

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАСООБМЕНА ПРИ ПЛАЗМЕННОМ РОЗЖИГЕ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

Одной из важнейших проблем энергетического комплекса является задача эффективного сжигания низкорекреационных высокозольных углей в котлах тепловых электростанций (ТЭС). Значительное снижение качества добываемого угля, привело к увеличению расходов подсобного топлива – природного газа и мазута. Доля мазута в тепловом балансе котла может достигать 40 % от суточного потребления высокозольных углей.

Для решения проблемы эффективного сжигания низкорекреационных высокозольных углей в котлах существующих ТЭС Научно-инженерным центром «Экология-Геос», Институтом геотехнической механики НАН Украины, Государственным конструкторским бюро «Южное» и Приднепровской ТЭС разрабатывается технология предварительной термохимической подготовки топлива (ТХПТ) непосредственно перед введением его в топочное пространство котла. Данная технология является результатом комплексных, фундаментальных и прикладных исследований [1, 2, 3]. Для оценки конструктивных параметров реактора ТХПТ (принципиальная схема, габаритные размеры, мощность источника плазмы) были разработаны математические модели и численные методики расчета движения и теплообмена в турбулентном закрученном потоке с горящими угольными частицами.

Проведенные расчеты позволили определить зависимости динамики поведения частиц различных диаметров от параметров несущего потока. Выполнены оценки зависимости времени воспламенения и выгорания частиц угля во вращающемся осесимметричном неизотермическом потоке воздуха, расчеты для определения влияния концентрации кислорода и зольности топлива на процесс воспламенения частиц. Также рассматривалось влияние параметров турбулентности во входном сечении и мощности источника плазмы на распределение температуры в камере реактора ТХПТ. На основе расчетных данных была разработана принципиальная схема и проектно-конструкторская документация на опытный образец реактора ТХПТ, который был изготовлен и испытан на Приднепровской ТЭС (г.Днепропетровск).

1. Математическая модель.

Для воздуха применялась модель существенно дозвукового течения с плотностью зависящей только от температуры, а также двухпараметрическая $k-\varepsilon$ модель турбулентности [1, 4, 5, 6]. Течение считалось стационарным осесимметричным с закруткой потока. Математическая модель построена на основе законов сохранения массы, количества движения и энергии, записанных в интегральной векторной форме.

$$\oint_S (\vec{V} \vec{n} \rho) dS = 0, \quad (1)$$

$$\iiint_W \frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} dW + \oint_S \left[\vec{V} \vec{n} \rho \vec{V} - (\mu + \mu_t) \frac{\partial \vec{V}}{\partial n} \right] dS = - \iiint_W \nabla p dW + \iiint_W \vec{B} dW + \iiint_W \vec{G} dW, \quad (2)$$

$$\iiint_W \frac{\partial \rho C_{pg} T}{\partial t} dW + \oint_S \left[\vec{V} \vec{n} (\rho C_{pg} T) - C_{pg} \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial n} \right] dS = \iiint_W S_T dW, \quad (3)$$

$$\vec{B} = \vec{e}_r \left(\rho \frac{V_\theta^2}{r} - (\mu + \mu_t) \frac{V_r}{r^2} \right) - \vec{e}_\theta \left(\rho \frac{V_\theta V_r}{r} + (\mu + \mu_t) \frac{V_\theta}{r^2} \right), \vec{G} = \nabla \left[(\mu + \mu_t) \left(\nabla V^T - \frac{2}{3} \bar{I} \operatorname{div} V \right) \right],$$

W – контрольный объем; S – поверхность W ; n – внешняя нормаль к S ; p – давление; μ – коэффициент динамической вязкости; μ_t – турбулентная динамическая вязкость; C_{pg} – теплоемкость газа; T – температура; Pr , Pr_t – ламинарное и турбулентное числа Прандтля; S_T – источники тепла, обусловленные тепломассообменом с частицами. Поскольку скорости воздуха в реакторе порядка 20 м/с то считается, что плотность зависит только от температуры и уравнение состояния имеет вид $\rho = \bar{p}/RT$, где ρ – плотность; $\bar{p}$ – среднее значение давления в камере реактора; R – газовая постоянная для воздуха.

Модель турбулентности основана на стандартной k - ε модели [4], которая с успехом применялась для расчета турбулентного течения в трубе [6], и в камере сгорания с закруткой потока [5].

Для описания движения и теплообмена частиц угля применялась траекторная модель, скорректированная с учетом экспериментально установленных особенностей движения горящих частиц [7]. Горение частиц описывалось с помощью полуэмпирической модели [7], основанной на балансе тепла переносимого конвекцией и излучением, а также тепла выделяемого в процессе горения частицы. При описании движения, горения и теплообмена частицы предполагается, что: положение частицы в пространстве в каждый момент времени задается тремя координатами (x, r, θ) ; частицы угольной пыли имеют сферическую форму с переменным диаметром $\delta = \delta(t)$; частицы на входе в форсунку разбиты на пять фракций с диаметрами от 20-ти до 100 мкм; реакция горения проходит с образованием двуокиси углерода; химический состав воздуха в камере остаётся неизменным. Влияние частиц на несущую среду моделируется через источниковые слагаемые в уравнении сохранения энергии газа.

2. Численные алгоритмы.

Для расчёта стационарного течения использован численный алгоритм [1, 3], основанный на процедуре SIMPLER. После достижения установившегося во времени течения газа проводится расчёт траекторий частиц различных фракций с помощью метода Рунге-Кутты четвертого порядка точности, определяется изменение температуры и диаметра частиц. Рассчитывается величина тепловых потоков между газом и частицами. Затем опять проводится расчет параметров течения газа и т.д.

3. Результаты расчетов и экспериментов.

Для верификации разработанных математических моделей и численных алгоритмов были решены тестовые задачи об изотермическом турбулентном течении в трубе с закруткой потока и без, получено удовлетворительное совпадение с данными других авторов [5, 6].

На опытном образце реактора были проведены эксперименты по измерению поля температуры в камере реактора. В качестве источника плазмы использовалась газовая горелка. На рис. 1 показано сравнение результатов расчетных и экспериментальных данных по распределению поля температуры в камере реактора.

На рис. 2 показаны результаты расчетов температуры частиц различных диаметров при движении в камере реактора. На рисунках видно, что повышение расхода угольной пыли при недостаточной мощности плазматрона приводит к понижению температуры аэросмеси на выходе из реактора рис. 2, а, б. Если мощность плазматрона достаточна для того, чтобы нагреть аэросмесь на начальном участке до температуры порядка 1500 °K, то увеличение расхода пыли приводит к увеличению выде-

ления тепла за счет горения частиц рис. 2, в, г, и температура аэросмеси на выходе из реактора повышается.

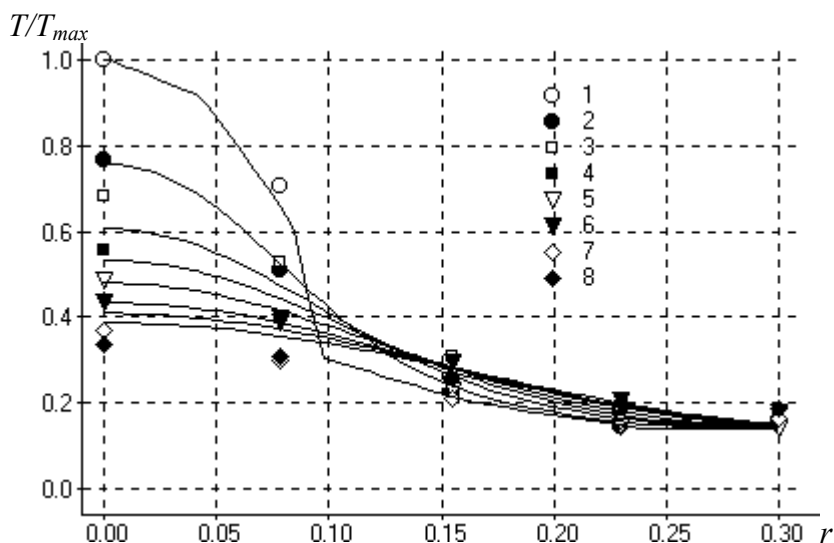


Рис. 1. Распределение безразмерной температуры газа T/T_{max} по радиусу r , м. Точки 1–8 экспериментальные данные для сечений x (м): 1 – $x=0$; 2 – $x=0.2$; 3 – $x=0.4$; 4 – $x=0.6$; 5 – $x=0.8$; 6 – $x=1.0$; 7 – $x=1.2$; 8 – $x=1.4$. Линии – расчетные данные для тех же сечений

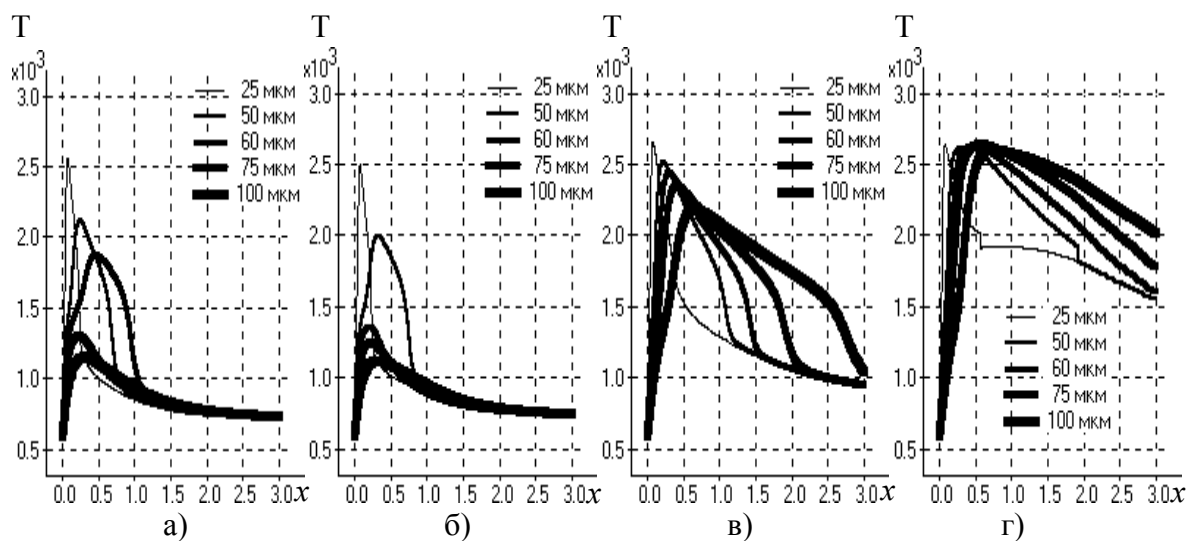


Рис. 2. Изменение температуры T , °K частиц различных диаметров при движении в камере реактора а, в) – расход угля 0.5 кг/с; б, г) – расход угля 1.0 кг/с; а, б) – средняя температура газа на начальном участке $T_{нач} < 1500$ °K; в, г) – $T_{нач} \sim 1700$ °K.

4. Выводы

Разработаны математические модели и численные методы для расчета движения и теплообмена аэросмеси воздуха с горящими частицами угля. Проведено тестирование моделей и численных методов. Показано удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных по распределению температуры в камере аэродинамического реактора ТХПТ. Исследованы зависимости распределения тепловых характеристик в камере реактора для различных мощностей плазматрона, расходов угольной пыли и интенсивности турбулентности на входе в реактор.

Результаты математического моделирования и испытаний подтвердили работоспособность новой технологии для подготовки и розжига пылеугольной аэросмеси. Проведение управляемой реакции ТХПТ в аэродинамическом реакторе способствует эффективному воспламенению и сжиганию угля марки АШ. Температура аэросмеси, проходящей через реактор и подаваемой в котел, может быть повышена до 900–1200°C, что позволит уменьшить использование мазута, снизить расход природного газа, уменьшить механический недожог угля, повысить КПД котла, снизить себестоимость электроэнергии. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии только на одном котле Приднепровской ТЭС по оценочным расчетам составит около 2 млн. долл. США. Внедрение предлагаемой технологии в топливно-энергетическом комплексе Украины позволит решить актуальные технические и экономические проблемы и получить годовой экономический эффект по отрасли порядка 350–400 млн. долл. США.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Булат А.Ф., Волошин А.И., Кудинов П.И. Технология плазменной подготовки пылеугольного топлива // Труды III российской национальной конференции по теплообмену. –М: Издательство МЭИ. 2002. Т.3. –С.173-176.
2. Волошин А.И., Пономарев Б.В. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов. –Киев: Наукова думка, 2001. –519 с.
3. Кудинов П. И. Метод расчета процессов гидродинамики и теплообмена в неортогональных криволинейных координатах // Вісник Дніпропетровського університету. Механіка, 1998. –Вип.1. Т.1. –С. 117–125.
4. Launder B.E, Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Computational methods in applied mechanics and engineering. Vol.3, 1974. –P.269-289.
5. Роуд Д.Л., Лилли Д.Г., Мак-Лафлин Д.К. Поля средних скоростей в осесимметричной камере сгорания с закруткой потока // АКТ. -1984. -№1. –С.86-95.
6. Мартинузи Р., Поллард А. Исследование применимости различных моделей турбулентности для расчета турбулентных течений в трубах. Часть II. Дифференциальные модели для напряжений и (k-ε) - модели // АКТ. -1990. №7. –С.33-42.
7. Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоатомиздат, 1986. –208 с.

БУЛАТ Анатолий Федорович – д.т.н., академик НАНУ, директор Института геотехнической механики НАНУ.

Научные интересы:

ВОЛОШИН Алексей Иванович – д.т.н., академик транспортной академии наук, Украины, директор НИЦ «Экология-Геос».

Научные интересы: механика пневмотранспортирования сыпучих материалов.

КУДИНОВ Павел Иванович – к.ф.-м.н., доцент кафедры технической механики Днепропетровского национального университета.

Научные интересы: численные методы аэрогидродинамики и тепломассообмена.

Математическое моделирование процессов тепломассообмена при плазменном розжиге угольной пыли / А.Ф. Булат, А.И. Волошин, П.И. Кудинов //

Разработана математическая модель для расчета параметров турбулентного закрученного потока с горящими угольными частицами. Рассмотрены результаты численного и экспериментального исследования процессов тепломассообмена в аэродинамическом реакторе для плазменной термохимической подготовки пылеугольного топлива.

Математичне моделювання процесів тепломасообміну при плазменому розпалюванні вугільного пилу / О.Ф. Булат, О.І. Волошин, П.І. Кудінов //

Розроблена математична модель для розрахунку параметрів турбулентного закрученого потоку з палаючими вугільними частинками. Розглянуті результати чисельного та експериментального дослідження процесів тепломасообміну в аеродинамічному реакторі для плазмової термохімічної підготовки пилувугільного палива.

Mathematical simulation of heat-mass transfer processes in plasma coil burning / A.F. Bulat, A.I. Voloshin, P.I. Kudinov //

Mathematical model for heat-mass transfer processes in turbulent swirling flow with burning coil particles was developed. Results of numerical and experimental investigation of heat-mass transfer processes in aerodynamic reactor for plasma thermo-chemical preparing of coil fuel were discussed.