

# МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

А. Д. РЫЧКОВ

*Институт вычислительных технологий СО РАН*

*Новосибирск, Россия*

e-mail: rych@ict.nsc.ru

The paper contains some results of numerical simulation of work processes in different advanced patterns of boiler units of thermal power stations. They are a pulverized-coal fired boiler with a vortex furnace, fluidized bed boiler and pulverized-coal burner with a plasma firing. The flow fields and basis performances of these objects are investigated. A simple control algorithm for power level of fluidized bed boiler is elaborated. The results of numerical simulations can be used in heat power industry as some recommendations.

Излагаются некоторые результаты численного моделирования ряда схем котельных агрегатов тепловых электростанций и пылеугольных горелок, выполненного в Институте вычислительных технологий СО РАН за последние годы. Моделирование в топочных камерах вихревого типа было проведено совместно с Д. В. Красинским (ИТ СО РАН), в расчетах топок с циркулирующим кипящим слоем принимал участие магистрант НГТУ К. П. Филипов.

## 1. Численное моделирование аэродинамики топочных камер вихревого типа

Одним из перспективных направлений повышения эффективности котельных агрегатов пылеугольных тепловых электростанций при уменьшении экологической нагрузки на окружающую среду является использование топочных устройств вихревого типа (рис. 1.1).

Наличие в них устойчивой вихревой структуры и высокий уровень турбулентности обеспечивают эффективное сжигание широкой гаммы топлив при пониженном образовании вредных выбросов. Численное моделирование пространственного двухфазного турбулентного течения в такой топке позволяет исследовать влияние аэродинамической структуры течения на процессы тепломассопереноса в ней и является основой для выбора рабочих режимов топки и оптимизации ее конструкции [1].

Математическая модель двухфазной среды основана на эйлеровом описании обеих фаз в рамках двухскоростного и двухтемпературного подходов [2], поскольку в вихревой топке траектории частиц даже мелких размеров не совпадают с траекториями несущего газа. При описании турбулентного течения использовались осреднение по Фавру для несущего газа и кинетическое уравнение для функции плотности распределения скоростей и температур частиц для дисперсной фазы. При замыкании ( $k - \varepsilon$ )-модели турбулентности

учитывалось влияние второй фазы на турбулентное течение несущего газа. Приведены некоторые результаты исследований. На рис. 1.2 показана структура течения в плоскости, проходящей через середину горелки. Видно, что в вихревой камере формируется устойчивый вихрь и течение в горловине топки существенно неравномерное. Сравнение рассчитанных (кривая 1) и измеренных (кривая 2) значений кинетической энергии турбулентности  $k_t$ , отнесенной к квадрату скорости несущего газа на выходе из горелки  $U_0$ , приведено на рис. 1.3.

Распределение избыточного давления  $p = (p - p_a) / \rho_a U_0^2$  ( $p_a, \rho_a$  — давление и плотность газа при атмосферных условиях) по высоте топки для разных размеров частиц показано на рис. 1.4: при размере частиц  $d_p = 90$  мкм — кривая 1, при  $d_p = 400$  мкм — кривая 2; течение чистого газа — кривая 3.

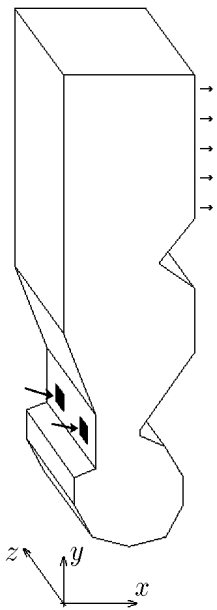


Рис. 1.1.

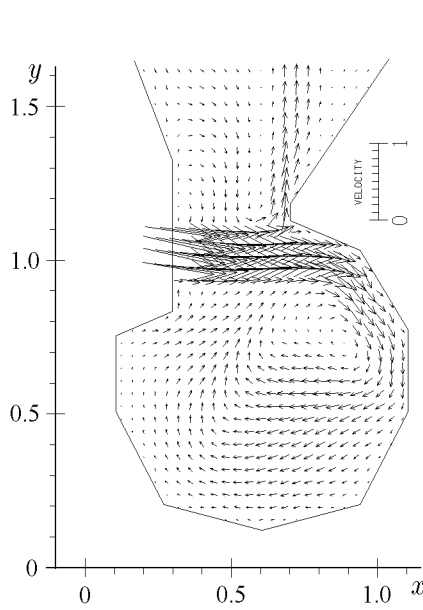


Рис. 1.2.

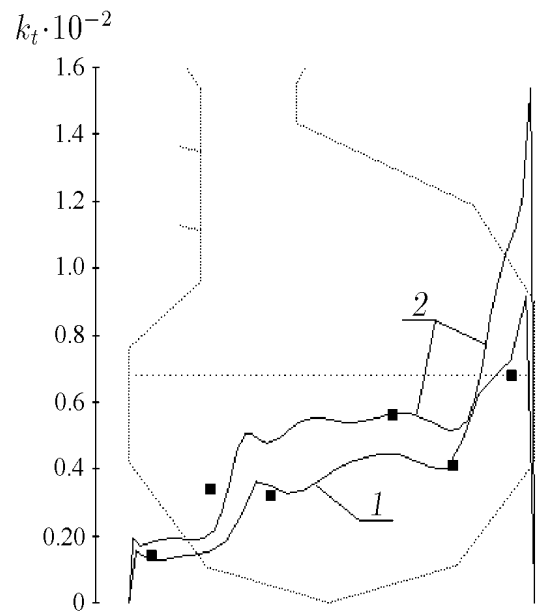


Рис.1.3.

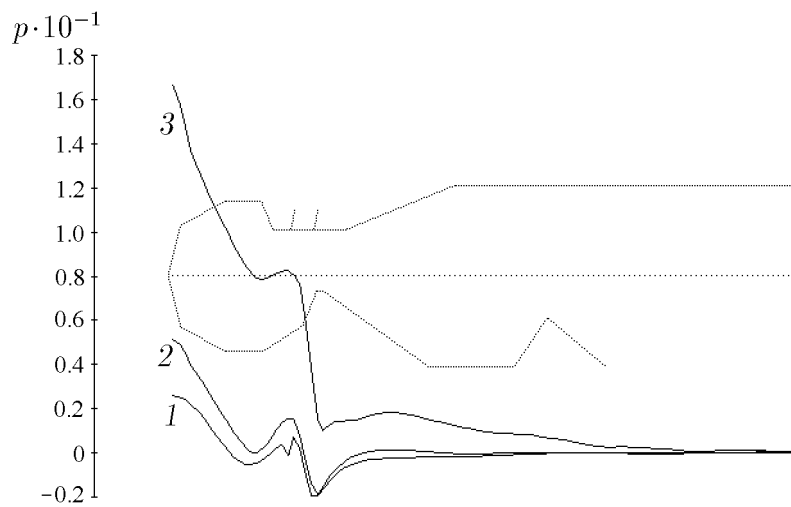


Рис. 1.4.

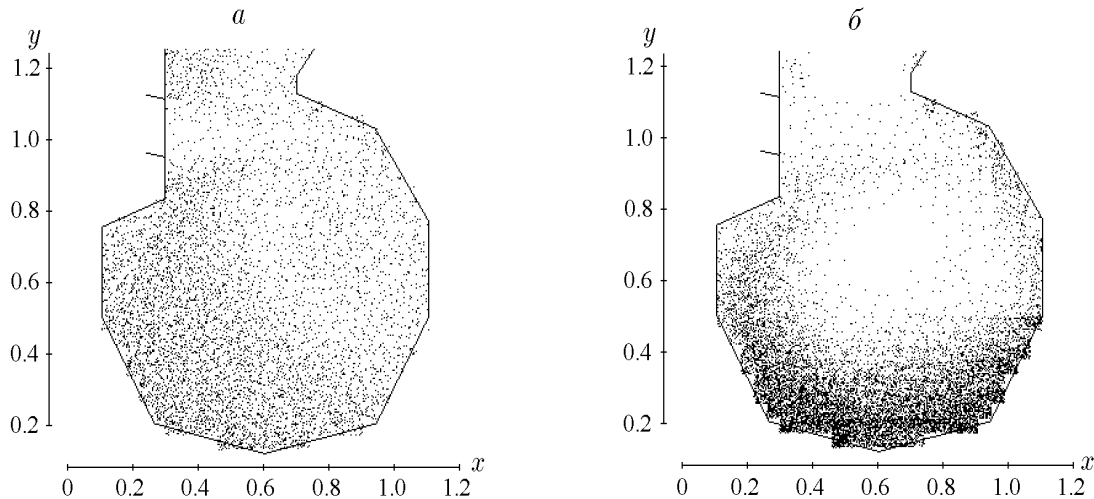


Рис. 1.5.

Увеличение перепада давления для частиц мелких размеров связано с их более интенсивным взаимодействием с несущим газом. От этого же фактора зависит и распределение концентрации частиц в вихревой камере. Концентрация частиц при  $d_p = 90$  мкм показана на рис. 1.5, *а*, при  $d_p = 400$  мкм — на рис. 1.5, *б*.

На основании результатов исследований разработаны практические рекомендации по выбору конфигурации области горловины вихревой камеры.

## 2. Математическое моделирование процесса плазменного розжига в топках пылеугольных котлов

Одним из интересных примеров применения плазменных технологий в котельной технике является использование струи низкотемпературной плазмы при розжиге котельных агрегатов тепловых электростанций (ТЭС) и стабилизации горения пылеугольного факела в них. Это позволяет отказаться от мазута и природного газа, обычно применяемых для этих целей, автоматизировать процесс розжига, повысить полноту сгорания твердого топлива и снизить уровень выбросов в атмосферу вредных газов, т. е. значительно улучшить экономические и экологические показатели ТЭС. Однако многие вопросы, связанные с более глубоким пониманием особенностей физико-химических процессов, протекающих при взаимодействии струи такой плазмы с пылеугольным потоком, остаются открытыми и требуют проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

В ИВТ СО РАН выполнен цикл работ по математическому моделированию процесса воспламенения аэросмеси струей низкотемпературной воздушной плазмы в осесимметричной пылеугольной горелке [3]. Схема течения в такой горелке показана на рис. 2.1. Горелка представляет собой трубу (муфель), по центральной части которой через сопловой насадок подается воздух, нагретый в электродуговом плазмотроне до температуры 5000 К, по периферийной — полидисперсный пылеугольный поток с весовым содержанием твердого топлива, типичным для пылеугольных горелок ТЭС. Течение в струе и периферийном низкоскоростном спутном двухфазном потоке предполагалось осесимметричным и турбулентным, учитывалось силовое и тепловое взаимодействие между несущим газом и частицами, а также все основные стадии процесса зажигания пылеугольных частиц,

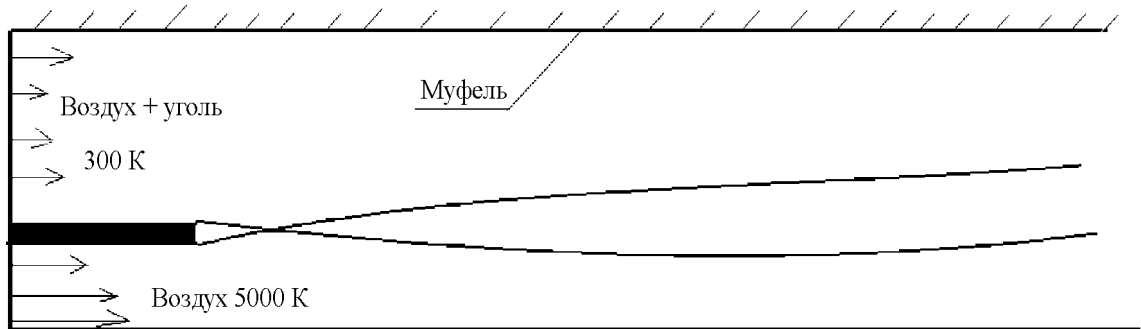
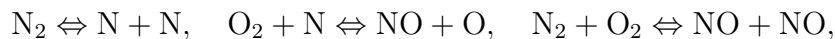


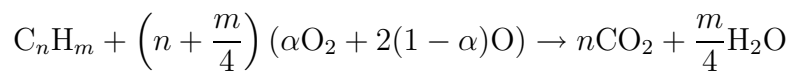
Рис. 2.1.

включая выход летучих и их горение, воспламенение и горение коксового остатка.

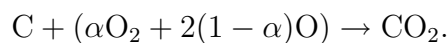
При описании этих процессов использовалась модель угольной частицы с прочным золовым каркасом, согласно которой при горении размер частицы не меняется, а изменяется лишь ее состав (следовательно, и удельный вес). Учитывалось, что в газовой фазе неравновесные химические реакции диссоциации и реакции обмена протекают в низкотемпературной плазме. Скорости реакций определялись на основе закона Аррениуса:



а также обобщенной реакции горения углеводородов



( $\alpha$  — относительная доля молекулярного кислорода в “обобщенном” окислителе, состоящем из смеси молекулярного и атомарного кислорода). Предполагалось, что ограничивающей стадией в процессе горения является турбулентное смешение, описываемое моделью дробления турбулентных вихрей, а также, что горение углерода при избытке окислителя протекает по схеме одностадийной реакции



Движение частиц рассматривалось в рамках траекторного метода пробных частиц, предложенного Кроу, а учет влияния турбулентных пульсаций несущего газа на их движение проводился с помощью метода случайных блужданий. Поскольку частицы попадают в область смешения струи плазмы со спутным потоком, где течение близко к стратифицированному, кроме сил аэродинамического сопротивления учитывались сила Саффмена, а также вращение частиц, которые предполагались сферическими. Рассматривался как конвективный, так и радиационный теплообмен между газом и частицами. Выход летучих рассчитывался на основе однокомпонентной схемы по реакции первого порядка, скорость которой определялась с помощью диффузионно-кинетической зависимости, учитывающей кинетику процесса, описываемую законом Аррениуса, и диффузионное сопротивление при прохождении летучих через массу частиц топлива.

Для описания движения несущего газа использовалась осредненная по Фавру система уравнений Навье — Стокса, замыкаемая ( $k - \varepsilon$ )-моделью турбулентности, в которой межфазные взаимодействия учитывались на уровне как осредненного, так и пульсационного движений.

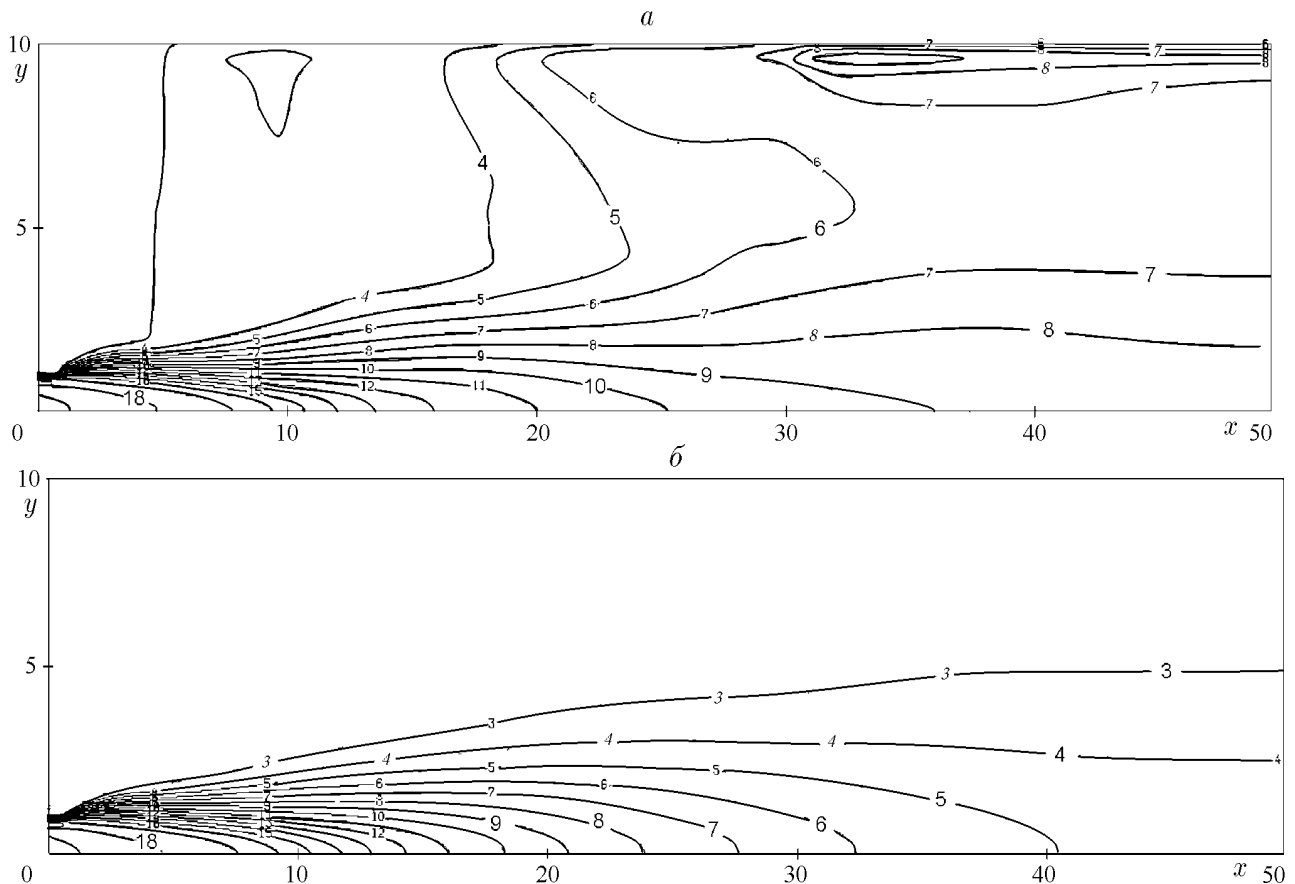


Рис. 2.2.

На рис. 2.2 приведены изотермы для двухфазного течения (*a*) и течения чистого газа (*б*) (линии проведены с шагом  $\Delta T = 250$  К, все линейные размеры отнесены к радиусу выходного сечения соплового насадка). Видно, что вблизи среза соплового насадка из-за теплообмена с частицами температура струи падает быстрее, однако по мере выделения и горения летучих и коксового остатка температура в поле течения оказывается выше, чем в случае течения чистого газа.

Интересен тот факт, что воспламенение частиц угля в потоке вне плазменной струи происходит вблизи стенки трубы (муфеля), что может быть связано с ведущей ролью радиационного теплообмена в процессе воспламенения, поскольку времена пребывания частиц в периферийной области течения оказываются наибольшими. Этот вывод подтверждается и динамикой выхода летучих, показанной на рис. 2.3 изолиниями их осредненной массовой доли в частицах угля.

Воспламенение частиц, судя по положению изотерм на рис. 2.2, *a*, происходит значительно ниже по потоку. Об этом свидетельствует и картина распределения изолиний концентрации молекулярного кислорода (рис. 2.4), которая подтверждает, что горение коксового остатка начинается в периферийной части течения после воспламенения летучих.

Значительный интерес представляет исследование распределения доли атомарного кислорода в поле течения (рис. 2.5), поскольку даже относительно небольшие его концентрации могут значительно интенсифицировать процесс розжига.

На основании рис. 2.5 можно сделать вывод о том, что в исследуемой технологической схеме розжига практически весь атомарный кислород расходуется в реакциях рекомбина-

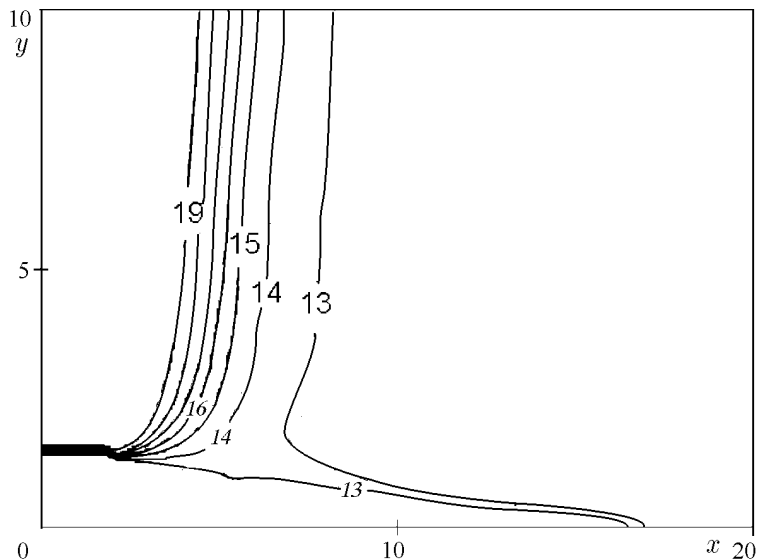


Рис. 2.3.

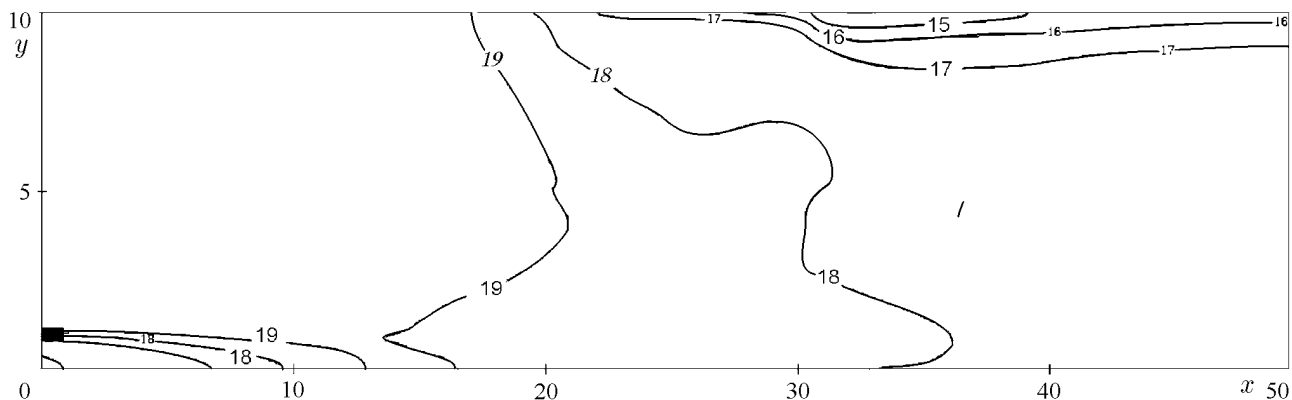


Рис. 2.4.

ции вблизи среза соплового насадка в зоне, свободной от частиц, и его влияние на процесс воспламенения частиц топлива оказывается незначительным. По-видимому, его роль будет более существенной в том случае, если часть пылеугольного потока будет подаваться через сопловой насадок, т. е. проходить через область течения низкотемпературной плазмы.

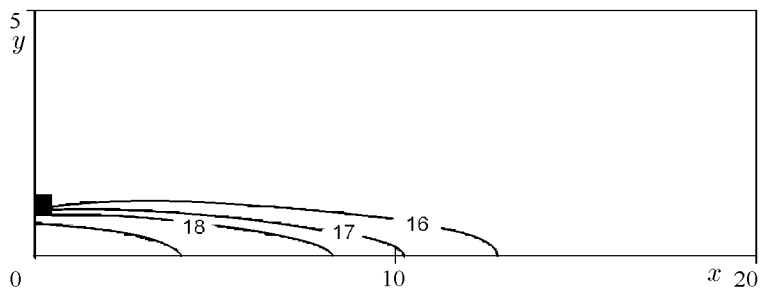


Рис. 2.5.

### 3. Численное моделирование топочных процессов в котлах с циркулирующим кипящим слоем

В последние годы наряду с традиционными факельным и слоевым способами сжигания твердого топлива в топках энергетических котлов начинают применяться системы с многократной циркуляцией топлива с так называемым циркулирующим кипящим слоем (ЦКС). Этот способ сжигания отвечает существующим жестким экологическим требованиям, он позволяет снизить затраты на топливо и вовлечь для нужд энергетики ранее не использовавшиеся низкокалорийные и высокзолые виды топлив. Схема топки с ЦКС показана на рис. 3.1. В нижнюю часть топочной камеры *A* поступает как свежее (первичное) топливо *1*, так и возвратное *2* из циклона *B*, улавливающего крупные несгоревшие частицы топлива и золы. Часть необходимого для горения воздуха (первичный воздух) *3* вводится снизу через газораспределительную решетку, в результате чего в нижней части топки образуется кипящий слой с высокой концентрацией твердого материала; при этом концентрация углерода, как правило, не превышает нескольких процентов от концентрации золы. Мелкодисперсная часть топлива выносится из кипящего слоя в надслоевое пространство, частично сгорает в верхней части топки, далее поступает в циклон и возвращается в топку, за исключением той части топлива, которая не улавливается циклоном и выносится из системы. На границе между слоем и надслоевым пространством вводится вторичный воздух *4*, и в верхней части топки организуется разреженный дисперсный поток, движущийся вверх в режиме пневмотранспорта. Для вывода крупных фракций золы из системы предусматривается слив твердого материала из слоя; при этом выносится и часть топлива, что приводит к увеличению механического недожога. Дымовые газы и мелкодисперсная зола выводятся из циклона в дымовую трубу *5*.

Для математического моделирования основных процессов в топках с ЦКС использовалась квазиодномерная модель течения [2]. Она, безусловно, не учитывает ряд существенно неодномерных эффектов, например, таких как опускное движение частиц вблизи стенок камеры [4], однако правильно отражает поведение различных интегральных характеристик процессов, определяющих основные режимы работы топок, и не требует больших затрат машинного времени. Это позволяет использовать ее в качестве основы при разработке специализированного программного обеспечения для систем автоматизированного управления работой котлоагрегатов с технологией ЦКС в режиме реального времени, когда влияние человеческого фактора является достаточно критичным для нормальной эксплуатации оборудования.

В используемой математической модели приняты следующие основные допущения:

1. Течение является двухфазным, квазиодномерным и нестационарным, т. е. используется модель идеального вытеснения. Для описания движения фаз применяется континуальная модель взаимопроникающих сред.

2. Горение угольных частиц определяется только реакцией окисления  $C + O_2 = CO_2$ , в выражении для скорости которой учитываются как кинетический, так и диффузионный режимы ее протекания.

3. Летучие выделяются и сгорают на входе в топочную камеру.

4. Несущий газ состоит из трех компонентов  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ . Учитывается межфазный обмен массой и импульсом, температура газа и частиц предполагается одинаковой.

5. При движении смеси в топочной камере учитываются конвективный, кондуктивный и лучистый теплообмен со стенкой камеры, а также силы трения.

6. Горения угольных и истирания золовых частиц в циклоне не происходит. Коэффи-

коэффициент эффективности улавливания циклона и время задержки в нем топлива считаются известными величинами.

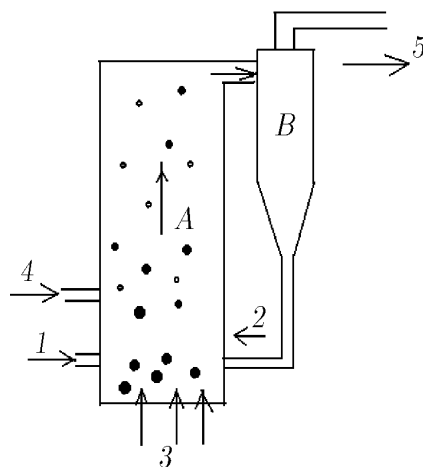


Рис. 3.1.

На основе разработанной модели создан комплекс программ для расчета стационарных и переходных процессов в топках котлов с ЦКС и проведены параметрические расчеты с целью моделирования основных режимов работы котла [5, 6]. Некоторые результаты исследований приводятся ниже.

На рис. 3.2 показано распределение скорости  $U$  (а), температуры  $T$  (б), плотности частиц  $\rho_p$  (в) и суммарного теплонапряжения  $q$  по высоте топки  $x$  (г). Небольшое увеличение плотности частиц (рис. 3.2, в) в выходной части топки и соответствующее ему уменьшение скорости частиц (рис. 3.2, а) обусловлены влиянием силы тяжести. Наибольшие значения температуры и концентрации частиц находятся в области кипящего слоя.

На рис. 3.3 приведены изменения температуры  $T$  от времени  $t$  на выходе (а) и суммарного теплонапряжения при запуске котла (б), по которому можно оценить время выхода агрегата на стационарный режим.

Зависимости тепловых характеристик от времени задержки частиц в циклоне при запуске котла приведены на рис. 3.4: кривые 1 – 5 (по возрастающим номерам) соответствуют временам задержки 5, 10, 20, 30, и 50 с. Видно, что с увеличением времени задержки динамическая реакция котла ухудшается.

**Моделирование переходных режимов работы котлов с ЦКС.** Большой практический интерес представляет исследование нестационарных процессов в котлах с ЦКС, когда имеет место изменение внешней тепловой нагрузки. Это может быть как плановое изменение (например, внутрисуточный цикл изменения нагрузки), так и внеплановое (аварийное). С учетом сложного характера управления таким котлоагрегатом и нежелательности участия в нем человеческого фактора разработана достаточно простая модель управления котлом и проанализированы некоторые результаты ее применения.

В основу модели положена зависимость выходной тепловой мощности котла  $I$  от следующих его основных входных параметров:

- расхода топлива и основного воздуха  $G_T$ ;
- расхода вторичного и третичного воздуха  $G_B$ ;
- расхода топливно-зольной массы при сливе ее из циклона и продолжительности этого слива  $G_C$ .



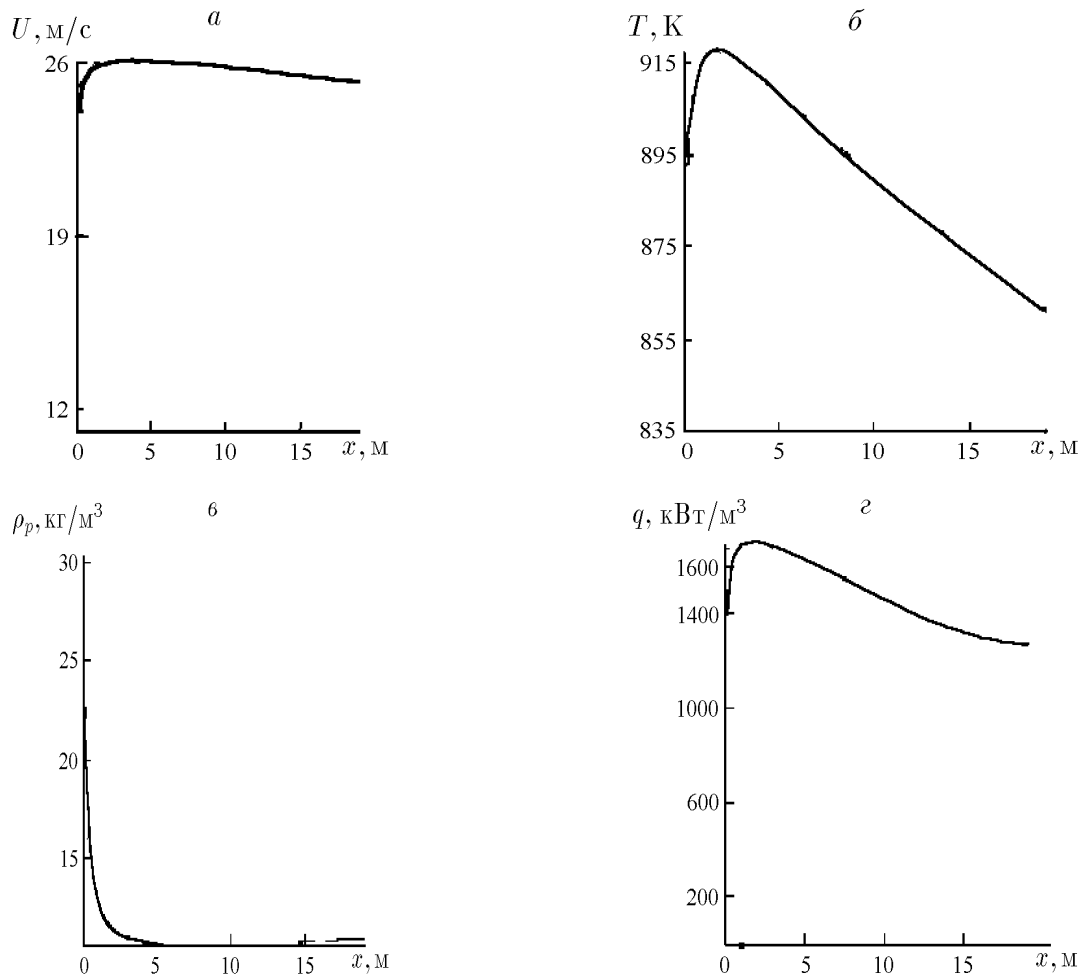


Рис. 3.2.

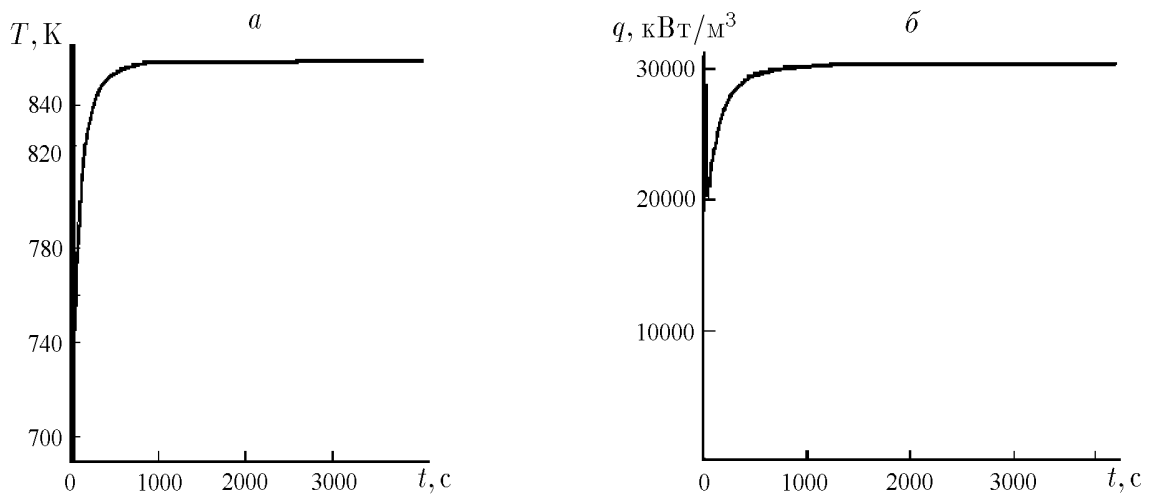


Рис. 3.3.

В общем виде эта зависимость может быть записана так:

$$I = F(G_T, G_B, G_C). \quad (3.1)$$

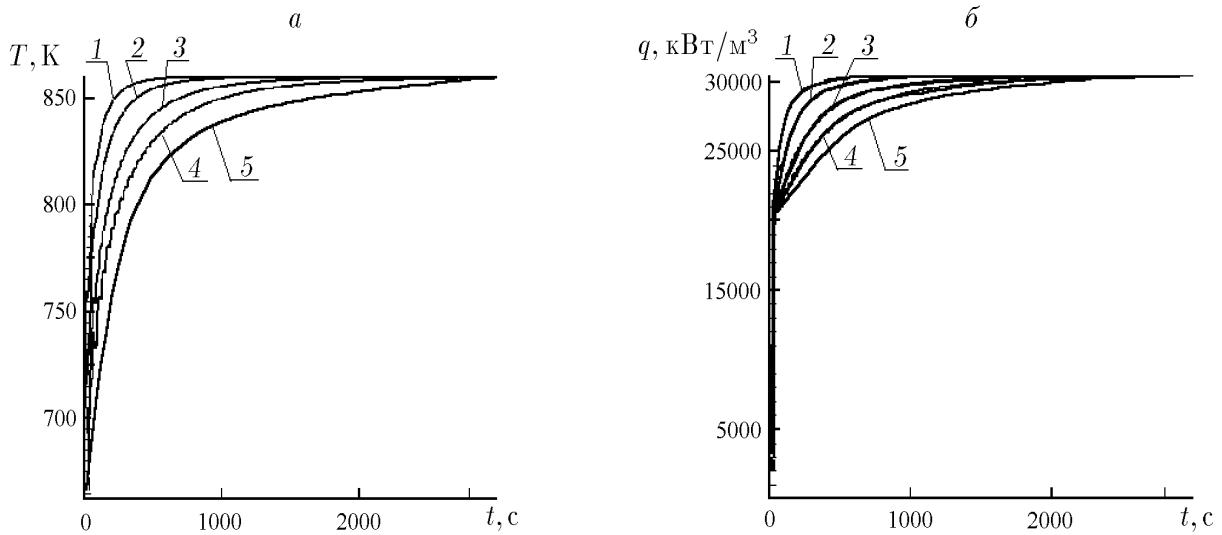


Рис. 3.4.

Значения этих входных параметров должны определяться из условия равенства выходной  $I$  и внешней  $I_W$  тепловых нагрузок и условия устойчивости работы котла, т. е. приходится решать обратную задачу: по величине внешней тепловой нагрузки определить наименьшие значения параметров  $G_T, G_B, G_C$  при условии  $I = I_W$ .

В качестве примера использования предложенного подхода рассмотрим только первые два параметра. Алгоритм решения обратной задачи был следующим. Зависимость (3.1) аппроксимировалась выражением

$$I = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{i,j} x^i y^j, \quad x_{\min} \leq x \leq x_{\max}, \quad y_{\min} \leq y \leq y_{\max}, \quad (3.2)$$

где  $x = G_T, y = G_B, x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$  — минимальные и максимальные значения соответствующих параметров при устойчивой работе котла. Далее путем численного решения основной системы уравнений, описывающей квазиодномерное двухфазное течение в котле, для различных комбинаций значений входных параметров (по четыре значения для каждого из входных параметров  $G_T$  и  $G_W$ ) рассчитывались числовые значения  $I$  (всего шестнадцать значений). Затем методом наименьших квадратов определялись значения коэффициентов  $a_{i,j}$  в приближенной зависимости (3.2), аппроксимирующей (3.1). Эти значения коэффициентов использовались затем при нахождении входных параметров  $x$  и  $y$  при решении следующей оптимизационной задачи управления котлом: найти минимум функционала

$$\min \left\{ \left( I_W(t) - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{i,j} x^i y^j \right)^2 \right\} \quad (3.3)$$

в любой момент времени  $t$ , обеспечивающего требуемый режим управления работы котлом. Конечно, в такой упрощенной постановке не учитывается инерционность процессов, протекающих в ЦКС, особенно в циклонах, но ее легко учесть путем введения в функционал (3.3) сдвига по времени, который можно определить из вычислительного эксперимента для котла данной конструкции и данного вида топлива.

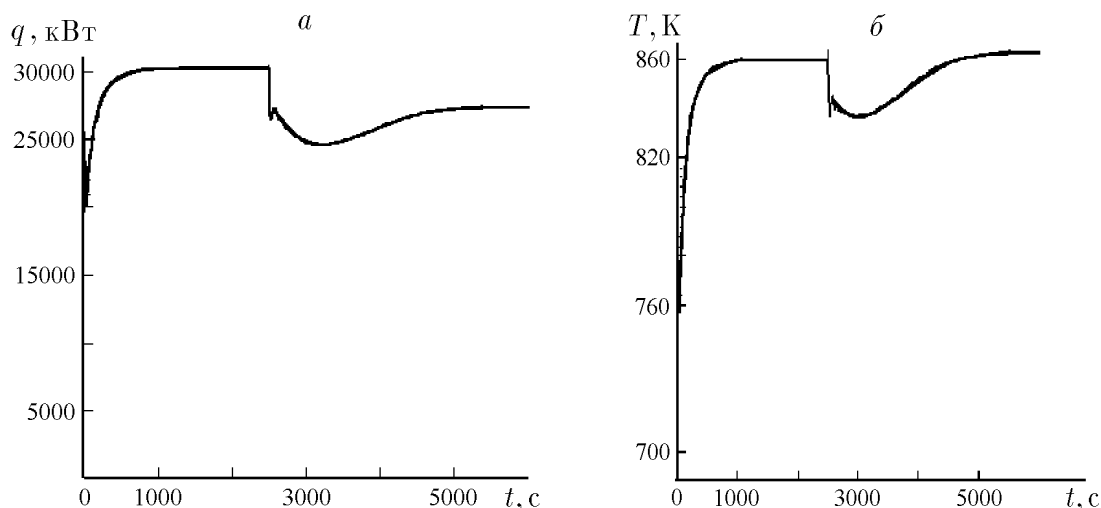


Рис. 3.5.

Рассматривалось динамическое поведение тепловых характеристик котла при внезапном изменении внешней нагрузки на него. С этой целью после выхода котла на установившийся режим ( $t = 2500$  с) внешняя нагрузка скачкообразно увеличивалась или уменьшалась на 10%. На рис. 3.5 показано изменение тепловых характеристик при снижении нагрузки, на рис. 3.6 — при увеличении нагрузки.

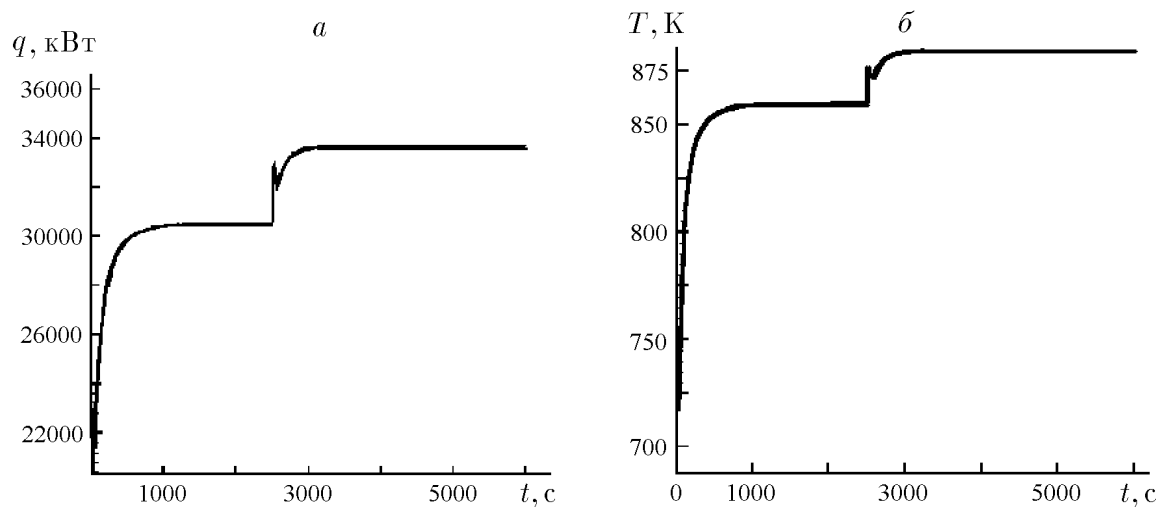


Рис. 3.6.

Из анализа результатов следует, что время установления стационарного режима при увеличении нагрузки значительно меньше, чем при ее снижении. Это обусловлено тем, что при снижении нагрузки происходит догорание топлива, находящегося в циклоне. Поэтому для сокращения времени выхода на режим предлагается установить дополнительный отвод топлива из циклона.

## Список литературы

- [1] РЫЧКОВ А. Д., КРАСНСКИЙ Д. В., КЕИНО А. Ж., САЛОМАТОВ В. В. Modeling the

- vortex furnace aerodynamics // Proc. 4th Europ. Conf. on Industrial Furnace and Boilers. Vol. 2. Portugal, Espinho-Porto, 1997. 9 p.
- [2] Волков Э. П., Зайчик Л. И., Першук В. А. Моделирование горения твердого топлива М.: Наука, 1994. 320 с.
- [3] Рычков А. Д., Жуков М. Ф. Математическое моделирование процесса воспламенения пылеугольной аэросмеси струей низкотемпературной плазмы // ПМТФ. 1998. Т. 39, №3. С. 134–140.
- [4] Рычков А. Д., Саломатов В. В., Грехов В. А. Численное моделирование аэродинамических процессов в котлах с циркулирующим кипящим слоем с учетом горения частиц твердого топлива // Теплофизика и аэромеханика. 1994. Т. 1, №3. С. 219–223.
- [5] Филипов К. П., Рычков А. Д., Саломатов В. В. Численное моделирование топочных процессов в котлах с циркулирующим кипящим слоем // Теплоэнергетика: Сб. науч. тр. Вып. 3 / Под ред. В. Е. Накорякова. Новосибирск: НГТУ, 1999. С. 111–117.
- [6] Рычков А. Д., Филипов К. П. Numerical modeling of coal combustion processes in ecological clear circulating fluidized bed boiler units // Proc. of 4th Intern. Korean Nat. Symp. on Sci. and Technologies KORUS 2000, Ulsan, 27 June – 1 July, 2000. Pt 1. P. 304–309.

*Поступила в редакцию 11 января 2002 г.*