



УДК 662.76

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ КОКСА КАМЕННОГО УГЛЯ В ПРИБОРЕ ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

### COMPUTATIONAL MODELING OF COAL COKE COMBUSTION PROCESS PERFORMED IN THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS DEVICE

**Овчарников Александр Олегович**, магистрант каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5. E-mail: strogg300@yandex.ru, Тел.: +7(906)813-33-24

**Абаимов Николай Анатольевич**, ассистент каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5. E-mail: nick.sum41@mail.ru, Тел.: +7(906)815-08-28

**Рыжков Александр Филиппович**, д-р. техн. наук, профессор каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5.

**Aleksandr O. Ovcharnikov**, Master student, Department «Heat power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Sofyi Kovalevskoy street, 5, Ekaterinburg, Russia. E-mail: strogg300@yandex.ru, Ph.: +7(906)813-33-24

**Nikolay A. Abaimov**, assistant, Department «Heat power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Sofyi Kovalevskoy street, 5, Ekaterinburg, Russia. E-mail: : nick.sum41@mail.ru. Ph.: +7(906)815-08-28

**Aleksandr F. Rijkov**, Doctor Sc., Prof., Department «Heat power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Sofyi Kovalevskoy street, 5, Ekaterinburg, Russia.

**Аннотация:** Уголь является дешевым и распространенным топливом для производства энергии и синтез-газа, поэтому изучение его кинетических характеристик позволит серьезно повысить эффективность работы оборудования. Перспективным методом определения кинетических свойств твёрдого топлива является термогравиметрический анализ (ТГА). Прибор ТГА (в частности печь) конструктивно сложен и не даёт полного представления обо всех сторонах процесса, таких как аэродинамические особенности и распределение газов в объёме печи. Данные параметры, как правило, определяют методом вычислительной гидродинамики (CFD). В докладе моделировалось внутреннее пространство печи, включающее тигли, подставку, держатель и трубку подачи защитного газа (аргона). В первом случае расчёт проводился для эксперимента с конечной температурой 450<sup>0</sup>С, а во втором – для эксперимента с конечной температурой 700<sup>0</sup>С. В обоих случаях один тигель был пустой, другой – с навеской кокса Кузнецкого каменного угля марки Д. Моделируемая система считалась изотермичной с температурами 450<sup>0</sup>С и 700<sup>0</sup>С и, соответственно, кинетическим и диффузионным режимами выгорания кокса. Сравнение результатов, полученных для двух вышеописанных случаев, позволило установить характер влияния режима горения кокса в одном из тиглей на аэродинамику и концентрационные поля внутри печи прибора ТГА.

**Abstract:** Coal is a cheap and videspread fuel for energy and syngas production, so the study of its kinetic characteristics allows to seriously improving the efficiency of the equipment. A promising method for determining the kinetic properties of solid fuels is a thermal gravimetric analysis (TGA). TGA instrument (particularly bake) structurally complicated and does not allow to experimentally determining some important process parameters such as aerodynamic characteristics, and distribution of gases in the kiln volume. These parameters are generally determined by computational fluid dynamics (CFD). The report modeled the interior of the furnace, including crucibles, stand, holder and tube shielding gas (argon). In the first case, the calculation was carried out for experiment with temperature of 450<sup>0</sup>С, and in the second – experiment with temperature of 700<sup>0</sup>С. In both cases one of the crucibles was empty and another with the sample coke Kuznetsk coal brand D.

Simulated system is considered to be isothermal with a temperature of 450°C and 700°C and, accordingly, the diffusion regime burning coke. Comparing the results obtained for the above two cases, allowed establishing the nature of the influence of coke combustion process in one of the crucibles on aerodynamics and concentration fields inside the furnace TGA instrument.

**Ключевые слова:** термогравиметрический анализ (ТГА), вычислительная гидродинамика (CFD), кокс угля, кинетика химических реакций, ламинарное течение.

**Keywords:** thermal gravimetric analysis (TGA), computational fluid dynamics (CFD), coal coke, chemical reaction kinetic, laminar flow.

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Одним из современных инструментов определения кинетических свойств твёрдых топлив является прибор термогравиметрического анализа (ТГА), принцип действия которого заключается в измерении убыли массы образца топлива, который находится на весах, расположенных в печи, при обдувании того газовой средой определённого состава и температуры. Из измерительных приборов в печи имеются термопары для определения температуры образца, прецизионные весы и устройство определения расхода газовых сред на входе в печь. Поэтому для определения аэродинамических характеристик и концентрационных полей требуется прибегать к инструментам моделирования, наиболее функциональным из которых является метод вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD) [1].

Цель работы – численное исследование гидродинамических процессов при горении кокса каменного угля в приборе ТГА.

Для достижения поставленной цели надо решить следующие задачи:

- 1) подготовить CFD-модель внутреннего пространства печи прибора ТГА с необходимыми подмоделями;
- 2) проанализировать полученные расчётные результаты по гидродинамике и концентрационным полям газов в печи;
- 3) оценить влияние горения угля на процессы, происходящие внутри прибора.

## 2 ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ПРИБОРА ТГА

Термический анализатор NETZSCH STA 449 F3 Jupiter позволяет выполнять измерения изменения массы и тепловых эффектов, при температурах до 1250°C. Моделируемый эксперимент представлял собой процесс сжигания кокса Кузнецкого каменного угля марки Д в одном из двух тиглей. Второй тигель остаётся пустой, чтобы можно было сравнить температуры тигля с топливом и с пустым определить тепловой эффект реакции. На Рис.1. показана схема держателя с тиглями.

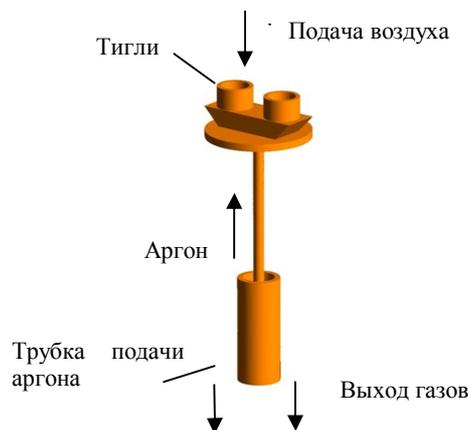


Рис. 1. Схема движения газов внутри печи прибора ТГА

Длина цилиндра (печи) – 74 мм, радиус – 16.7 мм. Сверху на тигли подается воздух. Снизу по трубке подается защитный газ – аргон. Было проведено два эксперимента. Сначала печь нагревалась от 40°C до 900°C со скоростью 25 К/мин в обоих случаях. Затем в 1-ом эксперименте температуру понизили до 450°C и сделали выдержку по времени 145 минут. Во 2-ом эксперименте температуру понизили до 700°C, а выдержку по времени сделали 28 минут.

## 3 ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Геометрия модели представляла собой внутреннее пространство печи, включающее в себя трубку подачи защитной среды, держатель, подставку и тигли. Геометрия имеет плоскость симметрии, проходящую через центры тиглей и ось симметрии печи, поэтому моделирование проводилось для одной из симметричных половин, это позволило сократить время расчёта.

На основании данной геометрии построена сетка с 500 тыс. расчётных элементов, наиболее детальная часть которой представлена на Рис. 2.

Исходные параметры для модели были взяты из точек максимальной убыли массы из каждого эксперимента.

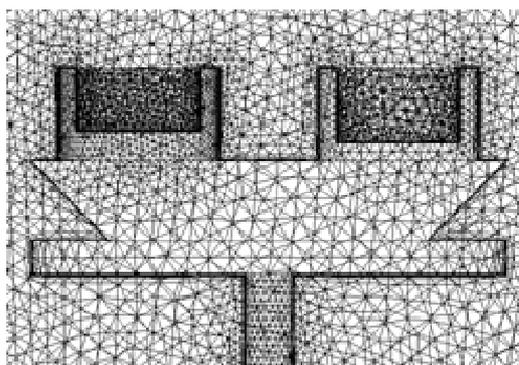


Рис. 2. Расчётная сетка вблизи тиглей

Массовые расходы воздуха и аргона равны  $1.3611 \cdot 10^{-6}$  кг/с и  $5.9 \cdot 10^{-7}$  кг/с соответственно. Зона реагирования кокса угля с кислородом воздуха была представлена в виде круга – поверхности, соединяющей навеску и газовый объём. Данное допущение справедливо при  $700^{\circ}\text{C}$ , так как в этом диапазоне горение носит диффузионный характер (без проникновения кислорода в толщу слоя кокса угля). Для полноценного моделирования распределение газов при кинетическом режиме горения ( $450^{\circ}\text{C}$ ) в будущем планируется дополнительно учитывать объём навески топлива. Считалось, что горение проходит по реакции полного окисления углерода топлива кислородом воздуха до углекислого газа. Исходя из экспериментально определённой убыли массы навески рассчитаны расходы газ-реагентов для обоих случаев: 1) поглощение  $\text{O}_2$  –  $4,4266 \cdot 10^{-9}$  кг/с; образование  $\text{CO}_2$  –  $6,0926 \cdot 10^{-9}$  кг/с; 2) поглощение  $\text{O}_2$  –  $3,33 \cdot 10^{-8}$  кг/с; образование  $\text{CO}_2$  –  $4,583 \cdot 10^{-8}$  кг/с. Для

моделирования не потребовалось использования моделей турбулентности так, как число Рейнольдса составило 57 (ламинарное течение), что намного меньше критического. Смесь газов состояла из  $\text{Ar}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ . Абсолютное давление составляло 1 атм. Система изотермическая с температурой в 1-ом случае  $450^{\circ}\text{C}$ , и  $700^{\circ}\text{C}$  во 2-ом. На стенках – условия прилипания.

#### 4 РЕЗУЛЬТАТЫ

На Рис. 3. приведены результаты моделирования процессов, происходящих в печи, в 1-ом эксперименте, а на Рис.4. – во 2-ом. Как видно из рисунков, в 1-ом эксперименте с горением угля и во 2-ом отличаются значения скорости и концентраций в результате неодинаковых температуры среды и выделения  $\text{CO}_2$ . В обоих случаях концентрации  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$ , приближаясь к линии подвода аргона, начинают падать. Скорость газов не изменяется до тиглей, но из-за сужения свободного пространства локально увеличивается и далее возрастает благодаря подмешиванию аргона. Скорость в эксперименте на  $450^{\circ}\text{C}$  ниже, из-за более низкой температуры, чем в эксперименте на  $700^{\circ}\text{C}$ . Связано это, с тем что при одинаковой подаче воздуха в обоих экспериментах, при более высокой температуре газы расширяются сильнее, и при одинаковом выходном сечении скорость у них будет выше. В пространстве возле тигля концентрации кислорода и азота падают. В первом случае из-за поглощения  $\text{O}_2$ , во втором из-за добавления  $\text{CO}_2$ . В экспериментах различаются показатели массовой доли газов вблизи тиглей. В эксперименте на  $700^{\circ}\text{C}$  доля азота и кислорода меньше, так как выделяется больше  $\text{CO}_2$ .

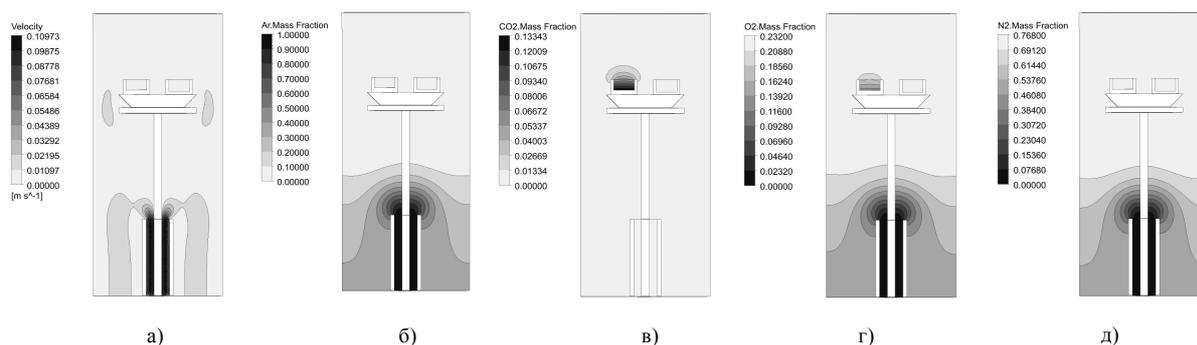


Рис. 3. Результаты моделирования при температуре  $450^{\circ}\text{C}$ : а) скорость; б) концентрация аргона; в) концентрация диоксида углерода; г) концентрация кислорода; д) концентрация азота

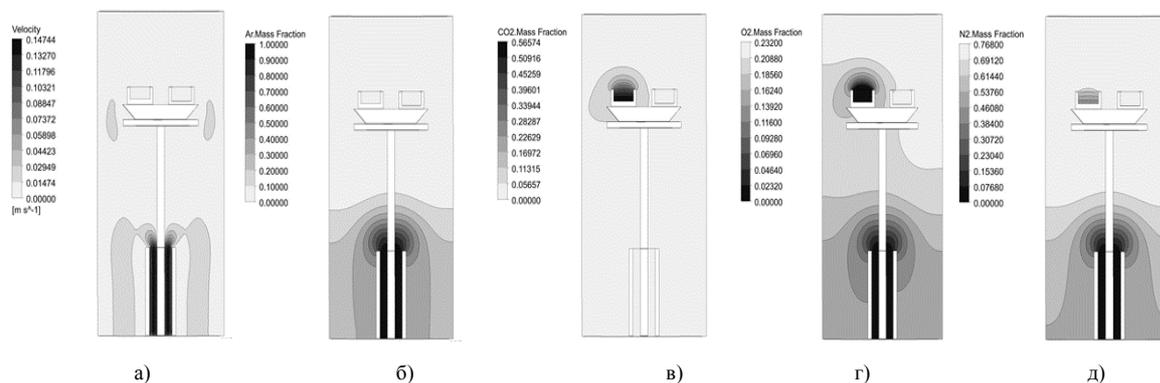


Рис. 4. Результаты моделирования при температуре 700<sup>0</sup>С: а) скорость; б) концентрация аргона; в) концентрация диоксида углерода; г) концентрация кислорода; д) концентрация азота

## 5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Термогравиметрический анализатор - сложный прибор, применяемый для получения данных о кинетике гетерогенных реакций, но он не дает понимания происходящих в нем гидрогазодинамических процессов. Численное моделирование позволяет выявить необходимые параметры работы печи и оптимизировать методику проведения экспериментов.

Сравнение расчётных результатов моделирования работы прибора при разных условиях показало, что при различной температуре сжигания топлива меняются скорости газов внутри печи. Концентрации исходных газов снижаются из-за добавления в смесь диоксида углерода, а также из-за разных условий горения меняется поглощение кислорода у тиглей. В частности, при температуре 450<sup>0</sup>С кислород поглощается не полностью, что

указывает на кинетические ограничения, при температуре 700<sup>0</sup>С наблюдается недостаток кислорода, что указывает на диффузионные ограничения. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение нестационарных явлений во время переходных процессов внутри печи прибора ТГА, а также на моделирование распределения газов в слое кокса угля.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00524).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыжков А.Ф., Худякова Г.И., Осипов П.В. Абаимов Н.А. Исследование выгорания углей методом ТГА // Горение и плазмохимия, 2015, том 13, № 3, С. 176-180