

Андрей Владимирович ГИЛЬ<sup>1</sup>  
Кирилл Иванович МАЛЬЦЕВ<sup>2</sup>  
Александр Сергеевич ЗАВОРИН<sup>3</sup>  
Александр Васильевич СТАРЧЕНКО<sup>4</sup>

УДК 621.181

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

- <sup>1</sup> кандидат технических наук, доцент,  
научно-образовательный центр И. Н. Бутакова,  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
andgil@tpu.ru; ORCID: 0000-0001-6816-7876
- <sup>2</sup> аспирант, научно-образовательный центр И. Н. Бутакова,  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
gunstar@yandex.ru
- <sup>3</sup> доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой — руководитель  
научно-образовательного центра И. Н. Бутакова на правах кафедры,  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
andgil@tpu.ru
- <sup>4</sup> доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой  
вычислительной математики и компьютерного моделирования,  
Национальный исследовательский Томский государственный университет  
starch@math.tsu.ru

### Аннотация

Исследования процессов горения и теплообмена в крупномасштабных объектах крайне затруднены как аналитически, так и экспериментально. Сжигание

---

**Цитирование:** Гиль А. В. Математическое моделирование топочных процессов при факельном сжигании твердого топлива / А. В. Гиль, К. И. Мальцев, А. С. Заворин, А. В. Старченко // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. Том 8. № 3 (31). С. 44-58.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-3-44-58

---

непроектных углей в котельных агрегатах зачастую сопровождается снижением полноты выгорания топлива, нежелательным перераспределением тепловых потоков и другими негативными факторами вследствие отличающихся теплотехнических характеристик топлива. Рассмотрена возможность эффективного выгорания полифракционного непроектного твердого топлива в топочной камере котельного агрегата с твердым шлакоудалением на основе численного исследования совместно протекающих аэротермохимических процессов. Решена задача численного моделирования стадийного выгорания угольных частиц, начиная от испарения содержащейся в них влаги до догорания их коксового остатка при движении в несущей фазе. Численные исследования физико-химических процессов в камере сгорания проведены для трех нагрузок (50%, 70%, 100%) на основе разработанного расчетного комплекса FIRE 3D. Применена Эйлерово–Лагранжева модель для запыленного потока, замыкание осредненных уравнений Навье–Стокса выполнено  $k-\epsilon$  моделью турбулентности, использован второй порядок точности при проведении численных расчетов. Основные результаты трехмерного моделирования представлены в виде полей скоростей и температур, распределении концентраций  $O_2$  и  $CO$  по высоте топочного объема. Результаты математического моделирования показали хорошее соответствие с доступными аналитическими значениями. На основании полученных данных можно констатировать возможность организации сжигания непроектного топлива в рассматриваемом котлоагрегате. Установлено, что при работе на нагрузках ниже номинальной наблюдается перераспределение горелочных струй, негативно отражающееся на надежности и эффективности работы котла. Для повышения эффективности работы котельного агрегата на пониженных нагрузках необходима более широкая проработка вариантов перераспределения долей топливно-воздушной смеси и вторичного воздуха.

#### **Ключевые слова**

Горение, двухфазный поток, топочная камера, тепловой поток, численное моделирование.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-3-44-58**

#### **Введение**

Из-за растущего потребления электроэнергии и отсутствия роста в использовании возобновляемых источников Россия остается одной из пяти стран большой двадцатки, в которой объем угольной генерации увеличился за последние пять лет и составляет 15% от общего объема выработки [5].

В отечественной энергетике на большинстве угольных тепловых электростанций топливо сжигается в пылевидном состоянии. При этом физико-химические процессы, протекающие в топочном объеме котельных агрегатов, в значительной степени, зависят от свойств угля, которые сильно различаются в зависимости от марки и месторождения [11]. Поскольку каждый котельный

агрегат проектируется под конкретную марку угля определенного угольного бассейна, то в случае перевода на непроектный уголь могут проявляться негативные факторы, связанные со снижением эффективности выгорания и экологических параметров, перераспределением тепловых потоков, шлакованием теплообменных поверхностей [10, 19].

Стоит отметить, что правильное понимание тепло-и массообмена в топках котельных агрегатов имеет важное значение для достижения оптимальной компоновки и эффективности. В индивидуальном рассмотрении физические явления, такие как течение газа с наличием твердой фазы, турбулентность, химические реакции и теплопередача, сложно поддаются прогнозам и анализу. Этот анализ является еще более сложным, когда данные явления взаимосвязаны в крупномасштабных системах [1, 3].

Поэтому с целью повышения качества проектирования и инженеринговых работ особое практическое значение имеет разработка методов и подходов к комплексным расчетам топочных камер энергогенерирующих устройств с учетом трехмерного анализа процессов воспламенения и выгорания полифракционного топлива, аэродинамики, тепломассообмена и генерации компонентов вредных веществ [17, 18].

Для решения подобного рода задач актуальным является проведение численных экспериментов с целью выявления характеристик топочных процессов в соответствии с реальными параметрами эксплуатации котельных агрегатов. Также актуально совершенствование отечественных программных комплексов, к которым относится пакет прикладных программ FIRE 3D [4].

Целью работы является математическое моделирование гомогенных и гетерогенных реакций горения пылевидного твердого топлива и летучих веществ, конвективного и лучистого теплообмена в объеме камеры сгорания при организации тангенциальной схемы сжигания непроектного бурого угля.

## **Методы**

При математическом моделировании топочной среды с организованным факельным сжиганием задаются геометрическими параметрами исследуемого объекта. Указывают поверхности ввода топливно-воздушной смеси и воздуха, а также поверхности выхода продуктов сгорания.

Соответственно на стенах топочной камеры задается температура стенки металла экранных поверхностей. На входных поверхностях: температура, скорость и компонентный состав вводимых сред. На выходной поверхности задаются условия выхода по давлению и температуре.

В данной работе при задании начальных условий учитывается содержание влаги в пылевидном предварительно подсушенном топливе согласно схеме топливоподачи. Считается, что топливо из промежуточного бункера совместно с сушильным агентом равномерно распределяется по сечениям горелочных устройств, топливно-воздушная смесь закручивается и поступает в расчетный объем топочной камеры. В дальнейшем под воздействием высоких температур (при достижении 373 К) начинается испарение влаги, и при дальнейшем росте температурного уровня выходят летучие компоненты топлива.

Газообразные летучие вещества воспламеняются, вызывая интенсивный рост температуры в расчетной области, что приводит к горению твердой углеродосодержащей части. Диаметр и плотность твердых частиц изменяются после каждой итерации расчета в следствие дегазации и выгорания кокса.

Численный расчет основан на итерационном методе. По завершению расчета производится верификация и анализ результатов моделирования.

### Объект исследования

В качестве объекта исследования принят паровой котельный агрегат (рис. 1) паропроизводительностью 210 т/час (давление перегретого пара 13,8 МПа, температура перегретого пара 570°C) [6]. Котел имеет П-образную компоновку. Ширина топочной камеры 7808 мм, глубина 7424 мм, объем 1102 м<sup>3</sup>. Диаметр экранных труб составляет 60 мм, шаг труб 64 мм, потолочная часть образована трубами радиационного пароперегревателя.

Прямоточные горелочные устройства установлены по тангенциальной схеме по углам топочной камеры. Разделение на первичный и вторичный воздух вертикальное, горелочные струи направлены к условной окружности в центре топки (рис. 1б). Диаметр окружности составляет 900 мм.

Котельный агрегат рассчитан на сжигание чихезского бурого угля. В данном исследовании в качестве непроектного топлива рассматривается бурый уголь Павловского месторождения.

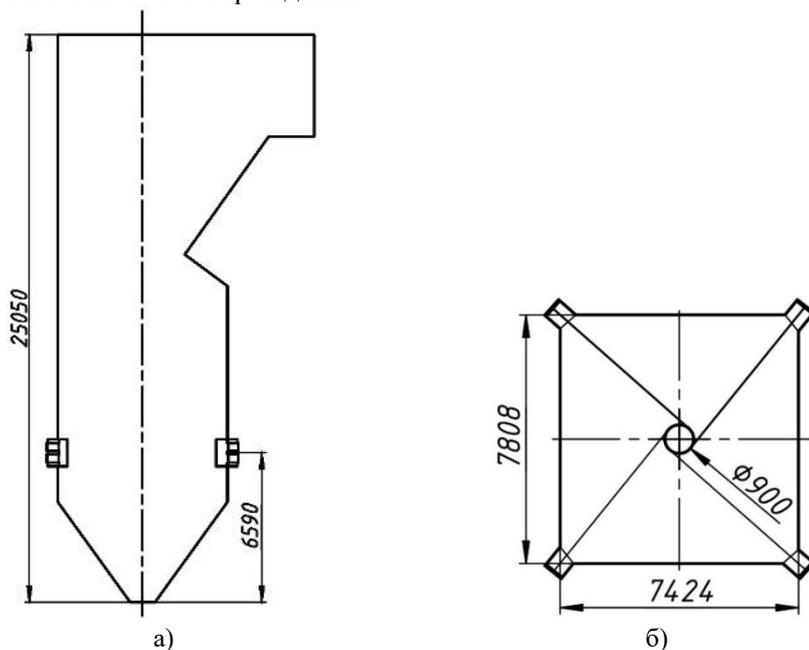


Рис. 1. Эскиз топочной камеры:  
а) вертикальное сечение;  
б) горизонтальное сечение  
на уровне горелок

Fig. 1. Design of the boiler furnace chamber: a) vertical section;  
б) horizontal section

### Математическая модель

В данном исследовании для получения адекватных результатов численного моделирования теплообмена, аэродинамической структуры, горения топливных частиц использован метод, совмещающий Эйлера и Лагранжев подходы. Соответственно газовая фаза описывается осредненными по времени уравнениями Эйлера для массы, импульса, энергии, концентраций элементов несущей среды, кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации [8]. Параметры турбулентности моделируются с использованием двухпараметрической « $k-\epsilon$ » модели турбулентности для запыленных потоков, которая продемонстрировала достаточную точность при решении подобных задач [13, 14, 16].

Дисперсная фаза описывается дифференциальными уравнениями движения, изменения энергии и массы в лагранжевой постановке. Предполагается, что каждая частица имеет сферическую форму, траектория группы частиц соответствующего размера отслеживается по представительной частице (частице — маркеру) в объеме расчетной сетки.

В данной работе при задании начальных условий учитывается содержание влаги в пылевидном предварительно подсушенном топливе согласно схеме топливоподачи. Считается, что топливо из промежуточного бункера совместно с сушильным агентом равномерно распределяется по сечениям горелочных устройств, топливно-воздушная смесь закручивается и поступает в расчетный объем топочной камеры. В дальнейшем под воздействием высоких температур (при достижении 373 К) начинается испарение влаги, и при дальнейшем росте температурного уровня выходят летуче компоненты топлива. Газообразные летучие вещества воспламеняются, вызывая интенсивный рост температуры в расчетной области, что приводит к горению твердой углеродосодержащей части. Диаметр и плотность твердых частиц изменяются после каждой итерации расчета в следствие дегазацией и выгорания кокса.

Лучистый теплообмен описывается в рамках P1-приближения метода сферических гармоник запыленного потока, который показывает хорошие результаты применения к пылеугольным топкам [2, 9, 20].

Численное решение выполнялось методом конечных разностей. Интегрирование дифференциальных уравнений осуществлялось на основе алгоритма SIMPLE [7], а аппроксимация уравнений выполнялась вторым порядком точности.

Верификация математической модели представлена в работе [4].

Уравнения описывающие физико-химические процессы в расчетном объеме топочных камер котельных агрегатов представлены в работах [4, 8, 9]. В качестве граничных условий для экранных поверхностей топочной камеры применен метод пристеночной функции при расчете теплового потока и турбулентности в пристеночном слое. Условия прилипания использованы для

скорости. Дискредитация расчетного объема составила 39 270 ячеек. Дисбаланс по скорости составил 0,067, по общей массе — 1,9%.

### **Результаты исследования и их обсуждение**

Процессы, протекающие в топочной камере, более сложные в отношении непосредственно горения, это и перераспределение окислителя, поведение минеральной части, столкновение с ограждающими поверхностями.

Поэтому в камере сгорания энергетического котельного агрегата с тангенциальной организацией вертикального вихря, процессы тепломассообмена, распространения горелочных струй, выгорания горючих элементов и т. п., оказывают существенное влияние.

На рис. 2-3 представлены аэродинамические структуры потоков в вертикальном и горизонтальном сечениях. Хорошо видно, что при работе на всех нагрузках в нижней части топки (холодной воронке) образуется горизонтальный вихрь с невысокими скоростями. В основном объеме топочной камеры распространяется вертикальный вихрь. Со снижением производительности увеличиваются горизонтальные вихри в верхнем углу топки и вблизи пода аэродинамического выступа, которые негативно влияют на равномерность прохождения продуктов сгорания и теплообмен с поверхностями нагрева в данных областях.

В зоне максимальных скоростей закрутка потока неявно выражена, активное перемешивание топливно-воздушных струй осуществляется ниже и выше расположения горелочных устройств, со средней скоростью 9-10 м/с.

Поскольку при снижении нагрузки до 70% одно из горелочных устройств отключается от подачи первичного воздуха, а при снижении до 50% отключатся две горелки, то происходит смещение вертикальной оси вихря от центра топки и изменение формы вихря. Так, при 70% нагрузки вихрь сдвигается в сторону отключенной горелки (нижний левый угол) (рис. 3б), а при 50% производительности вихрь принимает эллиптическую форму (рис. 3в).

Распределение температур по высоте токи во всех вариантах несения нагрузки представляется неравномерным (рис. 4): в области установки горелочных устройств температуры значительно ниже, чем в области холодной воронки и в верхней части топки от 12 м до потолка. Это связано с тем, что в данную область непрерывно подается влажное топливо и окислитель в необходимом объеме с относительно невысокой температурой (рис. 5). Вследствие затрат тепловой энергии на подогрев топлива и испарение влаги воспламенение угольных частиц происходит на значительном удалении от горелочных устройств по траектории их движения. При этом стоит отметить, что при снижении нагрузки происходит расширение высокотемпературной области в холодной воронке.

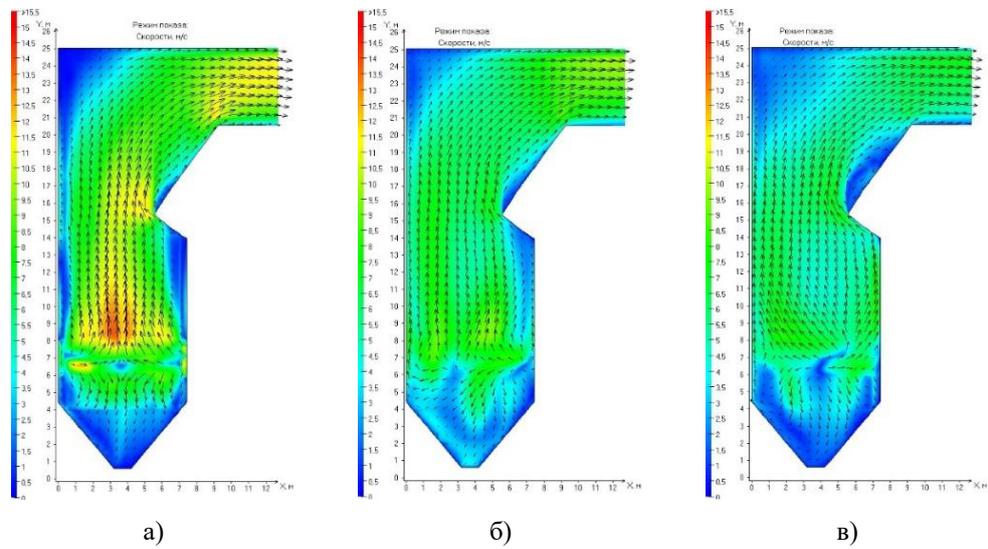


Рис. 2. Аэродинамическая структура потока в вертикальном сечении по оси топки (м/с): а) производительность 100%; б) производительность 70%; в) производительность 50%

Fig. 2. Velocity distribution and velocity vectors throughout the height of the vertical furnace section (m/s): а) steam capacity 100%; б) steam capacity 70%; в) steam capacity 50%

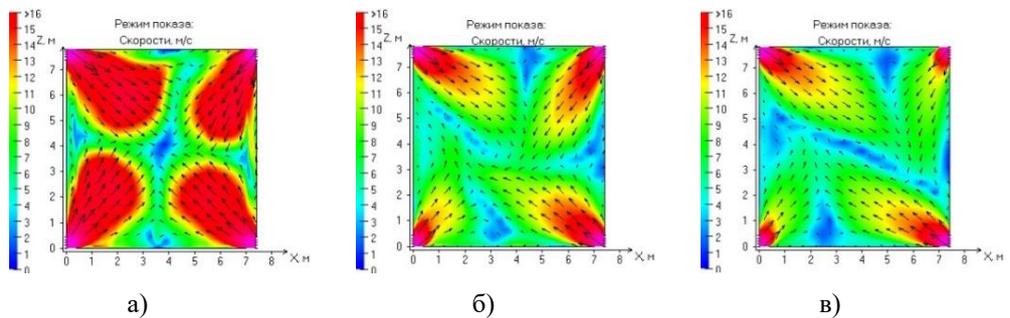


Рис. 3. Аэродинамическая структура потока в горизонтальном сечении по оси горелочных устройств (м/с): а) производительность 100%; б) производительность 70%; в) производительность 50%

Fig. 3. Velocity distribution and velocity vectors throughout of the horizontal section along the axis of the burner devices (m/s): а) steam capacity 100%; б) steam capacity 70%; в) steam capacity 50%

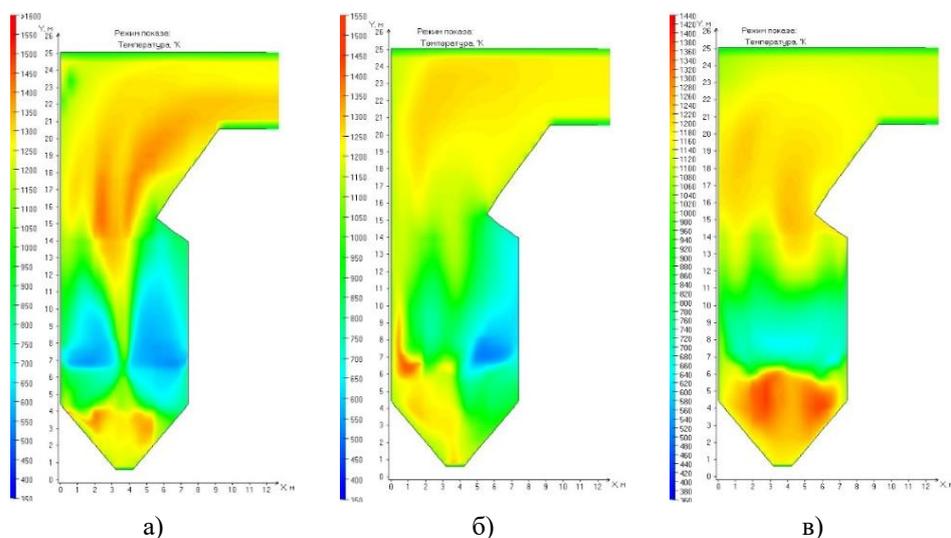


Рис. 4. Распределение температуры в вертикальном сечении по оси топки (К): а) производительность 100%; б) производительность 70%; в) производительность 50%

Fig. 4. Temperature distribution throughout the height of the vertical furnace section (K): а) steam capacity 100%; б) steam capacity 70%; в) steam capacity 50%

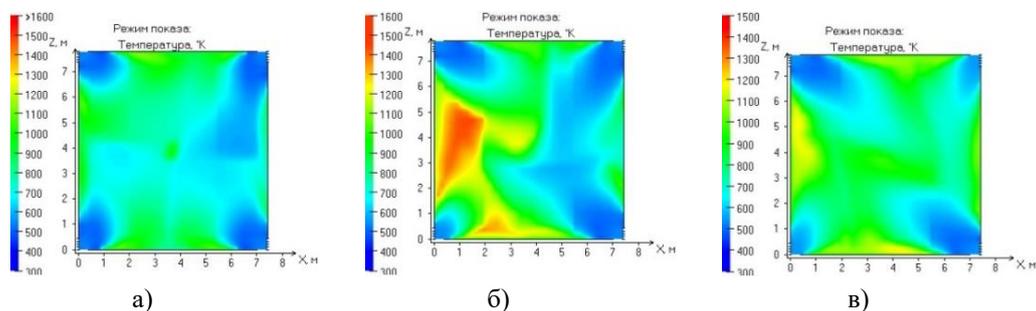


Рис. 5. Распределение температуры в горизонтальном сечении по оси горелочных устройств (К): а) производительность 100%; б) производительность 70%; в) производительность 50%

Fig. 5. Temperature distribution throughout of the horizontal section along the axis of the burner devices (K): а) steam capacity 100%; б) steam capacity 70%; в) steam capacity 50%

На рис. 6-7 представлено изменение концентрации кислорода. Концентрация  $O_2$  в объеме топочной камеры противоположна значениям температур. На высоте установки прямооточных горелок концентрация окислителя имеет максимальные значения (в области низких температур) и минимальные значения в зонах высоких температур.

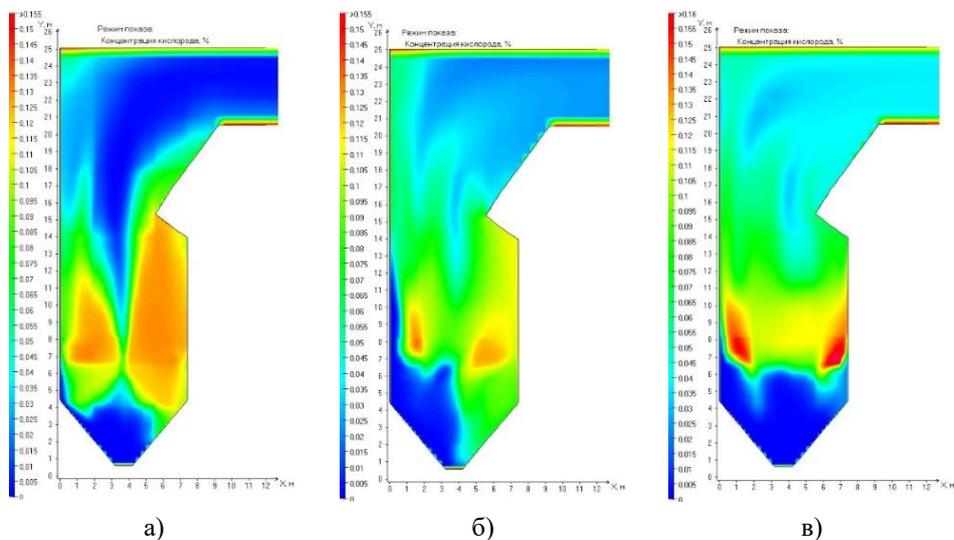


Рис. 6. Распределение  $O_2$  в вертикальном сечении по оси топки (%):  
 а) производительность 100%;  
 б) производительность 70%;  
 в) производительность 50%

Fig. 6. Oxygen  $O_2$  distribution throughout the height of the vertical furnace section (%): а) steam capacity 100%; б) steam capacity 70%; в) steam capacity 50%

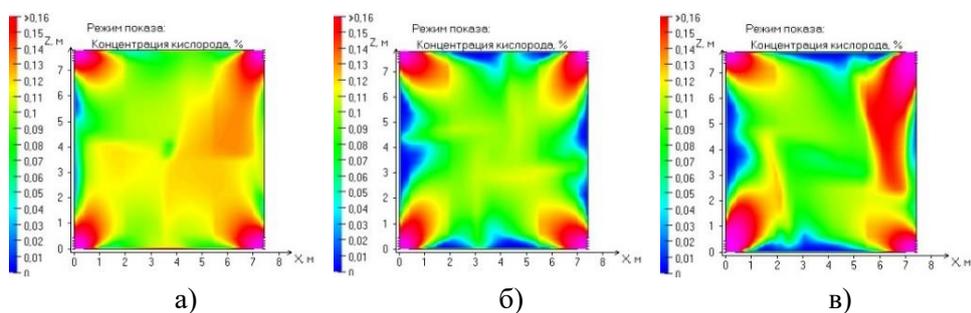


Рис. 7. Распределение  $O_2$  в горизонтальном сечении по оси горелочных устройств (%):  
 а) производительность 100%;  
 б) производительность 70%;  
 в) производительность 50%

Fig. 7. Oxygen  $O_2$  distribution throughout of the horizontal section along the axis of the burner devices (%): а) steam capacity 100%; б) steam capacity 70%; в) steam capacity 50%

Изменение температуры, концентраций кислорода и угарного газа по высоте топочной камеры представлены на рис. 8 в виде среднеинтегральных значений в плоскости горизонтального сечения при работе котла на исследуемых нагрузках.

Профили кривых изменения температурного уровня по вертикальной координате топки соответствуют визуальным картинкам (рис. 4). В области холодной воронки значение температуры составляет 850-950 °С, на уровне горелочных устройств температура снижается до 300-400 °С и в дальнейшем возрастает до температуры на выходе из топочной камеры: при 100% — 970 °С, при 70% — 940 °С, а при 50% — 850 °С.

Также результаты численного моделирования сравнивались с расчетным аналитическим значением температуры в выходном окне топочной камеры согласно [12]. Расчетное значение температуры на выходе из топки по нормативному методу составило 1035 °С. Таким образом разность температурных значений не превышает 100 °С, что вполне допустимо при итерационных расчетах по нормативному методу [12].

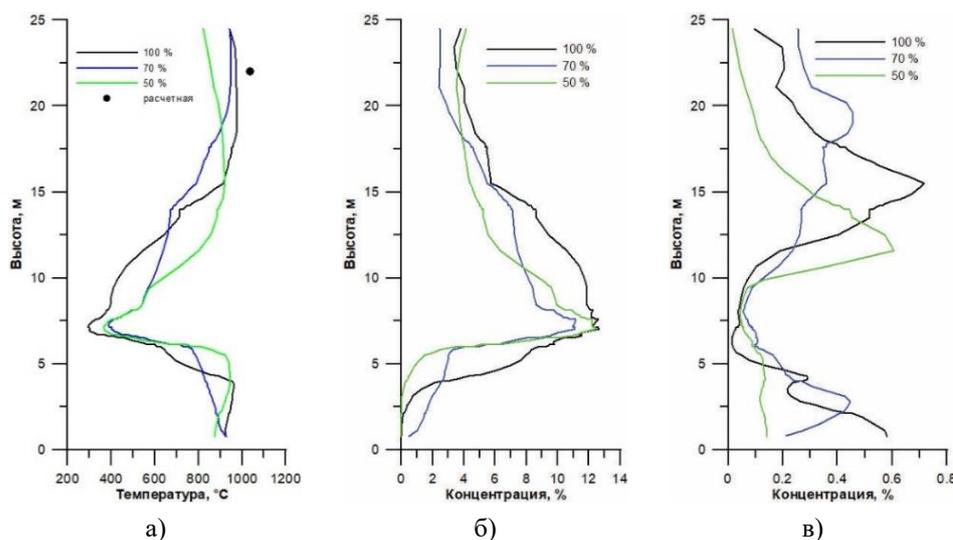


Рис. 8. Распределение по высоте топки (%):  
а) температура; б) кислород;  
в) монооксид углерода

Fig. 8. Furnace height distribution (%):  
а) temperature; б) oxygen;  
в) carbon monoxide

При анализе результатов моделирования (рис. 8) можно отметить, что профиль кривых концентрации  $O_2$  по высоте топочной камеры существенно не различается при снижении нагрузки, за исключением нагрузки в 50%, при которой на выходе из топки наблюдается более высокое содержание кислорода.

Максимальное содержание  $CO$  соответствует зонам с наибольшими значениями температур [15]. При нагрузке в 50% концентрация  $CO$  на выходе из топки минимальна, а при 100% и 70% наблюдается химический недожег.

### Заключение

Математическая модель, реализованная, в пакете прикладных программ FIRE 3D позволяет достаточно полно анализировать топочные процессы при сжигании полидисперсных твердых топлив в энергетических котельных агрегатах.

Анализируя полученные результаты моделирования, можно отметить, что наиболее устойчиво процесс выгорания непроектного бурого угля протекают при 100% нагрузке котельного агрегата. Поскольку наблюдается наиболее равномерный скоростной профиль распределения аэродинамических потоков, а также активное взаимодействие горючих компонентов и окислителя. Асимметрия вертикального вихря относительно его оси, а соответственно и траекторий движения угольных частиц, выявлена при снижении нагрузки котельного агрегата до 70%. Данный негативный фактор может способствовать процессу шлакования стен топочной камеры. В наибольшей степени этому будут подвержены фронтальной и боковые экраны. Также создаются условия снижения диффузии кислорода к угольным частицам, что приводит к повышению СО на выходе из топки. При работе на пониженной нагрузке (50%) поля температур имеют равномерное распределение. Однако учитывая скопление частиц внизу топки и высокое содержание кислорода вверху, можно отметить, что перемешивание топлива и воздуха происходит недостаточно хорошо для полного выгорания. Данное явление будет негативно влиять на экономичность работы котельного агрегата.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баутин С. П. Численное моделирование сложных течений газа в концентрированных огненных вихрях / С. П. Баутин, А. Г. Обухов // Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика Вестник Тюменского государственного университета. 2019. Т. 5. № 3. С. 47-68.
2. Бубенчиков А. М. Численные модели динамики и горения аэродисперсных смесей в каналах / А. М. Бубенчиков, А. В. Старченко. Томск: ТГУ. 1998. 236 с.
3. Волков Э. П. Исследование процесса сжигания твердого топлива в топках с прямоточными горелками / Э. П. Волков, В. Б. Прохоров, С. Л. Чернов и др. // Теплоэнергетика. 2020. № 6. С. 47-56.
4. Гиль А. В. Математическое моделирование физико-химических процессов сжигания углей в камерных топках котельных агрегатов на основе пакета прикладных программ FIRE 3D / А. В. Гиль, А. В. Старченко // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19. № 5. С. 655-671.
5. Грэм Ю. Глобальный обзор электроснабжения. 2021. URL: <https://ember-climate.org/wp-content/uploads/2021/03/Global-Electricity-Review-2021-Russia-Translated.pdf>.
6. Маршак Ю. Л. Исследование горения березовского угля в тангенциальной топочной камере с газовой сушкой топлива / Ю. Л. Маршак, В. Н. Верзаков // Теплоэнергетика. 1982. № 8. С. 4-9.
7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. Москва: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

8. Старченко А. В. Применение пакета FIRE 3D к анализу процессов шлакования / А. В. Старченко, А. С. Заворин, С. В. Красильников // Известия Томского политехнического университета. 2002. Т. 305. № 2. С. 152-157.
9. Старченко А. В. Численная оценка улавливания шлака в топке открытого типа с жидким шлакоудалением / А. В. Старченко, А. С. Заворин, С. В. Красильников // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 2. С. 127–133.
10. Супранов В. М. Исследование возможности работы котла ТПЕ-208 энергоблока №1 Смоленской ГРЭС на непроектных углях / В. М. Супранов, М. А. Изюмов, П. В. Росляков // Теплоэнергетика. 2011. № 1. С. 44-54.
11. Тайлашева Т. С. Оценка условий сжигания высоковлажного непроектного топлива в камерной топке на основе численного моделирования / Т. С. Тайлашева, А. В. Гиль, Е. С. Воронцова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 1. С. 128-135.
12. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) / Под ред. Г. М. Кагана. 3-е изд., перераб. и доп. Санкт-Петербург: ВТИ, 1998.
13. Audai Hussein Al-Abbasa. Numerical simulation of brown coal combustion in a 550 MW tangentially-fired furnace under different operating conditions / Audai Hussein Al-Abbasa, Jamal Naser, Emad Kamil Hussein // Fuel. 2013. Vol. 107. Pp. 688-698.
14. Bartłomiej Hernik. A numerical study on the combustion process for various configurations of burners in the novel ultra-supercritical BP-680 boiler furnace chamber / Bartłomiej Hernik, Grzegorz Latacz, Dominik Znamirowski // Fuel Processing Technology. 2016. Vol. 152. Pp. 381–389.
15. Baum M. M. Predicting the combustion behaviour of coal particles / M. M. Baum, P. J. Street // Combust Sci Technol. 1971. Vol. 3. Pp. 231-243.
16. Cuiliu Zhang. Numerical simulation of combustion behaviors of hydrochar derived from low-rank coal in the raceway of blast furnace / Cuiliu Zhang, Guangwei Wang, Xiaojun Ning, Jianliang Zhang, Chuan Wang // Fuel. 2020. Vol. 278. Art. 118267. 8 p.
17. Gil A. V. Numerical investigation of the combustion process for design and non-design coal in T-shaped boilers with swirl burners / A. V. Gil, A. S. Zavorin, A. V. Starchenko // Energy. 2019. Vol. 186. Art. 115844. 14 p.
18. Hatami Mohammad. Thermal optimization for the tangential swirl burner at the rotary furnace of steel pipe industry to save energy and reduce emissions / Hatami Mohammad, Heydari, Abbas // Alexandria Engineering Journal. 2022. Vol. 61. № 9. Pp. 6675-6694.
19. Karampinis E. Numerical investigation Greek lignite/cardoon co-firing in a tangentially fired furnace / E. Karampinis, N. Nikolopoulos, A. Nikolopoulos, P. Grammelis, E. Karakas // Applied Energy. 2012. Vol. 97. Pp. 514–524.
20. Magnusen B. F. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion / B. F. Magnusen, B. H. Hjertager // Proceedings of 16<sup>th</sup> International Symposium on Combustion. Pittsburg, 1976. Pp. 719-727.

Andrey V. GIL<sup>1</sup>  
Kirill I. MALTSEV<sup>2</sup>  
Alexander S. ZAVORIN<sup>3</sup>  
Alexander V. STARCHENKO<sup>4</sup>

UDC 621.181

## MATHEMATICAL SIMULATION OF FURNACE PROCESSES DURING FIRED PULVERIZED COAL

- <sup>1</sup> Cand. Sci. (Tech), Associate Professor, Butakov Research Center,  
National Research Tomsk Polytechnic University  
andgil@tpu.ru
- <sup>2</sup> Postgraduate Student, Butakov Research Center,  
National Research Tomsk Polytechnic University  
runstar@yandex.ru
- <sup>3</sup> Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
Head of the Department — Head of Butakov Research Center,  
National Research Tomsk Polytechnic University  
andgil@tpu.ru
- <sup>4</sup> Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor,  
Head of the Department of Computational Mathematics and Computer Modeling,  
National Research Tomsk State University  
starch@math.tsu.ru

### Abstract

The article presents the study of combustion and heat transfer processes in large-scale objects are extremely difficult both analytically and experimentally. The combustion of non-design coals in boiler units is often accompanied by a decrease in the completeness of fuel burnup, undesirable redistribution of heat flows and other negative factors due to different thermal characteristics of the fuel. The possibility of effective burnout of polyfractional non-design solid fuel in the combustion chamber

---

**Citation:** Gil A. V., Maltsev K. I., Zavorin A. S., Starchenko A. V. 2022. “Mathematical simulation of furnace processes during fired pulverized coal”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 8, no. 3 (31), pp. 44-58.  
DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-3-44-58

---

of a boiler unit with solid ash removal is considered on the basis of a numerical study of jointly occurring aerothermochemical processes. The problem of numerical modeling of the staged burnout of coal particles is solved, starting from the evaporation of the moisture contained in them to the burning out of their coke residue when moving in the carrier phase. Numerical studies of physical and chemical processes in the combustion chamber were carried out for three loads (50%, 70%, 100%) based on the developed FIRE 3D calculation complex. The Euler-Lagrange model for a dusty flow is applied, the closure of the averaged Navier-Stokes equations is performed by the k- $\epsilon$  turbulence model, the second order of accuracy is used in numerical calculations. The main results of three-dimensional modeling are presented in the form of velocity and temperature fields, the distribution of O<sub>2</sub> and CO concentrations along the height of the furnace volume. The results of mathematical modeling showed good agreement with the available analytical values. Based on the data obtained, it can be stated that it is possible to organize the combustion of non-design fuel in the boiler unit under consideration. It has been established that when operating at loads below the nominal, a redistribution of burner jets is observed, which negatively affects the reliability and efficiency of the boiler. To increase the efficiency of the boiler unit at reduced loads, a wider study of options for redistributing the proportions of the fuel-air mixture and secondary air is necessary.

**Keywords**

Combustion, two-phase flow, furnace, heat flow, numerical simulation.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-3-44-58**

**REFERENCES**

1. Bautin S. P., Obukhov A. G. 2019. "Numerical simulation of complex gas flows in concentrated fire vortices". *Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 47-68. [In Russian]
2. Bubenichikov A. M., Starchenko A. V. 1998. *Numerical models of dynamics and combustion of aerodisperse mixtures in channels*. Tomsk: TGU. [In Russian]
3. Volkov E. P., Prokhorov V. B., Chernov S. L., Kirichkov V. S., Kaverin A. A. 2020. "Investigation of the combustion process of solid fuel in furnaces with direct-flow burners". *Thermal Engineering*, vol. 67, pp. 365-373. [In Russian]
4. Gil A. V., Starchenko A. V. 2012. "Mathematical modelling of physical and chemical processes of coal combustion in chamber furnaces of boiler aggregates based on the package of applied programs FIRE 3D". *Thermophys Aeromechanics*, vol. 19, pp. 503-519. [In Russian]
5. Graham Y. The global electricity review. 2021. <https://ember-climate.org/wp-content/uploads/2021/03/Global-Electricity-Review-2021-Russia-Translated.pdf>. [In Russian]
6. Marshak Yu. L., Verzakov V. N. 1982. "Investigation of the combustion of Berezhovskiy coal in a tangential furnace transmission with gas fuel drying". *Thermal Power Engineering*, no. 8, pp. 4-9. [In Russian]
7. Patankar S. 1980. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing Corporation. New York. [In Russian]

8. Starchenko A. V., Zavorin A. S., Krasilnikov S. V. 2002. "Application of the FIRE 3D package to the analysis of slagging processes". *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, vol. 305, no. 2. pp. 152-157. [In Russian]
9. Starchenko A. V., Zavorin A. S., Krasilnikov S. V. 2004. "Numerical evaluation of slag capture in an open furnace with liquid ash removal". *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, vol. 307, no. 2. pp. 127-133. [In Russian]
10. Supranov V. M., Izyumov M. A., Roslyakov P. V. 2011. "Studying the possibility of running the TPE208 boiler of unit 1 at the Smolensk district power station on off-design coals". *Thermal Engineering*, vol. 58, no. 1, pp. 46-57. [In Russian]
11. Taylasheva T. S., Gil A. V., Vorontsova E. S. 2016. "Evaluation of burning conditions of high humidity non project fuel in chamber furnace based on numerical simulation". *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, vol. 327, no. 1, pp. 128-135. [In Russian]
12. Kagan G. M. 1998. *Thermal calculation of boilers (normative method)*. 3<sup>rd</sup> ed., revised and additional. Saint-Petersburg: VTI. [In Russian]
13. Audai Hussein Al-Abbasa, Jamal Naser, Emad Kamil Hussein. 2013. "Numerical simulation of brown coal combustion in a 550 MW tangentially-fired furnace under different operating conditions". *Fuel*, vol. 107, pp. 688-698.
14. Bartłomiej Hernik, Grzegorz Latacz, Dominik Znamirowski. 2016. "A numerical study on the combustion process for various configurations of burners in the novel ultra-supercritical BP-680 boiler furnace chamber". *Fuel Processing Technology*, vol. 152, pp. 381-389.
15. Baum M. M., Street P. J. 1971. "Predicting the combustion behaviour of coal particles". *Combust Sci Technol*, vol. 3, pp. 231-243.
16. Cuiliu Zhang, Guangwei Wang, Xiaojun Ning, Jianliang Zhang, Chuan Wang. 2020. "Numerical simulation of combustion behaviors of hydrochar derived from low-rank coal in the raceway of blast furnace". *Fuel*, vol. 278, art. 118267. 8 p.
17. Gil A. V., Zavorin A. S., Starchenko A. V. 2019. "Numerical investigation of the combustion process for design and non-design coal in T-shaped boilers with swirl burners". *Energy*, vol. 186, art. 115844. 14 p.
18. Hatami Mohammad, Heydari Abbas. 2022. "Thermal optimization for the tangential swirl burner at the rotary furnace of steel pipe industry to save energy and reduce emissions". *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 9, pp. 6675-6694.
19. Karampinis E., Nikolopoulos N., Nikolopoulos A., Grammelis P., Kakaras E. 2012. "Numerical investigation Greek lignite/cardoon co-firing in a tangentially fired furnace". *Applied Energy*, vol. 97, pp. 514-524.
20. Magnusen B. F., Hjertager B. H. 1976. "On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion". *Proceedings of 16<sup>th</sup> Int. Symposium on Combustion*, pp. 719-727.