

УДК 662.61

Методика определения времени задержки воспламенения при сжигании пылеугольного топлива в конкретных условиях

А.Б. Бирюков, С.М. Сафьянц, В.А. Семергей, П.А. Гнитиев
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, Украина
E-mail: birukov.ttf@gmail.com, gnitiev.pavel@gmail.com

Авторское резюме

Состояние вопроса. Прогнозные модели в упрощенной математической постановке, описывающие только лишь процесс выгорания коксового остатка частиц, являются эффективным научным инструментом для изучения и совершенствования технологий сжигания пылеугольного топлива в энергетических котлах. Для использования таких моделей необходимо задавать время выгорания коксового остатка частиц топлива, которое по сути является разностью между средним временем пребывания частиц в топке и временем задержки воспламенения. Вопросы, связанные с определением этой величины в конкретных условиях, до настоящего времени не решены. В связи с этим актуальной является задача определения времени задержки воспламенения частиц топлива и использования этих данных для адаптации математической модели.

Материалы и методы. Для использованной в работе математической модели ранее была проведена процедура верификации и исследования параметрической чувствительности.

Результаты. Для определения времени задержки воспламенения частиц разработана методика, новизна которой заключается в анализе зависимости механического недожога от времени выгорания, полученной при помощи математической модели выгорания полифракционного топлива, и в определении времени выгорания, соответствующего механическому недожогу, полученному в конкретных условиях. Для условий одной из электростанций Донбасса, эксплуатирующей котлы ТП-109, установлено, что время задержки воспламенения, составляющее до реконструкции горелок от 0,9 до 1,2 с, после замены горелок на лопаточно-улиточные с усовершенствованными параметрами крутки составляет 0,41–0,51 с.

Выводы. Предложенный способ определения времени задержки воспламенения и результаты, полученные с его помощью, позволяют проводить адаптацию упрощенной математической модели выгорания пылеугольного топлива к конкретным условиям, например, в случае приобретения нового оборудования или реконструкции старого.

Ключевые слова: энергетический котел, сжигание пылеугольного топлива, время задержки воспламенения, механический недожог, математическая модель

A method for determining ignition delay time in combustion of pulverized coal under specific conditions

A.B. Biryukov, S.M. Safyants, V.A. Semergey, P.A. Gnitiev
Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine
E-mail: birukov.ttf@gmail.com, gnitiev.pavel@gmail.com

Abstract

Background. Predictive models in simplified mathematical formulation, describing only the burnup process of coke particles residue, are an effective tool for studying and improving technologies of pulverized coal burning in power boilers. To use such models, it is necessary to set the time of fuel particles coke residue burnup, which is, in fact, the difference between the average time of particles residence in the furnace and the ignition delay time. Currently, there are no solutions to the problems related to this value definition in specific conditions. This article is dedicated to determining of fuel particles ignition delay time and using these data for adaptation of the mathematical model.

Materials and methods. We have earlier conducted a verification procedure for the mathematical model used in this work and determined its parametric sensitivity.

Results. We have developed a method of determining the particle ignition delay time. Its novelty consists in its ability to analyse the dependence of mechanical underburning on the burnup time (this dependence can be obtained by applying the mathematical model of polyfraction fuel burnup) and to determine the burnup time corresponding to mechanical underburning obtained under specific conditions. Ignition delay time is determined as the difference between the average time of particles residence in the furnace and the obtained burnup time. For the conditions of one of Donbass power plants using TP-109 boilers we have established that the ignition delay time before the burner reconstruction was 0,9–1,2 s, and after these burners were replaced with bladed-jet ones with improved twist parameters it was 0,41–0,51 s.

Conclusions. The proposed method of determining ignition delay time and the results obtained with its help can be used to adjust the simplified mathematical model of pulverized coal burning to specific conditions, for example, in the case of buying new equipment or reconstructing the old set.

Key words: energy boiler, burnup of pulverized coal, ignition delay time, mechanical underburning, mathematical model

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.5.033-038

Введение. Несмотря на существенные достижения в области нетрадиционной энергетики, производство электроэнергии на тепловых электростанциях продолжает играть важную роль. Значительная часть теплоэлектростанций работает на твердом топливе, сжигаемом факельным способом в пылевидном состоянии. Исследования, направленные на повышение КПД таких энергетических котлов, сохраняют свою актуальность и сегодня. Одним из важных направлений этой работы является снижение уровня механического недожога топлива. Основным инструментом для определения параметров конкретных мероприятий является метод математического моделирования.

В настоящее время самым распространенным научным инструментом для изучения динамики выгорания топлива являются соответствующие математические модели. Известны модели, использующие постановку задачи, включающую не только собственно уравнение, описывающее выгорание частиц, но и уравнение энергии, а также систему уравнений, описывающих аэродинамические процессы в топке [1–3]. Такие модели, дают ценную информацию в плане качественного анализа процесса, однако их верификация в конкретных условиях необычайно сложна. В [4] представлена математическая модель для исследования выгорания полифракционного факела, состоящая из нескольких обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих выгорание частиц соответствующих фракций. Для использования этой модели необходимо задавать время выгорания коксового остатка частиц топлива, которое определяется как разность между средним временем пребывания частиц в топке и временем задержки воспламенения. Для определения реального времени выгорания коксового остатка топливных частиц в каждом конкретном случае необходимо иметь свое значение времени задержки воспламенения.

С другой стороны, реализация конкретных мероприятий по снижению механического недожога сводится к сокращению времени задержки воспламенения [5]. Например, одним из основных направлений работы по снижению уровня механического недожога является использование усовершенствованных конструкций пылеугольных горелок. В этом случае положительный результат, как правило, достигается за счет достижения более рациональной аэродинамической картины среды в топочном пространстве, приводящей к улучшению контакта топлива с окислителем, рециркуляции части высокотемпературных продуктов сгорания и, как следствие, ускоренному прогреву частиц топлива и их более быстрому воспламенению. Однако данные, позволяющие напрямую оценить изменение времени за-

держки воспламенения частиц топлива в каждом конкретном случае, отсутствуют.

В целях адаптации математической модели выгорания полифракционного факела необходима разработка способа определения времени задержки воспламенения топлива в конкретных условиях.

Материалы и методы исследования. Наиболее длительным этапом выгорания угольной частицы является горение коксового остатка. Остальные этапы: прогрев частицы, выделение летучих веществ и их горение, – протекают значительно быстрее, при этом они, как правило, накладываются друг на друга [5, 6]. В то же время следует понимать, что время выгорания коксовой частицы оказывается меньше среднего времени пребывания частицы в топке на величину времени задержки воспламенения $\Delta\tau_3$.

Таким образом, при прочих равных условиях величина механического недожога может быть снижена за счет уменьшения времени задержки воспламенения $\Delta\tau_3$.

Прогрев частиц достигается за счет контакта вновь поступающего топлива с горячими продуктами сгорания либо за счет предварительной тепловой обработки.

В условиях электростанции потеря тепла с механическим недожогом (q_4) определяется как

$$q_4 = a_{yn} \frac{C_r^{yh}}{100 - C_r^{yh}} \frac{7800 \cdot A^r}{Q_H^p},$$

где a_{yn} – доля золы топлива в уносе, равная 0,85; C_r^{yh} – содержание горючих компонентов в уносе, %; A^r – зольность топлива, отнесенная к рабочей массе, %; Q_H^p – низшая теплота сгорания твердого топлива, Ккал/кг.

При получении практических результатов важно на их основе адаптировать математическую модель выгорания полифракционного факела для учета новых особенностей (технологических или конструктивных) технологии сжигания твердого топлива.

Адаптируемая математическая модель для исследования выгорания полифракционного факела состоит из нескольких обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, описывающих выгорание частиц соответствующих фракций [4]:

$$\frac{d\delta_i}{d\tau} = - \frac{P}{RT} 0,21 \frac{2M_C}{\rho_k} \frac{V_k^0}{V_r} \times \frac{k_i}{1 + \left(\frac{1}{Nu_{Di}} \right) \frac{k_i \delta_i}{D_i}} \left[(\alpha - 1) \frac{V^0}{V_k^0} + G \right], \quad (1)$$

где P – давление в топочной камере, Па; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура поверхности частицы, К; M_C –

молярная масса углерода, кг/кмоль; ρ_k – кажущаяся плотность угольной частицы без учета золы и летучих, кг/м³; V^0 – теоретически необходимый объем воздуха для сжигания 1 кг угля, м³/кг; V_r – объем продуктов сгорания, образующихся при сгорании 1 кг угля, м³/кг; V_k^0 – объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 кг углерода (8,89 м³/кг); k – константа скорости реакции окисления углерода, взятая при соответствующем значении температуры поверхности топлива, м/с; Nu_D – диффузионное число Нуссельта; D – коэффициент диффузии кислорода в газообразной среде, окружающей частицу, м²/с; G – текущая доля несгоревшего углерода коксового остатка.

При помощи этой модели для реально используемого уровня средней температуры газов в топке моделируется процесс выгорания топлива для промежутка времени от 0 до $\tau_{ср}$. В первом приближении величину $\tau_{ср}$ можно оценить при помощи модели идеального вытеснения:

$$\tau_{ср} = \frac{V_T}{BV_{пс}} \frac{273}{T_{ф}}, \quad (2)$$

где V_T – внутренний объем топки, м³; B – расход пылеугольного топлива (ПУТ), кг/с; $V_{пс}$ – удельный выход продуктов сгорания, м³/м³; $T_{ф}$ – средняя температура факела, К.

Такое приближение является достаточно грубым, однако может быть использовано, поскольку для исследования важно просто зафиксировать интервал моделирования более продолжительный, чем реальное время горения коксового остатка.

При помощи данной модели для набора исходных данных, соответствующих параметрам проведения испытания, можно получить зависимость доли несгоревшего углерода от времени. Пересчет доли несгоревшего углерода на расчетную величину механического недожога осуществляется по формуле

$$q_4 = G_c \frac{Q_H^p}{7830},$$

где G_c – оставшаяся после пребывания топлива в топке доля несгоревшего углерода; 7830 – теплота сгорания углерода, Ккал/кг.

В результате получаем кривую, описывающую изменение величины механического недожога во времени (рис. 1). Далее от значения q_4 , полученного в результате анализа золы уноса, проводится горизонтальная линия до пересечения с модельной кривой (рис. 1). Из точки их пересечения на ось времени опускается перпендикуляр. Его пересечение с осью абсцисс показывает реальное время, в течение которого протекало горение коксового остатка.

Если полученное время горения коксового остатка оказывается выше величины, опре-

деленной по формуле (2), то это указывает на неправильно заданный температурный уровень протекания процесса.

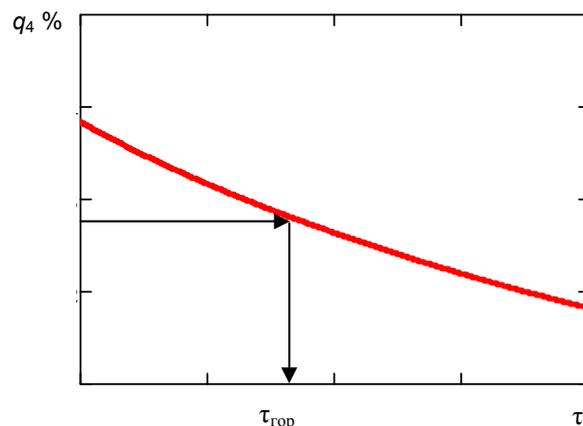


Рис. 1. Изменение механического недожога во времени

Реальное время горения коксового остатка меньше среднего времени пребывания частиц в топке на величину задержки воспламенения $\Delta\tau_3$:

$$\tau_{гор} = \tau_{ср} - \Delta\tau_3.$$

Для некоторых марок углей и котельных агрегатов при малых значениях q_4 и определении $\tau_{ср}$ по модели идеального вытеснения может получиться, что $\tau_{ср} < \tau_{гор}$. В этом случае необходимо искусственно задать значение $\tau_{ср}$, на 10–20 % большее, чем $\tau_{гор}$.

На основании работы со значениями q_4 до реконструкции и после реконструкции определяем время горения коксового остатка в обоих случаях. При одинаковом полном времени горения τ это приводит к тому, что реальное время выгорания коксового остатка оказывается выше для случая успешно проведенной реконструкции.

Таким образом, в результате реконструкции (в нашем случае замены или реконструкции горелок) должен быть достигнут результат, при котором сокращается время задержки воспламенения и повышается время выгорания коксового остатка:

$$\Delta\tau_3^{посл.р} < \Delta\tau_3^{до.р.}, \quad \tau_{гор}^{посл.р} > \tau_{гор}^{до.р.}$$

Результаты исследования. Использование данного способа адаптации модели при реконструкции пылеугольных горелок парогенератора проведено для условий одной из ТЭС Донбасса, на трех энергетических блоках которой проводилась замена горелок.

Реконструкция основных горелок котла ТП-109 позволила в максимальном приближении при принятых условиях выполнить требования отраслевого стандарта (ОСТ) на горелочные устройства «Горелки вихревые пылеугольные, пылегазовые и компоновка их с топ-

ками. Методы расчета и проектирования. ОСТ 108.030.26–78». Геометрический параметр крутки первичного воздуха составляет 3,94 (рекомендуемый диапазон 3,5–4,0) (до реконструкции – 5,07), вторичного воздуха – 4,28 (рекомендуемый диапазон 4,0–4,5) (до реконструкции – 2,78). Втулочное отношение (отношение диаметра центральной трубы к диаметру амбразуры) составляет 0,355 (рекомендуемый диапазон $0,35 > m > 5,0$) (до реконструкции – 0,295). Расчетное соотношение скоростей w_2/w_1 составляет 1,38 (рекомендуемый диапазон 1,3–1,4) (до реконструкции – 2,08).

В результате испытаний было установлено, что температура ядра факела повысилась на 40–60 °С, по сравнению с другими котлами, и достигает 1930–1950 К; увеличилась яркость свечения факела, наблюдаемого через центральные трубы горелок (гляделки), что свидетельствует об интенсификации рециркуляции топочных газов к устью горелок. Повысилось статическое давление вторичного воздуха перед горелками до 70–90 кгс/м² (на других котлах 20–30 кгс/м²) за счет повышения их аэродинамического сопротивления, благодаря чему имеется подпор горячего воздуха на входе в мельницы. Появилась возможность работы систем пылеприготовления с минимальным разрежением перед мельницами 20–40 кгс/м², что позволяет повысить сушильную производительность и снизить присосы холодного воздуха до 33,0 % (до реконструкции – 57,6 %).

Уровень механического недожога был установлен в результате анализа золы уноса до и после реконструкции (табл. 1).

Таблица 1. Значения механического недожога для разных блоков ТЭС до и после реконструкции горелок

№ блока	Механический недожога до замены горелок, %	Механический недожога после замены горелок, %
9	8,4	6,3
11	8,0	6,6
12	9,5	6,4

Для оценки изменения реального времени горения коксового остатка частиц ПУТ до и после реконструкции по предложенному способу было проведено моделирование выгорания полифракционного факела для следующих исходных данных: средняя температура в топочном пространстве 1640 К; коэффициент расхода воздуха 1,19; состав угля, поступающего на горелки котла, %: $C^f = 90$; $H^f = 4$; $N^f = 0,94$; $O^f = 4$; $S^f = 1,06$; $A^c = 19$; $W^p = 0,7$. Фракционный состав топлива задан следующим образом: 0,04–0 мм – 75,6 %; 0,063–0,04 мм – 10,4 %; 0,083–0,063 мм –

3,9 %; 0,104–0,083 мм – 4 %; 0,125–0,104 мм – 4 %; 0,16–0,125 мм – 2,1 %.

Пример графического определения реального времени горения коксового остатка для блока № 9 по предложенной схеме (рис. 1) представлен на рис. 2. Количественные результаты определения $\tau_{гор}$ и $\Delta\tau_3$ для трех энергоблоков представлены в табл. 2.

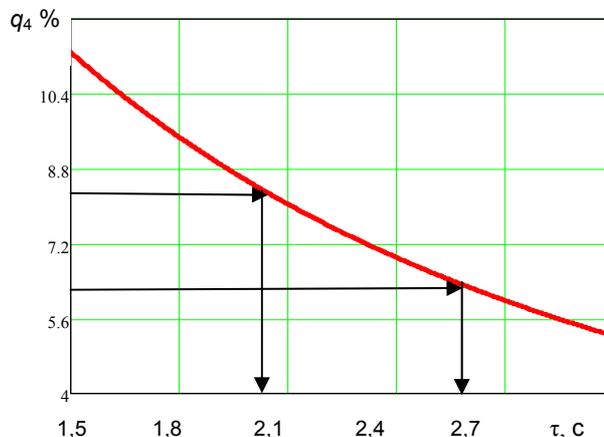


Рис. 2. Графическое определение реального времени горения коксового остатка для блока № 9 по предложенной схеме

Таблица 2. Установленные значение времени горения частиц и времени задержки воспламенения до и после реконструкции

№ блока	$\tau_{гор}^{до.р}$, с	$\tau_{гор}^{после.р}$, с	$\Delta\tau_3^{до.р}$, с	$\Delta\tau_3^{после.р}$, с	$\Delta\tau_3^{до.р} - \Delta\tau_3^{после.р}$, с
9	2,018	2,588	0,982	0,412	0,570
11	2,100	2,490	0,900	0,510	0,390
12	1,796	2,556	1,204	0,444	0,760

Выводы. Таким образом, установлено, что до реконструкции горелок парогенераторов ТП-109 время задержки воспламенения составляло от 0,9 до 1,2 с, а после замены горелок на лопаточно-улиточные с усовершенствованными параметрами крутки оно составляет 0,41–0,51 с. Это позволило увеличить время горения пыли на 0,39–0,76 с, что и объясняет экспериментально зафиксированное сокращение механического недожога на 1,4–3,1 %.

Предложенный способ определения времени задержки воспламенения и результаты, полученные с его помощью, позволяют проводить адаптацию упрощенной математической модели выгорания пылеугольного топлива к конкретным условиям, например, в случае приобретения нового оборудования или реконструкции старого.

Список литературы

1. **Ranade V.V., Gupta D.F.** Computational Modeling of Pulverized Coal Fired Boilers. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 271 p.
2. **Diez L.I., Cortés C., Campo A.** Modelling of pulverized coal boilers: review and validation of on-line simulation techniques // Applied Thermal Engineering. – 2005. – Vol. 25, issue 10. – P. 1516–1533.
3. **Norbert J., Modliński** Computational modelling of a tangentially fired boiler with deposit formation phenomena // Chemical and Process Engineering. – 2014. – № 35(3). – P. 361–368.
4. **Бирюков А.Б., Семергей В.А.** Математическая модель выгорания пылеугольного топлива в топке энергетического котла // Вестник ДонНТУ. – 2017. – № 1(7). – С. 32–37.
5. **Основы** практической теории горения: учеб. пособие для вузов / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др.; под ред. В.В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
6. **Enkhjargal Kh., Salomatov V.V.** Mathematical modeling of the heat treatment and combustion of a coal particle. Volatile escape stage // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – May 2011. – Vol. 84, issue 3. – P. 638–647.

Бирюков Алексей Борисович,

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технической теплофизики,
адрес: г. Донецк, ул. Кобозева, д. 15, ауд. 145а,
телефон: +38 (071) 405-89-73,
e-mail: birukov.tff@gmail.com

Biryukov Aleksei Borisovich,

Donetsk National Technical University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral degree), Professor, Head of the Engineering Thermophysics Department,
address: Donetsk, No. 15 Kobozeva St., Room 145a,
tel. +38 (071) 405-89-73,
e-mail: birukov.tff@gmail.com

Сафьянц Сергей Матвеевич,

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой промышленной теплоэнергетики,
адрес: г. Донецк, ул. Кобозева, д. 15, ауд. 153.

Safyants Sergei Matveyevich,

Donetsk National Technical University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral degree), Professor, Head of the Industrial Thermal Power Engineering Department,
address: Donetsk, No. 15 Kobozeva St., Room 153.

Семергей Владимир Александрович,

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»,
аспирант,
адрес: г. Донецк, ул. Кобозева, д. 15, ауд. 145а,
телефон: +38 (071) 393-86-09
e-mail: semergey79@mail.ru
Semergey Vladimir Aleksandrovich,
Donetsk National Technical University,
Post-Graduate student,
address: Donetsk, No. 15 Kobozeva St., Room 145a,
tel.: +38 (071) 393-86-09
e-mail: semergey79@mail.ru

References

1. Ranade, V.V. Gupta, D.F. Computational Modeling of Pulverized Coal Fired Boilers. Boca Raton: CRC Press, 2014. 271 p.
2. Díez, L.I., Cortés, C., Campo, A. Modelling of pulverized coal boilers: review and validation of on-line simulation techniques. Applied Thermal Engineering, 2005, vol. 25, issue 10, pp. 1516–1533.
3. Norbert J., Modliński Computational modelling of a tangentially fired boiler with deposit formation phenomena. Chemical and Process Engineering, 2014, no. 35(3), pp. 361–368.
4. Biryukov, A.B., Semergey, V.A. Matematicheskaya model' vygoraniya pyleugol'nogo topliva v topke energeticheskogo kotla [A mathematical model of pulverized coal fuel burnup in a power plant boiler furnace]. Vestnik DonNTU, 2017, no. 1(7), pp. 32–37.
5. Pomerantsev, V.V., Arefev, K.M., Akhmedov, D.B. Osnovy prakticheskoy teorii gorenija [Fundamentals of practical combustion theory]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986. 312 p.
6. Enkhjargal, Kh., Salomatov, V.V. Mathematical modeling of the heat treatment and combustion of a coal particle. Volatile escape stage. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, May 2011, vol. 84, issue 3, pp. 638–647.

Гнитиев Павел Александрович,

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»,
кандидат технических наук, доцент кафедры технической теплофизики,
адрес: г. Донецк, ул. Кобозева, д. 15, ауд. 145а,
телефоны: +38 (066) 671-34-71, +38 (071) 321-50-15
e-mail: gnitiev.pavel@gmail.com

Gnitiev Pavel Aleksandrovich,

Donetsk National Technical University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Engineering Thermophysics Department,
address: Donetsk, No. 15 Kobozeva St., Room 145a,
tel. +38 (066) 671-34-71, +38 (071) 321-50-15,
e-mail: gnitiev.pavel@gmail.com