

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ГОРЕНИЯ НА ТЕПЛОМАССОБМЕН В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

АННОТАЦИЯ

При помощи методов математического 3D моделирования в работе проведено исследование влияния термохимической активации горения на тепло-массообменные процессы в камере сгорания. В результате проведенных вычислительных экспериментов получены поля скорости, температуры и концентраций для различных вариантов активации пылеугольных потоков. Показано, что термохимическая активация потока аэросмеси оказывает значительное влияние на поля течения: на распространение реагирующей струи в объеме топки, процессы подмешивания в струе, на размеры, форму пламени температурное и концентрационные поля в топочном пространстве.

1. ВВЕДЕНИЕ

Явления конвективного теплообмена в турбулентных течениях с химическими реакциями широко распространены и играют большую роль в природных процессах, а также в различных отраслях промышленности. Знание закономерностей таких течений является важным при построении теории физики горения, при создании новых физико-химических технологий, а также при решении проблем теплоэнергетики и экологии. При этом в исследованиях сложный процесс горения необходимо анализировать в зависимости от влияния многочисленных физических и химических параметров реакции горения. Для улучшения эффективности угольного сжигания и газификации развиваются новые технологии использования энергии плазмы. Главный элемент такой технологии – плазменные топливные системы (ПТС) [1].

Плазмохимическая активация с использованием ПТС способствует более эффективному и экологически дружелюбному сжиганию низкосортных углей, а процесс газификации в данном случае увеличивает реактивность твердых топлив. ПТС были проверены на 26 котлах с плазменным воспламенением распыляемого угля и стабилизацией пламени в различных странах мира. Однако для внедрения новых технологий необходимо провести комплексное исследование процессов, происходящих как в плазменно-топливных системах, так и в топочном пространстве.

При термохимической подготовке угля, его молекулярная структура подвергается разрушению или перестраивается в той или иной степени. Это деструктивные реакции со свободным или связанным кислородом, а также с водяным паром. Этим реакциям могут способствовать определенные органические

и неорганические соединения, присутствующие в угле и добавляемые извне. Иначе, под термической подготовкой углей к сжиганию понимается комбинированное воздействие на подвергающееся деструкции топливо тепловой энергии и химических реагентов. В этом случае термохимические превращения затрагивают лишь органическую массу углей, практически не влияя на их минеральную часть.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для проведения трехмерного численного моделирования процесса горения термохимически активированного пылеугольного факела в объеме топочной камеры необходимо иметь полный набор характеристик для задания начальных условий. С помощью программы ТЕРРА получены начальные условия для математического моделирования Кинетики термохимических превращений аэросмеси. С помощью одномерной модели и программы ПЛАЗМА-УГОЛЬ смоделирован процесс плазменной подготовки угля в объеме ПТС [2]. Модель включает уравнения движения, нагрева и термохимических превращений пылеугольного топлива в потоке воздуха, нагреваемого электродуговым плазматроном. При этом учитываются теплообмен электрической дуги с воздухом, газа и стенки с угольными частицами. Кинетическая схема модели включает стадии выделения летучих из угля, их дальнейшие термохимические превращения в газовой фазе и реакции газификации коксового остатка кислородом, водяным паром и диоксидом углерода. В результате расчетов, проведенных с использованием указанных программ, получены интегральные характеристики (таблица 1) процесса термохимической активации угольной пыли в ПТС, которые использовались в качестве начальных условий для трехмерного численного моделирования горения термохимически активированных пылеугольных потоков в топочной камере энергетического котла ПК-39.

Сущность метода термохимической плазменной подготовки угля к сжиганию заключается в разделении пылеугольного потока на две части и нагреве электродуговой плазмой одной из них до температуры практически полного выделения летучих и частичной газификации коксового остатка. Это позволяет обеспечить суммарный выход горючих газов на уровне содержания летучих в высокорекреационных углях, способных воспламеняться и устойчиво гореть без подсветки мазутом. При этом в

плазменное устройство подают не всю аэросмесь, а лишь меньшую, строго определенную часть и подвергают её не полной, а частичной газификации. Такой подход позволяет резко сократить энергозатраты на подготовку топлив и обеспечивает необходимые условия для разработки и создания относительно небольших по электрической мощности и габаритам плазмотронов [5,6].

Таблица 1. Состав продуктов плазменной подготовки и газификации экибастузского угля

Состав газовой фазы (об.%)				A ^C , масс. %	C ^C , масс. %
H ₂ O	CO ₂	CO	CH ₄		
1.84	13.9	10.63	0.22	85.78	14.22
C ₆ H ₆	H ₂	N ₂	O ₂		
0.43	2.01	70.86	0.15		
Температура газа (К)				1074	
Температура частиц (К)				1077	
Скорость потока (м/с)				41.9	

Трехмерные вычислительные эксперименты проводились на основе решения системы трехмерных уравнений для турбулентных течений с теплопередачей, радиационным излучением, химическими реакциями и учетом многофазности течения. В обобщенном виде эта система может быть записана как [3]:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] + S_\phi. \quad (1)$$

Таблица 2. Система уравнений

	Величина ϕ	Коэф-т обмена Γ_ϕ	Источниковый член S_ϕ
Масса	1	0	0
Момент импульса	u_j	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right)$
Энергия	h	μ / Pr	$S_{str} + S_{chem}$
Компоненты вещества (O ₂ , CO ₂ , H ₂ O, CO, C _x H _y , NO _x , NH ₃ и т.д.)	* c_β	$\rho D_{c^* \beta}$	S_β
Энергия турбулентности	k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$P - \bar{\rho} \epsilon$
Диссипации турбулентной кинетической энергии	ϵ	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon}$	$C_{\epsilon,1} \frac{\epsilon}{k} P - C_{\epsilon,2} \frac{\epsilon^2}{k} \bar{\rho}$
			$P = \left[\mu_{turb} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$ <p>Константы k-ε-модели турбулентности: $\sigma_k = 1,00$; $\sigma_\epsilon = 1,30$; $C_{\epsilon,1} = 1,44$; $C_{\epsilon,2} = 1,92$</p>

В работе проведено численное моделирование и исследование влияния термохимической активации пылеугольных потоков на аэродинамические характеристики процесса горения в топочной камере камеры сгорания ПК-39. Были смоделированы три режима горения, когда низкотемпературная плазма воздействует на:

- 1) пылеугольный поток в четырех угловых горелках нижнего яруса;
- 2) пылеугольный поток в шести горелках нижнего яруса.

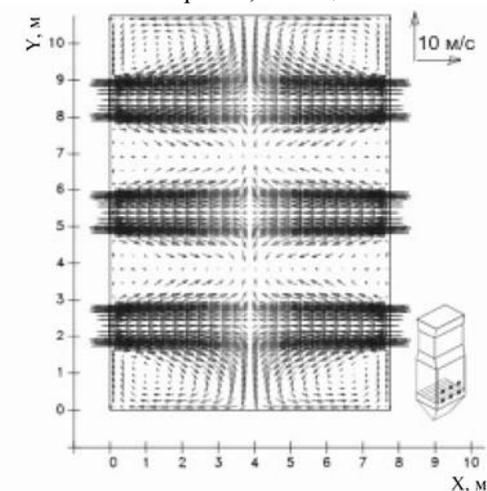
Методы термохимической подготовки низкосортных топлив основаны на их частичной газификации и использовании в качестве более высокорекреакционного, чем исходный уголь, топлива - горючего газа, коксового остатка и не прореагировавших угольных частиц. При полной газификации углей в воздухе получают горючий газ (CO + H₂ + CH₄ + CO₂ + N₂) и инертный зольный остаток с незначительным содержанием углерода С. После отделения твердого остатка горючий газ можно сжигать в топках или использовать для подсветки пылеугольного факела.

Применения систем термохимической активации для организации топочного процесса приводит к существенным изменениям в процессе горения, связанным с изменением входных характеристик пылеугольного топлива. Эти изменения позволяют по новому моделировать явления, происходящие в топочной камере и задавать реальные граничные условия на выходе из горелок.

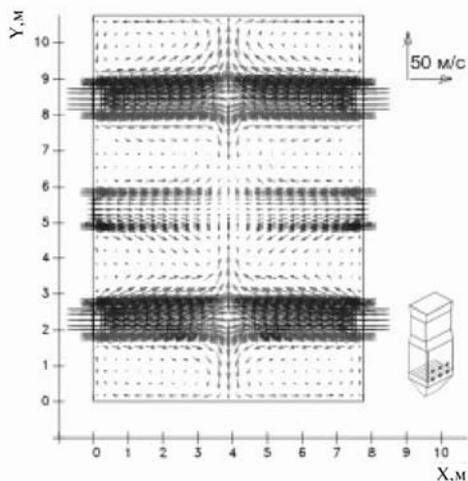
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 представлено поле вектора полной скорости в поперечном сечении камеры сгорания $Z = 7.32$ м (рис.1) для каждого вышеуказанного случая в сравнении со случаем, когда в топочное пространство поступает обычный пылегазовый поток. В объеме топки потоки двухкомпонентного высоко-реакционного топлива, полученного с помощью плазменной активации, распространяются в соответствии с законами аэродинамики и являются тепловым источником для аэросмеси, подаваемой через горелки, не оснащенные системами плазменного воспламенения.

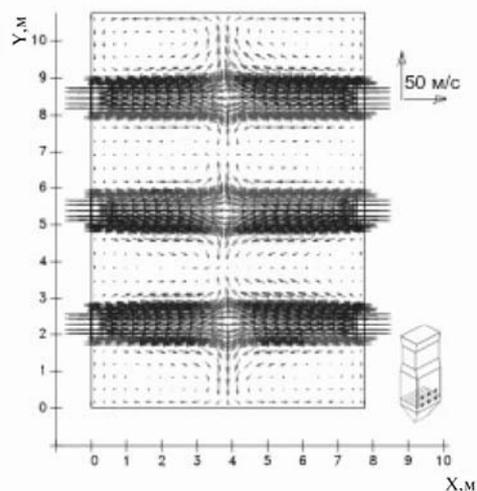
Наглядно заметно различие в распределении пылеугольных потоков, поступающих в топку через обычные горелки и через плазменно-топливные системы (ПТС). Основной причиной изменения в распределении скоростей в топочном пространстве является увеличение скорости поступающей в камеру сжигания топливной смеси (высокорекреакционное топливо + вторичный воздух). С увеличением числа термохимически активированных потоков ядро факела смещается к центру симметрии топочной камеры и мы наблюдаем более четкую границу движения потоков из горелок, оснащенных ПТС.



a)



б)



в)

Рис. 1. Поле вектора полной скорости в сечении горелок нижнего яруса $Z = 7.32$ м: а — обычное горение; б, в — 4- и 6-термохимически активированных потока

В месте соударения встречных потоков в результате торможения динамический напор трансформируется в статическое давление. Под действием образовавшегося перепада давления общий поток растекается вверх и вниз с повышенными скоростями. При соударении встречных факелов и турбулизации потоков в значительной степени ускоряется массо- и теплообмен, а усиливающееся при этом смесиобразование и нагрев интенсифицируют процесс горения. Ускорение прогрева и воспламенения топлива с увеличением числа термохимически активированных потоков ведет к более быстрой стабилизации высокоинтенсивных процессов горения. На рис. 2 проведен сравнительный анализ распределения средней в каждом сечении температуры для трех исследуемых режимов. При этом при плазменной обработке топлива наблюдается смещение местоположения ядра факела и увеличение протяженности зоны максимальных температур. Возрастание температуры факела при горении 6-плазменно-активированных потоков происходит быстрее. Значения температуры в большей степени отличаются в поясе горелок. Минимумы на всех кривых связаны с низкой температурой аэросмеси, поступающей в топочную камеру через горелки, не оснащенные плазменными системами. Увеличение температуры в ядре факела и снижение ее на выходе оказывает существенное влияние на химические процессы образования продуктов горения, поскольку температура является основным фактором при определении скорости реакции горения компонентов топливной смеси. Видно, что при 4- и 6-активированных плазмотроном потоках среднее значение температуры на выходе меньше, чем для обычного горения (1220 °С) соответственно на 36 и 110 °С.

Такие особенности высокотемпературных термохимически активированных потоков оказывают существенное влияние на процесс теплообмена в топочном пространстве.

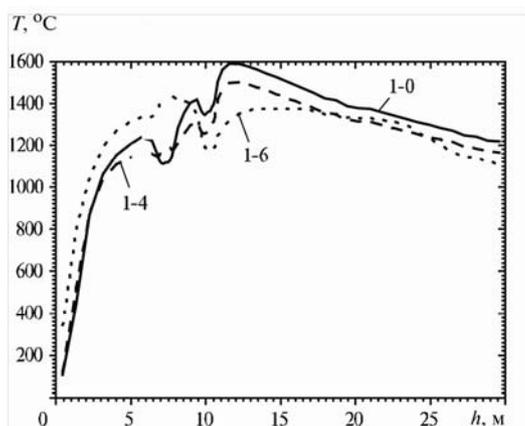


Рис. 2. Распределение средней в сечении температуры по высоте камеры сгорания: 1-0 – обычное горение; 1-4 – 4-плазменно-топливные системы; 1-6 – 6-плазменно-топливных систем

На рис. 3, 4 в качестве примеры приведены графики распределения концентрации некоторых продуктов реакции горения.

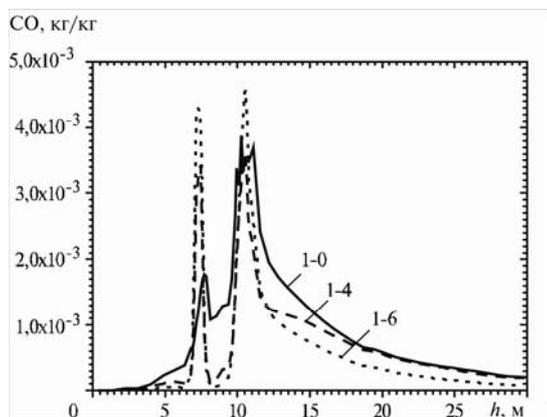


Рис. 3. Распределение концентрации CO по высоте камеры сгорания: 1-0 – обычное горение; 1-4 – 4-плазменно-топливные системы; 1-6 – 6-плазменно-топливных систем

Оксид углерода, как видно из рис. 3, в основном сконцентрирован в зоне столкновения струй топлива из противогорелок. При увеличении активированных потоков, вследствие увеличения содержания CO в поступающем высокорекреационном двухкомпонентном потоке, в плоскости сечения горелок наблюдаются максимальные значения CO. На выходе количество CO уменьшается. Так, для обычного горения концентрация CO на выходе составляет $2,01 \cdot 10^{-4}$ кг/кг, для 4- и 6-активированных потоков $1,96 \cdot 10^{-4}$ кг/кг и $7,68 \cdot 10^{-5}$ кг/кг соответственно.

Как видно из рис. 4, основное газообразование NO_x происходит в области распространения потоков из горелок. На выходе из топочного пространства наблюдается снижение суммарной концентрации NO_x и составляет для обычного горения $932,3$ мг/(Н·м³), для 4 и 6 активированных потоков $785,3$ мг/(Н·м³), $725,3$ мг/(Н·м³) соответственно.

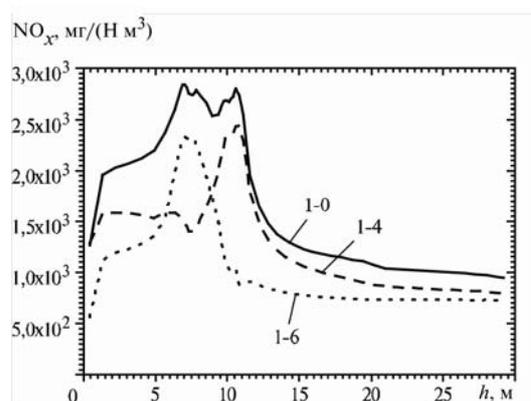


Рис. 4. Распределение концентрации NO_x по высоте камеры сгорания: 1-0 – обычное горение; 1-4 – 4-плазменно-топливные системы; 1-6 – 6-плазменно-топливных систем

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты представлены в виде полей температуры и концентраций основных компонентов. Проведено сравнение распределения основных параметров процесса горения для трех режимов работы топочных камер. Анализ полученных результатов говорит о положительном влиянии плазменной подготовки на основные кинетические и теплофизические характеристики процесса. В целом анализ приведенных рисунков показывает, что использование технологии плазменной термохимической подготовки угля к сжиганию положительно влияет на сам процесс: снижает температуру и химнедожог всюду в области топочного пространства и на выходе из него. Этот метод существенно позволяет снизить выбросы вредных веществ и в значительной степени оптимизировать процесс сжигания низкосортных высокозольных углей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B.** Plasma-Fuel Systems for Ignition, Combustion and Gasification of Pulverised Coal // The 7th Asia-Pacific Intern.Symp.on Combustion and Energy Utilization. - Hong Kong, 2004. B2—102.
2. **Askarova A., Messerle V., Ustimenko A.** etc. Plasma-chemical activation of coal gasification and combustion // 17th Intern. Symp.on Plasma Chemistry, Full-paper CD. Toronto, 2005. ISPC-296. 6 p.
3. **Müller H.** Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wärmeübergang und chemischen Reactionen am Beispiel des SNCR-Verfahrens und der Kohleverbrennung // VDI-Verlag.Reiche 6, Nr.268. 1992. 158 s.