

Павел КОЛАТ

Кафедра энергетики Горно-металлургического института
Острава

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОК КОТЛОВ БЛОКОВ 100, 200 и 500 МВт

Резюме. В статье даны принципы математического моделирования камер сгорания топок, применяемые на кафедре Энергетики Высшего Горного Учебного Заведения в Остраве, во время комплексных исследований аэродинамики сжигания в топках котлов большой производительности. Моделирование это является решением трехразмерной математической модели камер сгорания топок, предлагаемого Зубером.

В работе даны основные уравнения модели и математическое описание процесса сжигания пыли, дана характеристика расчетной программы для ЭВМ а также оговорен способ задавания данных и принятия краевых условий.

Представленная математическая модель служит для исследований влияния характеристик топлива, изменений выходных величин, геометрии горелки и камеры сгорания для различных и краевых условий а также для определения оптимальной формы камеры и системы горелок, для которых чувствительность котла к изменению топлива и эксплуатационных условий, с учетом стабильного сгорания, меньше.

Разработкой пространственной математической модели топки в ЧССР с 1965 г. занимался И. Зубев (ГНИИ машиностроения, Беховице). Модель была разработана независимо от математической модели Спелдинга (Англия) и параллельно с ней. За этими моделями был признан приоритет в мировом масштабе в области моделирования многомерных дифференциальных уравнений с частными производными для передачи количества движения, энергии и массы.

Этот метод расчета применялся с 1970 г. также на кафедре энергетики Горно-математического института при комплексном исследовании аэродинамики горения в топках котлов большой производительности в рамках решения государственных исследовательских заданий: "Исследования котлов большой производительности", "Лимитирующие элементы паровых котлов" и "Развитие аэродинамики в котле 500 МВт электростанции Мельник Ш". Целью этих исследований было получение расчетных и проектных данных для проектирования и модернизации топок с одновременной минимизацией выбросов вредных веществ при постоянно ухудшающемся качестве топлива в связи с повышением зольности и содержания серы.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Под понятием математическая модель топки подразумевается система уравнений для описания явлений, проходящих в топке. Основным свойством метода расчета является одновременное определение скорости, температуры отходящих газов и концентрации топлива и кислорода при химической реакции горения, а также при лучистом теплообмене. При применении этого метода изменение одной величины оказывает влияние на остальные. Система уравнений решается с помощью ЭВМ для конкретной задачи итерационным методом так, что ведутся поиски решения - т.е. пространственного поля скоростей, температур, концентраций и лучистых потоков независимо от времени. В топках котлов во всем пространстве протекает турбулентное течение. В таком случае уравнения течения не могут быть составлены для идеальной невязкой жидкости и мы должны это учитывать, приняв турбулентные переносные величины.

Основными уравнениями являются:

уравнения переноса количества движения

$$\frac{Dw_x}{Dt} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_T \nabla^2 w_x \quad (1)$$

$$\frac{Dw_y}{Dt} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_T \nabla^2 w_y \quad (2)$$

$$\frac{Dw_z}{Dt} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu_T \nabla^2 w_z \quad (3)$$

уравнение непрерывности

$$\frac{\partial \rho \cdot w_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho \cdot w_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho \cdot w_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

уравнение переноса энергии

$$\rho \cdot c_p \frac{DT}{Dt} = \lambda_T \cdot \nabla^2 T + \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot Q_T - \dot{Q}_S \quad (5)$$

где:

ω_1, ω_2, Q_T - сформулировано так, что реакция происходит в присутствии реакционноспособных составных топлива ω_1 и окислителя ω_2 ,
 Q_T [J/m³·s] - тепловая функция, определяющаяся экспериментальными результатами горения топлива [2]

уравнение переноса массы топлива

$$\frac{Dw_1}{Dt} = D_T \nabla^2 w_1 - \beta_1 \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot Q_T \quad (6)$$

уравнение переноса массы окислителя

$$\frac{D\omega_2}{Dt} = D_T \nabla^2 \omega_2 - \beta_i \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot Q_T \quad (7)$$

где: источник $\beta_i \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot Q_T$ [1/s] показывает скорость химической реакции топлива с окислителем и наоборот.

Систему уравнений замыкает уравнение состояния

$$P = \frac{R \cdot T}{V} \quad (8)$$

По сравнению с моделью Спелдинга настоящая модель пространственная, она содержит член излучения и источник с конечной скоростью реакции.

Система исходных дифференциальных уравнений с частными производными решается методом сеток.

Исследуемое пространство заменяется конечным числом узловых точек, для которых производится расчет свойств, как например, температуры, скорости, давления, концентрацией и лучистых потоков. Уравнения, образующиеся при переписании дифференциальных уравнений с частными производными для разрывной системы узловых точек, называются разностными уравнениями.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Процесс горения частицы топлива в математической модели описывается уравнениями передачи энергии и массы. Однако, для расчета необходимо определить модель выгорания неомогенной смеси угольной пыли при турбулентно-диффузионном горении. Скорость и продолжительность диффузионного горения угольной пыли зависят от специфических взаимосвязанных свойств топлива и не могут быть определены в лаборатории, а для данного топлива и условий горения непосредственно в топке котла.

Время диффузионного горения угольной частицы в пересчете на размер 100 мкм и температуру 1000°C в зависимости от избытка воздуха приводится на рис. 1 (кривая А действительна для венгерского лигнита, В для сухого остатка, С - смесь лигнита и мостецкого угля в соотношении 1 : 1, D - бурый уголь с карьеров Горький, Грабак, Либуше, Людмила, Е - зольный бурый уголь с карьера "Наступ", G - соколовский бурый уголь, H - смесь прослойка (Остравско-Карвинский бассейн) и пыли (1 : 4), J - угольная пыль (ОКБ), K - прослойка (ОКБ) Р - антрацит "Никанор", R - донецкий антрацит, T - донецкий уголь).

Фактическое время диффузионного горения для зерен размером "d" при температуре "T" получим путем вычисления по уравнению [1]:

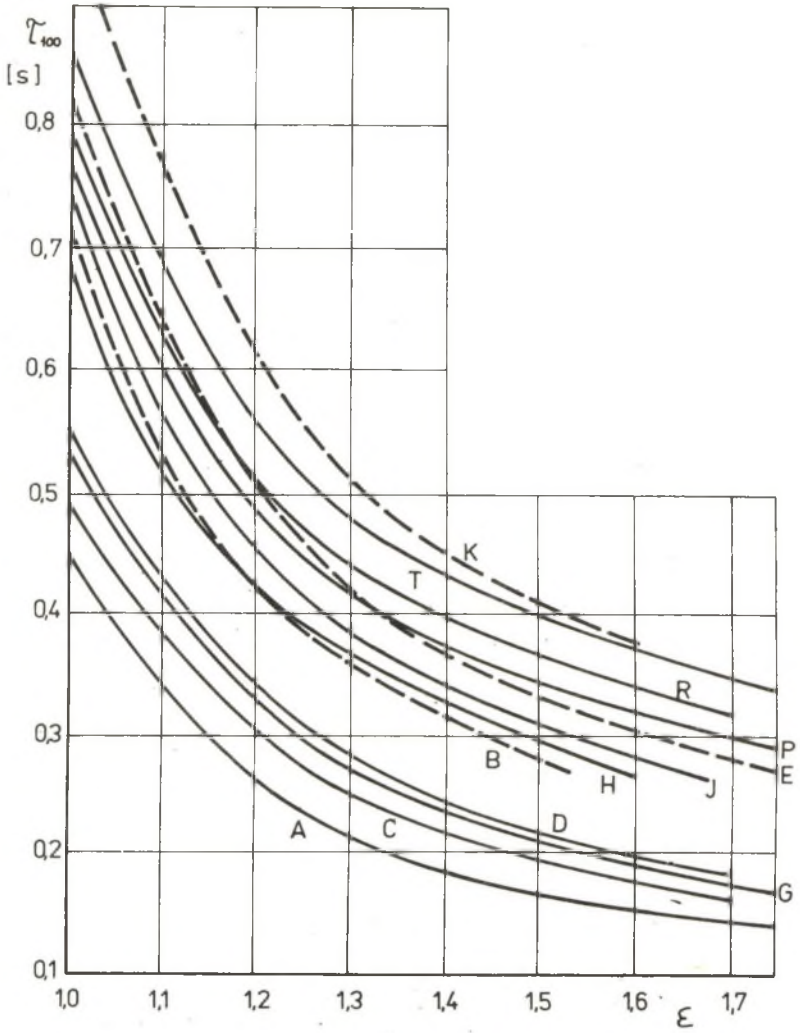


Рис. 1. Время диффузионного горения угольной частицы
 Rys. 1. Czas dyfuzyjnego spalania cząstki węglowej

$$\tau_d = \tau_{100} \cdot \frac{\left(\frac{d}{100}\right)^{1,59}}{\left(\frac{T}{1000}\right)^{0,63}} \quad [s] \quad (9)$$

Поскольку угольная пыль представляет собой смесь отдельных зерен и горение проходит в несколько этапов (воспламенение, горение и выгорание) недожог топлива h_d выражается с помощью величин ΔR_i (для частиц всей кривой остатков) уравнением:

$$h_d = \sum_1^m \Delta R_i \cdot \exp \left[\frac{\tau}{\left(\frac{d_i}{d'}\right)^{1,59} \cdot K_d} \right] \quad (10)$$

где:

τ_{d_i} - время горения и частицы диаметром d_i ,
 d' - характерный размер.

Для разных видов топлива или смесей невозможно использовать математическое описание выгорания, полученное при лабораторных измерениях, как указывается в некоторых зарубежных литературных источниках. Время горения может отличаться от фактического даже на один порядок.

Следовательно процесс горения угольной пыли проходит так, что при попадании смеси угольной пыли в топку пыль сначала высушивается с выделением газов. После воспламенения горючей части продолжается выгорание угольной пыли вплоть до температуры коксования, конечной фазой убыли массы является коксование с одновременным выгоранием углерода. Выделяемое тепло, определяющееся теплотворной способностью в отдельных фазах изменяется в зависимости от происхождения и свойств топлива. Выделенная тепловая энергия на 1 кг топлива выражается уравнением [4]

$$\dot{Q}_R = a + b \cdot h_d^3 + c \cdot h_d \quad (11)$$

где:

a, b, c - параметры, характеризующие влияние изменчивости теплотворной способности горючей части топлива.

Путем решения уравнений (10) - (11) мы получим отношения выделенного тепла для разного качества помола и свойств топлива в зависимости от времени горения и температуры горения:

$$Q_R = f(\tau_d, T) \quad (12)$$

Для данного вида топлива, тонкости помола, эффективности отделителя угольной пыли, избытка воздуха в топке и количества летучих веществ в горючей части мы можем установить тепло, выделенное в зоне горения в отдельных

узловых точках математической модели, путем обработки экспериментальных результатов топок экспериментальной серии блоков 100, 200 и 500 МВт.

Собственно программу можно характеризовать следующим образом:

- 1) Она решает методом сеток систему разностных уравнений, модель работает по декартовым координатам, она трехмерная.
- 2) Максимальное количество узловых точек $14 \times 14 \times 18$.
- 3) В узловых точках вычисляется: статическое давление p , температура T , относительная концентрация топлива и окислителя ω_1, ω_2 . В точках, разделяющих пополам шаг узлов, вычисляются составляющие скорости W_x, W_y, W_z . Следовательно можно наглядно представить каналы прямоугольного сечения со стенками, параллельными осями, или с наклонными стенками.
- 4) В стенках в любом месте могут быть размещены входы и выходы воздуха. Для входов задается скорость, температура и обе концентрации, для выхода задается статическое давление.
- 5) Стенки могут быть снабжены теплоизоляцией, что отражает краевое условие $\partial T / \partial n = 0$ или для стенки задается неизменная температура. Аналогично тому $\partial \omega_1 / \partial n = 0$ или $\omega_1 = \text{постоянная}$ для относительной концентрации.
- 6) Тепловая функция Q_T задается начиная с зажигания вплоть до выгорания по математической модели горения топлива.
- 7) В качестве начальных условий задаются выбранные поля $W_x, W_y, W_z, T, \omega_1, \omega_2$. ЭВМ постепенно корректирует поля вплоть до достижения стационарного состояния. При этом непрерывно контролируется баланс массы, т.е. сравнивается входное и выходное количество жидкости.
- 8) Результатом решения являются поля скорости, температур, концентраций и лучистых потоков к стенкам. Эти поля регистрируются регистрирующим устройством.

Входные данные для ЭВМ

- 1) Геометрия топки
При математической обработке фактический контур топки заменяется идеальным контуром - рис. 2.
- 2) Геометрия горелки
Она отражена в наклоне сопл, распределении по секциям и параметре турбулентности горелки. Турбулентность представляется в математической модели при помощи узловых точек в окружающем пространстве горелок.
- 3) Баланс массы на выходе горелки
Определяется в зависимости от вида топлива и воздушного баланса согласно фактическим аэродинамическим условиям в соответствующей части.
- 4) Температура стенок
Определяется расчетом по конструктивному расположению теплообменных поверхностей.

- 5) Переносные величины, как например турбулентная кинематическая вязкость, теплопроводность и диффузионность определяются методом Горно-металлургического института по прямому измерению пульсации давлений и температур с помощью цилиндрического зонда в топках [3].
- 6) Поле статического давления - на выходе из топки определялось измерением.
- 7) Относительная поглащательная способность факела зависит от свойств топлива, формы топки, компоновки горелки и меняется со степенью выгорания топлива. В математической модели она задается на основе обработанных экспериментальных результатов комплексных измерений [4].

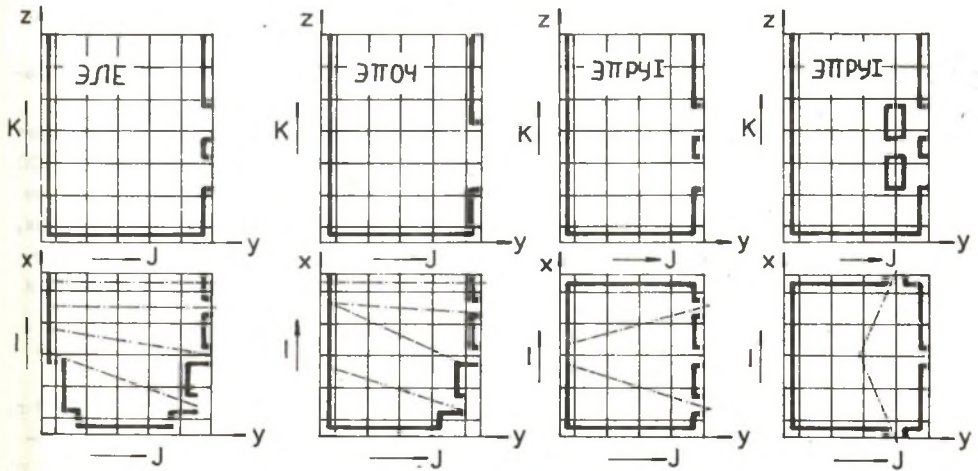


Рис. 2. Заданная геометрия моделируемых топок
 rys. 2. Zadana geometria modelowanych palenisk

Оптимизация расчетов

Проект оптимальной топки согласно математической модели заключается в решении ряда примеров при

- а) симметричном режиме горелок,
- б) несимметричном режиме и минимальной мощности,
- в) разной геометрии горелок и их расположении в топках,
- г) разных свойствах топлива.

По вычисляемым примерам математической модели можно исследовать влияние входных величин, переносных величин, геометрии горелки, топки и т.п. Целью этих расчетов является определение оптимальной аэродинамики, которая повышает универсальность топки, т.е. ее нечувствительность к изменению топлива и режима эксплуатации.

Определение оптимальной геометрии горелки и топки предоставляет проектировщику данные для выводов реализации еще в период проектной подготовки

котла или же для модернизации котла при изменении топливной базы. Математическая модель была использована при исследовании аэродинамики горения у экспериментальной серии котлов блоков 100, 200 и 500 МВт. Выбор примеров, исходных и краевых величин, а также обработка результатов проводилась в ГИИ, расчет собственно примеров – на ЭВМ в НИИ машиностроения, Беховице.

В 1970–71 гг. мы начали применять математическую модель для расчета аэродинамики котла блока 200 МВт на электростанции Ледвице ЭЛЕ [2].

Вместе с расчетами проводилось сравнение расчетов с результатами измерений в топках и проверка правильности вычисленных величин. В 1972 г. проводились расчеты топок ЭС Ледвице, Почерады (ЭПОЧ) и Прунержов (ЭПРУ) с реконструированными и прежними горелками при изменении топлива. Геометрия топки указана уже на рис. 2.

В 1973 г. вычислялись варианты при минимальной производительности при разном расположении горелок с целью повысить универсальность горелок и стабильность горения на ЭС Почерады.

В 1974 г. [2] проводились расчеты с целью определить оптимальный вариант конструкции горелки для вновь проектируемой электростанции Детмаровице (ЭДЕ) – рис. 3, с анализом влияний рециркулирующих потоков. В 1978 г. для той же ЭС [4] решается реконструкция горелок при переходе на смесь польского угля, прослойка ОКБ и пыли. В этом случае мы исследовали размещение в разной последовательности систем мельниц Н 1, Н 2, Н 3, Н 4 и геометрию горелок и их направление в топке – рис. 4.

В 1975–1978 гг. решилась проблематика оптимизации горения на ЭС Тушимице П (ЭТУ П) и Хвалетице (ЭХ) [4].

Реконструкция горелок у блока 500 МВт электростанции Мельник Ш в 1978 г. проводилась на основе результатов расчета математической модели при сжигании низкоортного топлива с последующей проверкой результатов в 1980–1982 гг. при комплексных измерениях аэродинамики.

Оптимальное размещение торцевых турбулентных горелок решается при помощи математической модели в 1982 г. для электростанции Пломин в Югославии с возможностью применения результатов для сжигания прослойка ОКБ и пыли на ЭС Детмаровице при помощи дополнительного флюидного реактора.

Начиная с 1982 г. до 1986 г. при помощи математической модели решается аэродинамика дополнительного отопления котла с помощью флюидного реактора для блока 200 МВт электростанции Почерады [1].

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА КОЛИЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ, ЭНЕРГИИ И МАССЫ В ЗОНЕ ГОРЕЛОК ТОПКИ

При помощи математической модели мы рассматриваем эксплуатационную надежность котла, которая определяется качеством сжигания, неравномерность температур и лучистых потоков, степенью засорения стенок зольными остатками, тепловой нагрузкой теплообменных поверхностей и др. Целью этих расчетов является:

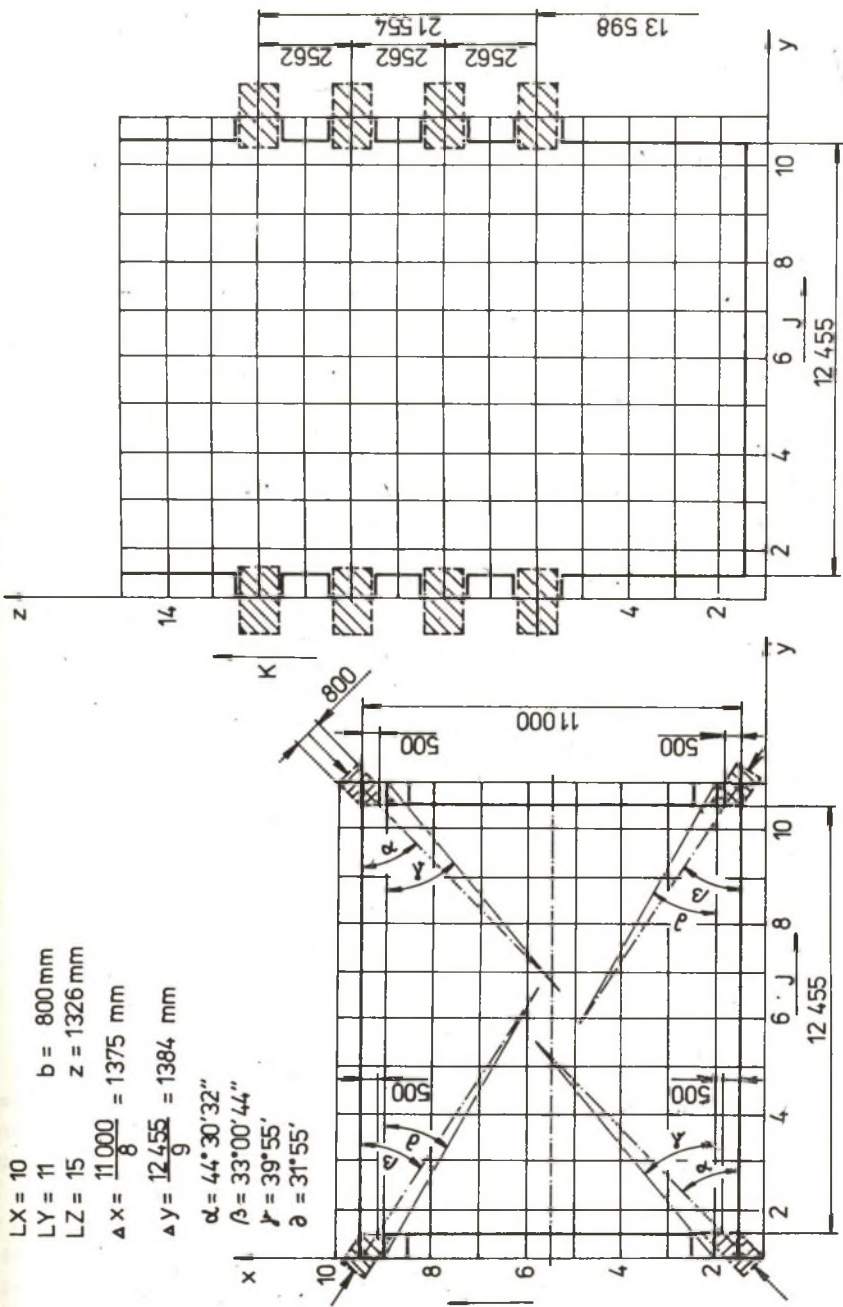
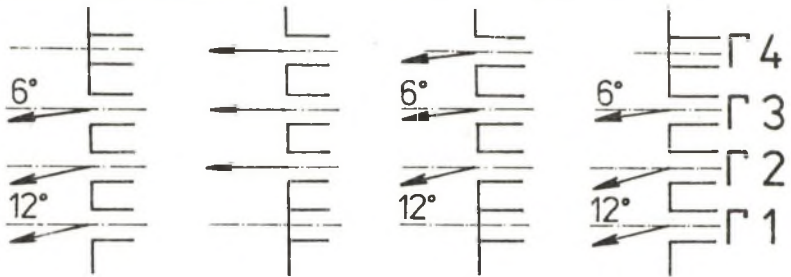


Рис. 3. Геометрия точки ЭС Детмаровице
 Rys. 3. Geometria paleniska E1. Detmarowice

- а) Таблица значения причин состояний при эксплуатации, отличающихся от расчетных величин.
- б) Проект реконструкции топки и горелок для измененных свойств топлива.
- в) Определение оптимального режима эксплуатации, при котором достигается максимальный к.п.д.

Например, при изменении топливной базы на 80 Детмаровице необходимо было создать условия для оптимальной рециркуляции отходящих газов путем поворота горелок и сопел горелок - рис. 4. Тем самым достигается также большее выгорание топлива перед горелками у оптимального варианта № 3 с горизонтальным направлением сопел. Условия контакта невыгоревших продуктов горения со стен-

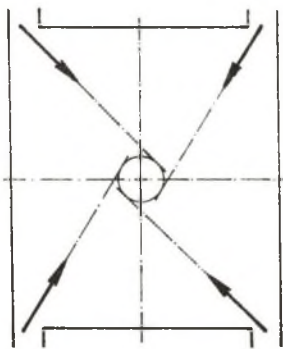


VAR.1

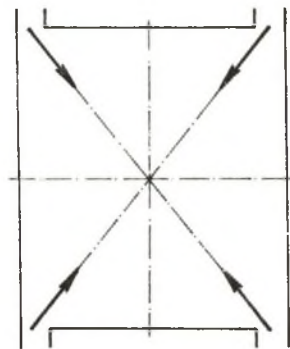
VAR.2

VAR.3

VAR.4



VAR.1



VAR.2,3,4

Рис. 4. Варианты расчетов математической модели 80 Детмаровице
 Rys. 4. Warianty obliczeń matematycznego modelu E1. Detmarowice

кой ухудшились и существенно понизилось шлакование - рис. 5, улучшилась аэродинамика и повысился к.п.д. котла [4].

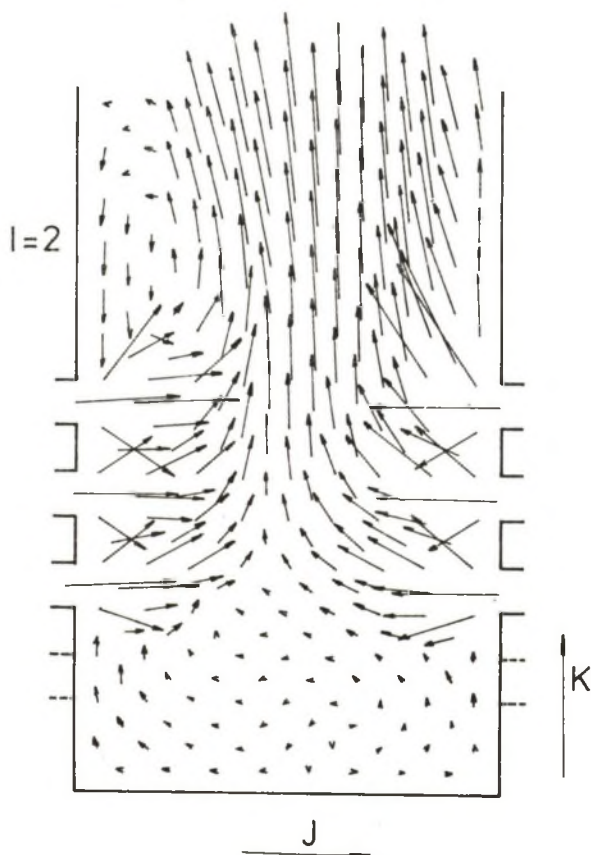


Рис. 5. Поле скоростей у оптимального варианта ЭС Детмаровице
 Rys. 5. Pole prędkości optymalnego wariantu El. Detmarowice

А потому математическая модель является действенным помощником проектировщика. Топки котлов большой производительности до сих пор проектировались, исходя из опыта эксплуатации малых топков. В обширном нормативном расчете котла в качестве параметра, характеризующего геометрию топки, приняты только объем, сечение и размещение горелки по высоте. В расчете не принимается во внимание более подробная геометрическая форма и аэродинамика. Математическая модель предоставляет данные для оценки влияния ряда параметров, которые мы до сих пор не могли рассматривать, и тем самым расширяет возможность расчета. Результаты математического моделирования, проводимого в стадии проектирования, проверяются на практике измерением условий горения в топке. Целью этих сложных измерений является определение с большей универ-

сальностью оптимального переноса количества движения, энергии и массы в зонах горелок. Универсальность точки является свойством, которое при разных видах топлива и разных режимах работы обеспечивает сохранение стабильности горения.

Универсальность определяется в зависимости от эффективности турбулентного переноса массы перед горелкой, характеризованной коэффициентом переноса массы и критерием Шервуда. Эти зависимости определялись для разных режимов горения котлов 200 МВт ЭС Детмаровице до и после реконструкции горелок путем непосредственных измерений в топке [4].

Для точки $x/b = 1,5$ было составлено уравнение критерия, характеризующее нестабильное горение до реконструкции горелки:

$$Sh = 0,0163 \cdot Re_T^{1,58} \cdot Sc^{0,3} \quad (13)$$

для которого действителен турбулентный критерий Рейнольдса и критерий Шмидта:

$$Re_T (8 - 33); \quad Sc (0,25 - 0,58)$$

После реконструкции улучшились аэродинамические условия, и турбулентный перенос массы мы можем описать уравнением:

$$Sh = 0,216 \cdot Re_T^{0,63} \cdot Sc^{0,3} \quad (14)$$

$$Re_T (12 - 80); \quad Sc (0,25 - 0,6)$$

Чем более плоская форма кривой Sh тем менее чувствителен процесс горения к изменению режима и топлива.

Зона горения передвинулась ближе к горелке, улучшились условия зажигания и укоротилась длина факела.

Благодаря стабильности горения и более высокой универсальности точки уменьшается степень засорения топки и радиационных перегревателей низкоплавким шлаком – рис. 6, что отражается при эксплуатации на понижении количества регулирующих впрыскиваний в радиационные и конвективные пароперегреватели. Каждая неравномерность температур и тепловых потоков влечет за собой неравномерный нагрев перегретого пара, а тем самым повышается температура стенок и термическая усталость материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования переноса количества движения, энергии и массы в топках котлов показали, что главной зоной для работы котла является область горения вплоть до $x/b = 5$. Горелки следует проектировать и конструировать так,

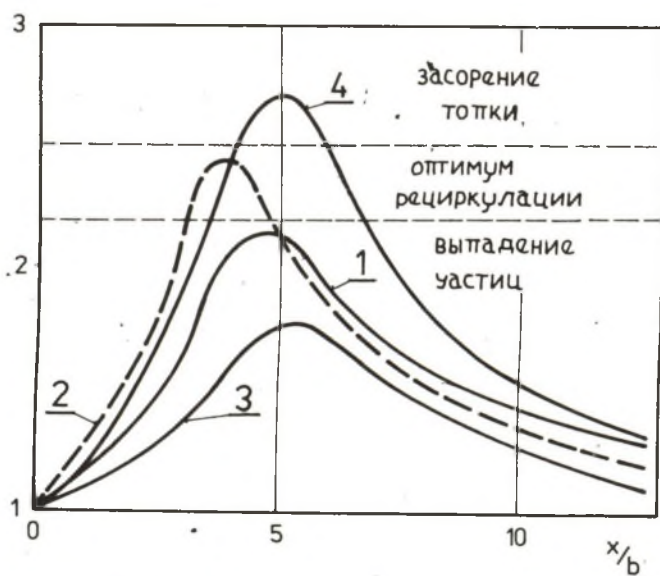
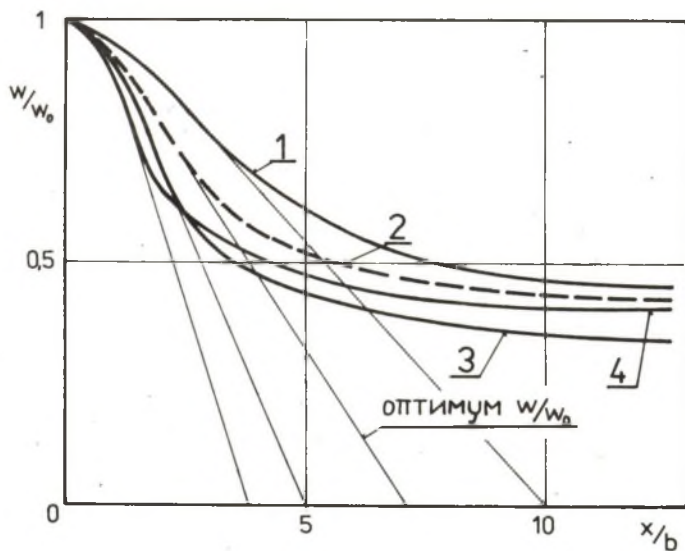


Рис. 6. Ход изменений относительного массового потока, скоростей и условия шлакования

Rys. 6. Przebieg zmian względnego wydatku masowego, prędkości i warunki odżułowania

чтобы зона зажигания и горения не менялась. Эту зону можно определить с помощью математической модели и на этой основе проектировать оптимальную форму топки и горелок.

Путем расчета примеров математической модели для разных начальных и крайних условий было установлено влияние расположения горелок и мельниц при минимальной производительности при сохранении стабильности горения. Выбор параметра турбулентности горелки, угла поворота и наклона горелки представляет выход для реализации этой части исследований. У оптимально спроектированной топки достигается:

- а) стабильная зона зажигания и горения,
- б) увеличенное количество рециркулирующих отходящих газов, а тем самым укращивается путь зажигания горелки, а также зона горения, повышается интенсивность турбулентности и предотвращается выпадение более крупных частиц из потока,
- в) компенсация изменения концентрации угольной пыли,
- г) воздействие на гранулометрические и физические свойства, а также на специфическое сопротивление золь-уноса, что определяет эффективность электрических пылеуловителей,
- д) понижение выброса сублимированных тяжелых металлов и оксидов азота NO_x .

d	м	- диаметр частицы топлива
c_p	Дж/кг дег	- удельная теплоемкость
k_d	с	- постоянная времени
p	Н/м ²	- давление
$w_{x,y,z}$	м/с	- скорость в направлении
T	°К	- температура
h_d	%	- недокор топлива
\dot{Q}_R	Вт/кг	- выделяемая теплопроизводительность
Q_R	Дж/кг	- выделяемое тепло 1 кг топлива
R	Дж/кг °К	- газовая постоянная
\dot{Q}_S	Вт/м ³	- теплопроизводительность радиации
ρ	кг/м ³	- удельная масса
ν_T	м ² /с	- турбулентная кинематическая вязкость
λ_T	Вт/м °К	- турбулентная теплопроводность
\dot{D}_T	м ² /с	- турбулентная диффузионность
ω_1, ω_2	-	- относительная концентрация топлива и окислителя

τ_d	с	- время диффузионного горения
τ_{100}	с	- продолжительность горения частиц 100 мкм
x/b	-	- относительный путь горения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доброземски А.: Эффективное использование низкосортного и небалансового топлива при минимизации вредных выбросов в энергетике у пылеугольных и флюидных топок. Исследовательский отчет государственной целевой программы С2 и 12, ГМИ, 1986 г.
2. Колат П., Конечны В.: Решение математической трехмерной модели. Исследовательский отчет Р-10-125-033/8 ГМИ, 1976 г.
3. Колат П.: К вопросу математического моделирования топок котлов блоков 100 и 200 МВт. Кандид. диссерт. работа, ГМИ, 1974 г.
4. Доброземски А., Колат П.: Использование математической трехмерной модели при комплексном исследовании аэродинамики топок. Исследовательский отчет С08, ГМИ 1981 г.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ludwik Cwynar

Wpłynęło do redakcji w marcu 1988 r.

MATEMATYCZNE MODELOWANIE KOMÓR PALENISKOWYCH
KOTŁÓW BLOKÓW 100, 200 i 500 MW

S t r e s z c z e n i e

W artykule przedstawiono zasady matematycznego modelowania komór paleniskowych, stosowanego w Katedrze Energetyki Wyższej Szkoły Górniczej w Ostrawie przy kompleksowym badaniu aerodynamiki spalania w paleniskach kotłów dużej wydajności. Stanowi ono rozwinięcie trójwymiarowego modelu matematycznego komór paleniskowych, zaproponowanego przez Zubera.

W pracy podano podstawowe równania modelu, opis matematyczny procesu spalania piłu, przedstawiono charakterystykę programu obliczeniowego na EMC oraz omówiono sposób zadawania danych i przyjmowane warunki brzegowe.

Przedstawiony model matematyczny służy do badań wpływu charakterystyki paliwa, zmian wielkości wejściowych, geometrii palników i komory paleniskowej przy różnych warunkach początkowych i brzegowych oraz do określenia optymalnego kształtu komory i układu palników, przy których wrażliwość kotła na zmiany paliwa i zmiany warunków eksploatacji, przy zachowaniu stabilnego spalania, jest mniejsza.

MATHEMATICAL SIMULATION OF 100, 200 AND 500 MW POWER UNIT
BOILER FURNACE CHAMBERS

S u m m a r y

Principles of mathematical simulation of the furnace chambers used in the Power Engineering Department of the Mining Academy in Ostrava at complex testing of combustion aerodynamics in the high yield boiler furnaces have been presented in the paper.

This simulation makes development of three - dimensional mathematical archetype proposed by Zuber.

Basic equations of the archetype and mathematical description of the dust combustion process have been given in the article, electronic digital computer calculation programme characteristic has been presented and method of data input and assumed boundary conditions have been discussed. The mathematical archetype presented serves investigations on influence of fuel characteristic, input quantity changes, geometry of the burners and furnace chamber under various initial and boundary conditions and determination of optimum shape of the chamber and system of the burners for which the boiler sensitivity to the fuel changes and operating conditions changes in lower when preserving stable combustion.