

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА ТОПОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КОТЛЕ С ЦИРКУЛИРУЮЩИМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

Гиль А.В.¹, Старченко А.В.², Саломатов В.В.³, Архипов Р.Ю.³

¹*Томский политехнический университет, г. Томск*

²*Томский государственный университет, г. Томск*

³*Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск*

В настоящее время особое внимание уделяется технологиям сжигания с высокой эффективностью низкокачественных твердых топлив и с низкой эмиссией вредных веществ. Об этом свидетельствует увеличение числа и мощности котельных агрегатов для сжигания твердого топлива в циркулирующем кипящем слое [1].

Качественное проектирование мощных энергетических колов с циркулирующим кипящим слоем в значительной степени зависит от представления и анализа газодинамических процессов, в особенности, 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 [2 – 4]. Наибольшего распространения и достижения высокого уровня моделирования имеют два различных подхода, Эйлера-Эйлера и Эйлера-Лагранжа.

В представляемом исследовании использован Эйлерово-Лагранжев способ описания азротермохимических процессов в газодисперсных средах на базе пакета прикладных программ FIRE 3D [5, 6]. Турбулентные характеристики газа рассчитываются с использованием двухпараметрической «k-ε» модели турбулентности, также учитывающей влияние движущихся частиц [7, 8]. Радиационный теплообмен в двухфазном потоке представляется в рамках P1 приближения метода сферических гармоник, который показывает хорошие результаты применения к пылеугольным топкам [7].

Объектом исследования является котельный агрегат БКЗ–500–13,8–560КБФ (рис. 1). Котел однобаранный, вертикально-водотрубный, с естественной циркуляцией, предназначенный для сжигания каменных и бурых углей ухудшенного качества в циркулирующем кипящем слое.

Компоновка котла выполнена по смешанной схеме: топка по Т–образной, а конвективный газоход – по П–образной.

Топочная камера призматической формы в газоплотном исполнении. Габариты топки: ширина – 19,0 м, глубина – 7,93 м, высота – 37,74 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 температурных напряжений футерованы абразивным материалом.

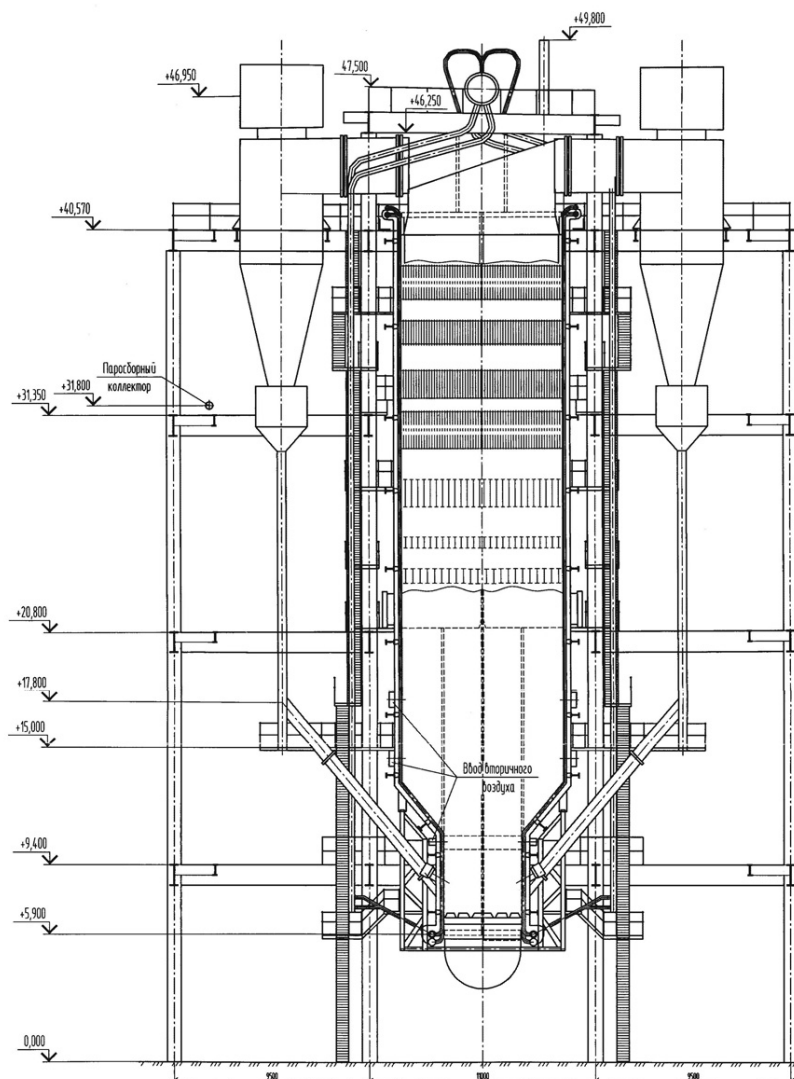


Рисунок 1 – Поперечный разрез котла БКЗ-500-13,8-560КБФ

Верхняя часть топки разбита на 8 газоходов оснащенных инерционными сепараторами. Часть топливно-зольных частиц возвращается в нижнюю часть топки по восьми течкам, 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 листовянский антрацит с добавлением известняка (CaCO_3) в размере 192 г/кг топлива, что непосредственно отражается на составе и расходе топлива. Поскольку модель не позволяет проводить расчет с учетом всех конструктивных особенностей организации сжигания в циркулирующем кипящем слое, то принято решение об учете только объема ограниченной топочной камерой, а рециркуляцию твердых частиц учесть как увеличение зольности исходного топлива до 55 %. Подобные допущения приводятся в ряде работ [9, 10], и отмечается, что погрешность не превышает 10 %.

Состав и теплотехнические характеристики расчетного топлива представлены в таблице 1, а исследуемый фракционный состав в таблице 2.

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_i^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	206	20
330	23	3242	20
583	21	5761	20
827	18	82203	20
1070	11,9	10651	20
1200	0,1		

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

При численном расчете топочных процессов в топке котла БКЗ–500–13,8–560КБФ размер сетки – 193284 ячейки. Критерии сходимости вычисляемого процесса по окончании 750 расчетных итераций имели следующие значения в первом варианте: расхождение скорости – 0,0016 %, норма невязки уравнений движения не превышает 1,9 %, дисбаланс теплообмена не превышает 3,2 %, дисбаланс по общей массе – не более 0,17 %; во втором варианте: расхождение скорости – 0,02 %, норма невязки уравнений движения не превышает 2,7 %, дисбаланс теплообмена не превышает 1,3 %, дисбаланс по общей массе – не более 0,2 %.

На рисунках 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 (рис. 2 а, б) аэродинамическая структура не имеет существенных скоростных изменений в объеме топки, в отличие от варианта с более грубым дисперсным составом (рис. 2 в, г). Во втором варианте наблюдаются области с более высокими скоростями (~4 м/с) восходящих потоков, зажатых в межгорелочном пространстве.

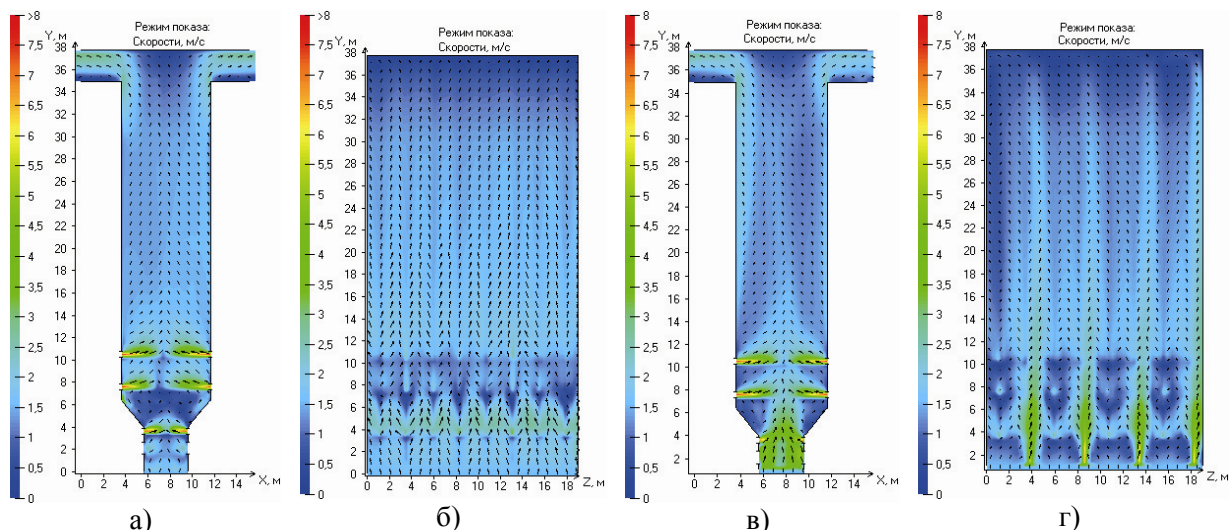


Рисунок 2 – Аэродинамическая структура потоков в вертикальных сечениях по оси горелок и продольной оси котла: а) и б) вариант №1; в) и г) вариант №2

В первом и во втором вариантах происходит накопление частиц крупной фракции в нижней части топки (рис. 3), при этом во втором случае происходит существенное 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 частицы витают либо имеют нисходящее движение у боковых стен до уровня 4 м (рис. 3 а, б). В варианте с грубым помолом перераспределение частиц по глубине топки не наблюдается (рис. 3 в, г), о чем свидетельствует отсутствие интенсивного выноса частиц из слоя и внутренней циркуляции.

При подаче в топку более тонкой фракции происходит ее вынос и перераспределение по объему топки за счет внутренней циркуляции, что отражается на равномерности температурного уровня – около 1300 К до высоты 16 м, а выше, т.е в объеме где расположены пароперегреватель и экономайзер температуры снижаются до 1000 К (рис. 4 а, б). Максимальные значения температур наблюдаются в области псевдооживленного слоя около 1500 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 (рис. 4 в, г), что негативно отразится на надежности работы контуров циркуляции котельного агрегата.

На рисунке 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 температуры достигают порядка 1350 °С, а далее по высоте топки снижается. На высоте около 4 метров разница температур между исследованными вариантами достигает 100 °С. После 12 метров разница температур плавно снижается и вверху топки в обоих случаях составляет 650 °С.

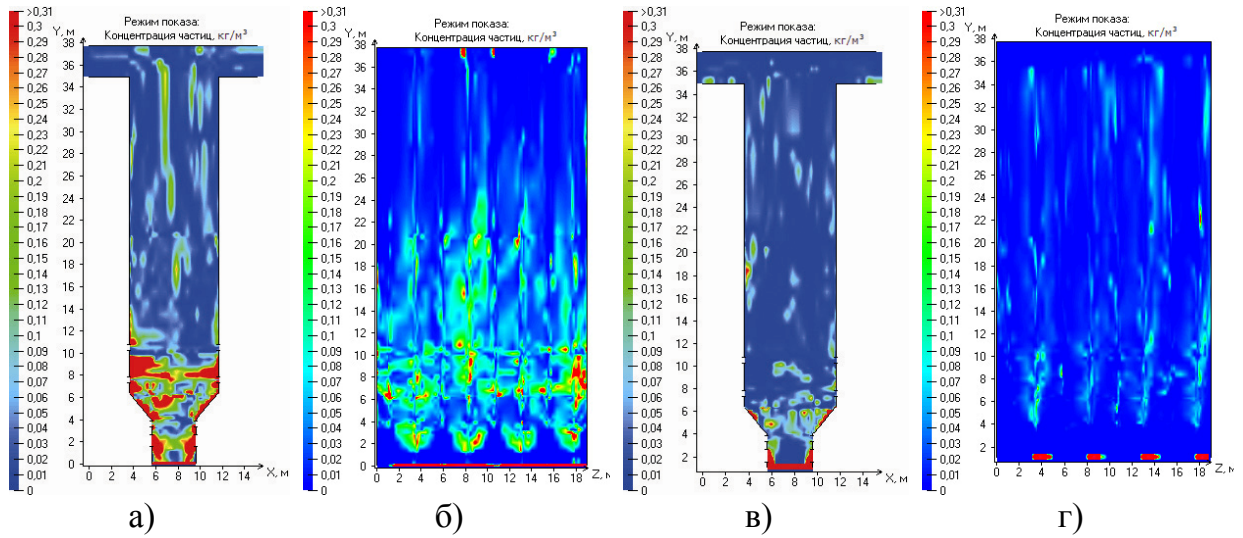


Рисунок 3 – Концентрация частиц в вертикальных сечениях по оси горелок и продольной оси котла: а) и б) вариант №1; в) и г) вариант №2

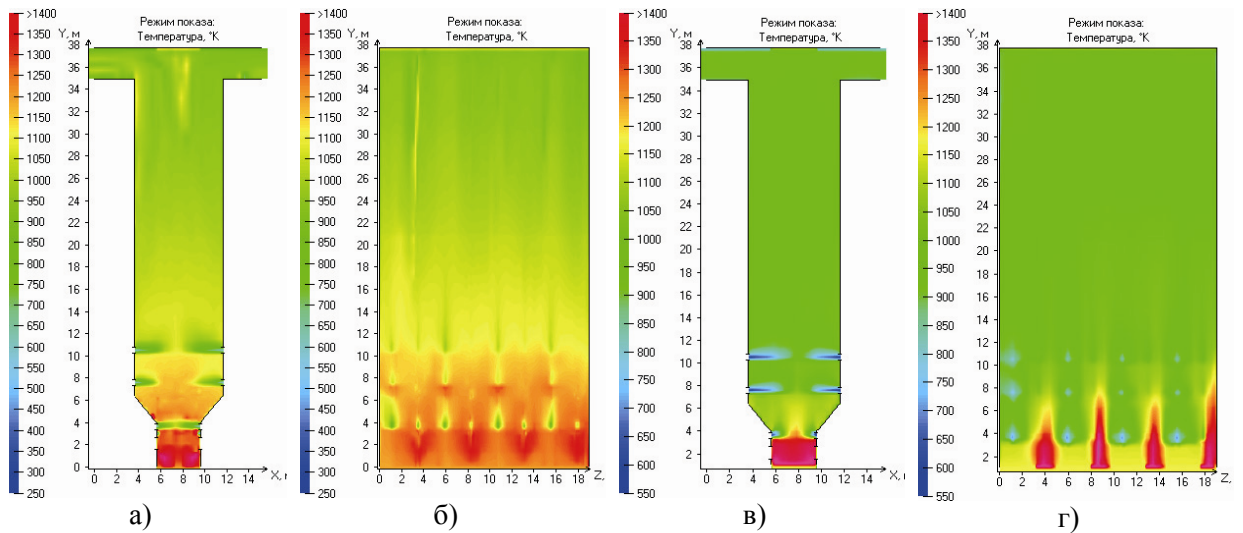


Рисунок 4 – Распределение температур в вертикальных сечениях по оси горелок и продольной оси котла: а) и б) вариант №1; в) и г) вариант №2

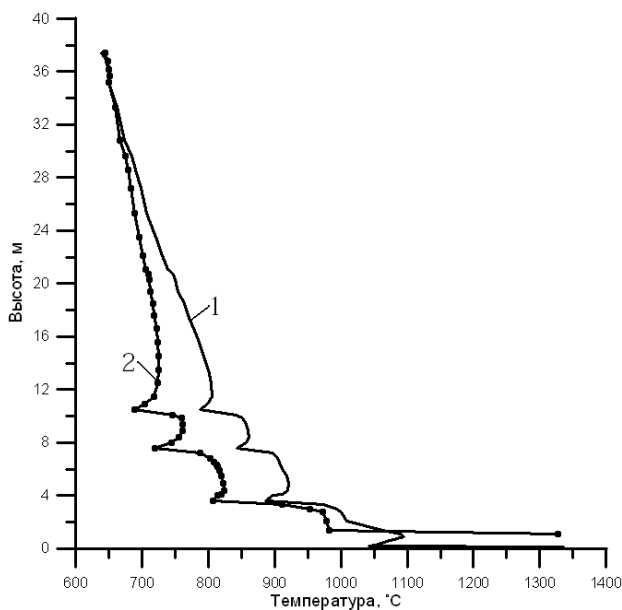


Рисунок 5 – Изменение средней температуры по высоте топки: 1 – вариант с тонким помолом; 2 – вариант с дробленкой

В заключении можно отметить, что принятые допущения возможны лишь при сжигании топлива с тонким дисперсным составом, поскольку увеличение зольности приводит к росту размеров зольных частиц, которые препятствуют выгоранию и воспламенению, выносу частиц и их догоранию.

Так в первом варианте в частицах, покидающих топку, доля горючего не превышала 16 %, а во втором – 76 %, причем в уносе доля несгоревшего топлива была более 40%.

Литература

1. P. Basu, Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: a review // Chem. Eng. Sci. –1999. Vol. 54. –P. 5547–5557.
2. L. Huilin, Z. Guangbo, B. Rushan, C. Yongjin, D. Gidaspow, A coal combustion model for circulating fluidized bed boilers // Fuel – 2000. Vol. 79. – P. 165–172.
3. J.R. Grace, H. Cui, S.S. Elnashaie, Non-uniform distribution of two-phase flows through parallel identical paths // Can. J. Chem. Eng. – 2007. Vol. 85. – P. 662–668.
4. J. Wang, W. Ge, J. Li, Eulerian simulation of heterogeneous gas–solid flows in CFB risers: EMMS-based sub-grid scale model with a revised cluster description // Chem. Eng. Sci. – 2008. Vol. 63. – P. 1553–1571.
5. 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.
6. 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.
7. Бубенчиков А.М., Старченко А.В. Численные модели динамики и горения аэродисперсных смесей в каналах. – Изд-во Том. ун-та. – 1998. – 236с.
8. Spalding D.B. Mathematical models of turbulent flames: a review // Combustion Science and Technology. – 1976. – Vol. 13, N. 1-6. – P. 3-22.
9. M. Grabner, S. Ogriseck, B. Meyer Numerical simulation of coal gasification at circulating fluidised bed conditions // Fuel Processing Technology. – 2007. – Vol. 88. – P. 948–958.
10. V. Jiradiloka, D. Gidaspow, S. Damronglerda, W. J. Kovesc, R. Mostofic Kinetic theory based CFD simulation of turbulent fluidization of FCC particles in a riser // Chemical Engineering Science. – 2006. – Vol. 61. – P. 5544 – 5559.