



УДК 662.76

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИССОЦИИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПОТОЧНОМ КИСЛОРОДНОМ ГАЗИФИКАТОРЕ

## NUMERICAL STUDY OF THE CARBON DIOXIDE DISSOCIATION INFLUENCE IN OXYGEN ENTRAINED-FLOW GASIFIER

**Ральников Павел Андреевич**, магистрант каф. «Тепловые электрические станции», 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

**Абаимов Николай Анатольевич**, ассистент каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

**Pavel A.Ralnikov**, 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: ral-pavel@mail.ru. Ph.: +7(909)727-94-29.

**Nikolai A.Abaimov**, Assistant, Department «Thermal power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia.

**Аннотация:** В работе рассмотрена одна из технологий энерго- и ресурсосбережения в угольной энергетике, а именно поточная газификация твёрдого топлива в газификаторе - ключевом элементе парогазовой установки с внутрицикловой газификацией. Произведено численное моделирование отечественной установки ООО «НПО ЦКТИ» с использованием метода вычислительной гидродинамики CFD. Выполнено исследование процесса поточной газификации твердого топлива без учета и с учетом процесса высокотемпературной диссоциации углекислого газа. Описаны результаты исследования влияния процесса диссоциации углекислого газа в поточном кислородном газификаторе.

**Abstract:** One of the energy technologies and resource saving in coal-based energy considered in this work. Namely, entrained-flow gasifier, as a key element of combined-cycle plants with gasification. Numerical modeling of the national plant «NPO CKTI» carried out using computational fluid dynamics (CFD) method. The research of the entrained-flow gasification of solid fuel process was carried out without regard to and with due regard to high-temperature dissociate carbon dioxide process. The researches results of carbon dioxide dissociation process influence in oxygen entrained flow gasifier were described.

**Ключевые слова:** газификация; вычислительная гидродинамика; твёрдое топливо; кислородное дутьё; поточный газификатор.

**Keywords:** gasification; CFD; solid fuel; oxygen-blowing; entrained-flow gasifier.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее перспективных энергетических технологий является парогазовая установка с внутрицикловой газификацией (ПГУ-ВЦГ) угля. Наиболее важный узел данной установки – поточный газификатор, в котором происходит конверсия пылеугольной смеси в горючий синтез-газ. Для создания высокоэффективного поточного газификатора перспективной высокомошной ПГУ-ВЦГ необходимы глубокие экспериментальные и численные исследования. Зачастую для полного понимания процессов, происходящих в экспериментальных газификаторах, требуется

использовать определённые инструменты моделирования. Среди численных методов моделирования наиболее функциональным считается метод вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics) – CFD.

В высокотемпературных процессах, таких как кислородная газификация, наблюдается диссоциации углекислого газа. Исследование влияния данного процесса на эффективность кислородной газификации практически невозможно изучить инструментально. Именно поэтому решено исследовать влияние этого процесса с помощью CFD метода. Для исследования влияния диссоциации CO<sub>2</sub> была выбрана отечественная установка поточной

газификации твердого топлива ООО «НПО ЦКТИ» [1].

Цель работы – численное исследование влияния диссоциации углекислого газа на процесс поточной кислородной газификации на примере установки ООО «НПО ЦКТИ» с использованием CFD метода.

Для достижения цели необходимо решить ряд задач:

- 1) создать CFD модель, включающую в себя все необходимые подмодели;
- 2) произвести численное моделирование исследуемой установки без учета процесса диссоциации углекислого газа и с её учетом;
- 3) проанализировать полученные результаты и сделать выводы о протекании процесса диссоциации CO<sub>2</sub> во время поточной кислородной газификации.

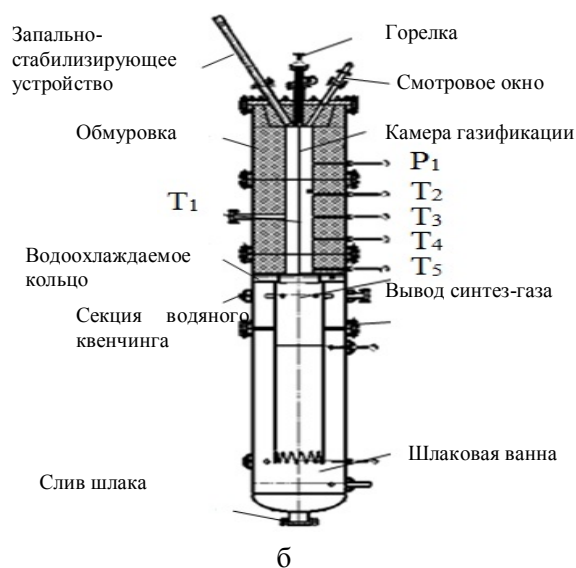


Рис. 1. Одноступенчатый газификатор ЦКТИ

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Газификатор представляет собой вертикально расположенный сосуд под давлением, в верхней части которого расположена камера газификации диаметром 0,21 м и высотой 1,6 м. В нижней части – камера охлаждения (секция водяного квенчинга и шлаковая ванна). Части соединены друг с другом водоохлаждаемым кольцом.

В верхнем торце газификатора установлены запально-стабилизирующее устройство, комбинированная прямоточная пылегазовая горелка и смотровое окно. Подогрев дутья до 350-550°C осуществляется в электронагревателе мощностью 10 кВт.

В камеру газификации подаётся угольная пыль и газ-реагент, в качестве которого может выступать воздух, кислород, пар и их смеси. Часть топлива сгорает создавая необходимый для процесса газификации уровень температур, а часть топлива газифицируется. Синтез-газ, после камеры газификации поступает в камеру охлаждения, где охлаждается водой поступающей из форсунок до температуры 900-1100°C. В процессе охлаждения происходит грануляция шлака и оседание его в шлаковой ванне. Очистка синтез-газа от твердых частиц и его охлаждение до температуры не более 300°C происходит в процессе барботажа газа через воду в шлаковой ванне.

Моделируемый режим работы данной установки приведен в Таблице 1.

Таблица 1

Моделируемый режим работы газификатора

Параметр	Значение
Расход топлива, кг/ч	12
Марка топлива	Кузнецкий каменный уголь марки Д
Транспортирующий агент	Азот
Расход транспортирующего агента, м <sup>3</sup> /ч	1,2
Температура транспортирующего агента, °С	25
Состав дутья, об. %	O <sub>2</sub> = 96 N <sub>2</sub> =4
Расход дутья, м <sup>3</sup> /ч	12,7
Температура дутья, °С	522
Рабочее давление, МПа	0,32

### ПРОЦЕСС МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для расчета скоростных параметров движения потока внутри газификаторов использовалась модель турбулентности k-ε стандартного вида. Выбор данной модели был обусловлен характером движения рабочей среды. При моделировании физико-химических процессов в газификаторе использовалась диффузионно-кинетическая модель, модель радиации Discrete Transfer Model, модель взвешенной суммы серых газов, модель движения угольных частиц, и другие. Для упрощения моделирования стенка принималась адиабатной, что, очевидно, завышало получаемые температуры и ускоряло реакцию диссоциации.

Геометрия газификатора ЦКТИ обладает лучевой симметрией из-за восьми отверстий выхода окислителя в форсунке горелки. Именно поэтому для моделирования установки был выбран сегмент в 45°, а исследование сетки показало возможность получения достоверных результатов на сетке в 180 тысяч элементов. Это позволило оптимизировать вычислительный процесс и сократить время расчёта.

**ВЫБОР КОНСТАНТ ДИССОЦИАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА**

Исследованием процесса высокотемпературной диссоциации CO<sub>2</sub> занимаются различные авторы [2,3]. Уравнение процесса диссоциации выглядит следующим образом:



Поскольку константы процесса диссоциации в различных источниках отличаются, то для добавления процесса диссоциации в расчетную модель CFD необходимо выбрать наиболее оптимальные. Константы диссоциации углекислого газа, приводимые авторами [2] и [3] приведены в Таблице 2. Константы приведены для расчёта скорости реакции (K) по формуле:

$$K = A T^m \exp(-E/RT),$$

где A - предэкспоненциальный множитель, 1/с; T - температура реагирующей смеси, K; m - показатель степени температуры; E - энергия активации Дж/моль; R - универсальная газовая постоянная.

Таблица 2  
Константы диссоциации CO<sub>2</sub>

Константа	K1[2]	K2[3]
A, 1/с	4,39*10 <sup>-7</sup>	1,04*10 <sup>-7</sup>
m	0	1,91
E, кДж/моль	540,1	546,7

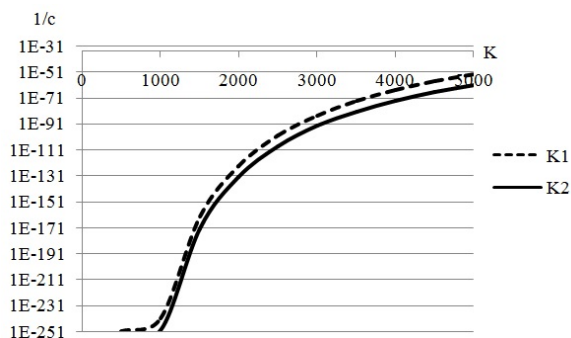


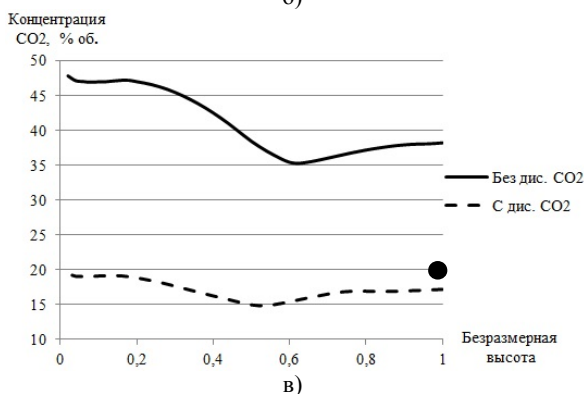
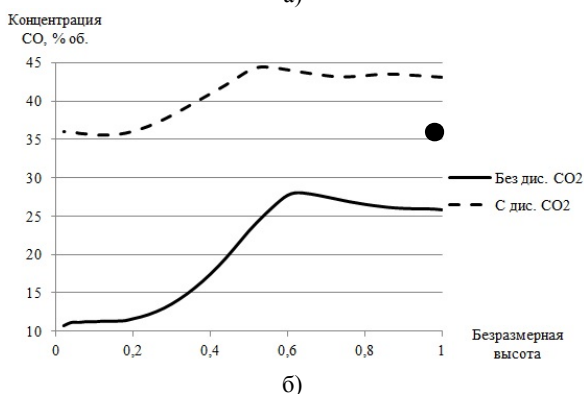
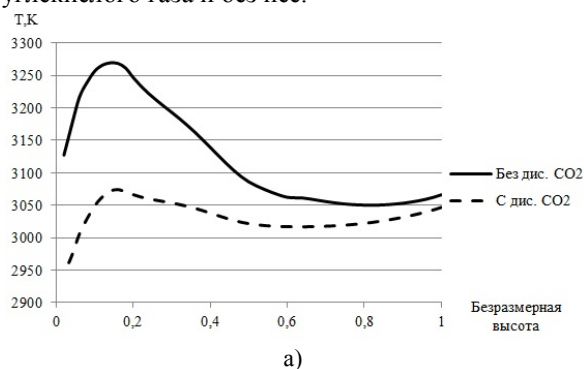
Рис. 2. Процесс диссоциации при различных температурах.

По рис. 2 мы можем наблюдать, что диссоциация углекислого газа протекает практически с

одинаковой скоростью при этих двух наборах констант. Поэтому выбор падает на наиболее "простой" набор [2], который позволяет учитывать температуру при расчёте скорости один раз, а не два.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ДИССОЦИАЦИИ CO<sub>2</sub> НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Для того, чтобы исследовать влияние процесса диссоциации углекислого газа были построены графики распределения основных параметров по высоте газификатора для случая с диссоциацией углекислого газа и без нее.



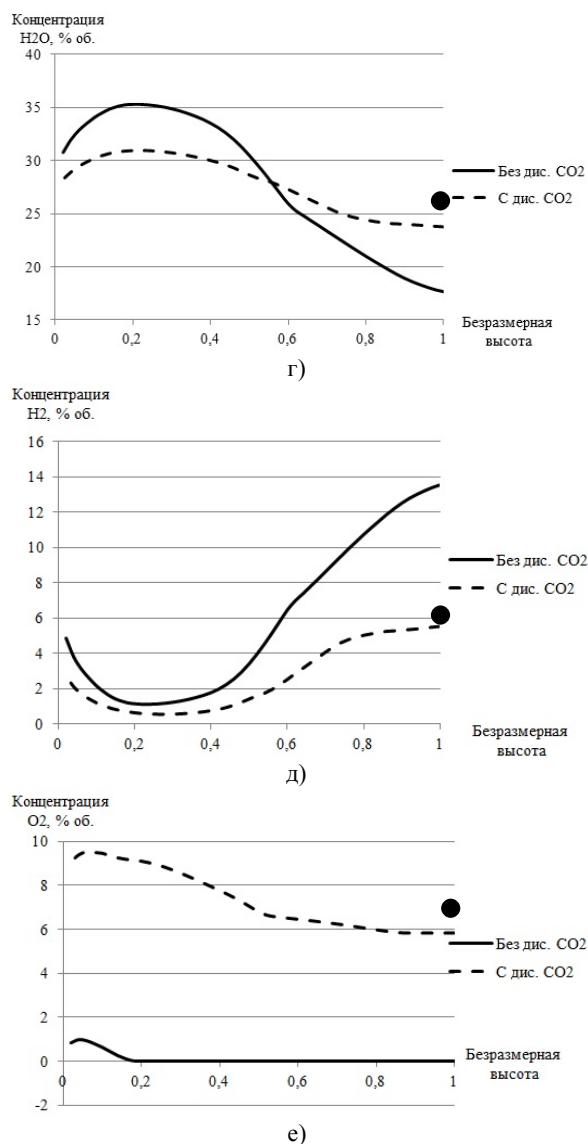


Рис. 3. Распределение параметров по высоте газификатора с диссоциацией  $\text{CO}_2$  и без нее: а) температура; б) объемная концентрация  $\text{CO}$ ; в)  $\text{CO}_2$ ; г)  $\text{H}_2\text{O}$ ; д)  $\text{H}_2$ ; е)  $\text{O}_2$ .

Анализируя полученные графики (рис.3) можно наблюдать, что процесс диссоциации углекислого газа значительно влияет на процесс поточной кислородной газификации. Как и предполагалось, средняя температура по сечению (рис. 3а) снизилась, особенно это заметно в первой половине установки, где располагается высокотемпературный факел.

На графиках распределения объемных концентраций  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  (рис. 3б и 3в) видно, что содержание углекислого газа на выходе из газификатора снизилось с 38% до 17%, а содержание угарного газа на выходе из установки увеличилось с 26% до 43%. Факт того, что снижения процентного содержания  $\text{CO}_2$  выше, чем повышение содержания  $\text{CO}$  говорит о том, что процесс газификации влияет не только на

содержание  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ .

К примеру, содержание водорода (рис. 3д) можно обусловить увеличением углеродосодержащих газов в составе. Если же говорить о процентом содержании кислорода, то в виду того, что  $\text{O}_2$  является продуктом реакции диссоциации его содержание увеличивается, что так же говорит о протекании реакции диссоциации углекислого газа.

Для понимания полноты протекания реакций на графики нанесены точки с равновесными концентрациями при данной температуре. Очевидно, что моделирование с учётом реакции диссоциации даёт результаты близкие к равновесию.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численное исследование влияния диссоциации углекислого газа на процесс поточной кислородной газификации показало, что диссоциация  $\text{CO}_2$  является важным элементом процесса кислородной высокотемпературной газификации. Диссоциация  $\text{CO}_2$  снижает температуру процесса, и особенно сильно влияет на содержание  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ , и  $\text{O}_2$ . Данное исследование показало, что нельзя пренебрегать процессом диссоциации  $\text{CO}_2$  при моделировании процесса кислородной газификации.

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

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абаимов Н.А., Шурчалин А.А., Шестаков Н.С., Осипов П.В., Рыжков А.Ф. Экспериментальное и численное исследование поточной газификации угля при повышенном давлении и различных составах дутья // Материалы IX Всероссийской конференции с международным участием Горение топлива: теория, эксперимент, приложения (16–18 ноября 2015 г.) / Институт теплофизики СО РАН, г. Новосибирск. 2015. Электронное издание.
2. S.H.MorenoWandurruga. Reduced reaction kinetics model for  $\text{CO}_2$  dissociation in non-thermal microwave discharges: A non-equilibrium distribution averaged kinetic model for multidimensional simulations // Delft University of Technology, Process & Energy, Faculty 3mE Intensified Reactions & Separation Systems. 2015.
3. J. Annaloro1, A.Bultel, P. Omary. Detailed kinetic of  $\text{CO}_2$  dissociation and C ionization: application to atmospheric Martian entries // Journal of Physics: Conference Series 511. 2014.