

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ КОТЛАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ТОПКАМИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

А.В. Бондарев, к.т.н.,  
ВА МТО, Санкт-Петербург

Представлен обзор математических моделей для расчета переходных процессов в котлах малой мощности высокотемпературного кипящего слоя. Приведены расчетные и экспериментальные данные изменения температуры слоя от возмущающих воздействий, вызванных изменением расхода топлива и воздушной смеси. Разработана модель, применимая для моделирования топочных процессов в котлах малой мощности с рециркуляцией уходящих газов при сжигании угля, торфа и древесных отходов, а также для сжигания угля в комбинированных установках, состоящих из дизель-генератора и активного котла-утилизатора.

Одним из наиболее перспективных направлений модернизации и технического перевооружения существующих угольных котельных в диапазоне мощностей от 1,5 до 9 Гкал/ч является применение технологии сжигания угля в высокотемпературном кипящем слое (ВТКС).

Теоретические и экспериментальные исследования котлов малой мощности с кипящим слоем при работе на угле, торфе и древесных отходах, а также их совместной работы с дизель-генератором проведены на кафедре двигателей и тепловых установок Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения [1–4]. Однако при проведении исследований в работе на установившихся и переходных режимах в топочных процессах котлоагрегата выявлены существенные недостатки. Так, при поддержании оптимальной гидродинамики кипящего слоя в объеме топочного пространства наблюдались повышенные значения коэффициента избытка воздуха, что приводило к возрастанию температуры в топке котла и как следствие — шлакованию решетки, появлялись очаги кратерного горения и образования «шлаковых мостиков».

Для устранения указанных недостатков и повышения устойчивого горения разработан ряд конструктивных технических решений, где в качестве основного предложена рециркуляция уходящих дымовых газов в воздуховод первичного

дутья. Другим решением при совместной работе дизель-генератора с котлом кипящего слоя является подача отработавших газов дизеля в топку котла. Данные мероприятия позволяют улучшить внутри топочные процессы, за счет оптимизации коэффициента избытка воздуха, улучшают экологические показатели и способствуют экономии котельного топлива [5, 6].

Для оптимизации процесса горения топлива в котле ВТКС в автоматизированном режиме с учетом его функционально-технологических особенностей разработаны технические решения по совершенствованию систем автоматического регулирования процесса горения при сжигании различных видов твердого топлива с учетом рециркуляции уходящих газов, а также подачи отработавших газов дизель-генератора в топку котла при их совместной работе. Данные решения защищены патентами на изобретения [7–10].

Эффективность разработанных технических решений подтверждена теоретическими исследованиями переходных процессов в котлах малой мощности с топками кипящего слоя. Математические модели для моделирования топочных процессов котлов малой мощности с кипящим слоем приведены в работах [11, 12]. Однако в данных моделях не учитывалась возможность рециркуляции газов, необходимой для качественного протекания переходных процессов в топке котла и создания эффективной системы автоматического регулирования процесса горения и пуска котлоагрегата ВТКС.

Для проведения теоретических исследований разработана базовая модель, описывающая переходные процессы в топке с кипящим слоем, с рециркуляцией уходящих газов при сжигании угля, состоящая из системы уравнений теплового и материального баланса при начальных условиях:  $z(0) = z_0$ ;  $t(0) = t_0$ ;

$$\begin{cases} \frac{dz}{d\tau} = -\frac{Sj}{\rho_k} z(\tau) + \frac{B}{V\rho_k} \\ \frac{dt}{d\tau} = \frac{VSQ_{ri}j}{MC_m} z(\tau) - \frac{wFC_g + k_p F_p}{MC_m} t(\tau), \end{cases} \quad (1)$$

$$j = v \cdot a_r \cdot C_{O_2}; \quad j_2 = v_2 \cdot a_{r,CO_2} \cdot C_{CO_2}; \quad (2)$$

$$\alpha_r = \left( \frac{1}{k_1} + \frac{\delta}{Sh \cdot D} \right)^{-1}; \quad (3)$$

$$\alpha_\kappa = \frac{Nu \cdot \lambda_\Gamma}{\delta}; \quad \alpha_\lambda = 8,64\sigma \cdot \epsilon_H \cdot \epsilon_{ст} \cdot t_{кc}^3; \quad (4)$$

$$k_p = \alpha_\kappa + \alpha_\lambda, \quad (5)$$

где  $z(\tau)$ ,  $z_0$  — концентрация горючих в момент времени  $\tau$  и  $\tau = 0$ ;  $t(\tau)$ ,  $t_0$  — температура кипящего слоя в начальный момент времени  $\tau$ , °C;  $M$  — масса кипящего слоя, кг;  $V$  — объем кипящего слоя, м<sup>3</sup>;  $\rho_k$  — плотность коксовых частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $C_m$ ,  $C_g$  — удельная теплоемкость материала слоя, продуктов сгорания, ккал/(кг °C);  $Q_{ri}$  — теплота сгорания топлива, ккал/кг;  $F$ ,  $F_p$  — площадь поперечного сечения топки, поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $k_p$  — коэффициент теплопередачи, ккал/(м<sup>2</sup>мин°C);  $S$  — удельная поверхность реагирующих коксовых частиц, 1/м;  $w$  — скорость продуктов сгорания на свободное сечение, м/мин;  $B$  — расход топлива, кг/с;  $j$ ,  $j_2$  — удельный поток углерода при его реагировании с кислородом и диоксидом углерода, кг/(м<sup>2</sup>мин);  $\alpha_r$ ,  $\alpha_{r,CO_2}$  — коэффициенты реакционного газообмена;  $C_{O_2}$ ,  $C_{CO_2}$  — средние концентрации кислорода и диоксида углерода по высоте;  $v$  — стехиометрические коэффициенты реакции;  $\lambda_\Gamma$  — коэффициент теплопроводности газов, Вт/мК;  $\sigma$  — постоянная Стефана–Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>;  $\alpha_\lambda$ ,  $\alpha_\kappa$  — лучистая и конвективная составляющая теплообмена;  $\epsilon_H$ ,  $\epsilon_{ст}$  — излучательная способность угля и шлака и стали;  $Sh$  — критерий Шервуда;  $\delta$  — диаметр топливной частицы, м;  $D$  — коэффициент молекулярной диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $k_1$  — константа скорости окисления углерода, м/с;  $t_{кc}$  — температура кипящего слоя, °C.

Для моделирования переходного процесса при условии ступенчатого изменения расхода топлива или газовой смеси преобразуем выражение (1) в дифференциальное уравнение второго порядка, используя следующие обозначения постоянных величин:

$$T_1 = \frac{\rho_k}{Sj}; \quad T_2 = \frac{M C_m}{F C_g}; \quad T_3 = \frac{M C_m}{k_p F_p}; \quad k = \frac{Q_{ri}}{M C_m};$$

$$\frac{d^2t}{dt^2} + \left( \frac{F C_g}{M C_m} w + \left( \frac{Sj}{\rho_k} + \frac{k_p F_p}{M C_m} \right) \right) \frac{dt}{dt} + \left( \frac{F C_g S j}{M C_m \rho_k} w + \frac{k_p F_p S j}{M C_m \rho_k} \right) t(\tau) = \frac{Q_{ri} S j B}{M C_m \rho_k}. \quad (6)$$

При подстановке ступенчатого изменения расхода воздушной смеси в топке котла от постоянного значения  $w_0$  в заданный момент времени  $\tau = \tau_1$  до постоянного значения  $w_1$ , пред-

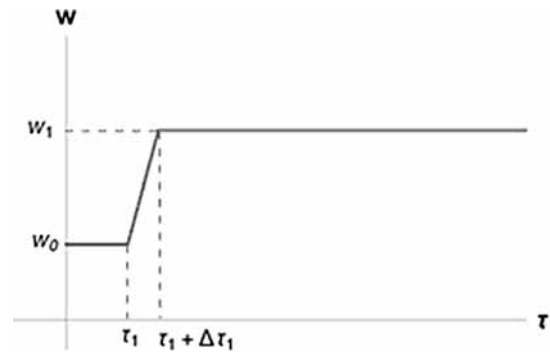


Рис. 1. Примерный вид зависимости ступенчатого изменения скорости воздушной смеси (7)

ставленного на рис. 1, получим уравнение для моделирования переходного процесса

$$w_{cm}(\tau) = w_0 \cdot (l(\tau) - 1(\tau - \tau_1)) + \left( \frac{w_1 - w_0}{\Delta\tau_1} (\tau - \tau_1) + w_0 \right) (l(\tau - \tau_1) - 1(\tau - \tau_1 - \Delta\tau_1)) + w_1 \cdot 1(\tau - \tau_1 - \Delta\tau_1), \quad (7)$$

где по функции Хевисайда

$$l(\tau) = \begin{cases} 1, & \tau \geq 0 \\ 0, & \tau < 0 \end{cases}$$

Аналогичным образом получим уравнение ступенчатого изменения расхода топлива  $B$ .

Окончательно дифференциальное уравнение изменения температуры во времени при изменении двух параметров расхода топлива и газовой смеси имеет вид:

$$\frac{d^2t}{dt^2} + \left( \frac{1}{T_2} w_{cm}(\tau) + \left( \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_3} \right) \right) \frac{dt}{dt} + \left( \frac{1}{T_1 T_2} w_{cm}(\tau) + \frac{1}{T_1 T_3} \right) t(\tau) = \frac{k}{T_1} B_{cm}(\tau) \quad (8)$$

с начальными условиями

$$t(0) = t_0; \quad \frac{dt}{dt}(0) = \frac{dt_0}{dt} = \frac{V S Q_{ri} j}{M C_m} z_0 - \frac{w_0 F C_g + k_p F_p}{M C_m} t_0. \quad (9)$$

Расчеты переходных процессов выполнены для сжигания угля следующего элементарного 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  $V_p = 0,46$ .

На рис. 2 и 3 представлены результаты основных расчетных показателей переходных процессов в виде разгонных характеристик при ступенчатом изменении расхода топлива и газовой смеси при сжигании угля.

Результаты моделирования переходных процессов показали, что при сжигании угля в топках

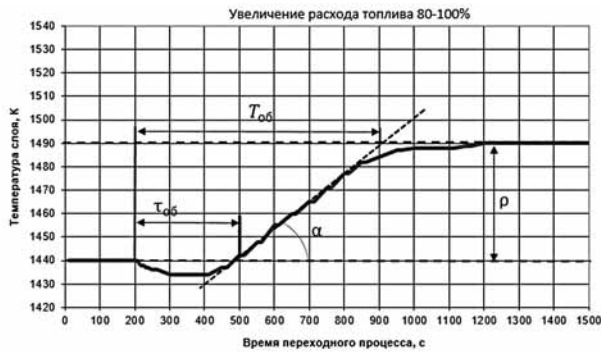


Рис. 2. Изменение температуры слоя в котле с рециркуляцией уходящих газов при увеличении расхода топлива



Рис. 3. Изменение температуры слоя в котле с рециркуляцией уходящих газов при увеличении расхода газовой среды

котлов ВТКС с рециркуляцией уходящих газов уменьшается время запаздывания в 1,2 раза, время переходного процесса в 1,5 раза (до 15 минут), по сравнению с переходными процессами без рециркуляции газов.

Графики сравнения экспериментальных и расчетных показателей при сжигании угля с рециркуляцией уходящих газов представлены в работе [4].

На следующем этапе с использованием полученных дифференциальных уравнений выполнены расчеты переходных процессов при сжигании торфа и древесных отходов в топке высокотемпературного кипящего слоя (ВТКС), а также комбинированной установки при совместной работе дизель-генератора с котлом и подачей отработавших газов в топку котла.

Отличительной особенностью моделирования переходного процесса сжигания торфа в топках с ВТКС с рециркуляцией уходящих газов является необходимость определения лучистой составляющей теплообмена в топочной камере, которая зависит от температур в объеме топки кипящего слоя и экранных труб поверхностей нагрева. Расчетно-поправочный коэффициент для лучистого теплообмена определяется по зависимости

(10), полученной в ходе экспериментальных исследований

$$\alpha_n = 5,24 \cdot \sigma \cdot \varepsilon_n \cdot \varepsilon_{ст} \cdot t_{кc}^3 \cdot \left( 1 - \left( \frac{t_{ст}}{t_{кc}} \right)^{0,2} \right), \quad (10)$$

где  $t_{ст}$  — температура стальной стенки.

Расчеты выполнены для условий сжигания фрезерного торфа Тихвинского месторождения следующего элементарного состава: содержание углерода  $C_p = 42,14 \%$ ; водорода  $H_p = 4,46 \%$ ; серы  $S_p = 0,15 \%$ ; зольность  $A_p = 2,17 \%$ ; влажность  $W_p = 23,5 \%$ ; выход летучих  $V_p = 69,85 \%$ . Геометрические параметры топки, расход топлива, воздушной смеси и другие параметры на номинальных и долевых режимах работы рассчитаны для котла малой мощности КВП-1,74-ВТКС-Д.

На рис. 4, 5 приведены графики изменения температуры слоя при увеличении расхода топлива и газовой смеси в диапазоне нагрузок котла от 80 до 100 % при сжигании фрезерного торфа.

Переходные процессы в котле при сжигании торфа с рециркуляцией уходящих газов характеризуются улучшенными динамическими характеристиками из-за повышенной температуры входящей воздушной смеси в топку котла. При этом уменьшается время переходного процесса в 1,3 раза, время запаздывания на 25 %, увели-

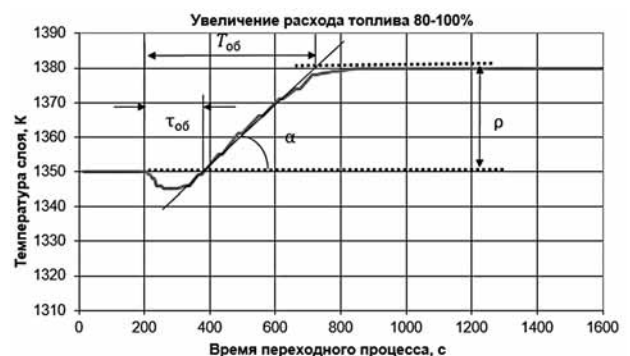


Рис. 4. Изменение температуры слоя при увеличении расхода топлива при сжигании торфа

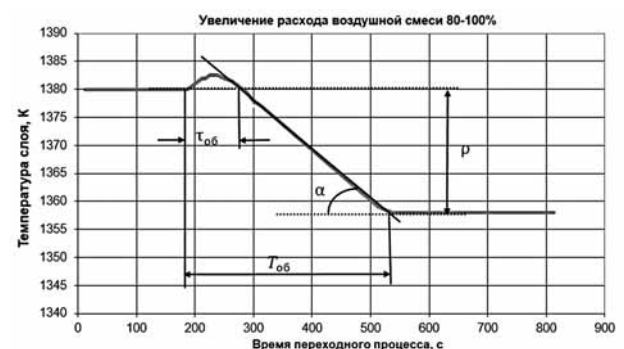


Рис. 5. Изменение температуры слоя при увеличении расхода газовой среды при сжигании торфа

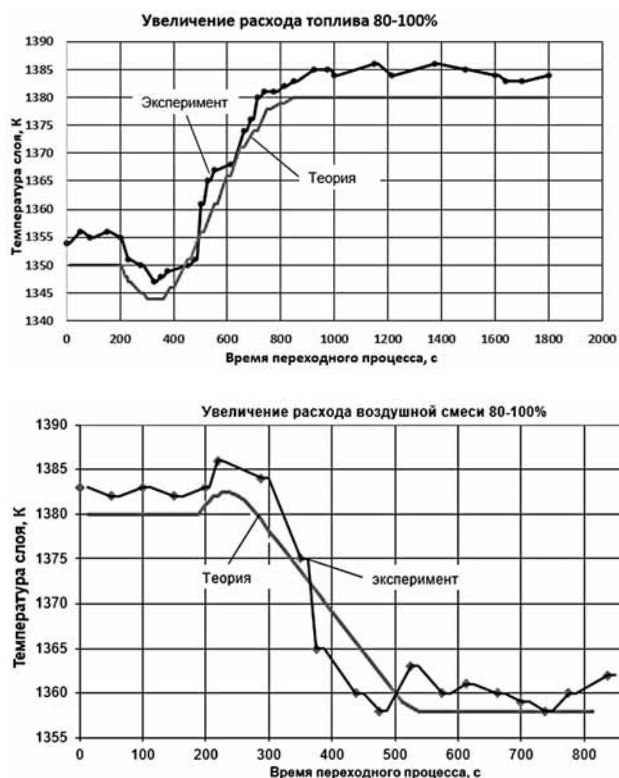


Рис. 6. Сравнение переходных процессов в котле ВТКС с рециркуляцией уходящих газов при различных возмущающих воздействиях при сжигании торфа

чивается коэффициент самовыравнивания на 15 %, в сравнении со сжиганием торфа без рециркуляции газов.

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных переходных процессов при сжигании торфа, представленные на рис. 6, показывают удовлетворительную сходимость, с погрешностью не превышающую 10 %.

Улучшения экологических показателей, снижение вредных выбросов в атмосферу, повышенные качества внутри топочных процессов за счет оптимизации коэффициента избытка воздуха, также экономия топлива может быть получена при подаче отработавших газов дизель-генератора в топку котла кипящего слоя.

Отличительной особенностью математической модели котла с топкой ВТКС при подаче отработавших газов дизеля в дутьевой воздух является определение лучистой составляющей коэффициента теплопередачи, которая рассчитывается по расчетно-экспериментальной зависимости (11). При этом температура газовой смеси подаваемая в топку котла составляет около 400 °С

$$\alpha_{л} = 9,14 \cdot \sigma \cdot \epsilon_{н} \cdot \epsilon_{ст} \cdot t_{КС}^3 \cdot \left( 1 - \left( \frac{t_{СТ}}{t_{КС}} \right)^{0,2} \right) \quad (11)$$

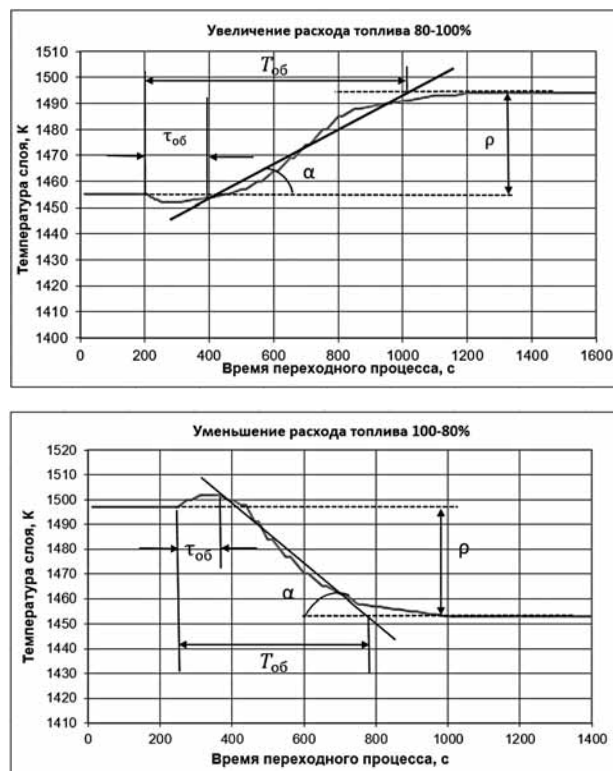


Рис. 7. Изменение температуры слоя при увеличении и снижении расхода топлива в котле ВТКС с подачей отработавших газов ДГ в топку угольного котла

С использованием базовой модели получены расчетные зависимости переходных процессов от возмущающих воздействий изменения расхода топлива на 20 %, а также при совместной работе дизель-генератора с котлом ВТКС. Эти зависимости представлены на рис. 7. Их анализ показывает, что высокая температура газовой смеси, подаваемой в топку котла, значительно повышает температуру горения до 1200 °С, время запаздывания сокращается до 140 с, при этом изменение температуры горения в первоначальный момент изменения нагрузки котла составляет 5–10 °С, что определяется быстрым удалением влаги вследствие высокой температуры горения в зоне первичного дутья, коэффициент самовыравнивания в 1,2 раза выше, чем при работе на воздухе. Результаты моделирования, представленные на рис. 8, показывают удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

Заключительный этап теоретических исследований включил моделирование пусковых режимов усовершенствованных котлов с топками высокотемпературного кипящего слоя, оборудованных пусковыми горелками, работающими на жидком топливе. Для данного объекта разработана математическая модель пусковых процессов [13]. В отличие от существующих математических

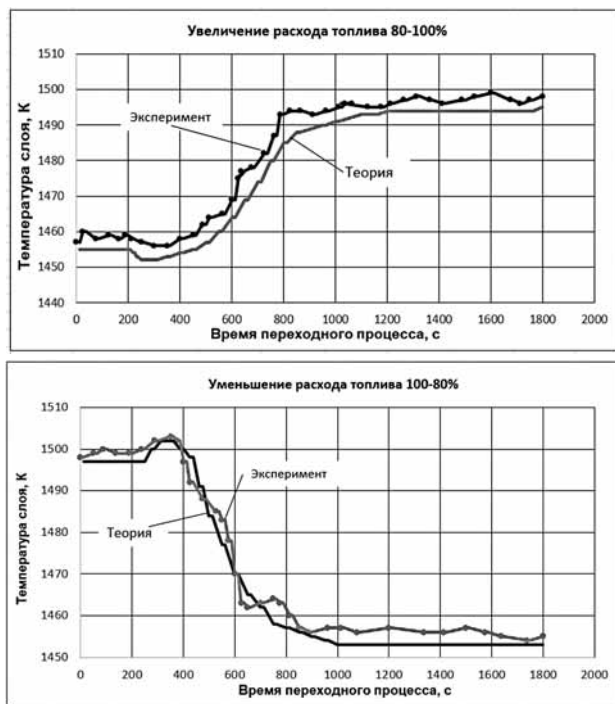


Рис. 8. Сравнение переходных процессов в котле ВТКС с подачей отработавших газов ДГ от возмущающих воздействий изменения расхода топлива при сжигании угля

моделей, здесь учитывается тепловая энергия, вырабатываемая в топочном пространстве котла во время работы розжиговой горелки.

Входными параметрами модели (при заданных конструктивных параметрах и характеристиках топлива) являются расход топлива, расходы и температуры первичного и вторичного воздуха. Выходными параметрами модели служат основные показатели дисперсного потока в топочном контуре, такие как температура, содержание кислорода и углерода, количество воспринятого тепла, а также потери с механическим недожогом.

В соответствии с расчетной схемой для каждого универсального блока  $i$  рассматривается система балансовых уравнений для массы золы, углерода, тепловых потоков и потоков газовых реагентов, включающих соотношения, описывающие скорость химического реагирования и теплоотдачу к теплообменным поверхностям.

Ниже представлена система уравнений, описывающая произвольный блок контура КС:

уравнение материального баланса по золе

$$\frac{dm_i(\tau)}{d\tau} = B_T(\tau) \frac{A^p}{100} + G_{B_{i+1}}(B_T(\tau)) + G_{3_{i-1}}(B_T(\tau)) + G_3(B_T(\tau)) - G_2(B_T(\tau)) - G_{B_i}(B_T(\tau)) - G_3(B_T(\tau)); \quad (12)$$

уравнение материального баланса по газу

$$\frac{d\alpha_i(\tau)}{d\tau} = \left( V_{B_1}(\tau) + V_{B_2}(\tau) + V_{PT}(\tau) + G_{B_{i+1}}(\tau) - G_{B_i}(\tau) - \frac{dV_i^0(\tau)}{d\tau} \cdot \alpha_i(\tau) \right) \cdot \frac{1}{V_i^0(\tau)}; \quad (13)$$

уравнение теплового баланса

$$\frac{dt_i(\tau)}{d\tau} = (Q_{T_i}(B_T(\tau)) + Q_{PT_i}(B_{PT}(\tau)) + Q_{B_{i+1}}(\tau) + Q_{3_{i-1}}(\tau) + Q_3(\tau) - Q_{Экр_i}(\tau) - Q_2(\tau) - Q_{B_i}(\tau) - Q_3(\tau) - \frac{dH_i(\tau)}{d\tau} \cdot t_i(\tau)) \cdot \frac{1}{H_i(\tau)}, \quad (14)$$

где  $H_i(\tau) = (V_i^0(\tau) \cdot \alpha_i(\tau) \cdot c_2 + m_i(\tau) \cdot c_3)$ .

Начальные условия для решения системы уравнений (12–14):

$$m_i d(0) = 0 \text{ кг}; \alpha_i(0) = 1,2; t_i(0) = 20 \text{ }^\circ\text{C},$$

где  $m_i(\tau)$  — масса твердой фазы, кг;  $B_T(\tau)$  — массовый расход твердого топлива, кг/с;  $G_{B_i}(\tau)$ ,  $G_3(\tau)$  — массовый расход опускающих токов твердой фазы, подъемных токов твердой фазы, кг/с;  $G_3(\tau)$ ,  $G_2(\tau)$  — массовый расход твердых частиц по линии возврата (слива), кг/с;  $G_{B_i}(\tau)$  — массовый расход газов в блоке  $i$ , кг/с;  $V_i^0(\tau)$  — массовый расход воздуха в блоке  $i$ , теоретически необходимого, кг/с;  $V_{B_1}(\tau)$ ,  $V_{B_2}(\tau)$ ,  $V_{PT}(\tau)$  — массовый расход первичного, вторичного воздуха, необходимого для сжигания жидкого топлива, кг/с;  $\alpha(\tau)$  — коэффициент избытка воздуха в блоке  $i$ ;  $Q_{T_i}(B_T(\tau))$ ,  $Q_{PT_i}(B_{PT}(\tau))$  — количество тепла, выделяющегося при сгорании основного топлива и растопочного топлива в блоке  $i$ , Вт;  $B_{PT}(\tau)$  — массовый расход жидкого топлива, кг/с;  $Q_{B_i}(\tau)$ ,  $Q_{3_i}$ ,  $Q_3(\tau)$ ,  $Q_2(\tau)$  — количество тепла опускающих, подъемных токов твердой фазы в блок  $i$ ; выделяющегося при сгорании твердых частиц по линии возврата; покидающего блок  $i$  со сливом, Вт;  $Q_{Экр_i}(\tau)$  — тепловой поток к экранам топки, Вт;  $c_1(\tau)$ ,  $c_3(\tau)$  — теплоемкость газа, твердых частиц по линии возврата, Дж/кг · с.

Отличительной особенностью представленной математической модели является введение в уравнение (13) материального баланса по газу составляющей  $V_{PT}(\tau)$ , связанной с дополнительным объемом воздуха от пусковой горелки, а в уравнение теплового баланса (14) — составляющей  $Q_{PT}(\tau)$ , учитывающей дополнительную тепловую энергию от сгорания растопочного топлива.

Система уравнений решена в программной среде Mathcad как задача Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений, решаемых с использованием метода Рунге–Кутты.

При этом переменные величины массовых расходов основного  $B_i(\tau)$  и растопочного  $B_{PT}(\tau)$  топлива заданы в виде эмпирических зависимостей, полученных в результате проведенных в настоящей работе испытаний, которые представлены на рис. 9.

Величины расходов золы  $G_3(\tau)$ ,  $G_2(\tau)$ ,  $G_{B_i}(\tau)$ ,  $G_{3_i}(\tau)$  и их теплосодержаний  $Q_3(\tau)$ ,  $Q_2(\tau)$ ,  $Q_{B_i}(\tau)$ ,  $Q_{3_i}(\tau)$ , а также массовые расходы газов в блоке  $G_{B_{i-1}}(\tau)$ ,  $G_{B_i}(\tau)$  были заданы в виде эмпирических зависимостей, полученных из работ Давыдова Н.И., Плоткина Е.Р., Рябова Г.А., Шмуклер



Рис. 9. Экспериментальные графики зависимостей массового расхода твердого и дизельного топлива от времени при автоматизированном пуске котла с помощью жидкотопливной горелки

Б.И. и др. по исследованиям переходных процессов в котлах с кипящим слоем.

Переменная величина массовых теоретических расходов  $V_i^0(\tau)$  газообразных продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха 1 задается в виде расчетных зависимостей стехиометрических реакций горения и экспериментальных зависимостей расходов основного  $V_г(\tau)$  и растопочного  $V_{рт}(\tau)$  топлива. Переменные величины первичного  $V_{В1}(\tau)$ , вторичного  $V_{В2}(\tau)$  и растопочного воздуха  $V_{рт}(\tau)$  получены из режимных карт, количества тепла, выделяющегося при сгорании основного и растопочного топлива  $Q_{г}(\tau)$ ,  $Q_{рт}(\tau)$  в блоке  $i$  заданы в виде эмпирических зависимостей от переменных величин расходов топлива.

На рис. 10, 11 представлены расчетные графические зависимости коэффициента избытка воздуха, температуры в топке от времени растопки котла и сравнение теоретических и экспериментальных значений параметров топочных процессов на пусковых режимах.

Анализ расчетных графиков показывает, что в момент пуска более высокое значение коэффициента избытка воздуха и расхода воздуха в топке котла, оборудованного пусковой горелкой, обусловлено нагнетанием воздуха вентилятором горелки и изменением параметров регулирования для обеспечения эффективного сгорания жидкого топлива.

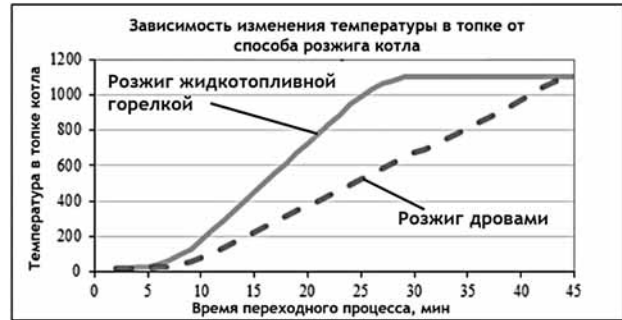
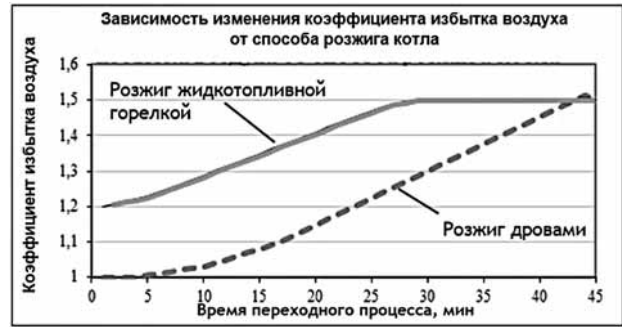


Рис. 10. Расчетные графики параметров топочных процессов на пусковых режимах



Рис. 11. Графики сравнения параметров топочных процессов на пусковых режимах

## Выводы

1. Результаты расчетов по разработанной математической модели при сжигании угля, торфа в котлах ВТКС показывают, что рециркуляция дымовых газов обеспечивает улучшенные качества переходных процессов, в частности времени запаздывания, разгона и коэффициента самовыравнивания по сравнению с работой без рециркуляции уходящих газов.

2. Полученные расчетные параметры переходных процессов при сжигании угля, торфа с рециркуляцией газов, а также графики переходных процессов при совместной работе дизель-генератора с котлом высокотемпературного кипящего слоя, показывают удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

3. По разработанной математической модели пусковых процессов котлов малой мощности с топками ВТКС установлено, что применение пусковой горелки сокращает время выхода котла на номинальный режим работы за счет увеличения скорости воспламенения угля от факела горелки и дополнительной доли тепловой энергии, образующейся при сгорании жидкого топлива.

## Литература

1. *Смирнов А.В., Семенов П.А., Бондарев А.В.* Практический опыт разработки систем комплексной автоматизации угольных котельных с котлами кипящего слоя на объектах МО РФ. Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского № 657 2017 г. — СПб., С. 77–81, ISSN 2218-5429. — 209 с.
2. *Смирнов А.В., Рода И.С., Овчаров И.В., Бондарев А.В., Карнов М.А.* Практический опыт проектирования, строительства и реконструкции угольных котельных малой мощности по технологии высокотемпературного кипящего слоя // Инженерные системы. — 2006. — № 4 (25).
3. *Смирнов А.В., Бондарев А.В., Болбышев Э.В., Александров С.В.* Автоматизация угольных котлов малой мощности с топками высокотемпературного кипящего слоя с рециркуляцией дымовых газов // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 19–24.

4. *Карнов 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.

5. *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.

6. *Смирнов А.В., Александров С.В., Бондарев А.В.* Силовая установка с активным котлом утилизатором высокотемпературного кипящего слоя с рециркуляцией уходящих газов // Двигателестроение. — 2019. — № 1. — С. 33–37.

7. *Бондарев А.В.* Экспериментальные исследования переходных и стационарных режимов работы в котлах высокотемпературного кипящего слоя с рециркуляцией уходящих газов // Двигателестроение. — 2019. — № 1. — С. 33–37.

8. *Бондарев А.В., Смирнов А.В., Болбышев Э.В., Савчук Н.А., Киревнин А.Г.* Система автоматического регулирования процесса горения котлоагрегата для сжигания твердого топлива в кипящем слое. Патент на изобретение. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 26.02.2019 г. № 2680778 РФ, бюл. № 6.

9. *Бондарев А.В., Смирнов А.В., Болбышев Э.В.* Котел малой мощности высокотемпературного кипящего слоя с системой автоматического регулирования процесса горения. Решение о выдаче патента на изобретение № 2018118788 от 05.02.2019 г.

10. *Бондарев А.В., Смирнов А.В., Болбышев Э.В., Савчук Н.А., Тучков В.К.* Система автоматического регулирования процесса горения котлоагрегата для сжигания твердого топлива в кипящем слое с горелкой жидкого топлива. Патент на изобретение. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 21.03.2019 г. № 2682787 РФ, бюл. № 9.

11. *Смирнов А.В., Карнов М.А. и др.* Автоматизация котлов малой мощности с топками высокотемпературного кипящего слоя. СПб: Стройпрофиль, 2004, № 3 (33).

12. *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.

13. *Бондарев А.В., Маллаев К.М., Смирнов А.В.* Разработка и испытания модернизированного угольного котлоагрегата высокотемпературного кипящего слоя с устройством автоматического пуска // Двигателестроение. — 2017. — № 3. — С. 35–43.