

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ГОРЕНИЯ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ

В результате вычислительных экспериментов получены поля скорости и температуры для различных вариантов активации пылеугольных потоков. Показано, что плазменная активация потока аэросмеси оказывает значительное влияние на поля течения: на распространение реагирующей струи в объеме топки, процессы подмешивания в струе, на размеры, форму пламени и распределение температуры в топочном пространстве.

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). Плазмохимическая активация с использованием ПТС способствует более эффективному и экологически дружественному сжиганию низкосортных углей, а процесс газификации в данном случае увеличивает реактивность твердых топлив. ПТС были проверены в различных странах мира на 26 котлах с плазменным воспламенением распыляемого угля и стабилизацией пламени. Однако для внедрения новых технологий необходимо провести комплексное исследование процессов, происходящих как в плазменно-топливных системах, так и в топочном пространстве [1, 2].

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.

Методы термохимической подготовки низкосортных топлив основаны на их частичной газификации и использовании в качестве более высокореакционного, чем исходный уголь, топлива – горючего газа, коксового остатка и непрореагировавших угольных частиц. При полной газификации углей в воздухе получают горючий газ ($\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{N}_2$) 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 [3].

Для 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 [4]. С помощью одномерной модели и программы ПЛАЗМА–УГОЛЬ смоделирован процесс плазменной подготовки угля в объеме ПТС [5]. Модель включает уравнения движения, нагрева и термохимических превращений пылеугольного топлива в потоке воздуха, нагреваемого электродуговым плазмотроном. При этом

Таблица 1. Состав продуктов плазменной подготовки и газификации экибаустузского угля

Состав газовой фазы, об. %								A ^c , мас. %	C ^c , мас. %
H ₂ O	CO ₂	CO	CH ₄	C ₆ H ₆	H ₂	N ₂	O ₂	85,78	14,22
1,84	13,9	10,63	0,22	0,43	2,01	70,86	0,15		
Температура газа, К			1074						
Температура частиц, К			1077						
Скорость потока, м/с			41,9						

учитываются тепломассообмен 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 с использованием указанных программ получены интегральные характеристики (табл. 1) процесса термохимической активации угольной пыли в ПТС [6], которые использовались в качестве начальных

условий для трехмерного численного моделирования горения термохимически активированных пылеугольных потоков в топочной камере энергетического котла ПК-39.

Трехмерные вычислительные эксперименты проводились на основе решения системы уравнений, которая в обобщенном виде может быть записана как [7,8]

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

Таблица 2. Система уравнений

Показатели	ϕ	Коэффициент обмена Γ_ϕ	Источниковый член S_ϕ
Масса	1	0	0
Момент импульса	u_j	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho \cdot g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \cdot \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right)$
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^*	$\rho \cdot D_{c_\beta^*}$	S_β
Энергия турбулентности	k	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k}$	$P - \bar{\rho} \cdot \varepsilon$
Диссипации турбулентной кинетической энергии	ε	$\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon}$	$C_{\varepsilon,1} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot P - C_{\varepsilon,2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \cdot \bar{\rho}$ $P = \left[\mu_{turb} \cdot \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \cdot \rho \cdot k \cdot \delta_{ij} \right] \cdot \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$

Константы k - ε модели турбулентности:
 $\sigma_k=1,00$; $\sigma_\varepsilon=1,30$; $C_{\varepsilon,1}=1,44$; $C_{\varepsilon,2}=1,92$

В работе проведено численное моделирование и исследовано влияние термохимической активации пылеугольных потоков на аэродинамические характеристики процесса горения в топочной камере 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;
- 3) пылеугольный поток в двенадцати горелках двух ярусов.

Ниже приведены результаты численного моделирования указанных режимов течения в топочной камере.

На рис. 1, 2 представлено поле вектора полной скорости в поперечном сечении камеры сгорания $Z = 7,32$ м (рис. 1) и на выходе из топочной камеры (рис. 2) для каждого вышеуказанного случая в сравнении со случаем, когда в топочное пространство поступает обычный пылегазовый поток. В объеме топки потоки двухкомпонентного высокорекреационного топлива, полученного с помощью плазменной активации, распространяются в соответствии с законами аэродинамики и

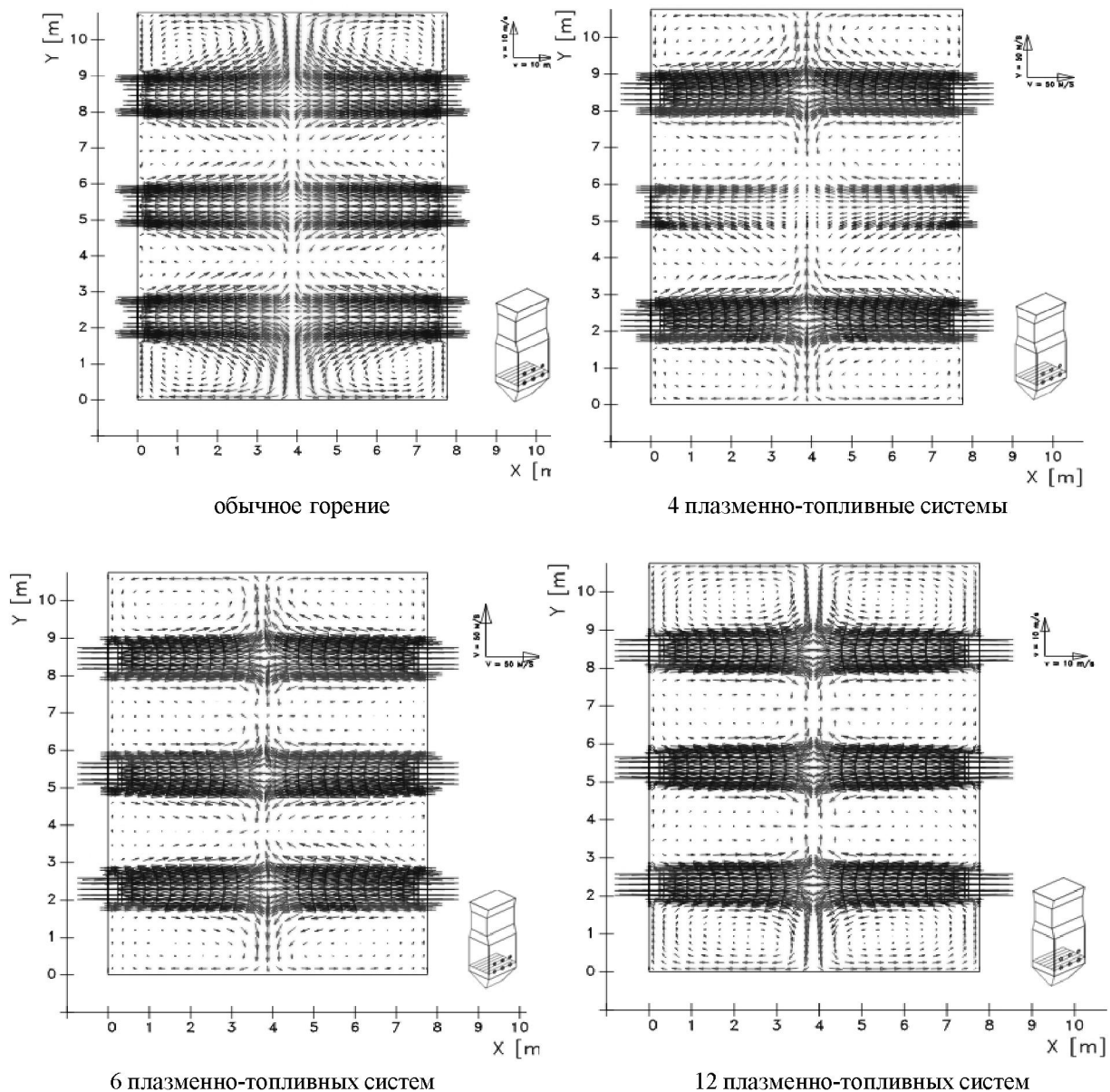


Рис. 1. Поле вектора полной скорости в сечении горелок нижнего яруса $Z=7,32$ м

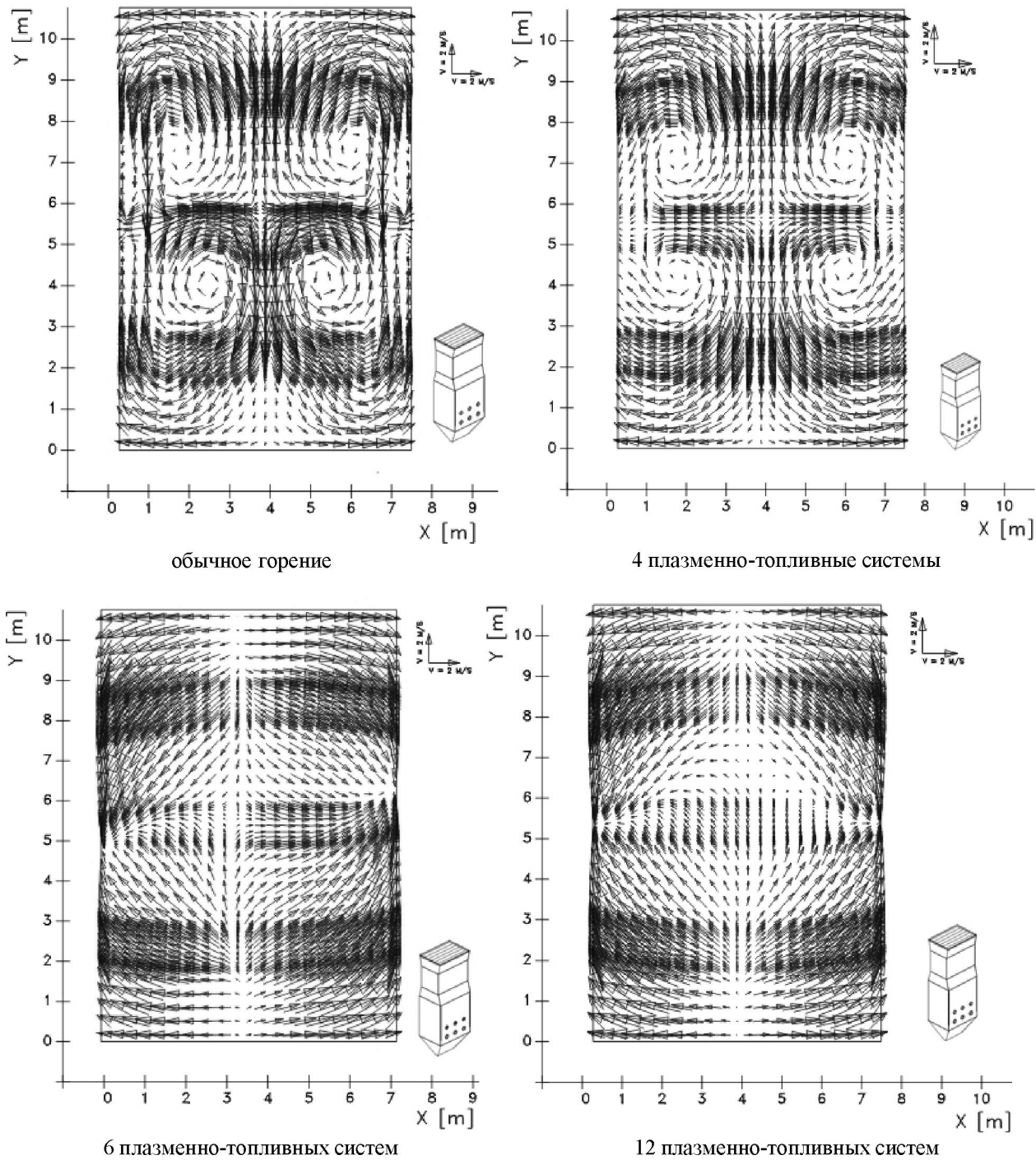


Рис. 2. Поле вектора полной скорости на выходе из топочной камеры

являются тепловым источником для аэросмеси, подаваемой через горелки, не оснащенные системами плазменного воспламенения. Таким образом, используя одну и ту же угольную пыль в объеме топки, мы имеем два вида топлива: традиционное (аэросмесь) и электротермохимически подготовленное к интенсивному сжиганию.

Наглядно видно различие в распределении пылеугольных потоков, поступающих в топку через обычные горелки и через плазменно-топливные системы (ПТС). Основной причиной изменения поля скоростей в топочном пространстве является увеличение скорости поступающей в камеру сжигания топливной смеси (высокореак-

ционное топливо + вторичный воздух). С увеличением числа термохимически активированных потоков (4, 6, 12 плазменных горелок) ядро факела смещается к центру симметрии топочной камеры, и мы наблюдаем более четкую границу движения потоков из горелок, оснащенных ПТС. 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 усиливающиеся при этом смесеобразование и нагрев интенсифицируют процесс горения.

Увеличение скорости вдоль оси факела повышает интенсивность подмешивания высокотемпературных топочных газов, что, в свою очередь, ведет к ускорению роста температуры частиц, а следовательно, к улучшению воспламенения пылеугольного потока из горелок, неоснащенных ПТС. Вследствие аэродинамических особенностей термохимически активированных потоков обеспечивается интенсивный подвод горячих топочных газов к корню факела, благодаря внешней и внутренней рециркуляции и регулированию их количества в широком диапазоне (рис. 1).

Ускорение прогрева и воспламенения топлива с увеличением числа термохимически активированных потоков ведет к более быстрой стабилизации высокоинтенсивных процессов горения. Основной вихрь, поднимаясь вверх, раскручивается и на выходе из топочной камеры с увеличением числа ПТС поле скоростей выравнивается (рис. 2), области с интенсивными завихрениями сглаживаются. При термохимической активации пылеугольного потока до выхода в топочное пространство выделяются летучие и газифицируется углерод угля. Выделившиеся летучие и продукты газификации начинают реагировать с присутствующим в первичном воздухе кислородом, в свою очередь, дополнительно выделяя тепло и еще больше нагревая реагирующий поток пылеугольных частиц, продуктов сгорания летучих и газификации коксового остатка (углерода).

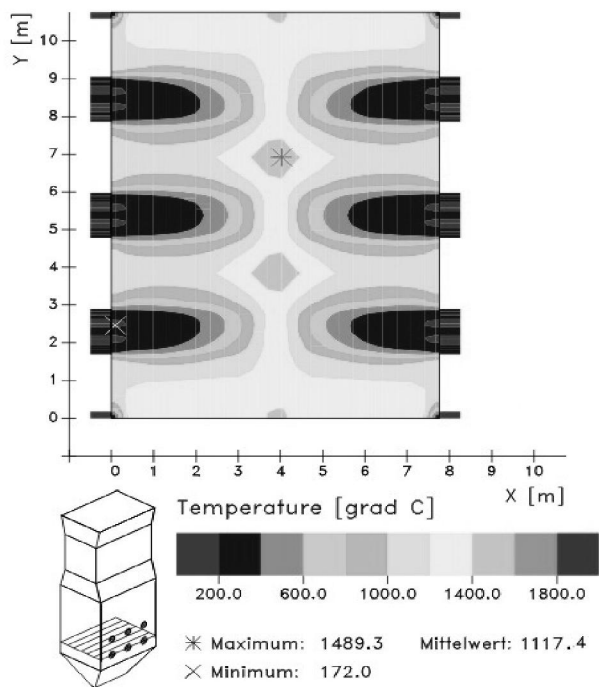
В результате на выходе в топку мы имеем нагретый до высоких (1300К и более) температур реагирующий поток частиц (основными составляющими которых являются зола и углерод)

и газообразных продуктов плазменной термохимической подготовки аэросмеси. В состав последних входят азот, водяной пар, оксид и диоксид углерода, водород, метан. При смешении с вторичным воздухом указанные продукты сгорания, нагретые до температуры воспламенения, интенсивно реагируют, выделяя тепло и образуя конечные продукты реакций (водяной пар и диоксид углерода). Такие особенности высокотемпературных термохимически активированных потоков оказывают существенное влияние на процесс тепломассообмена в объеме камеры.

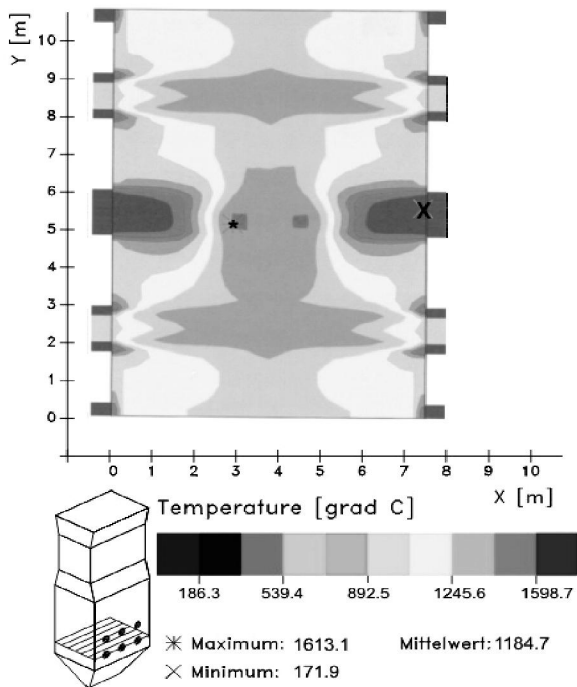
На рис. 3 представлены температурные поля в области сечения горелок нижнего яруса. Наблюдается существенное различие для четырех рассматриваемых случаев. По сравнению с использованием обычного пылеугольного потока среднее значение температуры в плоскости сечения горелок с увеличением числа термохимически активированных потоков возрастает и составляет: без активации – 1117,4 °С, 4 активированных потока – 1184,4 °С, 6 – 1211,1 °С и 12 потоков – 1488,2 °С. Таким образом, плазменная активация горения аэросмеси приводит к быстрому нагреву и воспламенению аэросмеси. При этом наблюдается смещение фронта горения к месту расположения систем плазменной активации угольных потоков. Область высоких температур при увеличении числа активированных плазмой потоков смещается к центру симметрии топки, при этом у боковых поверхностей наблюдается более высокий уровень температур. С увеличением числа термохимически активированных потоков отмечается снижение температуры на выходе из камеры сгорания, что позволяет снизить концентрацию окислов азота на выходе из нее.

При увеличении степени плазменной активации перемешивание смеси в камере сгорания происходит более интенсивно, что способствует раннему и более устойчивому воспламенению без использования для этого дополнительных мер (например, исключение из практики использования мазута и газа для розжига и стабилизации факела).

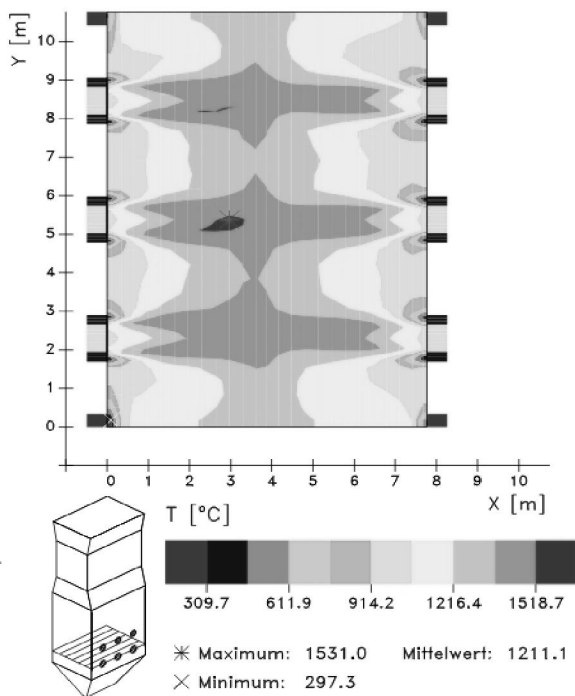
Полученные результаты позволяют выработать рекомендации по использованию новых максимально выгодных методов организации топочного процесса горения пылеугольного факела с целью повышения эффективности энергетических объектов и уменьшения выбросов вредных



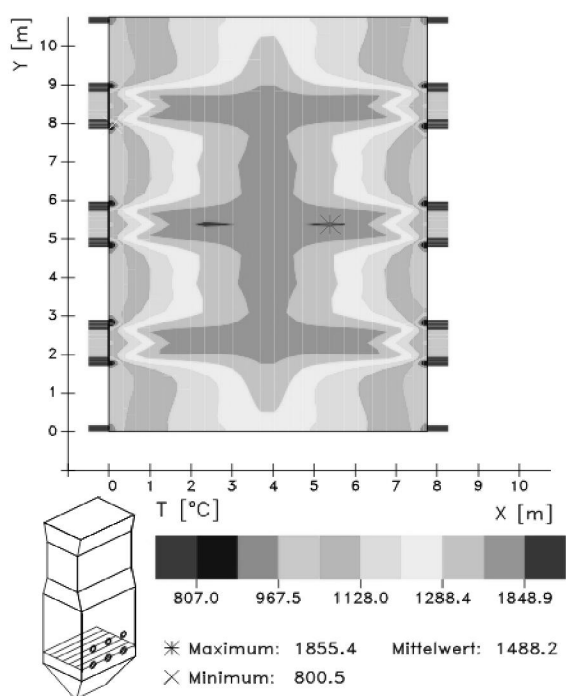
обычное горение



4 плазменно-топливные системы



6 плазменно-топливных систем



12 плазменно-топливных систем

Рис. 3. Поле температуры в плоскости горелок нижнего яруса Z = 7,32 м

веществ в окружающую среду. Предложенная методика расчета может быть использована на любых энергетических объектах Республики Казахстан, использующих в качестве основного источника энергии низкосортные угли.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Askarova A.S., Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B.* Simulation of low-temperature plasma interaction with pulverized coal for incineration improvement // Works of Seventh International Conference on energy for a clean Environment Clean Air. Portugal, 2003. P. 32.08.
2. *Аскарова А.С., Карпенко Е.И., Локтионова И.В., Мессерле В.Е., Устименко А.Б.* Оптимизация процесса сжигания энергетических углей с использованием плазменных технологий // Теплоэнергетика. 2004. №6. С. 60-65.
3. *Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B.* Plasma-Fuel Systems for Ignition, Combustion and Gasification of Pulverised Coal // The 7th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization. Hong Kong SAR, 2004. B2-102. P. 64.
4. *Jankosky Z., Lockwood F., Messerle V.E., Ustimenko V.E.* Modelling of plasma pre-treatment of powdered coal for combustion // Thermophysics and Aeromechanics. 2004. V. 11, N 3. P. 461-475.
5. *Askarova A., Karpenko E., Messerle V., Ustimenko A.* Plasmachemical activation of coal gasification and combustion // 17th International Symposium on Plasma Chemistry, Full-paper CD. Toronto, 2005. ISPC-296. 6 p.
6. *Askarova A.S., Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B.* Modeling of Coal Combustion Activated by Plasma Flame

// Presentations Abstracts of 30th International Symposium on Combustion. Chicago, 2004. 5F4-03. P. 423.

7. *Müller H.* Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wärmeübergang und chemischen Reactionen am Beispiel des SNCR-Verfahrens und der Kohleverbrennung // Fortschritt-Berichte VDI-Verlag. Reiche 6. 1992. N 268. 158 s.

8. *Vockrodt S.* 3-Dimensionale Simulation der Kohleverbrennung in zirkulierenden atmosphärischen Wirbelschichtfeuerungen // Fortschrittberichte. VDI-Verlag. Reiche-6. 1995. N 334. 198 s.

Резюме

Жүргізілген сандық тәжірибе нәтижесінде шаңтозаңды ағынның әртүрлі активтену түрлері үшін температуралар және өріс жылдамдықтары алынды. Көрсетілгендей, плазмалық активтену ағынының аэроқоспасы өріс ағысына көптеген әсер береді: жағу көлемінде ағын әсерінің таралуына, ағыстың араласу процесіне, өлшем-деріне, жағу жазығында температураның таралуына және алаудың формасына.

Summary

As a result of the carried out computing experiments fields of speed and temperatures for various variants of coal-dust flame activation were obtained. It is shown, that plasma activation of coal dust streams exert significant influence on fields of main characteristics of combustion process: distribution of a reacting jet into furnace volume, processes of mixing in reacting flow, sizes and forms of a flame and temperature distribution in combustion space.