

АВТОМАТИЗАЦИЯ УГОЛЬНЫХ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ТОПКАМИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ И РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

А.В. Бондарев, к.т.н., Э.В. Болбышев, инженер,
ВА МТО, Санкт-Петербург
А.В. Смирнов д.т.н., ВИ(ИТ), Санкт-Петербург

Рассмотрены перспективы применения и основные направления повышения эффективности твердотопливных котлов малой мощности, работающих по технологии высокотемпературного кипящего слоя (ВТКС). Для повышения устойчивости работы котлов с ВТКС и рециркуляцией дымовых газов на установившихся и переходных режимах разработана система автоматического регулирования процесса горения твердого топлива на базе многоканального программируемого контроллера. Рабочие параметры автоматизированных котлов с ВТКС усовершенствованной конструкции и их динамические характеристики при работе на переходных режимах исследованы методами численного моделирования с использованием разработанной математической модели. Показано, что процесс горения твердого топлива в котлах ВТКС с рециркуляцией дымовых газов, в сравнении с котлами без рециркуляции, характеризуется улучшенными параметрами переходных процессов, а именно сокращением времени запаздывания на возмущающие воздействия, меньшей продолжительностью переходных процессов при оптимальных значениях коэффициента избытка воздуха в диапазоне от 1,15 до 1,25.

Теплоснабжение небольших городов, населенных пунктов и объектов различных ведомств в России обеспечивается от котельных малой мощности. Их количество достигает десятков тысяч. В основном это твердотопливные котельные, большинство которых построено в 60–80 годах XX в. и укомплектованы чугунными секционными и стальными котлами устаревших конструкций с топками ручного обслуживания. В них отсутствует механизация и автоматизация технологических процессов, эффективные системы газоочистки, основное оборудование значительно изношено и морально устарело.

Угли, поставляемые на твердотопливные котельные малой мощности, характеризуются низкой теплотворной способностью и высоким содержанием внешнего

балласта. В результате работа котлов сопровождается пониженной эффективностью сжигания твердого топлива, что приводит к снижению эффективности, высоким эксплуатационным затратами и неудовлетворительным экологическим показателям. Эксплуатация твердотопливных котельных характеризуется тяжелым ручным трудом обслуживающего персонала в условиях запыленных и загазованных помещений.

Перспективным направлением совершенствования твердотопливных котельных малой мощности является применение технологии высокотемпературного кипящего слоя (ВТКС).

В настоящее время на кафедре двигателей и тепловых установок Военного института (инженерно-технического) Военной Академии материально-технического обеспечения имени А.В. Хрулева (ВИ(ИТ) ВА МТО) накоплен значительный опыт разработки и промышленного изготовления высокоэффективных котлоагрегатов КВП-1,74-ВТКС, а также опыт проектирования, строительства и реконструкции угольных котельных с применением таких котлов [1, 4].

Применяемая в котле технология ВТКС позволяет достичь высоких экономических, технологических и экологических показателей:

- эффективность выгорания топлива составляет 95–98 %;

- коэффициент полезного действия котлоагрегата достигает 80–83 %;

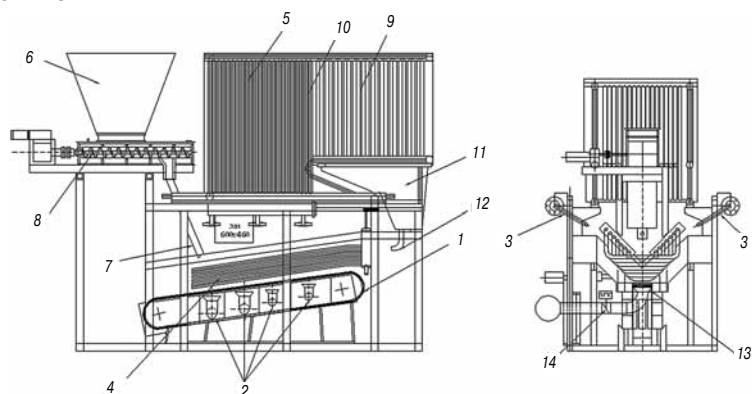


Рис. 1. Конструктивная схема модернизированного котла ВТКС с улучшенными характеристиками топочных процессов

➤ минимальные значения выбросов оксида азота, золовых и сажистых веществ за счет внутритопочных методов их подавления (NO_x 170–220 мг/нм³; SO_2 3,8–4,3 мг/нм³; CO 0,8–1,2 мг/нм³, твердые частицы 1,7 мг/нм³).

Наряду с положительными результатами в ходе экспериментальных исследований выявлен ряд недостатков, которые препятствуют устойчивой работе котла ВТКС на статических и динамических режимах. Для устранения данных недостатков на кафедре разработана усовершенствованная конструкция котла ВТКС, на которую получен патент № 170747 «Котлоагрегат для сжигания твердого топлива в кипящем слое» [6].

В данной конструкции, наряду с прежними конструктивными элементами, подвижной колосниковой решеткой прямого хода 1, дутьевыми зонами первичного 2 и вторичного дутья 3, панелью охлаждения 4, газоплотными водотрубными секциями 5, 9, топливным бункером 6, наклонной плитой 7, перегородкой 10 из жаропрочной стали, бункером возврата уноса 11 с эжектором возврата уноса 12, применены новые конструктивные решения:

1. Рециркуляция дымовых газов 14 — для снижения температуры горения и предотвращения шлакования решетки.

2. Питатель шнекового типа 8 — для обеспечения равномерной (непорционной) подачи топлива и повышения устойчивости горения на установившихся режимах работы и качества переходных процессов на динамических режимах.

3. Воздуховоды в зонах вторичного дутья в виде шелевых сопел 3 — для создания более плотной воздушной завесы мелким фракциям топлива и уменьшения потерь теплоты от

механической неполноты сгорания топлива вследствие уноса.

4. Воздуховод в зоне первичного дутья под колосниковой решеткой изогнут до вертикального положения — для предотвращения смещения потока первичного воздуха в сторону и возникновения кратерного горения.

5. В надрешеточную поверхность нагрева добавлена дополнительная трубная секция 4 —

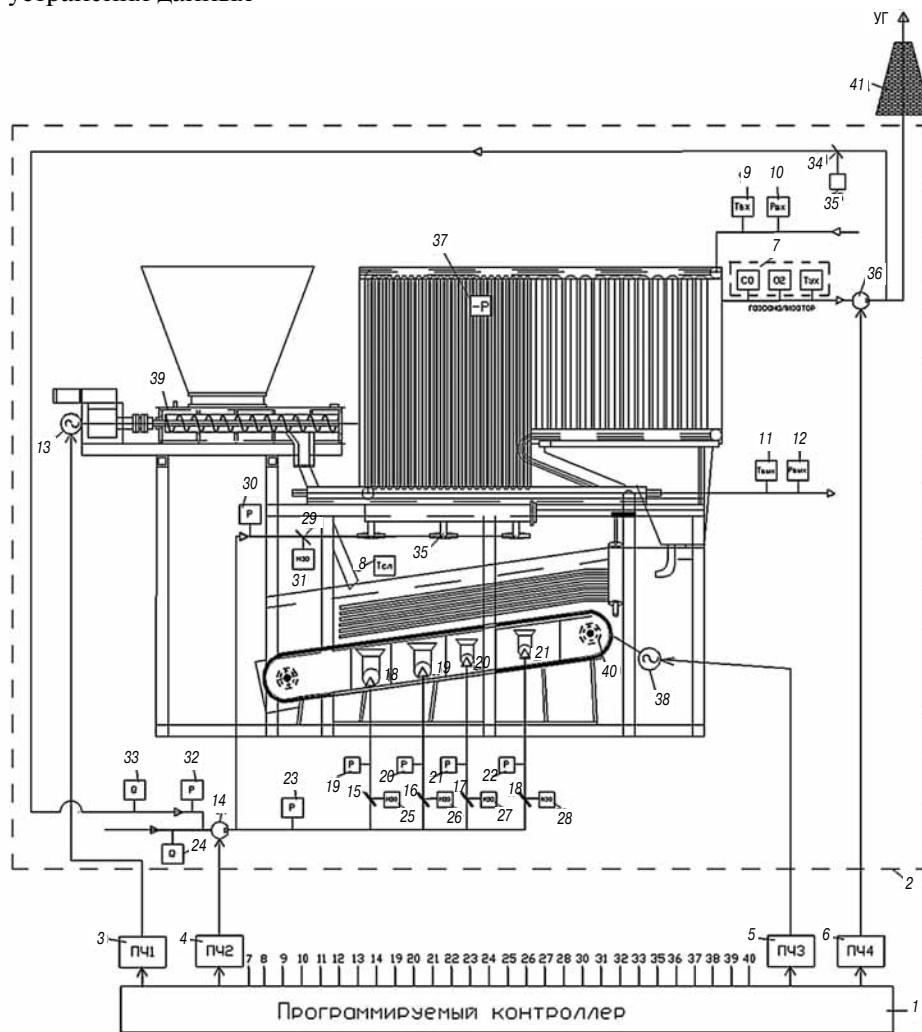


Рис. 2. Схема автоматизации котла ВТКС с рециркуляцией дымовых газов:

1 — программируемый контроллер; 2 — котлоагрегат с рециркуляцией уходящих газов; 3, 4, 5 и 6 — исполнительные механизмы с частотно-регулируемыми приводами; 7 — газоанализатор; 8 — датчик температуры кипящего слоя; 9, 10 — датчики температуры и давления воды на входе в котлоагрегат; 11, 12 — датчики температуры и давления воды на выходе из котлоагрегата; 13 — привод питателя; 14 — вентилятор для воздушной смеси; 15, 16, 17 и 18 — шибера для регулирования позонного первичного дутья; 19, 20, 21, 22 — датчики давления позонного первичного дутья; 23 — датчики давления (общего) первичного дутья; 24 — датчик расхода воздуха; 25, 26, 27 и 28 — исполнительные механизмы с электроприводом шибера регулирования позонного первичного дутья; 29 — шибера регулирования вторичного дутья; 30 — датчик давления вторичного дутья; 31 — исполнительный механизм с электроприводом шибера регулирования вторичного дутья; 32 — датчик давления рециркуляции уходящих газов; 33 — датчик расхода рециркуляции уходящих газов; 34 — шибера регулирования рециркуляции уходящих газов; 35 — исполнительный механизм электроприводом шибера регулирования уходящих газов; 36 — дымосос; 37 — датчик разряжения; 38 — привод колосниковой решетки; 39 — питатель топлива; 40 — колосниковая решетка; 41 — дымовая труба

для обеспечения оптимального теплосъема от кипящего слоя и стабилизации температуры.

Таким образом, предлагаемые конструктивные решения позволяют осуществить устойчивый режим работы котла на статических и динамических режимах.

Для обеспечения работы котла ВТКС в автоматическом режиме было разработано техническое решение «Система автоматического регулирования процесса горения котлоагрегата для сжигания твердого топлива в кипящем слое с рециркуляцией уходящих газов» (заявка на изобретение № 2018118920 от 22.05.2018). Схема такого решения приведена на рис. 2, где показано, что в программируемом логическом контроллере предусмотрен канал рециркуляции уходящих газов, соединенный с датчиком температуры кипящего слоя, исполнительным механизмом регулирования рециркуляции уходящих газов, датчиками контроля и безопасности на линии первичного дутья и рециркуляции.

Для подтверждения работоспособности конструктивного решения котла ВТКС с рециркуляцией дымовых газов проведены теоретические исследования переходных процессов.

Существует ряд аналитических моделей переходных процессов в котлах средней и большой мощности с топками НТКС и ЦКС, известны ряд моделей переходных режимов работы в котлах малой мощности с топками ВТКС при сжигании угля [2, 3], но в данных моделях не учитывается процесс рециркуляции уходящих газов и применение существующих моделей для новой конструкции котла представляется некорректным ввиду особенностей топочных устройств высокотемпературного кипящего слоя и инерционности их рабочих процессов.

Для моделирования переходных процессов котла ВТКС с рециркуляцией дымовых газов за основу принята известная математическая модель, разработанная Карповым М.А. [2].

Входными параметрами модели являются конструктивные параметры топочной камеры, физические свойства, расходы и температуры топлива и воздуха. Дифференциальные уравнения, описывающие переходные процессы в топке ВТКС, имеют вид:

$$M \cdot c_i \cdot \frac{dt_b}{dt} = V \cdot S^* \cdot Q_k \cdot j \cdot z - V \cdot S^* \cdot Q_2 \cdot j_2 \cdot z - B \left(1 - \frac{W^r}{100} - \frac{V^r}{100} \right) c_k (t_b - t_n) - B \frac{W^r}{100} \kappa - \quad (1)$$

$$\cdot w_{cm} \cdot F \cdot c_r \cdot (t_b - t_b) - k_n \cdot F_n \cdot (t_b - t_n) + \beta_l \cdot Q_l \cdot B \cdot \frac{V^r}{100};$$

$$V \cdot \rho_k \cdot \frac{dz}{dt} = B - V \cdot S^* \cdot j \cdot z; \quad (2)$$

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_r}{\delta}; \quad (3)$$

$$\alpha_\lambda = 6,53\sigma \cdot \varepsilon_M \cdot \varepsilon_r \cdot T. \quad (4)$$

Переходные процессы описываются системой дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями для концентрации горючих $z[\tau]$ и температуры $tb[\tau]$. После интегрирования системы уравнений методом Коши получаем:

$$fz(\tau) = \frac{B}{jSV} \left(-e^{-\frac{jS\Phi}{\rho_k} \tau} + 1 \right) + z_0 e^{-\frac{jS\tau}{\rho_k}}; \quad (5)$$

$$ft_b = \frac{BQ_i^r}{w_{cm} \cdot F_b \cdot c_r + k_n \cdot F_n} + \frac{1}{\left(-k_n \cdot F_n + w_{cm} \cdot F_b \cdot c_r + \frac{jSC_m M}{\rho_k} \right)} X \quad (6)$$

$$\left(\left(t_b \left(-k_n \cdot F_n + w_{cm} \cdot F_b \cdot c_r + \frac{jSC_m M}{\rho_k} \right) Q_i^r SV(z_0) - \frac{BjQ_i^r SC_m M}{(k_n \cdot F_n + w_{cm} \cdot F_b \cdot c_r) \rho_k} \right) e^{\frac{jS\tau}{\rho_k} (BQ_i^r - jQ_i^r SV_z)} \uparrow + e^{\frac{(k_n \cdot F_n + w_{cm} \cdot F_b \cdot c_r)}{c_n M}} \right)$$

где M — масса слоя, кг; c_i, c_k, c_r — теплоемкость материала слоя, коксового остатка, продуктов сгорания Дж/кг К; t_b, t_b, t_n, t_n — температура частиц в слое, начальные температуры воздуха, топлива, температура тепловоспринимающей среды, К; V — объем кипящего слоя, м³; S — удельная поверхность реагирования частиц, 1/м; Q_k, Q_l — теплота сгорания коксового остатка и летучих частиц, ккал/кг; j, j_2 — удельный поток реагирующего углерода с кислородом и диоксидом углерода, кг/(м²с); z — концентрация горючих в слое, %; β_l — доля летучих передавшая теплоту слою; B — расход топлива, кг; V^r — выход летучих в рабочем состоянии, %; W^r — влажность топлива в рабочем состоянии, %; k_n — коэффициент теплопередачи в кипящем слое, Вт/(м²К); w — скорость сгорания газозвушной смеси на свободное сечение, м/мин; F_b — площадь попе-

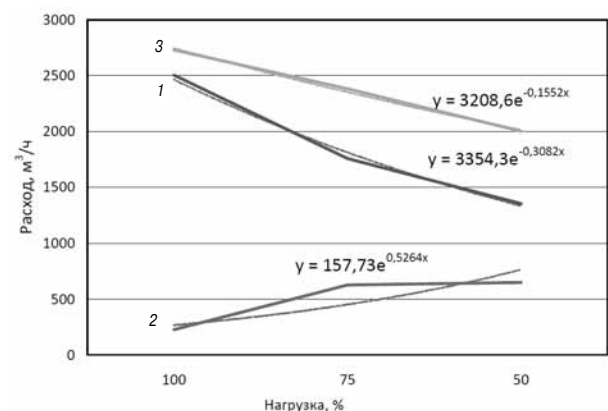


Рис. 3. Функциональные зависимости изменения расходов от нагрузки котла:

1 — изменение расхода воздуха; 2 — изменение расхода газов рециркуляции; 3 — изменение расхода газозвушной (ГВС) смеси

речного сечения топки, m^2 ; F_n — площадь поверхности теплообмена, m^2 ; ρ_k — плотность коксовых частиц, kg/m^3 .

Отличительной особенностью данной модели с рециркуляцией дымовых газов является то, что в уравнении (1) теплового баланса включена составляющая расхода газозвушной смеси, учитывающая дополнительное количество тепла, внесенного в топку котла $w_{см} \cdot F \cdot c_r \cdot (t_b - t_b)$ с газами рециркуляции; дополнительной особенностью является то, что при составлении уравнений теплового и материального баланса теплота, выделяющаяся за счет сгорания топлива, раскладывается из теплоты сгорания коксового остатка и летучих частиц, затрачивается на подогрев коксового остатка, испарение влаги,

теплоотвод к поверхностям теплообмена и на подогрев продуктов сгорания до температуры слоя.

По разработанной математической модели с использованием программного обеспечения «Mathematica» выполнен расчет основных параметров переходных процессов при изменениях расходов топлива и газозвушной смеси.

На рис. 3 показаны расчетно-экспериментальные зависимости расходов воздуха, газов рециркуляции и газозвушной смеси в зависимости от нагрузки котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальных и долевых режимах работы.

В результате численного решения данных дифференциальных уравнений определяется изменение температуры слоя в зависимости от различных возмущений — изменения подачи

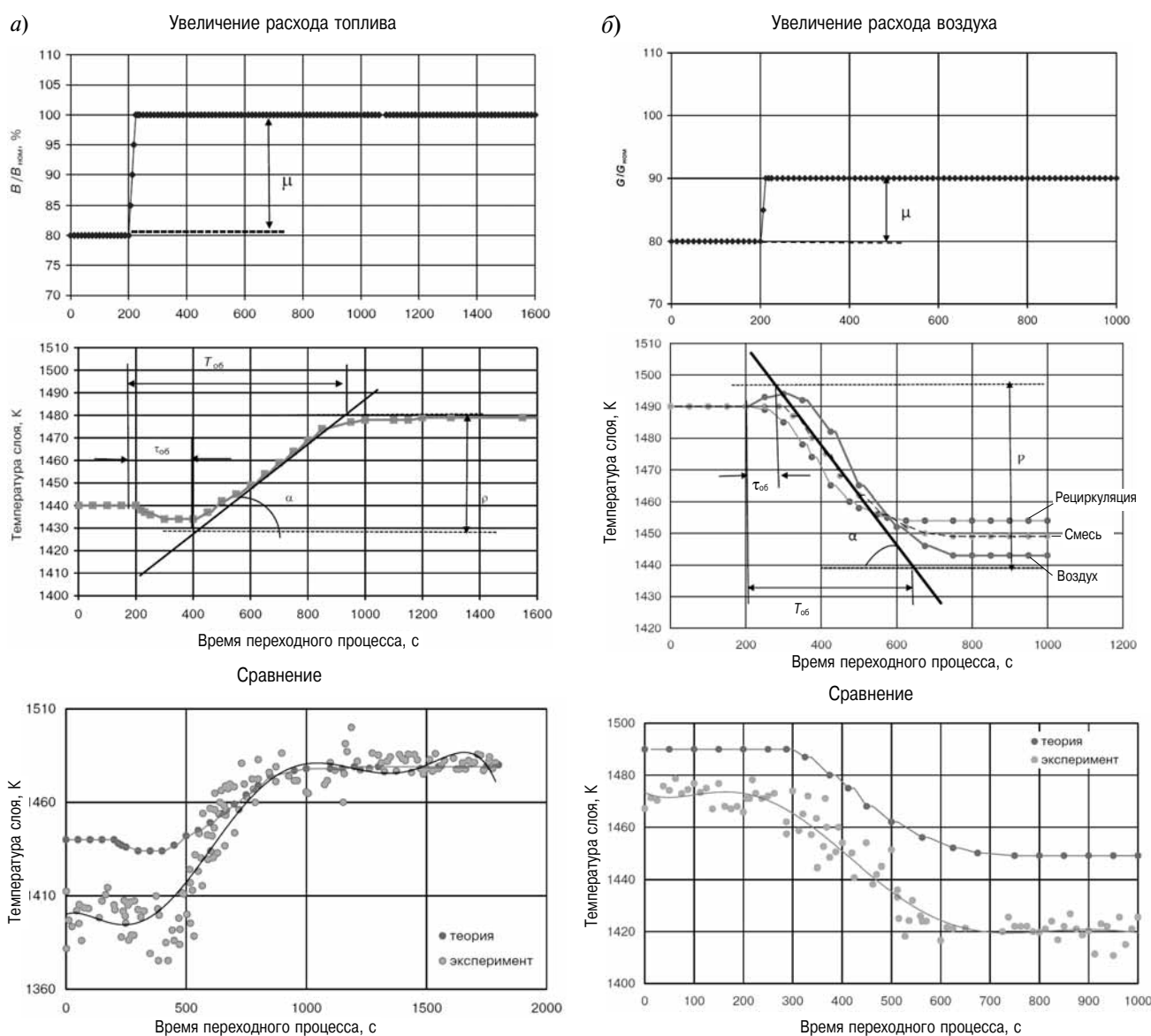


Рис. 4. Изменение температуры слоя при различных возмущающих воздействиях:

a — изменение температуры слоя при увеличении расхода топлива; *b* — изменение температуры слоя при увеличении расхода газозвушной смеси

топлива или воздуха. Расчеты выполнены для сжигания угля следующего фракционного состава: содержание углерода $C_p = 0,565$, водорода $H_p = 0,04$, серы $S_p = 0,05$, кислорода $O_p = 0,011$, азота $N_p = 0,015$, зольность $A_p = 0,095$, влажность $W_p = 0,17$, выход летучих $V_p = 0,46$.

В качестве примера на рис. 4 показана реакция котла на ступенчатое изменение расхода топлива от постоянного значения в заданный момент времени до постоянного значения по линейному закону в течение заданного промежутка времени Δt . На графиках представлены изменения температуры слоя при увеличении расхода топлива от 80 до 100 %. Также показана реакция котла на ступенчатое изменение расхода газовой смеси от постоянного значения $G_{ном}$ в заданный момент времени τ до постоянного значения G по линейному закону в течение заданного промежутка времени Δt . На графиках представлено изменение температуры слоя при увеличении расхода газовой смеси от 80 до 90 %. На рис. 4 также приведены графики переходных режимов работы котла малой мощности с высокотемпературным кипящим слоем КВП-1,74 ВТКС при изменении расхода топлива и воздуха без рециркуляции, полученные в диссертационной работе Проскуракова Д.А. [3].

При увеличении расхода топлива в начале переходного процесса наблюдается некоторое снижение температуры слоя из-за увеличения расхода тепла на испарение влаги и прогрев топлива. Затем температура возрастает по мере увеличения концентрации горючего в объеме слоя.

Увеличение расхода газовой смеси приводит к снижению температуры кипящего слоя в связи с увеличением доли тепла, расходуемого на нагрев большего количества воздуха, поступающего в топку.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что инерционность процесса при увеличении (уменьшении) подачи топлива в среднем в 1,5 раза (а продолжительность в 2 раза) выше, чем при изменении расхода воздуха. Этот

факт объясняется тем, что возмущения при изменении подачи топлива или воздуха по-разному влияют на изменение содержания горючих в кипящем слое, изменяется также и количество теплоты, вносимое в топку с данными средами.

Сравнительный анализ протекания переходных процессов в угольных котлах с рециркуляцией дымовых газов и без нее показывает улучшение качества основных динамических параметров, времени запаздывания $\tau_{об}$, разгона объекта $T_{об}$, коэффициента самовыравнивания $\rho_{об}$ при работе с рециркуляцией. Время запаздывания $\tau_{об}$ и коэффициент самовыравнивания $\rho_{об}$ значительно уменьшаются, так как в топку подается газоздушная смесь с температурой 80–90°C. В результате уменьшается инерционность и продолжительность переходного процесса в среднем в 1,5 раза.

Выводы

1. В результате выполненных расчетов с использованием разработанной математической модели установлено, что горение топлива в котлах ВТКС с рециркуляцией дымовых газов на динамических режимах характеризуется улучшением качества переходных процессов по показателям времени запаздывания, времени разгона и коэффициента самовыравнивания, при оптимальном значении коэффициента избытка воздуха 1,15–1,25, в отличие от топок без рециркуляции, в которых значение коэффициента находится в пределах от 1,6–1,8 [3].

2. Установлен характер влияния возмущающих воздействий на температуру кипящего слоя, а также характер изменения режимных параметров топки ВТКС котла малой мощности с использованием рециркуляции уходящих газов при сжигании угля.

3. Полученные результаты могут быть использованы для разработки алгоритмов автоматического регулирования процесса горения в топке ВТКС с рециркуляцией дымовых газов угольного котла малой мощности и заложены в программируемый контроллер для автоматизированного управления топочными процессами.

Литература

1. Смирнов А.В., Рода И.С., Овчаров И.В., Бондарев А.В., Карпов М.А. Практический опыт проектирования, строительства и реконструкции угольных котельных малой мощности по технологии высокотемпературного кипящего слоя // Инженерные системы. — 2006. — № 4 (25).
2. Смирнов А.В., Карпов М.А. и др. Автоматизация котлов малой мощности с топками высокотемпературного кипящего слоя // Стройпрофиль. — 2004. — № 3(33).
3. Смирнов А.В., Проскураков Д.А. и др. Экспериментальные исследования сжигания твердого топлива в котле малой мощности с топкой высокотемпературного кипящего слоя на переходных режимах работы // Инженерные системы. — 2009. — № 1(38). — С. 34–39.

4. Бондарев А.В., Морозов Б.И., Смолинский С.Н. Оценка технико-экономической эффективности реконструкции систем теплоснабжения с применением угольных котлов высокотемпературного кипящего слоя // Двигателестроение. — 2017. — № 4 (270). — С. 34–40.

5. Карпов М.А., Смирнов А.В., Юферев Ю.В., Воронов В.Ю., Кныш С.А. Котлоагрегат для сжигания угля в кипящем слое. Патент на полезную модель. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей РФ 20.05.2004 г. №38041. Бюл. № 14.

6. Смирнов А.В., Бондарев А.В., Маллаев К.М. и др. Котлоагрегат для сжигания твердого топлива в кипящем слое. Патент на полезную модель. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей 05.05.2017 г., №170747. Бюл. № 13.