

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА ПОТОЧНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ В СРЕДЕ O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>

### 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 CO<sub>2</sub> в дутье, которое изменялось от 0 до 100 %. Получены данные, которые показали отличие кислородного режима от режима с дутьем O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>. Они требуют подробного анализа. В дальнейшем запланирована верификация полученных данных с помощью эксперимента на реальной установке.*

**Ключевые слова:** ПГУ-ВЦГ, газификация угля, среда O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>, вычислительная гидродинамика, улавливание и хранение углерода, поточный газификатор.

### 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 O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> blowing, were obtained. It requires detailed analysis. Verification of the obtained data will be planned by experiment with real installation.*

**Key words:** IGCC, coal gasification, O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>.

Целью данной работы является получение новых данных о процессе газификации в поточном газификаторе каменного угля в среде O<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>.

### 1. 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, в 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.

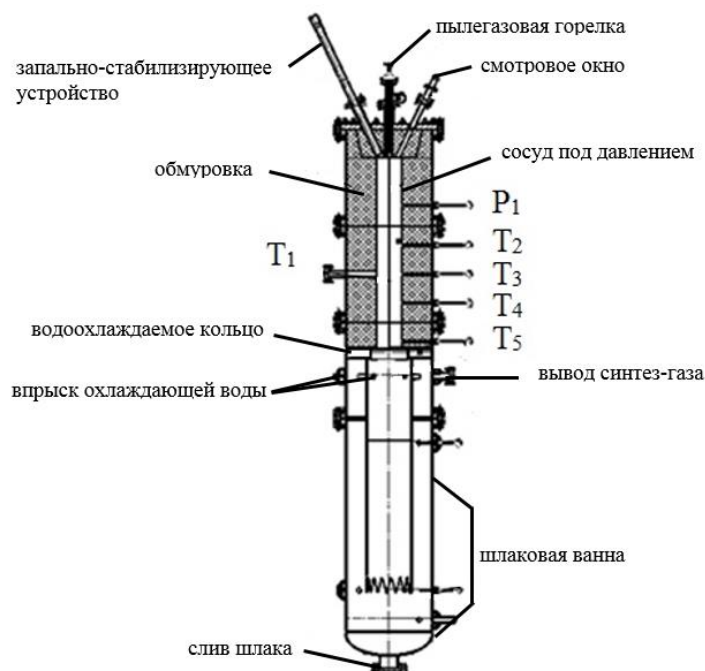


Рис. 1. Газификатор «НПО ЦКТИ»

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 350–500 °С.

## 2. 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.

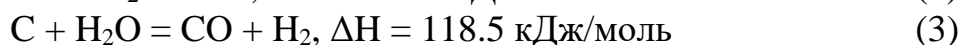
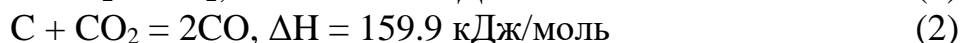
**2.1. Модель турбулентности.** При выборе модели турбулентности необходимо учитывать тип течения, особенности задачи, требуемую точность решения, вычислительную мощность оборудования и т.п. Считается, что для моделирования движения свободных струй удовлетворительно подходит стандартная  $k-\epsilon$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

2.2. *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  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, при которой нет необходимости в моделировании взаимодействия между частицами, учет которого значительно усложняет вычисления.

2.3 *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.

2.4. *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

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

где  $m$  – масса углерода топлива, кг;  $t$  – время, с;  $d_q$  – диаметр частицы, м;  $C_r$  – концентрация газа-реагента у поверхности частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $k_d$  – 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

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

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

### 3. Расчетная сетка

Газификатор ЦКТИ обладает лучевой симметрией благодаря восьми отверстиям выхода окислителя в форсунке горелки. Это позволило упростить модель до сегмента в  $45^\circ$ . 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.

#### 4. Результаты моделирования

В ходе работы был произведен расчет нескольких случаев с различной концентрацией  $\text{CO}_2$  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 углекислый газ более слабый окислитель, чем кислород. При увеличении доли  $\text{CO}_2$  в дутье примерно до 80 % наблюдается плавное снижение максимальной температуры от 1850 до 1350 °С. При дальнейшем увеличении концентрации углекислого газа низкотемпературный поток начинает получать тепло от более нагретой стенки.

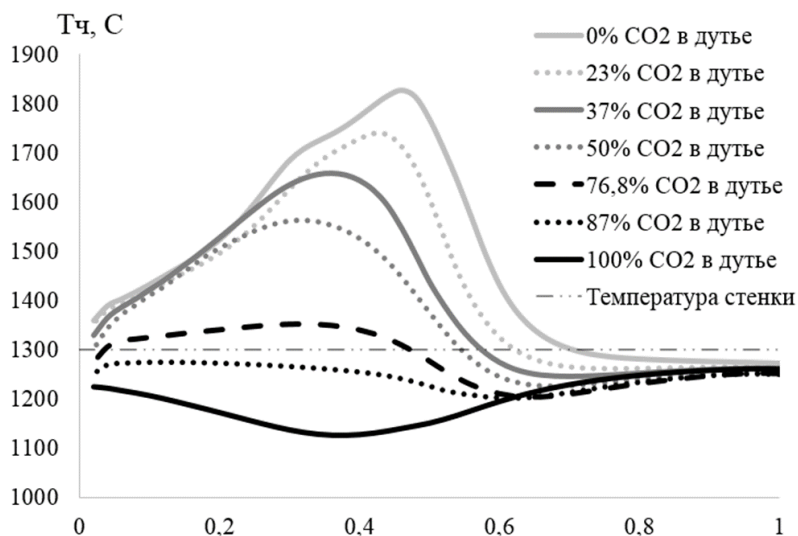


Рис. 2. Распределение температуры по высоте газификатора при изменении концентрации  $\text{CO}_2$  в дутье

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

Повышение доли  $\text{CO}_2$  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.

## Список использованных источников

1. Ральников П.А., Абаимов Н.А., Рыжков А.Ф. Численное исследование процесса газификации в пилотном кислородном поточном газификаторе / П.А. Ральников, Н.А. Абаимов, А.Ф. Рыжков // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: материалы науч.-практ. конф. – Екатеринбург: УрФУ, 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 CO<sub>2</sub> 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., Абаимов 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. Vol. 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. Абаимов Н.А., Рыжков А.Ф. Разработка модели поточной газификации угля и отработка аэродинамических механизмов воздействия на работу газогенераторов // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 3.

УДК 621.746.27.047.669.041:596.24

**Н. А. Краюшкин, И. А. Прибытков, К. С. Шатохин**

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»», г. Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ НА КАЧЕСТВО НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК

### Аннотация

*В статье изложены результаты исследования влияния неоднородности граничных условий на интенсивность охлаждения металла в процессе непрерывной разливки цилиндрических заготовок из антикоррозионных марок сталей. Предполагается, что граничные условия неоднородны по периметру заготовки и между соседними зонами по периметру заготовки имеются перетоки теплоты. Приводится сравнительный анализ градиентов температур и возникающих термических напряжений в затвердевающей заготовке при различных интенсив-*