



УДК 662.76

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА ПОТОЧНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ В СРЕДЕ O₂-CO₂**THE USE OF NUMERICAL MODELING METHODS IN THE STUDY OF THE ENTRAINED FLOW GASIFICATION PROCESS IN THE O₂-CO₂ ENVIRONMENT**

Котегов Александр Андреевич, магистрант каф. «Тепловых электрических станций», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: s.kotegov2010@yandex.ru, Тел.: +7(922)186-31-94

Ральников Павел Андреевич, аспирант каф. «Тепловых электрических станций», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: ral-pavel@mail.ru. Тел.: +7(909)727-94-26

Рыжков Александр Филиппович, д-р. техн. наук, профессор каф. «Тепловых электрических станций», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: af.ryzhkov@mail.ru

Alexander A. Kotegov, Master student, Department «Thermal Power Plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: s.kotegov2010@yandex.ru. Ph.: +7(922)186-31-94

Pavel A. Ralnikov, post-graduate student, Department «Thermal Power Plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ral-pavel@mail.ru. Ph.: +7(909)727-94-26

Alexander F. Ryzhkov, Doctor Sc., Prof, Professor of the Department. «Thermal power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: af.ryzhkov@mail.ru.

Аннотация. В ходе исследования подобраны наиболее подходящие модели и методы для описания процессов происходящих в пилотном одноступенчатом газификаторе «НПО ЦКТИ» при переходе с кислородной среды на кислородно-углекислотную. Численное моделирование процесса газификации проведено с использованием метода вычислительной гидродинамики (CFD). Для сокращения времени расчета исследуемая модель газификатора была упрощена до сегмента в 45 градусов, а количество элементов расчетной сетки принято равным 180 тысяч. Получены и проанализированы результаты моделирования для различного содержания CO₂ в дутье, которое изменялось от 0 до 100%. Получены данные, которые показали отличие кислородного режима от режима с дутьем O₂-CO₂. Они требуют подробного анализа. В дальнейшем запланирована верификация полученных данных с помощью эксперимента на реальной установке.

Abstract. In the course of the study, the most suitable models and methods were chosen to describe the processes taking place in the pilot single-stage gasifier «NPO CKTI» which operates in O₂-CO₂ environment. Numerical modeling of the gasification process was carried out using the method of computational fluid dynamics (CFD). The model of the gasifier was simplified to a segment of 45 degrees, the number of elements of the computational grid is taken equal to 180,000. The results of modeling for different contents of CO₂ in the blowing, which varied from 0 to 100%, were obtained and analyzed. New data, which showed the difference between the oxygen regime and the regime with O₂-CO₂ blowing, were obtained. It requires detailed analysis. Verification of the obtained data will be planned by experiment with real installation.

Ключевые слова: ПГУ-ВЦГ; газификация угля; среда O₂-CO₂; вычислительная гидродинамика; улавливание и хранение углерода; поточный газификатор.

Key words: IGCC; coal gasification; O₂-CO₂ environment; CFD; CCS; entrained-flow gasifier.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время парогазовая установка с внутрицикловой газификацией угля является перспективным направлением в развитии технологий электрогенерации, так как она обладает значением КПД выше, чем у обычных пылеугольных станций, а также предоставляет возможность в полной мере использовать потенциал технологий улавливания и хранения углерода, снижая количество вредных выбросов в атмосферу до околонулевых значений, тем самым решая одну из наиболее важных проблем, а именно сокращение выбросов CO_2 .

Целью данной работы является получение новых данных о процессе газификации в поточном газификаторе каменного угля в среде $\text{O}_2\text{-CO}_2$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Объектом исследования является поточный газификатор «НПО ЦКТИ», который был изначально спроектирован для работы на кислородном дутье. Ранее для этих условий уже было проведено численное исследование [1].

Реакционная камера – это вертикально расположенный сосуд под давлением диаметром 0.21 м и высотой 1.6 м, покрытый обмуровкой (рис. 1). Нижняя часть является камерой охлаждения,

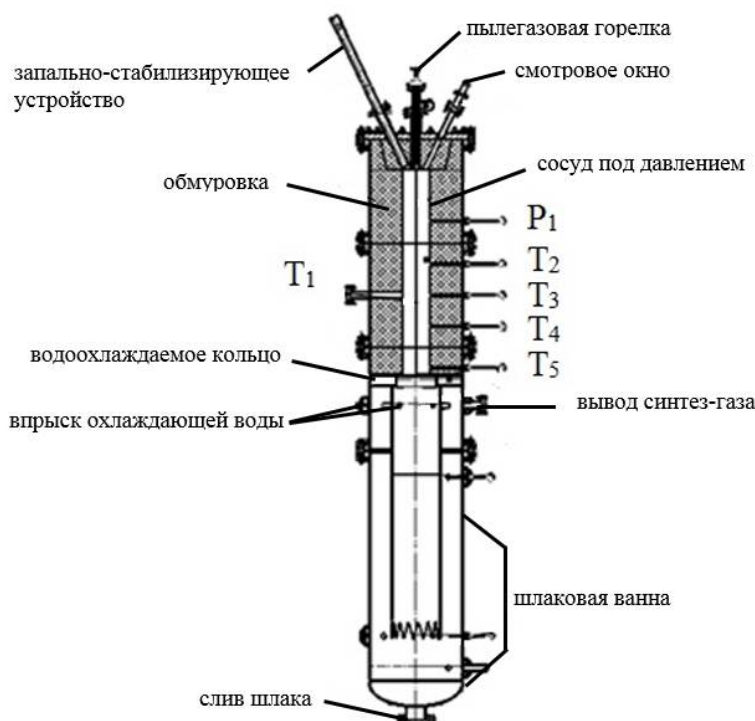


Рис. 1. Газификатор «НПО ЦКТИ»

которой расположены секция водяного квенчинга и шлаковая ванна. Верхняя и нижняя части соединены водоохлаждаемым кольцом. С целью снижения уноса капельной жидкости патрубков вывода синтез-газа установлен на высоте 1 м над уровнем воды.

В верхней части газификатора расположены смотровое окно, комбинированная пылегазовая горелка и запально-стабилизирующее устройство, которое работает на природном газе и используется для прогрева футеровки при пуске из холодного состояния, поддержания температуры в реакционной камере при останове и в качестве розжига основного факела при

растопке и переходных режимах. Дутье подогревается с помощью электронагревателя до $350\text{-}500^\circ\text{C}$.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для проведения численного моделирования используется метод вычислительной гидродинамики (CFD), который широко применяется при решении такого рода задач [2]. На основе литературного обзора выбраны следующие подмодели.

МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

При выборе модели турбулентности необходимо учитывать тип течения, особенности задачи, требуемую точность решения, вычислительную мощность оборудования и т.п. Считается, что для моделирования движения свободных струй удовлетворительно подходит стандартная k - ϵ модель [3]. Ранее [4] данная модель была верифицирована при решении схожей задачи.

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Для описания процессов движения частицы используется метод Лагранжа. При таком подходе движение частицы описывается уравнениями динамики материальной точки с учетом сил сопротивления и силы тяжести. Использование данного метода обосновано низкой объемной концентрацией частиц, порядка 10^{-4} – 10^{-5} м³/м³, при которой нет необходимости в моделировании взаимодействия между частицами, учет которого значительно усложняет вычисления.

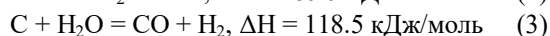
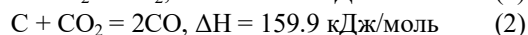
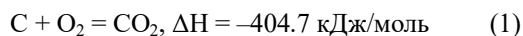
МОДЕЛЬ ГОМОГЕННОГО РЕАГИРОВАНИЯ

Для моделирования гомогенных реакций использована комбинированная модель Eddy Dissipation/Finite Rate Chemistry. Согласно механизму действия этой модели, за реальную скорость реакции принимается минимальная из скоростей, рассчитанных по схемам FiniteRateChemistry и EddyDissipation.

МОДЕЛЬ ГЕТЕРОГЕННОГО РЕАГИРОВАНИЯ

Для сокращения времени расчётов принималось, что испарение влаги угля происходит мгновенно. Скорость выхода летучих веществ описывалась по одноступенчатой модели, отработанной в [5], а их состав с учетом больших скоростей газофазных реакций с летучими веществами принимался равновесным, что вполне достаточно для оценочных расчетов.

Для расчёта скоростей реакций горения (1), Будуара (2) и гидрогазификации (3) использована диффузионно-кинетическая модель.



Скорость процесса убыли массы пылеугольной частицы описывается уравнением n -го порядка по реагенту

$$\frac{dm}{dt} = -\pi d_p^2 C_r \frac{k_d k_x}{(k_d + k_x)} * \left(\frac{p}{p_0}\right)^n, \quad (4)$$

где m – масса углерода топлива, кг; t – время, с; d_p – диаметр частицы, м; C_r – концентрация газа-реагента у поверхности частицы, кг/м³; k_d – константа скорости диффузии газа-реагента к поверхности частицы, м/с; k_x – константа скорости химической реакции, м/с; p_0 – давление при нормальных условиях, Па; p – рабочее давление, Па, n – порядок реакции.

Константа скорости химической реакции частицы с углеродом вычисляется по формуле

$$k_x = A_x \exp\left(-\frac{E_x}{RT_p}\right), \quad (5)$$

где A_x – предэкспоненциальный фактор, м/с; E_x – энергия активации химической реакции, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К), T_p – температура частицы.

Использованы кинетические константы кузнецкого каменного угля марки Д полученные методом термогравиметрического анализа (ТГА) [6]. Более детальное описание всех используемых моделей приведено в работе [7].

РАСЧЕТНАЯ СЕТКА

Газификатор ЦКТИ обладает лучевой симметрией благодаря восьми отверстиям выхода окислителя в форсунке горелки. Это позволило упростить модель до сегмента в 45°. Далее была создана расчетная сетка. Для обеспечения достаточной точности результатов было проведено исследование [1] влияния количества элементов расчетной сетки на результаты расчета. Согласно результатам, было принято решение использовать в моделировании сетку на 180 тыс. элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В ходе работы был произведен расчет нескольких случаев с различной концентрацией CO₂ в дутье, которая изменялась от 0 до 100%. Влияние этих изменений лучше всего оценить по изменению средней по сечению температуры потока по высоте газификатора.

Анализируя график на рисунке 2 можно прийти к выводу, что переход от кислородного дутья к кислородно-углекислотному приводит к общему снижению пиковой температуры, и ядро факела смещается ближе к горелке. Это связано с тем, что

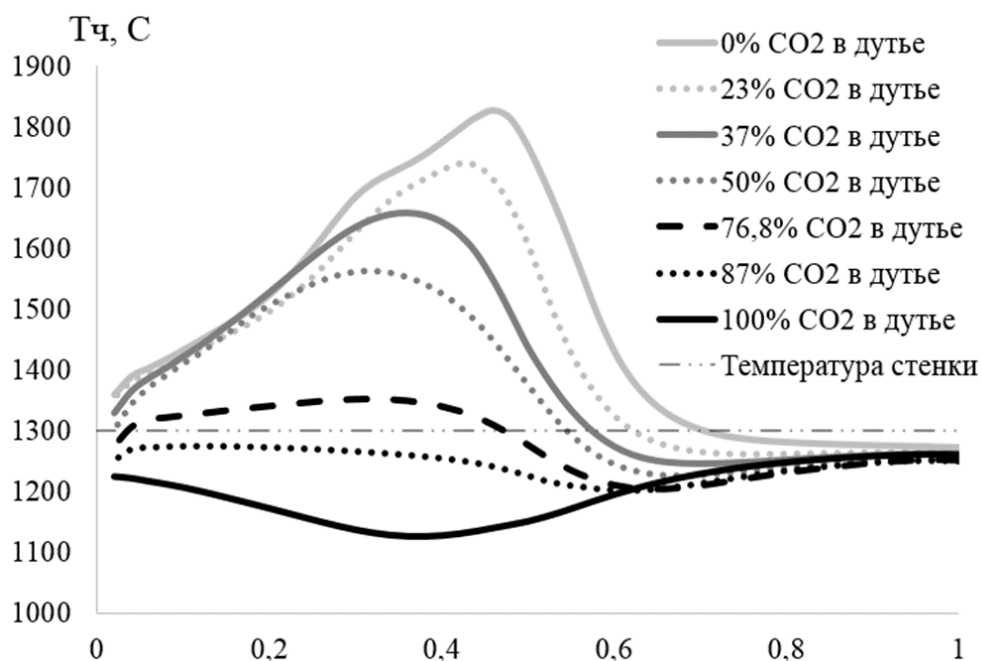


Рис. 2. Распределение температуры по высоте газификатора при изменении концентрации CO₂ в дутье

углекислый газ более слабый окислитель, чем кислород. При увеличении доли CO₂ в дутье примерно до 80% наблюдается плавное снижение максимальной температуры от 1850 до 1350 °C. При дальнейшем увеличении концентрации углекислого газа низкотемпературный поток начинает получать тепло от более нагретой стенки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, данные полученные в ходе исследования показали необходимость дальнейшего изучения процессов, происходящих в газификаторе с кислородно-углекислотным дутьем.

Повышение доли CO₂ в дутье приводит к снижению температуры потока, это в свою очередь может снизить стоимость газификатора при проектировке за счет использования менее дорогих материалов. В дальнейшем планируется эксперимент на реальной установке «ЦКТИ». Интересующий нас режим с долей углекислого газа равной 76,8% будет опробован и верифицирован, так как именно он показал наибольшее снижение температуры потока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ральников П.А., Абаймов Н.А., Рыжков А.Ф. Численное исследование процесса газификации в пилотном кислородном поточном газификаторе / П.А. Ральников, Н.А. Абаймов, А.Ф. Рыжков // Теплотехника и информатика в

образовании, науке и производстве: материалы науч.-практ. конф. – Екатеринбург, 2017. – С. 113.

2. Watanabe H., Tanno K., Umetsu H., Umemoto S. Energy Modeling and simulation of coal gasification on an entrained flow coal gasifier with a recycled CO₂ injection // Fuel 142 (2015) 250–259 Contents

3. Bardina J.E., Huang P.G., Coakley T.J. Turbulence Modeling Validation, Testing and Development // NASA reports. – 1997. Pp. 105-130.

4. Чернецкий М.Ю., Кузнецов В.А., Дектерев А.А., Абаймов Н.А., Рыжков А.Ф. Сравнительный анализ влияния моделей турбулентности на описание процессов горения угольной пыли при наличии закрутки потока // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 4. С. 615-626.

5. Badzioch S., Hawksley P.G.W. Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles / S. Badzioch, P.G.W. Hawksley // Industrial and Engineering Chemistry: Process Design and Development. - 1970. - V. 9. I. 4. - Pp. 521–530.

6. Abaimov N.A., Osipov P.V., Ryzhkov A.F. Experimental and computational study and development of the bituminous coal entrained-flow air-blown gasifier for IGCC // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Т. 754. № 11. С. 112001

7. Абаймов Н.А., Рыжков А.Ф. Разработка модели поточной газификации угля и отработка аэродинамических механизмов воздействия на работу газогенераторов // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 3.