

УДК 662.61

П.К. Сеначин, **М.А. Утемесов**, Р.М. Утемесов

Исследование процесса воспламенения полидисперсной воздушно-пылеугольной смеси при низких температурах радиационных поверхностей

Современное состояние энергетических ресурсов, в частности, уменьшение запасов и повышение цены на нефть и газ, стимулирует исследование по более эффективному сжиганию твердого топлива. Очевидно, что в ближайшей перспективе использование твердого топлива будет возрастать. В то же время качество угля, поставляемого для энергетических целей, постоянно снижается, а это влечет за собой снижение температуры факела, нестабильность горения и зажигания воздушно-пылеугольной смеси. Эти проблемы усугубляются в топках водогрейных котлов из-за присущей им низкой температуры радиационных поверхностей. В данной работе рассматривается такой случай сильного радиационного влияния низкотемпературных поверхностей энергетического агрегата на процесс зажигания воздушно-пылеугольной смеси. Экспериментальные исследования проводили на модельной установке (огневой стенд АГУ) с масштабом 1:8. В качестве натурального агрегата был взят котлоагрегат КВ-ТК-100-150 Ульяновской ТЭЦ-2 (станционный номер пять) производства Барнаульского котельного завода.

Исследования теплофизических и гидродинамических процессов, происходящих в топках паровых котлов, обобщены в работах [1-9]. Стационарный процесс горения воздушно-пылеугольной смеси характеризуется следующими этапами [9]: в топке образуется стационарно движущийся двухфазный поток, в топочной камере – квазистационарные поля концентраций и температур, вследствие полидисперсности угольной пыли процессы выхода летучих и горения коксового остатка в факеле протекают одновременно, происходит интенсивный теплообмен между горящими частицами, газовой средой и поверхностью топочной камеры.

В термодинамическом отношении описанные процессы является изобарными, в аэродинамическом и тепловом – стационарными. Исходя из этой физической картины, описание процесса возможно системой интегро-дифференциальных уравнений, включающих уравне-

ния гидродинамики, диффузии, химической кинетики и теплообмена.

Для физического моделирования из системы уравнений и условий однозначности определяются соответствующие числа подобия для натурной и модельной установок. Для обеспечения адекватного моделирования топочных процессов необходимы следующие условия: геометрическое подобие модельной и натурной установок; аэродинамическое подобие; подобие процессов горения; тепловое подобие; приближительное равенство концентрационных и температурных полей [10]; в модели необходимо сжигать то же по химическому и дисперсному составу топливо. Как отмечено в работе [9], для удовлетворения аэродинамического подобия, подобия массообмена и горения скорость газового потока в модельной установке должна быть меньше, что в свою очередь требует уменьшения среднего коэффициента обратного излучения экранов модельной установки

$$(r_p = 1 - \frac{T_p^4}{T_\phi^4}), \text{ где } T_p - \text{температура радиационной поверхности; } T_\phi - \text{температура факела.}$$

Чаще всего это достигается покрытием экранных поверхностей модели подходящей огнеупорной обмазкой.

При моделировании агрегатов с низкотемпературными ограждающими поверхностями остро встает вопрос адекватного учета радиационного теплообмена в топке, особенно при малых линейных масштабах модели. Заведомая неавтомодельность процесса в отношении числа подобия Бугера (Bu) приводит к тому, что в модели степень черноты факела ($e_{\phi м}$), как правило, существенно меньше, чем в натуре ($e_{\phi м} < e_{\phi н}$). При этом представление радиационного числа подобия в виде, предложен-

$$\text{ном в работе [9]} \quad \Pi = \frac{\sigma_0 T_a^4 F_p r_p}{BQ} = \frac{\varepsilon_T}{Bo}, \text{ является}$$

недостаточно точным. Из уравнений радиационного теплообмена и теплового баланса безразмериванием можно получить зависимость для температуры текущего сечения потока сре-

ды в топке [11-12], которая должна сохранять-
ся для модельной установки

$$\Theta = 1 - \frac{(\Theta_\phi^4 - \Theta_p^4)}{\Pi} = idem. \quad (1)$$

Приведенную степень черноты топки ϵ_T обыч-
но записывают как функцию ϵ_ϕ и коэффициента
тепловой эффективности экранов ϵ_p [13]

$$\epsilon_T = \frac{1}{1 + \psi \left(\frac{1}{\epsilon_\phi} - 1 \right)}.$$

В то же время, как показывает анализ переиз-
лучения радиационных потоков в прозрачном
факеле, в рассматриваемом случае ее можно пред-
ставить как функцию степени черноты факела ϵ_ϕ
и радиационных поверхностей экранов ϵ_p [14]

$$\epsilon_T = \epsilon_\phi \epsilon_p + \epsilon_\phi \epsilon_p (1 - \epsilon_\phi)(1 - \epsilon_p) + \epsilon_\phi \epsilon_p (1 - \epsilon_\phi)^2 (1 - \epsilon_p)^2 + \dots = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_\phi} + \frac{1}{\epsilon_p} - 1}. \quad (2)$$

Из выражений (1) и (2) получим связь между
температурами радиационных поверхностей для мо-
дельной и натурной установок:

$$T_{PM} = T_{PH} \left[1 + \left(\frac{T_\phi^4}{T_{PH}^4} - 1 \right) \cdot \left[1 - M \frac{\frac{1}{\epsilon_\phi} + \frac{1}{\epsilon_{PH}} - 1}{\frac{1}{\epsilon_\phi} + \frac{1}{\epsilon_{PH}} - 1} \right]^{0.25} \right]. \quad (3)$$

Согласно выражению (3), разность $T_{PH} - T_{PM}$
может достигать сотен градусов.

Анализ балансных уравнений горения части-
цы [15] с учетом их взаимного экранирования в
факеле позволяет предложить несколько способов
интенсификации процесса: увеличение температу-
ры стенки топочной камеры в районе воспламе-
нения факела (установка зажигательного пояса);
увеличение коэффициента экранирования частиц
в факеле (наиболее простой путь для этого – уве-
личить тонину помола топлива); температуры газа
в корне факела, что можно достичь, поднимая тем-
пературу вторичного воздуха или степень рецир-
куляции газа в топке. В реальных котлоагре-
гатах и конкретно в топках водогрейных
котлов без вложения существенных затрат
могут быть реализованы воздействия по уве-
личению коэффициента экранирования темпе-
ратуры в корне факела.

Моделирование процессов зажигания и горе-
ния в воздушно-пылеугольной смеси в топке во-
догрейного котла производилось на огневом стен-
де Алтайского государственного университета.
Линейный масштаб модели $M = 0.125$. В каче-
стве горелочного устройства использовали модель
вихревой горелки и котлоагрегат КВ-ТК-100-150
в масштабе 1:7. Другие сравнительные показате-
ли приведены в таблице 1.

Таблица 1
Сравнительные показатели натурной и модельной
установок

№	Показатель	КВ-ТК-100-150	Стенд АГУ
1	Объем топочной камеры $V_T, \text{ м}^3$	936	1.7
2	Высота топочной камеры $h_T, \text{ м}$	17.7	2.9
3	Ширина топочной камеры $D, \text{ м}$	7.06	0.9
4	Полная лучевоспринимающая поверхность $F_{лр}, \text{ м}^2$	608	9
5	Толщина излучающего слоя, $L = 0.36 \cdot V_T / F_{лр}, \text{ м}$	5.43	0.68
6	Степень черноты радиационных поверхностей экранов (топки): фактическая ϵ_T эффективная (приведенная) ϵ_p	0.81 0.67	0.9 0.29
7	Степень черноты факела: фактическая ϵ_ϕ эффективная (объемная) ϵ_ϕ	0.8 0.64	0.3 0.27
8	Температура вторичного воздуха $T_{в}, \text{ }^\circ\text{C}$	310	200-400

В экспериментах сжигали кузнецкий уголь марок ОС и Т; технологическая характеристика их приведена в таблице 2. Уголь для экспериментов отбирался с тракта подачи топлива котла №2 Барнаульской ТЭЦ-2 (полностью подготовленный к сжиганию в факеле). В экспериментах выдерживали параметры в соответствии с проектными показателями натурной установки:

- коэффициент избытка воздуха α варьировался в пределах 1.05–1.25 при проектном – 1.2;
- теоретически необходимое количество воздуха V_0 составляло 6.88 нм^3 ;
- адиабатическая температура сгорания T_a 2032 $^\circ\text{C}$;
- видимое напряжение объема – 7.8 $\text{кДж/м}^3\text{ч}$ (117800 $\text{ккал/м}^3\text{ч}$);
- теплонапряжение сечения топки – 1466 $\text{кДж/м}^2\text{ч}$ ($2.21 \cdot 10^6$ $\text{ккал/м}^2\text{ч}$).

Таблица 2
Характеристика углей, сжигающихся в экспериментах

Показатель	Уголь кузнецкий	
	Т	ОС
Влажность, $W^a, \%$	0.7	1.1
Содержание летучих, $V^a, \%$	10.8	13.5
Зольность, $A^a, \%$	10.6	10.6
Тонина помола (остаток на сите 90 мкм), $R_{90}, \%$	13.7	13.8
Теплотворная способность топлива, $Q_{PH}, \text{ МДж/кг}$ (ккал/кг)	1.53 (6400)	1.61 (6750)

Конструкция огневого стенда АГУ подробно описана в работе [16]. Он построен на базе элек-

трической печи СШЦМ-6.6/М1 Бийского завода «Электропечь». Установленные спирали общей мощностью 70 кВт обеспечивают предварительный разогрев печи до температуры 1000–1100 К. Подогрев воздуха осуществлялся электрическим воздухоподогревателем с мощностью 20 кВт. Воздух подавался вентилятором острого дутья типа 1ЭП-1. Подача угольной пыли производилась шнековым питателем, расход пыли контролировался по скорости оборота шнекового питателя.

Порядок проведения эксперимента был следующим. Сначала включали электроподогрев печи. По истечении 24–30 ч температура радиационных поверхностей и газа в камере достигала 1000 К, что достаточно для воспламенения воздушно-пылеугольной смеси. В экспериментах определяли температурные точки воспламенения воздушно-пылеугольной смеси и срыва факела. Точка срыва факела определялась следующим образом. Устанавливали заданный расход и температуры первичного и вторичного воздуха. Включали подачу угольной пыли. После зажигания факела отключали электроподогрев и определяли (визуально и по скорости падения температуры факела) момент срыва. В это время фиксировали температуры стенок топочной камеры и воздушно-пылеугольной смеси.

Момент воспламенения воздушно-пылеугольной смеси определяли следующим образом. Внутреннее пространство топочной камеры с помощью электроподогрева разогревалось до температуры на несколько десятков градусов ниже предполагаемой точки воспламенения (по результатам экспериментов по определению точки срыва). После этого отключали электроподогрев. Воздушно-пылеугольная смесь воспламенялась через 10–15 мин после начала подачи за счет тепловой инерции стенок камеры. В этот момент фиксировали температуру стенок и смеси.

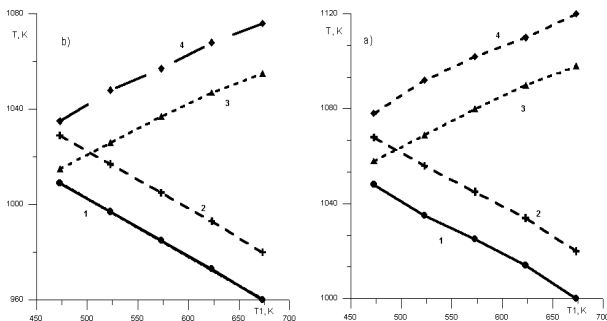


Рис. 1. Зависимость предельных температур поверхности и факела от температуры вторичного воздуха. а – уголь кузнецкий Т; б – уголь кузнецкий ОС. 1, 2 – температура поверхности; 3, 4 – температура факела; 1, 3 – коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1.05$; 2, 4 – коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1.25$

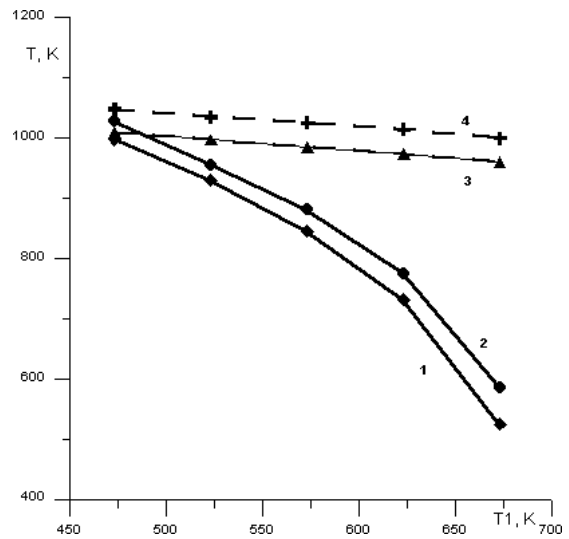


Рис. 2. Зависимость предельных температур поверхности от температуры вторичного воздуха: 1, 3 – уголь кузнецкий Т; 2, 4 – уголь кузнецкий ОС. 1, 2 – натурная установка (расчет по формуле (3)); 3, 4 – модельная установка (эксперимент); коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1.05$

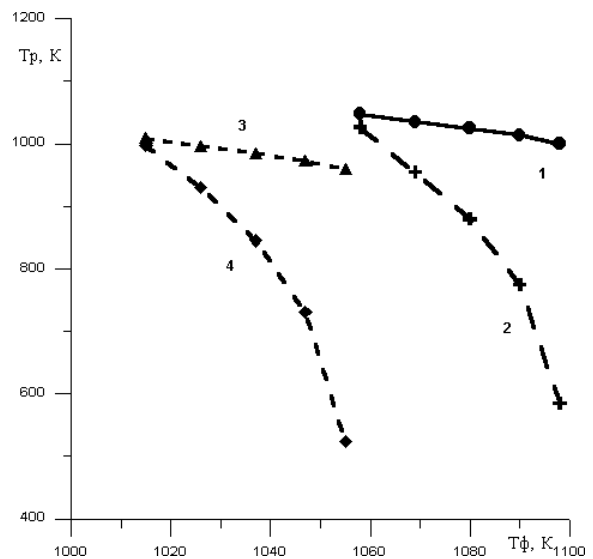


Рис. 3. Зависимость предельных температур поверхности от температуры факела. 1, 2 – уголь кузнецкий Т; 3, 4 – уголь кузнецкий ОС. 1, 3 – модельная установка (эксперимент); 2, 4 – натурная установка (расчет по формуле (3)); коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1.05$

На рисунке 1 приведены усредненные результаты измерений температур при погасании и воспламенении воздушно-пылеугольной смеси. По сути это предельные температуры устойчивого горения факела при низких радиационных температурах топки. Как видно из рисунка 1, зависимость устойчивости факела аналогична для испытанных сортов угля. При этом зависимость допустимой температуры поверхности и предельной температуры факела от температуры подаваемого воздуха – линейная; чем выше температура

воздуха (который имитирует вторичный для натурной установки), тем выше температура факела и тем ниже может быть температура радиационной поверхности. Так, увеличение температуры вторичного воздуха с 500 К до 700 К позволяет снизить температуру радиационных поверхностей модельной установки на 50 К (что соответствует 440 К для натурной). На рисунке 2 показаны рассчитанные по формуле (3) предельно допустимые температуры поверхности натурного агрегата в зависимости от температуры вторичного воздуха для обоих углей в сравнении с температурами для модельной установки. Устойчивость факела возрастает с увеличением масштаба установки. Уве-

личение степени рециркуляции топочных газов к корню факела, очевидно, аналогично увеличению температуры вторичного воздуха. Увеличение температуры факела позволяет снизить температуру радиационных поверхностей, масштабный эффект наблюдается и в этом случае (рис. 3).

Выводы. 1. Устойчивость пылеугольного факела существенно зависит от температуры вторичного воздуха и повышается с ее увеличением так же, как и при увеличении степени рециркуляции топочных газов.

2. С увеличением масштаба установки эффект устойчивости факела с повышением температуры вторичного воздуха возрастает.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

P – радиационное число подобия для топки;
 V – расход топлива, кг/с;
 Bi – число подобия Бугера; Bo – число подобия Больцмана;
 F – площадь, м²;
 k – текущий коэффициент поглощения пламени;
 L – средняя эффективная толщина пламени;
 M – масштаб моделирования;
 r – коэффициент обратного излучения радиационных поверхностей;
 T – температура, К;
 Q – теплотворная способность топлива;

a – коэффициент избытка воздуха;
 e – степень черноты;
 Q – безразмерная температура;
 $s_0 = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана;
 γ – коэффициент тепловой эффективности экранов.
 Индексы: a – адиабатические условия;
 M – модельная установка;
 N – натурная установка;
 P – радиационные поверхности;
 Φ – факел;
 l – воздух.

Литература

1. Блох А.Г. Тепловое излучение в котельных установках. М., 1967.
2. Виленский Т. В., Хзмалян Д.М. Динамика горения пылевидного топлива. М., 1978.
3. Зах Р.Г. Котельные установки. М., 1968.
4. Вулис Л.А., Ярин Л.П. Аэродинамика факела. Л., 1978.
5. Вулис Л.А., Ершин Ю.А., Ярин Л.П. Основы теории газового факела. Л., 1968.
6. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М., 1986.
7. Ярин Л.П., Сухов Г.С. Основы теории горения двухфазных сред. Л., 1987.
8. Устименко Б.П., Алияров Б.К., Абубакиров Е.К. Огневое моделирование пылеугольных топок. Алма-Ата, 1982.
9. Резняков А.Б. Моделирование тепловых и химико-технологических устройств. Алма-Ата, 1979.
10. Гурвич А.М. Теплообмен в топках паровых котлов. М.; Л., 1950.
11. Блох А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов. Л., 1984.
12. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М., 1979.
13. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. М., 1973.
14. Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. М., 1979.
15. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. М., 1976.
16. Сеначин П.К., Утемесов М.А. Влияние пульсирующей подачи воздуха на процесс горения пылеугольного факела в топках паровых котлов // Вестник Алт. ГТУ. 2000. №2.