообразно, так как это приведет к существенному усложнению конструкции поворотных горелок.

Опыт эксплуатации котлов показывает, что при изменении условий тепловосприятия в топке следует провести оценку надежности циркуляции в экранах котла [5, 6]. Результаты расчетных исследований циркуляции при регулировании угла поворота горелок показывают, что существенных изменений в работе циркуляционных контуров топки при этом не происходит.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА КОНТРОЛЯ И КОРРЕКТИРОВКИ РЕЖИМА ГОРЕНИЯ КОТЛА

Ключевым элементом комплексной системы сжигания с автоматической корректировкой режима горения может стать малоэмиссионная вихревая поворотная горелка с возможностью регулирования угла поворота по вертикали в пределах $\pm 15^\circ$ [7, 8]. Однако общий алгоритм, обеспечивающий автоматизацию управления топочным режимом, должен учитывать влияние большого количества исходных данных.

Общая схема алгоритма управления системой контроля и корректировки режима горения представлена на рис. 3.

В качестве исходных параметров, контролируемых в непрерывном режиме, принята температура:

металла горелок $t_{m,г}$ (датчики устанавливаются в выходной части каждой горелки);

металла пылепроводов $t_{пп}$ (датчики размещаются на каждом пылепроводе перед горелкой) (может использоваться в качестве косвенного параметра для оценки взрывобезопасности);

газов на выходе из топки t_t [охлаждаемые датчики (пирометры) устанавливаются в верхней части топки];

перегретого пара $t_{пе}$ (щитовые показания).

При изменении различных исходных параметров может возникнуть потребность произвести

Таблица 4. Результаты расчета температуры газов на выходе из топки при разных значениях угла поворота горелок

Угол поворота горелок, град	Параметр M	Температура газов на выходе из топки, °С (расчет в Boiler Designer)
-15	0.432	1109
0	0.394	1150
+15	0.357	1198

определенные действия для корректировки режима горения, которые могут оказаться несовместимыми. Во избежание противоречивых команд в алгоритме вводится градация исходных параметров, а именно их ранжирование на параметры I и II категории важности. При отклонении параметров от нормы система в первую очередь будет реагировать на изменение параметров I категории; если же они находятся в допустимых диапазонах, система отреагирует на изменение параметров II категории.

К параметрам I категории важности относятся температуры металла горелок и пылепроводов. Превышение этих температур сверх установленных значений чревато серьезными повреждениями (прогоранием) горелок и пылепроводов вплоть до критических — требующих замены оборудования. Поэтому система должна обеспечивать прежде всего безопасный режим эксплуатации горелок.

К параметрам II категории важности относятся температуры в топочной камере (на выходе из топки и, при необходимости, над уровнем горелок) и температура перегретого пара. Колебания этих температур вне допустимых пределов негативно сказываются на надежности металла труб пароперегревательных поверхностей нагрева (а температура перегретого пара должна поддерживаться постоянной во всех режимах работы котла). Кроме того, изменение температур в топочной камере является косвенным признаком шлакования поверхностей нагрева (экранов топки или поверхностей в соединительном газоходе). Поэтому при изменении указанных параметров сверх допустимых значений система контроля горения должна вносить корректировки в топочный режим.

Подсистема регулирования $t_{пе}$ является дополнением к штатной системе регулирования температуры перегрева с помощью впрысков.

Автоматическая корректировка режима горения при изменении тех или иных входных параметров будет осуществляться в соответствии с математической моделью на основе полиномов. Эти полиномы будут получены экспериментальным путем по результатам испытаний котла при разных режимах работы. Например, в ходе испытаний будет выведена зависимость изменения температуры на выходе из топки от угла поворота горелок, и при повышении температуры на выходе из топки условно на 30°C программа, основываясь на построенном полиноме, будет инициировать поворот горелки таким образом, чтобы температура на выходе из топки снизилась на эти же 30°C.

Все допустимые уставки параметров, времени стабилизации режимов и т.д. также будут определяться в ходе испытаний.

Схема алгоритма контроля превышения температур металла горелок и пылепроводов пред-

ставлена на рис. 4. На рис. 3 она обозначена одним элементом блок-схемы.

Система проверяет, наблюдается ли увеличение температуры металла горелки или пылепровода (шесть датчиков по металлу горелок, шесть датчиков по пылепроводам). Если все температуры находятся в допустимых пределах, система переходит к действиям основной части алгоритма (см. рис. 3). Если температура превышает допустимое значение согласно показаниям хотя бы одного из 12 датчиков, система отключает эффекты воздействия по корректировке показателей II категории вплоть до устранения проблемы повышенных температур в горелках. Затем определяются горелки и пылепроводы с повышенными температурами. После выявления проблемных зон на блок управления пылепитателями поступает команда по снижению расхода пыли в проблемные горелки и увеличению расхода пыли в остальные горелки.

Перераспределение пыли в данном случае позволит, во-первых, поддержать паропроизводительность, а во-вторых, оценить возможность устранения проблемы без отключения горелки.

Далее вновь проверяется уровень температур по всем датчикам. Если температуры в проблемных зонах снизились, происходит стабилизация режима. Если снижения не наблюдается, система дает команду на прекращение подачи пыли в проблемные горелки (и увеличение расхода пыли в остальные горелки). Затем горелки продуваются воздухом с повышенным расходом в целях выдувания возможных отложений пыли и снижения температур металла. После стабилизации температур восстанавливается исходный режим работы системы. Если проблема увеличения температур металла горелок и пылепроводов больше не наблюдается, система включает действие основной части алгоритма и начинает корректировку режима по параметрам II категории.

После шага контроля температур металла горелок система проверяет, происходит ли изменение температуры газов на выходе из топки или температуры перегретого пара превышают допустимые уставки. Если такие изменения есть, система выявляет проблему и соответствующим образом корректирует режим с учетом степени изменения отслеживаемых параметров.

Точные значения будут определены в ходе испытаний, но в общем виде предполагается следующая схема. В программу закладываются четыре степени изменения отслеживаемых параметров. Для температуры перегретого пара один шаг изменения принимается равным 3°C, таким образом, возможное отклонение составит $\pm 12^\circ\text{C}$. Изменение температуры на 3°C (в любую сторону) соответствует 1-й степени отклонения параметра, изменение на 3–6°C — 2-й степени, на 6–9°C —

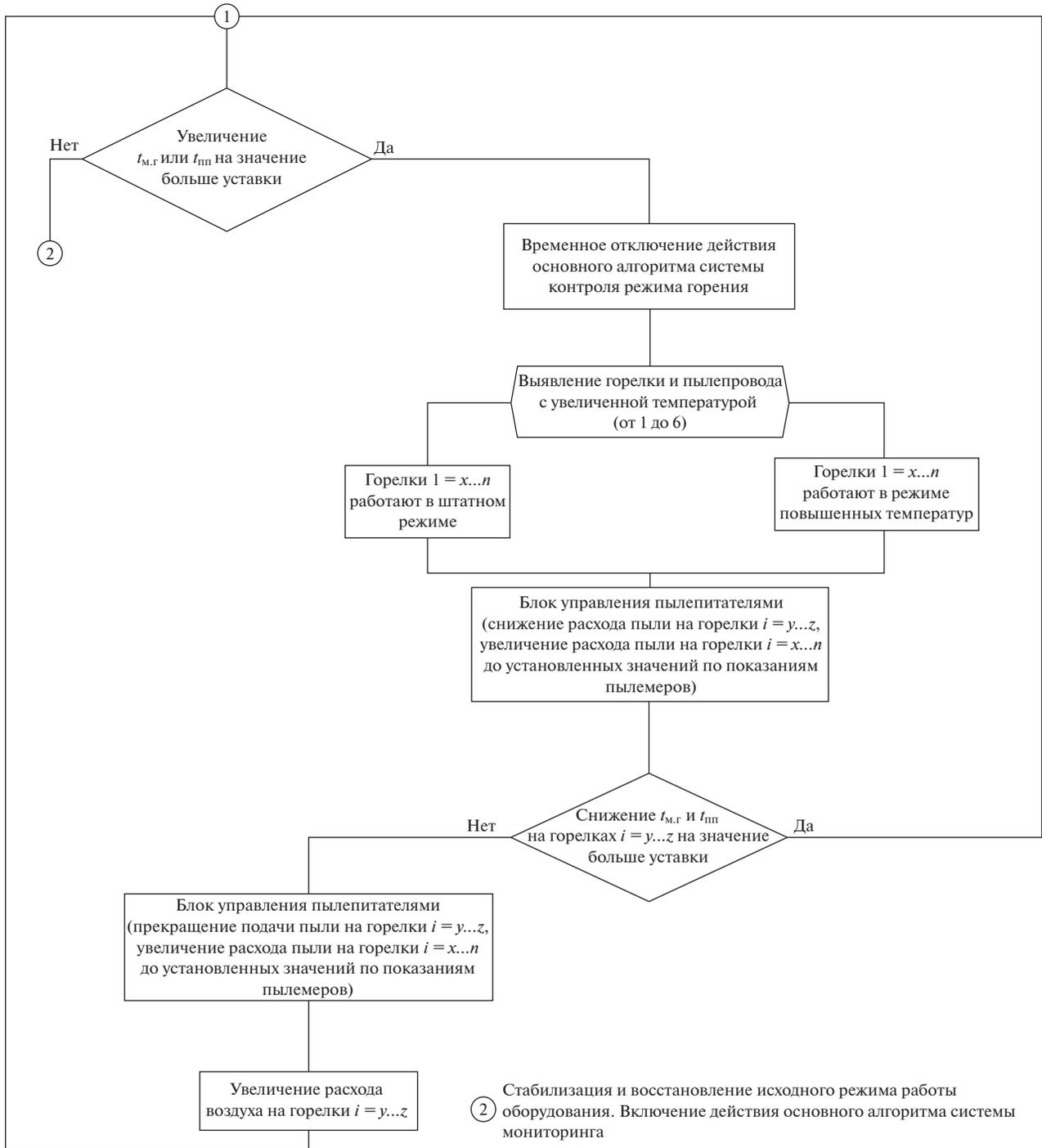


Рис. 4. Блок управления горелками в режиме повышенных температур

3-й степени, на 9–12°C – 4-й степени отклонения. Контроль изменения $t_{пе}$ (температуры перегретого пара) важен при возникновении проблемных ситуаций, когда регулировка $t_{пе}$ впрыском собственного конденсата оказывается недостаточно эффективной.

Если изменение температуры перегретого пара относительно невелико (1-я степень), система

контроля горения пробует решить проблему без поворота горелок – только перераспределением топлива между ярусами горелок.

Если же отклонение температуры перегретого пара существенно (2–4-я степени), на указатель положения горелок (УПГ) подается сигнал, в результате чего горелка поворачивается вверх или вниз в соответствии с заложенной в алгоритм за-

висимостью УПГ горелки от $t_{пе}$. Указатель положения горелки (вверх, вниз или горизонтально) меняется в зависимости от значения температуры перегретого пара. По результатам испытаний строится зависимость “если $t_{пе}$ меняется на x °С, угол поворота горелки меняется на y °”. Например, при 2-й степени отклонения температуры горелка поворачивается на 5° в соответствии с построенной зависимостью, при 3-й степени – на 10°, при 4-й степени – на 15°.

Общая закономерность реакции системы на изменение температуры перегретого пара следующая. Если наблюдается рост этой температуры, с большой вероятностью происходят шлакование экранов топки и повышение тепловосприятости пароперегревательных поверхностей нагрева. В этом случае целесообразно подать больше топлива на нижний ярус горелок и (если этого недостаточно) направить горелки вниз. Факел сместится вниз, экраны топки воспримут больше тепла, тепловосприятость пароперегревательных поверхностей уменьшится, температура перегретого пара снизится. При снижении температуры перегретого пара следует выполнить обратные действия – подать меньше топлива на нижний ярус и направить горелки вверх.

Изменение температуры газов на выходе из топки воздействует на систему аналогично изменению температуры перегретого пара. Однако температура газов меняется быстрее и в более широких диапазонах, чем температура перегретого пара, поэтому для данного параметра уставки принимаются другими. Например, в алгоритм будет заложена возможность изменения t_t в пределах ± 40 °С. Тогда 1-я степень отклонения параметра будет соответствовать 10°С (система перераспределяет топливо по ярусам горелок), 2-я степень – 20°С (система поворачивает горелки на 5°), 3-я степень – 30°С (поворот горелок на 10°), 4-я степень – 40°С (максимальный поворот на 15°). Точные уставки и соответствующие изменения угла поворота горелок будут определяться в ходе испытаний.

В алгоритме (см. рис. 3) присутствуют блоки “Оценка степени изменения параметра от 1-й до 4-й”. По результатам проведенной оценки система принимает решение, как именно скорректировать режим горения.

Порядок контроля параметров задан так, что сначала система проверяет температуру газов на выходе из топки и лишь затем – температуру перегретого пара. Температура газов быстрее реагирует на изменение режима, предположительно, мониторинг этого показателя позволит более оперативно корректировать режим горения. Однако данный вопрос нуждается в дополнительных исследованиях.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

Проведенные исследования позволили наметить дальнейшие шаги по разработке и внедрению комплексной системы сжигания топлива с автоматизированным регулированием топочного процесса на котле Е-210-13.8КТ.

1. Разработка технических решений по малоэмиссионному вихревому поворотному горелочному устройству. Должна быть обеспечена возможность поворота горелки в вертикальной плоскости в диапазоне ± 15 ° и сжигания, помимо угольной пыли, природного газа и мазута. Также конструкция горелки должна способствовать снижению выбросов оксидов азота NO_x [9].

2. Выполнение необходимых расчетов и математического моделирования с использованием современных программ для оценки эффективности и надежности работы новых горелок.

3. Изготовление головного образца малоэмиссионной вихревой поворотной горелки, проведение его испытаний на котле.

4. Замена всех старых горелок на котле, внедрение автоматизированной системы сжигания в соответствии с разработанным алгоритмом.

5. Проведение опытно-промышленных испытаний автоматизированной системы сжигания, отладка алгоритма по результатам испытаний.

ВЫВОДЫ

1. Внедрение комплексной системы сжигания с автоматической корректировкой режима горения является чрезвычайно актуальным для ТЭС, на которых сжигаются угли, основные характеристики которых могут претерпевать существенные изменения.

2. Расчетные исследования топочного процесса на примере котла Е-210-13.8КТ Томской ГРЭС-2 показывают, что изменение в топке направления факела на начальном участке в пределах ± 15 ° позволяет обеспечить диапазон регулирования температур газов на выходе из топки 80–89°С. Это может стать способом решения проблемы колебания температуры газов и температуры перегретого пара при изменении характеристик сжигаемого угля.

3. Алгоритм автоматической корректировки режима горения предполагается построить на основе двухступенчатой оценки категорий важности с четырьмя степенями отклонений параметров. Для построения полиномов математической модели, на базе которой будут разработаны реакции системы управления, требуется получить несколько эмпирических зависимостей.

4. Ключевым элементом предлагаемой комплексной системы сжигания твердого топлива является малоэмиссионная вихревая поворотная горелка, обеспечивающая регулирование направления факела на начальном участке в диапазоне $\pm 15^\circ$ и позволяющая снизить выбросы оксидов азота. Разработке и внедрению данной горелки будут посвящены дальнейшие исследования.

5. **Росляков П.В., Плешанов К.А., Стерхов К.В.** Исследование естественной циркуляции в испарителе котла-утилизатора с горизонтальными трубами // Теплоэнергетика. 2014. № 7. С. 3–11. <https://doi.org/10.1134/S0040363614070091>
6. **Плешанов К.А., Стерхов К.В.** Расчет циркуляции котла-утилизатора ПР-76-3.3-415 // Сб. трудов междунар. науч.-практ. конф. “Пакет прикладных программ для расчета теплоэнергетического оборудования Boiler Designer-2014”. М., 2014. С. 77–82.
7. **Пат. РФ на полезную модель RU 207 337 U1.** Мало-токсичная вихревая пылеугольная горелка с остроконечными рассекающими и завихрителем потока аэросмеси / А.В. Штегман, И.А. Рыжий, Е.А. Фоменко, Д.В. Сосин. Оpubл. 25.10.2021.
8. **Пат. РФ на полезную модель RU 207 329 U1.** Пылеугольная горелка с поворотной выходной частью / А.В. Штегман, И.А. Рыжий, Е.А. Фоменко, Д.В. Сосин. Оpubл. 25.10.2021.
9. **Успешная реконструкция котла П-57 блока 500 МВт Троицкой ГРЭС / Д.В. Сосин, И.А. Рыжий, А.В. Штегман, В.Р. Котлер // Энергетик. 2014. № 4. С. 34–38.**

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сосин Д.В., Штегман А.В.** Опыт сжигания каменного угля марки Д разреза АО “Шубарколь Комир” в котлах блоков 225 МВт Черепетской ГРЭС // Электрические станции. 2017. № 2. С. 19–22.
2. **Алехнович А.Н.** Характеристики и свойства энергетических углей. Челябинск: Цицеро, 2012.
3. **Энергетические угли восточной части России и Казахстана: справ.** Челябинск: УралВТИ, 2004.
4. **Тепловой расчет котлов (нормативный метод).** 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998.

Studying the Effect of Fireball Position in the Furnace on the Coal Fired Boiler’s Operation Mode

I. A. Ryzhiy^{a,*}, A. V. Shtegman^a, D. V. Sosin^a, and A. S. Natal’in^a

^a All-Russia Thermal Engineering Institute, Moscow, 115280 Russia

*e-mail: ryzhy1987@mail.ru

Abstract—Automating the operation of equipment at modern thermal power plants to the maximal possible extent is becoming an increasingly more urgent problem. For coal-fired boilers, the development of furnace operation mode control systems is of special importance. A significant scatter in the characteristics of the coal delivered for combustion have a strong influence on the boiler’s operation mode and its technical and economic indicators. Essential changes in the combustion mode frequently give rise to problems connected with gas temperature fluctuations at the furnace outlet, with maintaining a stable superheated steam temperature, slagging of heating surfaces, degraded combustion efficiency, etc. For estimating the influence of coal properties on the operation mode of the E-210-13.8KT boiler (the factory designation is BKZ-210-140) at the Tomsk GRES-2 thermal power plant, computational studies of gas temperature at the furnace outlet were carried out using the Boiler Designer software package. With an essential variation in the coal characteristics, the calculated values of temperature varied from 1103 to 1150°C at 100% load and from 910 to 948°C at 50% load. The adjustment of fireball direction at the burner outlet by $\pm 15^\circ$ made it possible to change the gas temperature at the furnace outlet by approximately 90°C. In the case of introducing a fireball direction adjustment system, it would be possible to solve, to a significant extent, the boiler-operation problems mentioned above. An algorithm for automatically adjusting the combustion mode has been developed, which, in case of having been implemented, would make it possible to achieve more reliable operation of boiler unit components, decrease the risk of the heating surfaces becoming intensely fouled with slag, and maintain a stable superheated steam temperature in different boiler-operation modes. A swirl movable burner able to vary the fireball direction at the burner outlet by $\pm 15^\circ$ should become the combustion system’s key component.

Keywords: fluctuations in coal properties, gas temperature at the furnace outlet, Boiler Designer software package, adjustment of fireball vector at the burner outlet over the furnace height, algorithm for automatically adjusting the combustion mode, swirl movable burner