

Кукота Ю.П., докт. техн. наук, **Дунаевская Н.И.,** канд. техн. наук,
Бондзик Д.Л., канд. техн. наук

Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев
ул. Андреевская, 19, 04070 Киев, Украина, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Расчет динамики выхода, состава и теплового вклада летучих веществ антрацита в муфельных горелках

По разработанному методу инженерного расчета оценена динамика нагрева полидисперсной аэросмеси донецкого антрацита, динамика выхода, состав и тепловой вклад летучих и время пребывания частиц угля внутри муфельной горелки, которое для котлоагрегата ТПП-210А при скоростном нагреве угольной пыли составило около 0,1 с. Эти данные целесообразно использовать при создании котловых горелок с термохимической подготовкой в качестве первичных исходных данных и для проверки результатов CFD-моделирования избранных конструкций. Расчеты показали, что в процессе термохимической подготовки антрацитовых пыли летучие, которые вышли в муфеле, могут заменить до $170 \text{ нм}^3/\text{ч}$ природного газа на одну горелку котла ТПП-210А. *Библ. 13, рис. 3, табл. 3.*

Ключевые слова: антрацит, термохимическая подготовка, муфельная горелка, выход летучих.

В настоящее время известны технические решения для модернизации существующих котловых горелок путем их малозатратной реконструкции с проведением термохимической подготовки (ТХП) пыли в горелках, направленной на бесподсветочную стабилизацию режимов горения и ЖШУ, уменьшение генерации оксидов азота, снижение недожога угля.

С экологической точки зрения преимуществ газовой ТХП состоят в уменьшенной генерации топливных NO_x в зоне воспламенения при $900\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C}$ и низких концентрациях кислорода [1–3]. С точки зрения удельных расходов газа они составляют $X_r \approx 5 \%$ по теплу при одностадийной, $X_r \approx 2,5 \%$ при двухстадийной ТХП, что меньше современных уровней подсветки при работе на АШ, особенно при частичных нагрузках котлоагрегатов и в переходных режимах ($X_r \geq 6 \%$). Таким образом, газовая ТХП пыли перед факельным сжиганием может быть рекомендована для антрацитовых ТЭС Украины.

Создание антрацитовых горелок с ТХП нуждается в комплексе исходных данных для расчетов, необходимых расходных и временных характеристик, в частности, динамики нагрева полидисперсной аэросмеси, динамики выхода, состава и теплового вклада летучих веществ антрацита.

Динамика нагрева полидисперсной пыли

В статье [4] предложен метод расчетов выхода летучих при скоростном пиролизе и под-

тверждена его адекватность для условий пиролиза каменного угля в предварительно нагретом кипящем слое. Для применения избранного подхода к расчетам выхода летучих веществ антрацита при ТХП необходимо оценить темпы нагрева угольной пыли в потоке продуктов сгорания газа.

При расчетах динамики нагрева пыли его фракционный состав распределялся по шести узким диапазонам. Для каждого из них определялся средний размер частичек и методом последовательных приближений рассчитывался темп нагрева в потоке смеси горячих продуктов сгорания газа и воздуха, которые транспортируют пыль [5]:

$$dT/d\tau = [\alpha (T_r - T_q)/(1 + 0,2 Bi) - \varepsilon \sigma_0 (\Theta_q^4 - \Theta_r^4)] S_q / (m_q C_q), \quad (1)$$

где α — коэффициент конвективного теплообмена, $\alpha = Nu \lambda_T / d_q$; T_r, T_q — температура газа и частичек, К; Bi — критерий Био, $Bi = Nu \lambda_T / 2\lambda$; ε — приведенная степень черноты; σ_0 — постоянная Стефана-Больцмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$, $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$; $\Theta = T/100$; S_q, m_q, C_q — поверхность, масса, теплоемкость частичек антрацита соответственно [6].

Результаты расчетов показаны на рис.1. Верхняя нисходящая кривая определяет температуру газовой фазы для заданных расходов газа, воздуха и угля. Нижние восходящие линии (1–6) показывают возрастание температу-

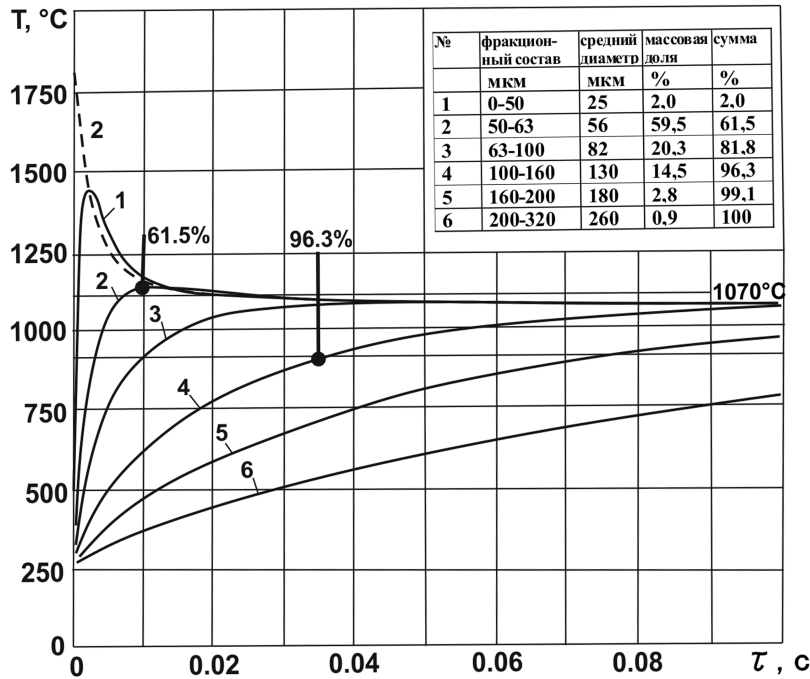


Рис.1. Фракционный состав и динамика нагрева полидисперсной пыли АШ в продуктах сгорания природного газа в муфеле ТХП.

ры угольных частичек для каждой группы фракций, показанных в верхней части рисунка.

За короткое время (< 0,1 с) пребывания полидисперсной смеси в муфеле и горелке не все фракции пыли могут достичь температуры начала пиролиза. Хотя выход летучих веществ из антрацита начинается уже при 400 °С [7–9], реально заметные выходы определяются, начиная лишь с $T_{\text{ч}} = 800\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Из рис.1 можно видеть, что время достижения температуры 900 °С для частичек < 50 мкм составляет около 0,001 с. Для основной фракции 50–63 мкм (59,5 %) – около 0,005 с, для фракции 63–100 мкм (20,3%) – около 0,010 с, для более грубой фракции 100–160 мкм (4,5%) – около 0,035 с. Фракции > 160 мкм не успевают достичь температуры интенсивного пиролиза (их массовая доля в антрацитовой пыли не превышает 3–4 %).

Таблица 1. Компонентный состав летучих веществ донецкого антрацита

n_i	Массовая доля	V^{daf} , % для АШ	$G_i^{\text{л}}$, кг/кг угля	$(Q_i^{\text{л}})_i$, МДж/кг n_i	Q_i , МДж/кг угля	β_i , кг O_2 /кг n_i	G_{O_2} , кг/кг угля
CO_2	0,08	0,32	$2,294 \cdot 10^{-3}$	–	–	–	–
H_2O	0,08	0,32	$2,294 \cdot 10^{-3}$	–	–	–	–
CO	0,29	1,16	$8,317 \cdot 10^{-3}$	10,111	$8,41 \cdot 10^{-2}$	0,57	$4,751 \cdot 10^{-3}$
HCN	0,13	0,52	$3,728 \cdot 10^{-3}$	0,02	$7,46 \cdot 10^{-5}$	2,07	$7,72 \cdot 10^{-3}$
C_nH_m	0,06	0,24	$1,721 \cdot 10^{-3}$	46,875	$8,06 \cdot 10^{-2}$	3,43	$5,90 \cdot 10^{-3}$
CH_4	0,16	0,64	$4,589 \cdot 10^{-3}$	49,972	$2,29 \cdot 10^{-1}$	4,00	$1,84 \cdot 10^{-2}$
H_2	0,12	0,48	$3,440 \cdot 10^{-3}$	119,95	$4,13 \cdot 10^{-1}$	8,00	$2,75 \cdot 10^{-2}$
S	0,08	0,32	$2,294 \cdot 10^{-3}$	10,892	$2,50 \cdot 10^{-2}$	1,00	$2,30 \cdot 10^{-3}$
Σn_i	1,00	4,00%	$2,868 \cdot 10^{-2}$	–	$8,318 \cdot 10^{-1}$	–	$6,66 \cdot 10^{-2}$

Таким образом, более 96 % угля в аэросмеси за время около 0,04 с достигает температур 900–1100 °С, а на протяжении остального времени пребывания в муфеле (0,10–0,04 = 0,06 с) проходит стадию пиролиза при $T_{\text{ч}} \approx T_{\text{г}}$.

Состав и свойства летучих веществ антрацита

В литературных источниках данные о химическом составе летучих веществ донецкого антрацита отсутствуют. Анализ известных компонентных составов подобного угля витринитной группы и состава летучих веществ [9] с учетом соотношений $C^{\text{daf}}/H^{\text{daf}}$, $C^{\text{daf}}/O^{\text{daf}}$, $H^{\text{daf}}/O^{\text{daf}}$ дал возможность оценить приблизительный состав летучих донецкого антрацита в массовых долях и в процентах от горючей массы. Для

АШ с $A^{\text{г}} = 27,3\%$ и $W^{\text{г}} \leq 1\%$ с горючей массой $1 \cdot (1 - 0,273 - 0,01) = 71,7\%$ и содержанием летучих $V^{\text{daf}} = 4\%$ в табл.1 рассчитаны массы отдельных компонентов $G_i^{\text{л}}$, теплота их сгорания Q_i , удельный расход кислорода $(G_{\text{O}_2})_i$ при их сжигании и стехиометрический коэффициент β .

Из табл.1 находим значение теплоты сгорания летучих веществ антрацита $Q^{\text{daf}}_{\text{л}} = \Sigma G_i^{\text{л}} Q_i^{\text{л}} / \Sigma G_i^{\text{л}} = 8,32 \cdot 10^{-1} / 2,868 \cdot 10^{-2} = 29,003$ МДж/кг летучих и удельный расход кислорода на их сжигание (стехиометрический коэффициент) $\beta^{\text{л}}_{\text{л}} = \Sigma G_i^{\text{л}} \beta_i / \Sigma G_i^{\text{л}} = 6,66 \cdot 10^{-2} / 2,868 \cdot 10^{-2} = 2,32$ кг O_2 /кг летучих. Для оценки выхода и теплоты сгорания углеводородов группы C_nH_m они упрощенно принимались как этилен C_2H_4 , а первичный комплекс HCN оценивался по выходу продуктов полного окисления: $4 \text{HCN} + 7 \text{O}_2 = 4 \text{NO} + 4 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$.

Отсюда $\beta_1 = 224 / 108 = 2,07$ кг O_2 /кг;

	H(1,0) – 0,019 %		$1,36 \cdot 10^{-4} \cdot 119,9 =$	$+ 1,63 \cdot 10^{-2}$	
0,52 % HCN =	C(12) – 0,231 %	$\times 0,717 =$	$1,66 \cdot 10^{-3} \cdot 32,5 =$	$+ 5,40 \cdot 10^{-2}$	$Q_r^i \approx 0,02 \text{ МДж/кг HCN}$
	N (14) – <u>0,270 %</u>		$1,94 \cdot 10^{-3} \cdot 26,9 =$	$- 5,20 \cdot 10^{-2}$	
	0,520 %			$+ 1,83 \cdot 10^{-2}$	

Эндотермичность образования NO в процессе разложения HCN принята по реакции $N_2 + O_2 \rightarrow 2 NO - 754 \text{ кДж/моль} \approx 26,9 \text{ МДж/кг } N_2$ [6]. По тепловому эффекту вклад азотного комплекса HCN в калорийность летучих мал, а по расходу кислорода – значителен. Кислород топлива в летучих веществах уже связан в CO, CO₂ и H₂O. Теплота конденсации водного пара на стадии выхода и горения летучих обычно не учитывается, поэтому $Q_{daf}^l > Q_{i,l}^r$. По экспериментальным данным [8], при воспламенении угля выхоят не более 90 % летучих, а остаток сгорает уже на стадии горения коксового остатка.

Расчеты выхода летучих из антрацита

Поскольку процесс пиролиза является кинетически контролируемым, оценки для первого приближения (пренебрегая временем нагрева частичек) проводились для изотермических условий без учета ограничений внутреннего массообмена. Для определения исходных значений массового содержания газогенерирующих продуктов в каждом из источников проводился анализ известных данных для ряда углей витринитной группы [9–12].

Для температур, которые достигаются частичками полидисперсной угольной пыли за время пребывания в зоне ТХП, рассчитывался

суммарный выход летучих в частичках от их общего содержания в горючей массе угля:

$$V^l = \sum V_i(T_q) \Delta G_i / \sum \Delta G_i, \quad (2)$$

где V^l – выход летучих веществ от общего количества $\sum \Delta G_i$ пыли, % (мас.); $V_i(T_q)$ – выход летучих для i-го размера частичек пыли при данной температуре T_q , рассчитанный для каждого источника летучих и дальше суммированный по всем компонентам, % (мас.); ΔG_i – количество летучих в источниках фракции i-го размера частичек пыли.

Кривые на рис.2 показывают темп выхода летучих веществ из частичек антрацита в изотермических условиях. Видно, что со временем темпы выхода их замедляются: за первые 0,01 с при 700 °С выходит 17 %, при 1100 °С – 75 % летучих, за дальнейшие 0,09 с – 12 и 8 % соответственно. За время, которое соответствует реальному времени пребывания аэросмеси в горелочном устройстве, при температурах ниже границы шлакования выход летучих не превышает 85 % от стандартно определенного. Экспериментальные данные, полученные на установке ВВП-100В, показали, что основной тепловой вклад от выхода и сгорания летучих получается на начальном этапе процесса за время $\tau \approx 0,03-0,04$ с при заметном остатке летучих веществ в термохимически обработанном угле [13].

Более точные расчеты динамики выхода летучих веществ выполнялись отдельно для каждой фракции пыли по алгоритму, приведенному в [4], с учетом распределения по источникам из табл.1 и динамики нагрева частичек i-й фракции, рассчитанной по выражению (1) (см. рис.1). Суммируя эти результаты по всем фракциям, получали полный выход летучих для пыли заданного фракционного состава.

На рис.3 приведен пример такого комплексного расчета темпов нагрева и выхода летучих. Номера кривых (1–6) отвечают фракционному составу из табл.2 для пыли более тонкого помола с Трипольской ТЭС, который соответствует современному состоянию системы

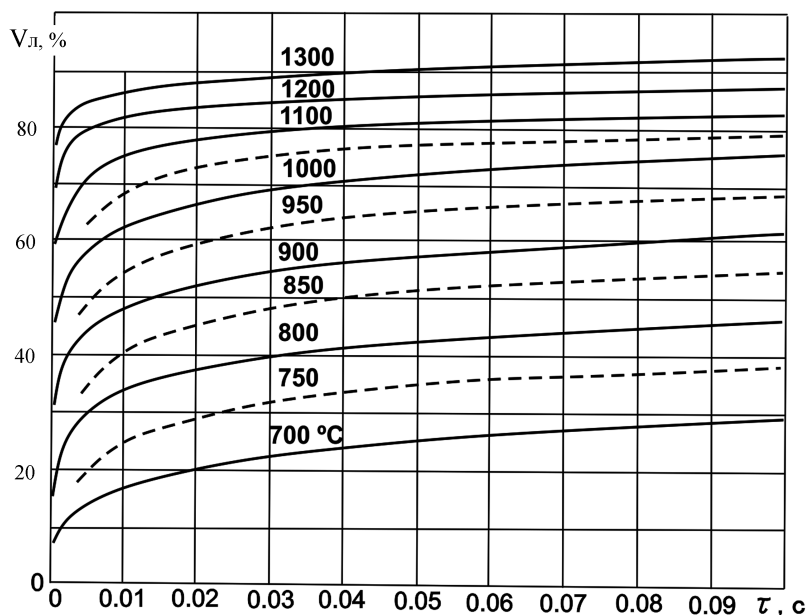


Рис.2. Динамика выхода летучих из полидисперсной пыли АШ в изотермических условиях. Фракционный состав пыли как на рис.1.

Таблица 2. Фракционный состав и темпы нагрева пыли АШ с Трипольской ТЭС

Показатель	< 50 мкм	50–63 мкм	63–100 мкм	100–160 мкм	160–200 мкм	> 200 мкм
Содержание, % (мас.)	39,3	33,7	16,6	8,45	1,29	0,66
Средний размер, мкм	25	56	82	130	180	260
Темп нагрева, °С/с	$5 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^5$	$6,7 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^3$
Номер кривой на рис.3	1	2	3	4	5	6

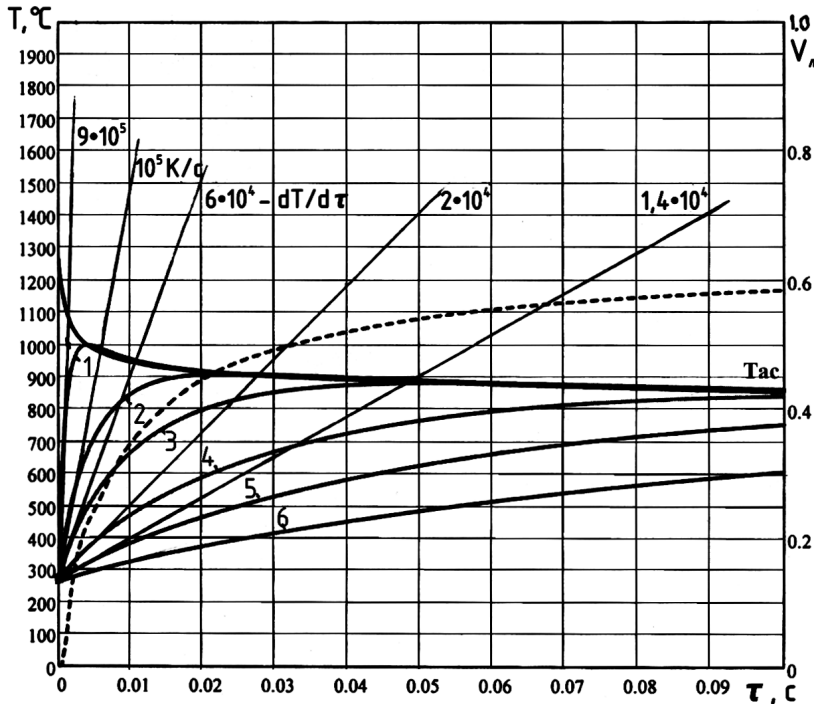


Рис. 3. Пример комплексного расчета темпов нагрева, пиролиза и выхода летучих веществ из полидисперсной антрацитовой пыли по алгоритму [4]. Расходы газа — $64 \text{ м}^3/\text{ч}$, угля — $1000 \text{ кг}/\text{ч}$, воздуха — $1440 \text{ м}^3/\text{ч}$. Температура газовой фазы в начале — $1263 \text{ }^\circ\text{C}$, в конце — $855 \text{ }^\circ\text{C}$. Обозначения: $dT/d\tau$ — начальный темп нагрева частиц угля; V_d — доля выхода летучих веществ от их общего количества (пунктир); 1–6 — температура частиц угля разного размера.

пылеприготовления. В сравнении с предыдущим фракционным составом, показанном на рис.1, темпы нагрева отдельных фракций мало отличаются, но большая массовая доля мелких фракций уменьшает общее время, нужное для нагрева до температур пиролиза.

На рис.3 пунктирная восходящая кривая, которая относится к правой ординате, показывает долю летучих веществ от их общего количества в угле, которая успевает выделиться за определенный отрезок времени от начала нагрева аэросмеси в бескислородной среде, то есть без поправки на разогрев частиц за счет сгорания летучих. Это дает «оценку снизу» количества летучих веществ, которые могут выделиться в муфеле за время пребывания аэросмеси в нем при заданной интенсивности нагрева.

При наличии кислорода рядом с выходом летучих будет происходить их горение, которое

будет повышать температуру газовой фазы, а с ней и угольных частичек, которая еще увеличит темп выхода летучих. Но в любом случае основной выход продуктов пиролиза приходится на первые $0,04\text{--}0,05 \text{ с}$, а дальше их прирост существенно замедляется. За время от $0,05$ до $0,1 \text{ с}$ выход возрастает всего на $6\text{--}8 \%$. Поэтому длина муфельной камеры должна определяться по времени пребывания $\tau < 0,05 \text{ с}$.

Кроме динамических характеристик выхода летучих веществ, разработанные в [4] метод и алгоритм расчетов дают возможность определять вклад летучих в тепловом балансе процессов ТХП для разных сортов угля. Например, при подаче в горелку тепловой мощностью 70 МВт (котлоагрегат ТПП-210А) на ТХП 30% угольной пыли при расходе ее около $1 \text{ кг}/\text{с}$ ($3600 \text{ кг}/\text{ч}$) с зольностью $A_r = 27 \%$, $V_{daf} = 4\text{--}8 \%$ и влажностью $W_r \approx 1 \%$ (горючая масса $0,719 \text{ кг}/\text{с}$)

максимальное количество летучих веществ, теплота их сгорания при $Q_{r_i} = 29 \text{ МДж}/\text{кг}$ и тепловой эквивалент по природному газу с $Q_{r_i} = 34,2 \text{ МДж}/\text{м}^3$ приведены в табл.3.

Эффективность газовой ТХП непосредственно в котловых горелках будет определяться мерой использования энергетического запаса летучих, которая возрастает при многоступенчатой организации процесса или при постепенном добавлении пыли.

Таблица 3. Возможности замещения газа летучими веществами антрацита

Выход летучих веществ V_{daf} , %	4 %	6 %	8 %
Общее количество летучих, $\text{кг}/\text{с}$	$2,88 \cdot 10^{-2}$	$4,31 \cdot 10^{-2}$	$5,77 \cdot 10^{-2}$
Теплота сгорания летучих, кВт	834	1254	1668
Газовый эквивалент, $\text{м}^3/\text{ч}$	88	132	176

Выводы

Приведенные результаты расчетных исследований динамики выхода и теплового вклада летучих веществ при скоростном нагреве угольной пыли позволили оценить необходимое время ТХП, которое нужно использовать при проектировании горелок с ТХП-устройствами.

На основании результатов проведенных ранее экспериментальных исследований и подтвержденных ими численных исследований по разработанному методу инженерного расчета оценена динамика нагрева полидисперсной аэросмеси, динамика выхода, состав и тепловой вклад летучих веществ антрацита в одномерном приближении. Эти данные целесообразно использовать при создании котловых горелок с ТХП в качестве первичных исходных данных и для проверки результатов CFD-моделирования избранных конструкций.

Расчеты показали, что в процессе ТХП антрацитовой пыли летучие, которые вышли в муфеле, могут заменить до 170 нм³/ч природного газа на одну горелку котла ТПП-210А.

Список литературы

1. Чмель В.Н., Дунаевская Н.И., Огий В.Н. Повышение эффективности сжигания низкосортных топлив методом термохимической обработки // Изв. вузов. Сер. Энергетика. — 1985. — № 3. — С. 96–98.
2. Бабий В.И., Вербовецкий Э.Х., Артемьев Ю.П. Горелка с предварительной термодобготовкой угольной пыли для снижения образования оксидов азота // Теплоэнергетика. — 2000. — № 10. — С. 33–38.
3. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. — Л. : Недра, 1988. — 312 с.

4. Бондзик Д.Л., Дулиенко С.Г., Чернявский Н.В. Метод и результаты расчета динамики газовой выделенности при скоростном пиролизе угля // Экологические и ресурсозбережение. — 2005. — № 6. — С. 3–14.
5. Бондзик Д.Л., Кукота Ю.П., Чернявский Н.В. Оценка интенсивности выхода летучих в процессах ТХП антрацитовой пыли // III Науч.-практ. конф. «Угольная теплоэнергетика : Проблемы реабилитации и развития» : Тез. докл. (Алушта, 14–18 сент. 2006 г.). — Алушта : ТРИАКОН, 2006. — С. 5–6.
6. Агроскин А.А., Гончаров В.И., Макеев Л.А. Теплоемкость и тепловые эффекты пиролиза углей Донбасса // Кокс и химия. — 1970. — № 5. — С. 8–13.
7. Блох А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов. — Л. : Энергоатомиздат, 1984. — 240 с.
8. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. — М. : Энергоатомиздат, 1986. — 206 с.
9. Solomon P.R., Serio M.A., Suuberg E.M. Coal pyrolysis: experiments, kinetic rates and mechanisms // Prog. Eng. Comb. Sci. — 1992. — Vol. 18. — P. 133–220.
10. Камнева А.И., Платонов В.В. Теоретические основы химической технологии твердых горючих ископаемых : Учеб. — М. : Химия, 1990. — 288 с.
11. Гапонич Л.С., Тальнова Г.Н., Чернявский Н.В. Газовыделение при термодетактном пиролизе угля в зависимости от давления и среды // Экологические и ресурсозбережение. — 1998. — № 2. — С. 13–17.
12. Чернявский Н.В. Механизм торможения газовой выделенности при термодетактном пиролизе угля // Пром. теплотехника. — 2000. — № 1. — С. 41–48.
13. Бондзик Д.Л., Дунаевська Н.І., Кукота Ю.П., Чернявський М.В. Дослідження спалювання пилового високозоного антрациту із застосуванням попередньої термодетактної обробки // Новини енергетики. — 2005. — № 12. — С. 24–29.

Поступила в редакцию 11.04.13

Кукота Ю.П., докт. техн. наук, **Дунаевська Н.І.,** канд. техн. наук,
Бондзик Д.Л., канд. техн. наук

Інститут вугільних енерготехнологій НАН України, Київ
вул. Андріївська, 19, 04070 Київ, Україна, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Розрахунок динаміки виходу, складу та теплового внеску летких речовин антрациту у муфельних пальниках

За розробленим методом інженерного розрахунку оцінено динаміку нагріву полідисперсної аеросуміші донецького антрациту, динаміку виходу, склад та тепловий вклад летких та час перебування часток вугілля усередині муфельного пальника, який для котлоагрегата ТПП-210А при швидкісному нагріві вугільного пилу склав близько 0,1 с. Ці дані доцільно використовувати при створенні котельних пальників з термодетактною підготовкою як первинні вихідні дані та для перевірки результатів CFD-моделювання вибраних конструкцій. Розрахунки показали, що у процесі термодетактної підготовки антрацитового пилу леткі речовини, які вийшли у муфель, можуть замінити до 170 нм³/ч природного газу на один пальник котла ТПП-210А. *Бібл. 13, рис. 3, табл. 3.*

Ключові слова: антрацит, термодетактна підготовка, муфельний пальник, вихід летких.

Kukota Yu.P., Doctor of Technical Science, **Dunaevskaya N.I.**, Candidate of Technical Science, **Bondzyk D.L.**, Candidate of Technical Science

Coal Energy Technology Institute of National Academy of Science of Ukraine, Kiev
19, Andriivska Str., 04070 Kiev, Ukraine, e-mail: ceti@i.kiev.ua

Calculation of Devolatilisation, Composition and Thermal Contribution of Anthracite Volatile Matters in Muffle Burner

According to the developed engineering method the heating dynamics of polydisperse fuel mixture of Donetsk anthracite, composition and thermal contribution of volatile and the residence time of coal particles in a muffle burner were estimated, which for a TPP-210A boiler unit with rapid heating of coal dust was about 0.1 seconds. These data should be used when creating a boiler burners with thermochemical preparation as the primary initial data and for chosen burner's designs CFD-modeling results verification. Calculations have shown that volatiles which have been formed during a thermochemical preparation of pulverized anthracite in the muffle, can replace up to 170 Nm³/h of natural gas at the burner of TPP-210A boiler. *Bibl. 13, Fig. 3, Table 3.*

Key words: anthracite, thermochemical preparation, muffle burner, devolatilisation.

References

1. Chmel' V.N., Dunaevskaja N.I., Ogij V.N. (1985). Improving the efficiency of low-grade fuels burning by thermochemical treatment. *Izvestia vuzov. Seria Energetika*, (3), pp. 96–98. (Rus.)
2. Babij V.I., Verboveckij Je.H., Artem'ev Ju.P. (2000). Burner with a preliminary thermal treatment of pulverized coal to reduce nitrogen oxide formation. *Teploenergetika*, (10), pp. 33–38. (Rus.)
3. Sigal I.Ja. (1988). Zashhita vozdušnogo bassejna pri szhiganii topliva. — Leningrad : Nedra, 312 p. (Rus.)
4. Bondzik D.L., Dulienko S.G., Chernyavsky N.V. (2005). The method and the results of the calculation of the dynamics of gas release in fast pyrolysis of coal. *Ekotehnologii i resursosberezenie*, (6), pp. 3–14. (Rus.)
5. Bondzik D.L., Kukota Ju.P., Chernyavsky N.V. (2006). The estimation of intensity of devolatilisation processes in TCP of pulverized anthracite. III Nauchno-prakticheskaja konferencija «Ugol'naja teploenergetika: problemy rehabilitacii i razvitiija» : Tezisy dokladov, Alushta, 14–18 Sept., 2006. — Alushta : TRIAKON, pp. 5–6. (Rus.)
6. Agroskin A.A., Goncharov V.I., Makeev L.A. (1970). The heat capacity and thermal effects of Donbass coals pyrolysis. *Koks i himija*, (5), pp. 8–13. (Rus.)
7. Blokh A.G. (1984). Teploobmen v topkakh parovyh kotlov. — Leningrad : Energoatomizdat, 240 p. (Rus.)
8. Babij V.I., Kuvaev Ju.F. (1986). Gorenje ugol'noj pyli i raschet pyleugol'nogo fakela. — Moscow : Energoatomizdat, 206 p. (Rus.)
9. Solomon P.R., Serio M.A., Suuberg E.M. (1992). Coal pyrolysis: experiments, kinetic rates and mechanisms. *Prog. Eng. Comb. Sci.*, 18, pp. 133–220.
10. Kamneva A.I., Platonov V.V. (1990). Teoreticheskie osnovy himicheskoj tehnologii tverdyh gorjuchih iskopaemyh. — Moscow : Himija, 288 pp. (Rus.)
11. Gaponich L.S., Tal'nova G.N., Chernyavsky N.V. (1998). Gas evolution during coal thermocontact pyrolysis depending on the pressure and the environment. *Ekotehnologii i resursosberezenie*, (2), pp. 13–17. (Rus.)
12. Chernyavsky N.V. (2000). The inhibition mechanism of gas evolution at thermocontact pyrolysis of coal. *Promyshlennaja teplotehnika*, (1), pp. 41–48. (Rus.)
13. Bondzyk D.L., Dunaevska N.I., Kukota Ju.P., Chernyavsky M.V. (2005). Study on the combustion of the pulverized high-ash anthracite coal with preliminary chemical treatment. *Novyny energetyky*, (12), pp. 24–29. (Ukr.)

Received April 11, 2013