

В. В. Саломатов^{1,2}, **А. В. Гиль**³, **А. В. Старченко**⁴, **Р. Ю. Архипов**²

¹ *Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия*

² *Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия*

³ *Томский политехнический университет
пр. Ленина, 30, Томск, 634004, Россия*

⁴ *Томский государственный университет
пр. Ленина, 34, Томск, 634030, Россия*

salomatov.vv@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЖИГАНИЯ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ЦИРКУЛИРУЮЩЕМ КИПАЩЕМ СЛОЕ

Особенность математического моделирования циркулирующего кипящего слоя (ЦКС) состоит в том, что твердая фаза (топливные и золовые частицы) всегда является полидисперсной средой. В статье сконструирована математическая модель газодинамики, тепломассообмена и горения в топочном объеме парогенератора ЦКС с высококонцентрированным содержанием дисперсной фазы применительно к исследованию аэротермохимических процессов в топке ЦКС. Учитываются: турбулентная структура двухфазного потока, радиационный теплообмен в запыленной среде, химическая кинетика реакций воспламенения и горения, эффекты силового и теплового взаимодействия между частицами и частиц со стенкой, др. В качестве модели такой среды была выбрана феноменологическая модель взаимопроникающих континуумов Х. А. Рахматулина. Характерными признаками технологии ЦКС являются: во-первых, организованная внутритопочная циркуляция твердых частиц; во-вторых, повторный возврат недогоревших крупных фракций в псевдооживленный слой. В результате этого время выгорания в низкотемпературном ЦКС увеличивается практически на два порядка по сравнению с факельным режимом, что позволяет выжечь самые тяжелые топлива. Анализ данных численных расчетов показал, что наилучшие результаты по воздействию полидисперсного состава топлива на характеристики топочного процесса в ЦКС обеспечивает распределение частиц по размерам, в котором преобладает более мелкая фракция.

Ключевые слова: твердое топливо, дисперсный состав, математическое моделирование, циркулирующий кипящий слой, внутритопочная циркуляция.

Введение

В настоящее время особое внимание уделяется технологиям сжигания низкокачественных твердых топлив с высокой эффективностью и низкой эмиссией вредных веществ. Анализ известных способов сжигания показывает, что наиболее экологически совершенным является сжигание в циркулирующем кипящем слое (ЦКС). Эта

технология позволяет сжечь даже самые низкометаморфизованные угли с рабочей зольностью до 80 % и рабочей влажностью до 60 %. Сюда попадают также все отходы углеобогащения и углепереработки. Данный способ сжигания обеспечивает уровень воздействия на окружающую среду, соответствующий требованиям экологически чистой энергетики, без применения дорогостоящих и громоздких систем газоочистки. Такие

Саломатов В. В., Гиль А. В., Старченко А. В., Архипов Р. Ю. Численное исследование влияния дисперсного состава на характеристики сжигания угольного топлива в циркулирующем кипящем слое // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2016. Т. 11, № 3. С. 53–61.

уникальные качества этой технологии способствовали ее тиражированию, что привело за рубежом к увеличению числа и мощности агрегатов для сжигания твердого топлива в ЦКС [1; 2]. Однако научное обоснование параметров технологии ЦКС пока не завершено.

Качественное проектирование мощных энергетических парогенераторов с ЦКС, что чрезвычайно актуально прежде всего для российской энергетики, в значительной степени зависит от представления и анализа газодинамических процессов, особенно, в топочной камере. Экспериментальные исследования топочных процессов ограничены локальными областями, трудоемкостью проведения опытов и неполной информацией об условиях функционирования реального объекта, в отличие от численного моделирования, интерес к которому постоянно растет в связи с быстрым развитием вычислительных технологий.

Поскольку математические модели сложных газодинамических систем постоянно совершенствуются и апробируются, то современные результаты численных исследований имеют высокую степень достоверности [3–5]. Наибольшее распространение при моделировании топочных процессов имеют два различных подхода к их описанию: Эйлера – Эйлера и Эйлера – Лагранжа. В представляемом исследовании использован Эйлерово-Лагранжев способ описания аэротермохимических процессов в газодисперсных средах на базе пакета прикладных программ FIRE 3D [6; 7]. Турбулентные характеристики газа рассчитываются с использованием двухпараметрической «к- ω » модели турбулентности, подправленной с учетом влияния движущихся частиц [8; 9]. Радиационный теплообмен в двухфазном потоке представляется в рамках P1 приближения метода сферических гармоник, который показывает хорошие результаты применения к пылеугольным топкам [8].

Объект исследования

Объектом исследования является парогенератор БКЗ-500-13,8-560КБФ конструкции ОАО «Сибэнергомаш» (рис. 1). Парогенератор однобарабанный, вертикально-водотрубный, с естественной циркуляцией, предназначенный для сжигания каменных и бурых углей ухудшенного качества в ЦКС. Компо-

новка парогенератора выполнена по смешанной схеме: топка – по Т-образной, а конвективный газоход – по П-образной. Топочная камера имеет вид призматической формы в газоплотном исполнении. Габариты топки: ширина – 19,0 м, глубина – 7,9 м, высота – 37,7 м. Боковые экраны в нижней части образуют скаты с целью сужения топки и повышения теплового напряжения в области псевдооживленного слоя. Топочные экраны в зоне высоких температур покрыты торкрет-материалом.

Верхняя часть топки разбита на 8 газоходов, оснащенных инерционными сепараторами. Часть недогоревших крупных топливно-золотых частиц возвращается в нижнюю часть топки по восьми каналам, расположенных встречно в один ярус по четыре на каждой боковой стене. Топочная камера оборудована 48-ю воздушными соплами, расположенными встречно на боковых стенах топки в три яруса.

Сжигаемым топливом является листованский антрацит Новосибирской обл. с добавлением известняка (CaCO_3) для связывания серы в размере 192 г на килограмм топлива, что непосредственно отражается на составе и расходе топлива. Поскольку модель не позволяет проводить расчет с учетом всех конструктивных особенностей организации сжигания в ЦКС, то принято решение об учете расчетного объема, ограниченного топочной камерой, а рециркуляцию твердых частиц учесть увеличением зольности исходного топлива до 55 %. Подобные допущения приводятся в ряде работ [10; 11] и отмечается, что погрешность расчетов не превышает 10 %. Состав и теплотехнические характеристики расчетного топлива представлены в табл. 1, а исследуемый фракционный состав – в табл. 2.

Расход топлива на парогенератор составляет 15,12 кг/с с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,2$. Температура подаваемого воздуха на горение составляет 300 °С.

Результаты численных исследований

При численном расчете топочных процессов в топке парогенератора БКЗ-500-13,8-560КБФ число расчетных ячеек – 193 284. Критерии сходимости вычисляемого процесса по окончании 750 расчетных итераций имели следующие значения.

В первом варианте: расхождение скорости – 0,0016 %, норма невязки уравнений турбулентного движения Рейнольдса не превышает 1,9 %, дисбаланс теплообмена не превышает 3,2 %, дисбаланс по общей массе частиц – не более 0,17 %.

Во втором варианте: расхождение скорости – 0,02 %, норма невязки уравнений турбулентного движения Рейнольдса не превышает 2,7 %, дисбаланс теплообмена не превышает 1,3 %, дисбаланс по общей массе частиц – не более 0,2 %.

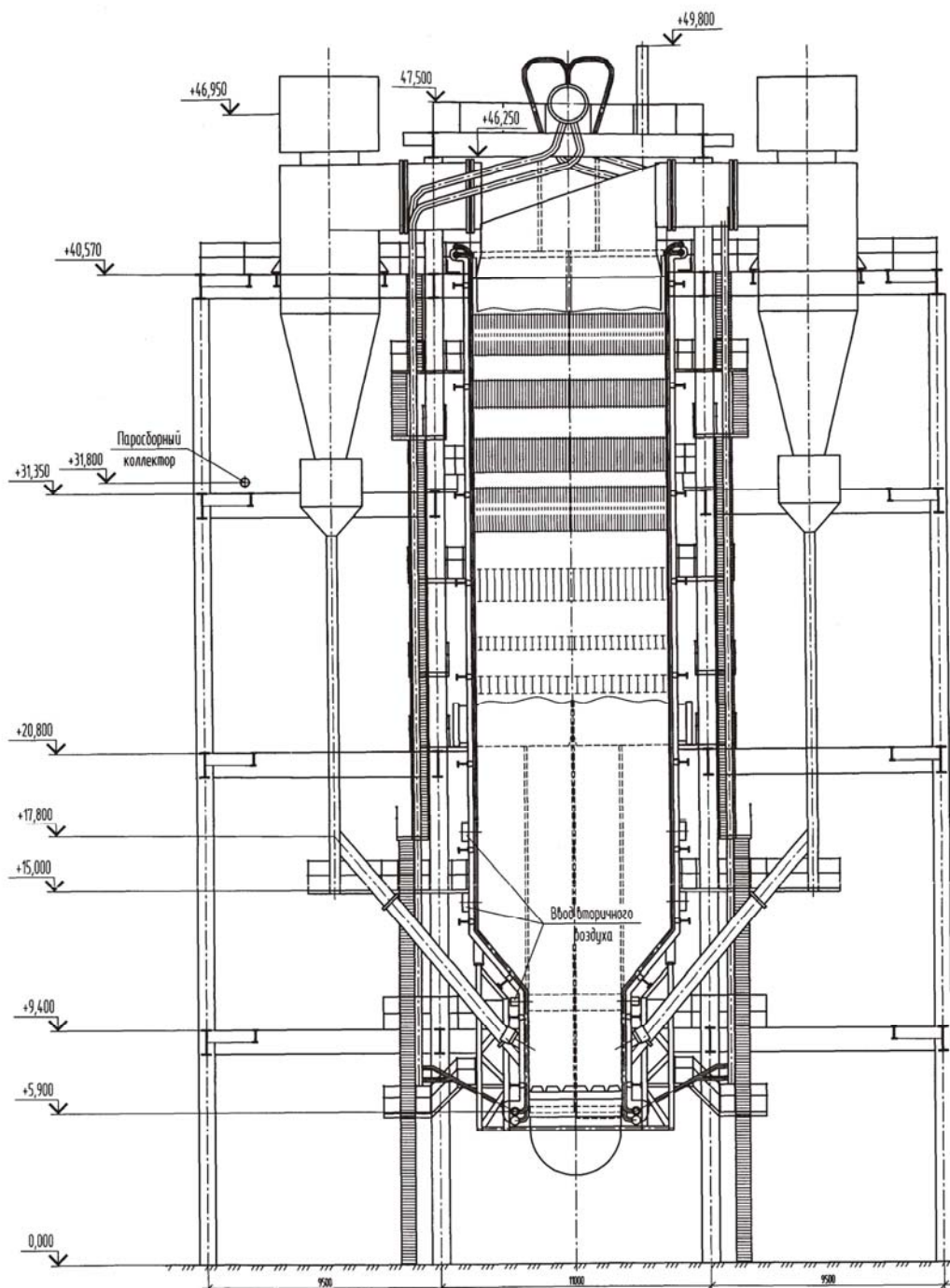


Рис. 1. Парогенератор БКЗ-500-13,8-560КБФ (поперечный разрез)

Таблица 1

Основные характеристики сжигаемого топлива

Параметры	Листвянский антрацит
Влажность W_t^r , %	9,2
Зольность A^r , %	55,0
Содержание серы $S_p^r + S_o^r$, %	0,2
Содержание углерода C^r , %	32,85
Содержание водорода H^r , %	0,84
Содержание азота N^r , %	0,48
Содержание кислорода O^r , %	1,43
Низшая теплота сгорания Q_t^r , МДж/кг	12,782

Таблица 2

Фракционный состав исследуемых вариантов

Вариант 1		Вариант 2	
Диаметр частиц, мкм	Количество, %	Диаметр частиц, мкм	Количество, %
35	26	210	20
330	23	3 240	20
585	21	5 760	20
830	18	82 205	20
1 070	11,9	10 650	20
1 200	0,1		

На рис. 2–4 представлены визуальные результаты численного расчета топочных процессов при различном дисперсном составе сжигаемого топлива. При анализе аэродинамических потоков можно отметить, что при более тонком дисперсном составе (см. рис. 2, а, б) аэродинамическая структура не имеет существенных скоростных изменений в объеме топки в отличие от варианта с более грубым дисперсным составом (см. рис. 2, в, г). Во втором варианте наблюдаются области с более высокими скоростями (~ 4 м/с) восходящих потоков, зажатых в межгорелочном пространстве.

В первом и во втором вариантах происходит накопление частиц крупной фракции в нижней части топки (см. рис. 3), при этом во втором случае наблюдается существен-

ное скопление частиц на решетке, что и отражается на увеличении скоростей восходящих потоков в межгорелочных пространствах. По мере выгорания частицы крупной и мелкой фракций выносятся вдоль продольной оси топки до уровня 12 м, где они летают, а далее приобретают нисходящее движение у боковых стен до уровня 4 м (см. рис. 3, а, б). В варианте с грубым помолом перераспределения частиц по глубине топки не наблюдается (см. рис. 3, в, г), о чем свидетельствует отсутствие интенсивного выноса частиц из слоя и внутритопочной циркуляции.

При подаче в топку более тонкой фракции происходит ее вынос и перераспределение по объему топки за счет внутритопочной циркуляции, что отражается на равномерности

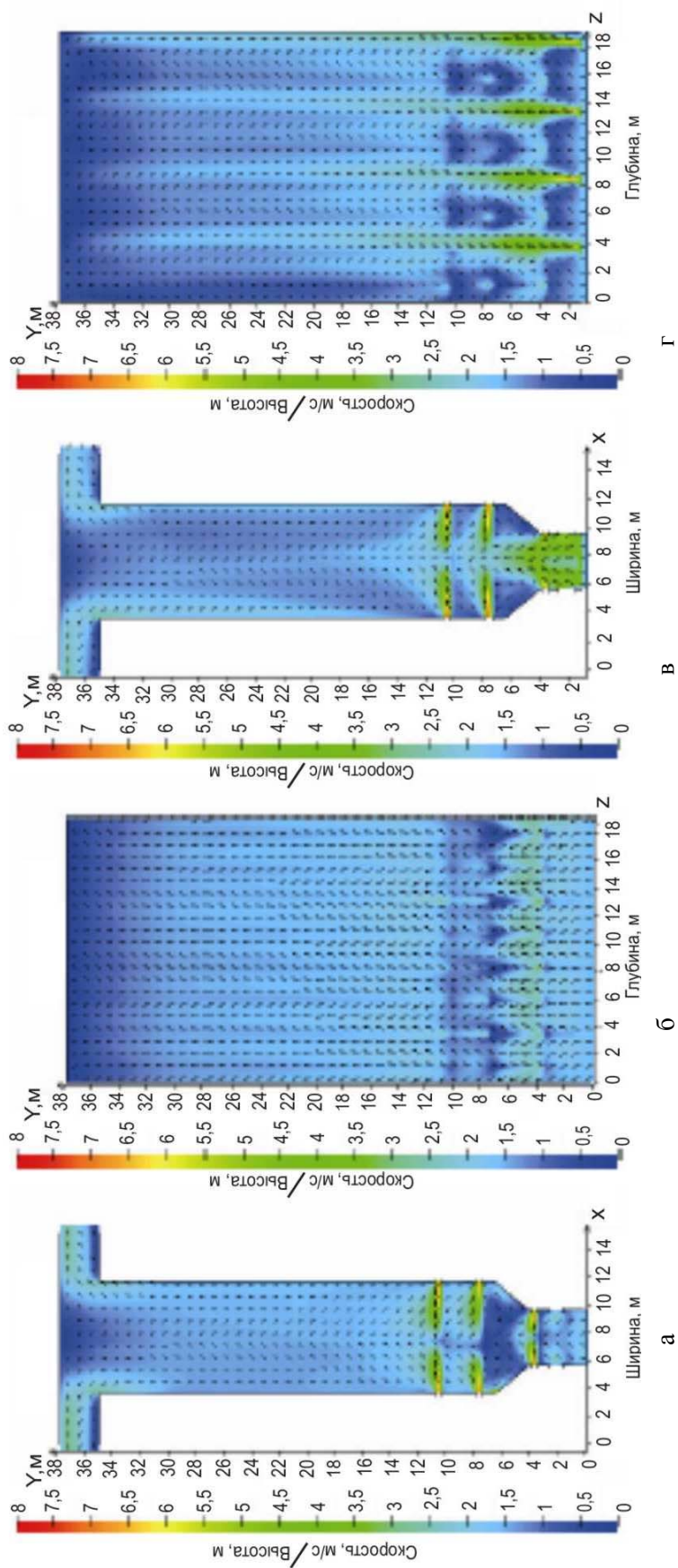


Рис. 2. Аэродинамическая структура потоков в вертикальных сечениях по оси горелок и продольной оси парогенератора:
 а, б – вариант 1; в, г – вариант 2

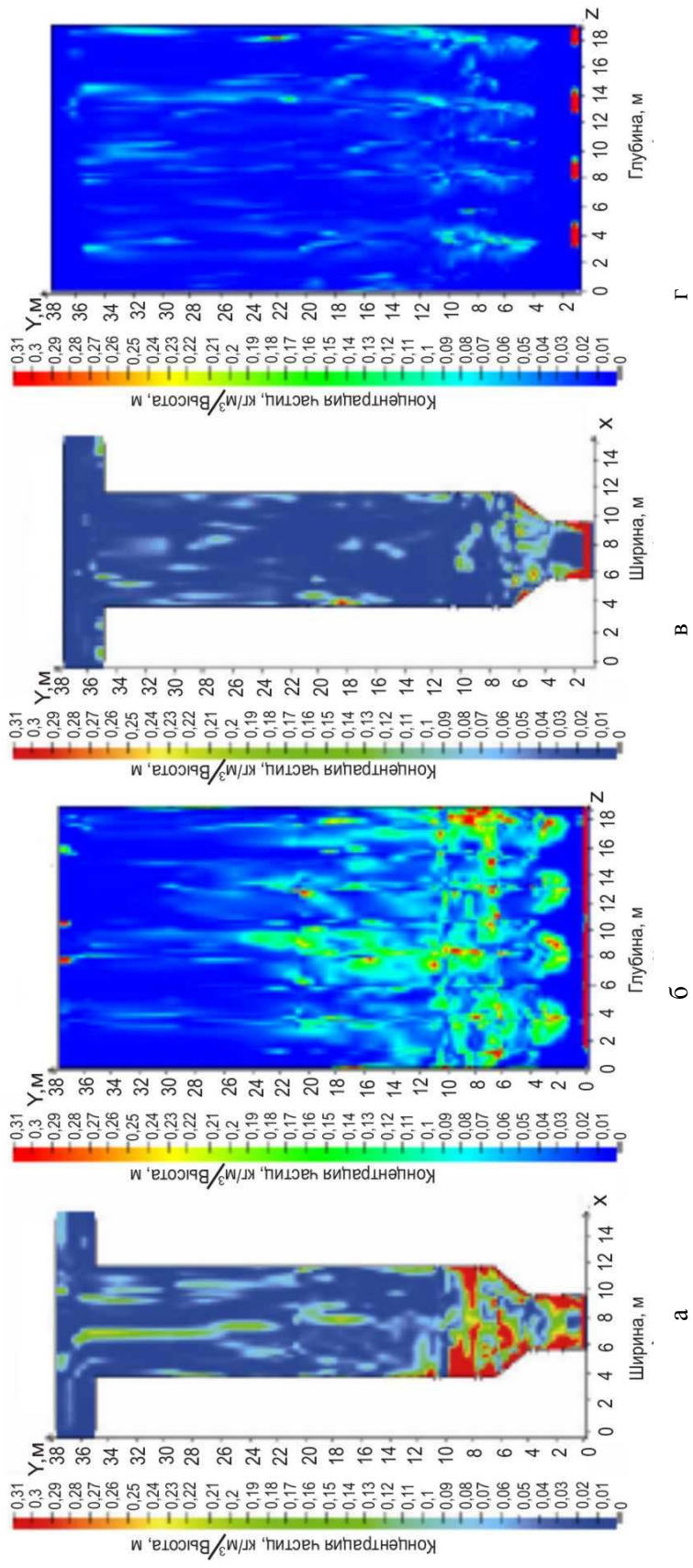


Рис. 3. Концентрация частиц в вертикальных сечениях по оси горелок и продольной оси парогенератора:
 а, б – вариант 1; в, г – вариант 2

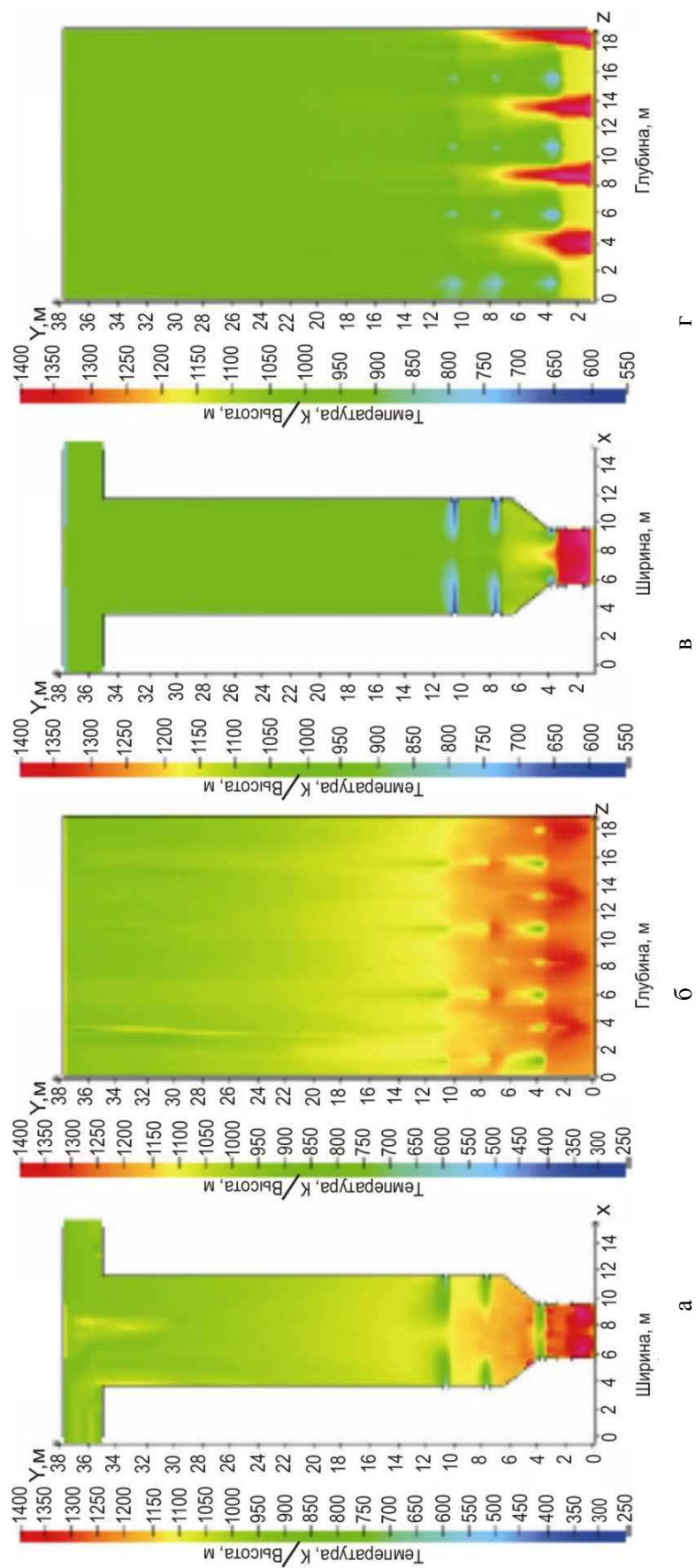


Рис. 4. Распределение температур в вертикальных сечениях по оси горелок и продольной оси парогенератора:
 а, б – вариант 1; в, г – вариант 2

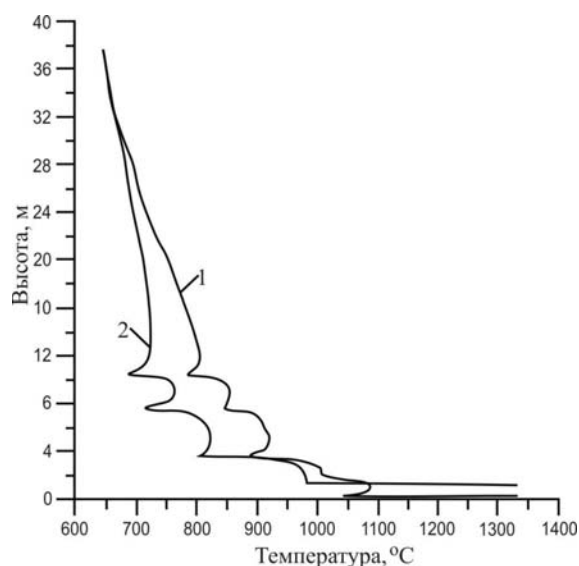


Рис. 5. Изменение средней по сечению температуры в зависимости от высоты топки: 1 – вариант с тонким помолом; 2 – вариант с дробленкой

температурного уровня – около 1 300 К до высоты 16 м, а выше, т. е. в объеме, где расположены теплообменные поверхности, температура снижается до 1 000 К (см. рис. 4, а, б). Максимальные значения температуры наблюдаются в области псевдооживленного слоя – около 1 500 К.

Скопление грубой фракции на решетке без активного выноса и перераспределения частиц представляет существенную неравномерность температур в топочном объеме с максимальными значениями в нижней части топки (см. рис. 4, в, з), что негативно отразится на надежности работы контуров циркуляции парогенератора.

На рис. 5 представлено изменение температуры по высоте топочной камеры при сжигании топлива с принятыми фракционными составами. В первом и во втором случаях профили кривых имеют аналогичный вид. В нижней части топочной камеры температура достигает порядка 1 350 °С, а далее по высоте топки снижаются. На высоте около 4 м разница температур между исследованными вариантами достигает 100 °С. После уровня 12 м разница температур плавно снижается и вверху топки в обоих случаях составляет 650 °С.

В заключение можно отметить, что наилучшие результаты по топочным процессам в ЦКС, как и характерные признаки ЦКС, достигаются тогда, когда режим сжигания

топлива реализуется с более тонким дисперсным составом. В любых других режимах сжигания с участием в полифракционном составе более крупных фракций (дробленка) формируются условия, которые препятствуют устойчивому воспламенению и дальнейшему горению, выносу частиц из слоя и их окончательному выгоранию. Так, в первом варианте доля несгоревшей горючей части в частицах, покидающих топку, в целом не превышала 16 %, а во втором недопустимую по технологии долю – до 76 %.

Список литературы

1. Basu P. Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: a review // Chem. Eng. Sci. 1999. Vol. 54. P. 5547–5557.
2. Саломатов В. В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. Новосибирск, 2006. 853 с.
3. Huilin L., Guangbo Z., Rushan B., Yongjin C., Gidaspow D. A coal combustion model for circulating fluidized bed boilers // Fuel. 2000. Vol. 79. P. 165–172.
4. Grace J. R., Cui H., Elnashaie S. S. Non-uniform distribution of two-phase flows through parallel identical paths // Can. J. Chem. Eng. 2007. Vol. 85. P. 662–668.
5. Wang J., Ge W., Li J. Eulerian simulation of heterogeneous gas – solidflows in CFB risers: EMMS-based sub-grid scale model with a revised cluster description // Chem. Eng. Sci. 2008. Vol. 63. P. 1553–1571.
6. Бубенчиков А. М., Старченко А. В. Численный анализ аэродинамики и горения турбулентной пылеугольной горелочной струи // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 1. С. 51–59.
7. Гиль А. В., Старченко А. В., Заворин А. С. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо: Монография. Томск: STT, 2011. 184 с.
8. Бубенчиков А. М., Старченко А. В. Численные модели динамики и горения аэродисперсных смесей в каналах. Томск, 1998. 236 с.
9. Spalding D. B. Mathematical models of turbulent flames: a review // Combustion Science and Technology. 1976. Vol. 13, № 1–6. P. 3–22.
10. Grabner M., Ogriseck S., Meyer B. Numerical simulation of coal gasification at

circulating fluidised bed conditions // Fuel Processing Technology. 2007. Vol. 88. P. 948–958.

11. Jiradiloka V., Gidaspow D., Damronglerda S., Kovesc W. J., Mostofic R. Kinetic theory based CFD simulation of turbulent fluidiza-

tion of FCC particles in a riser // Chemical Engineering Science. 2006. Vol. 61. P. 5544–559.

Материал поступил в редколлегию 15.06.2016

V. V. Salomatov^{1,2}, A. V. Gil³, A. V. Starchenko⁴, R. Yu. Arkhipov²

¹ Institute of Thermophysics, SB RAS
1 Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

² Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ Tomsk Polytechnic University
30 Lenin Ave., Tomsk, 634004, Russian Federation

⁴ Tomsk State University
34 Lenin Ave., Tomsk, 634030, Russian Federation

salomatov.vv@mail.ru

NUMERICAL RESEARCH OF INFLUENCE OF DISPERSE COMPOSITION ON CHARACTERISTICS OF COMBUSTION OF COAL-FIRED CIRCULATING FLUIDIZED BED

The peculiarity of mathematical modeling of the circulating fluidized bed (CFB) is that the solid phase (fuel and ash particles) is always a polydispersed medium. The paper constructed a mathematical model of gas dynamics, heat and mass transfer and combustion in the furnace volume of CFB steam generator with a highly concentrated content of the dispersed phase in relation to the investigation of processes in aerothermochemical CFB furnace. Taking into account: the turbulent structure of the two-phase flow, radiation heat transfer in a dusty environment, the chemical reaction kinetics of ignition and combustion, the effects of the power and thermal interactions between the particles and the particles with the wall. A model of such an environment has been chosen phenomenological model of interpenetrating continua Rahmatulina HA. The characteristic features of CFB technology are: firstly organized circulation of solid particles; Second, the repeated return unburned coarse fractions in the fluidised bed. As a result, during the low-temperature burn-in CFB increased almost two orders of magnitude compared with torch mode, allowing you to burn the most difficult fuels in the energy sector. Numerical analysis of data showed that the best results on the effects of polydisperse composition for fuel combustion characteristics in CFB process provides a particle size distribution in which a small fraction predominates.

Keywords: solid fuel, a dispersed composition, mathematical modeling, the circulating fluidized bed, circulation.