



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 числительные 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 CO₂ 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_2 во время поточной кислородной газификации.

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.

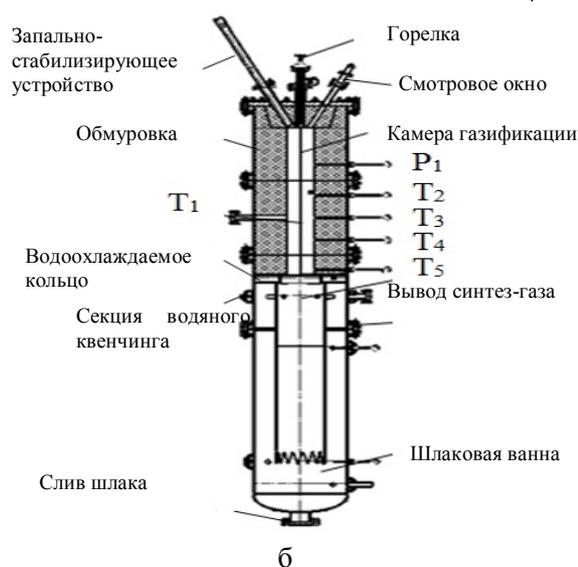


Рис. 1. Одноступенчатый газификатор ЦКТИ

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 ³ /ч	1,2
Температура транспортирующего агента, °С	25
Состав дутья, об. %	O ₂ = 96 N ₂ =4
Расход дутья, м ³ /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 CO₂ 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 CO₂

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

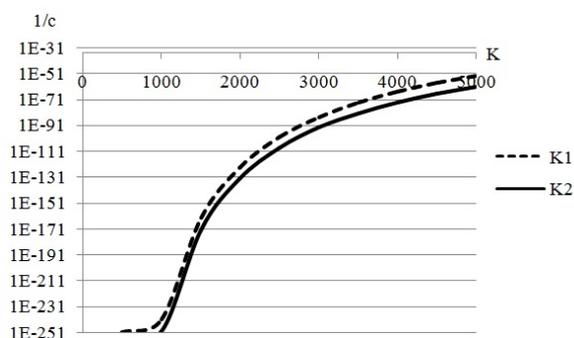


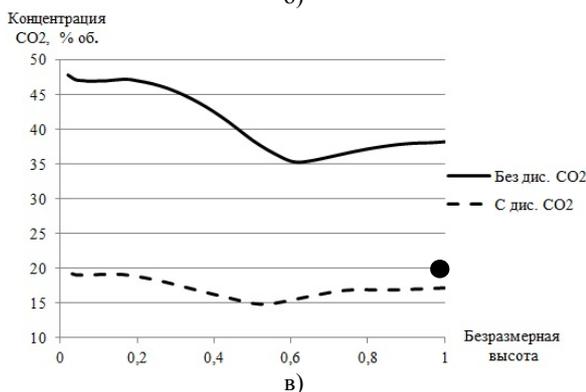
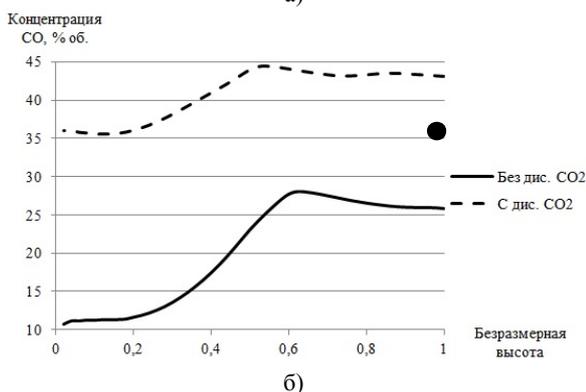
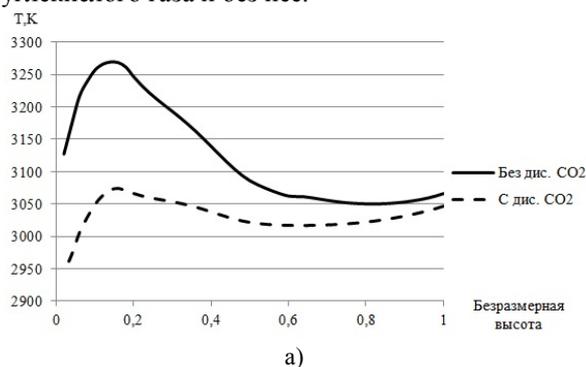
Рис. 2. Процесс диссоциации при различных температурах.

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 CO₂ 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.



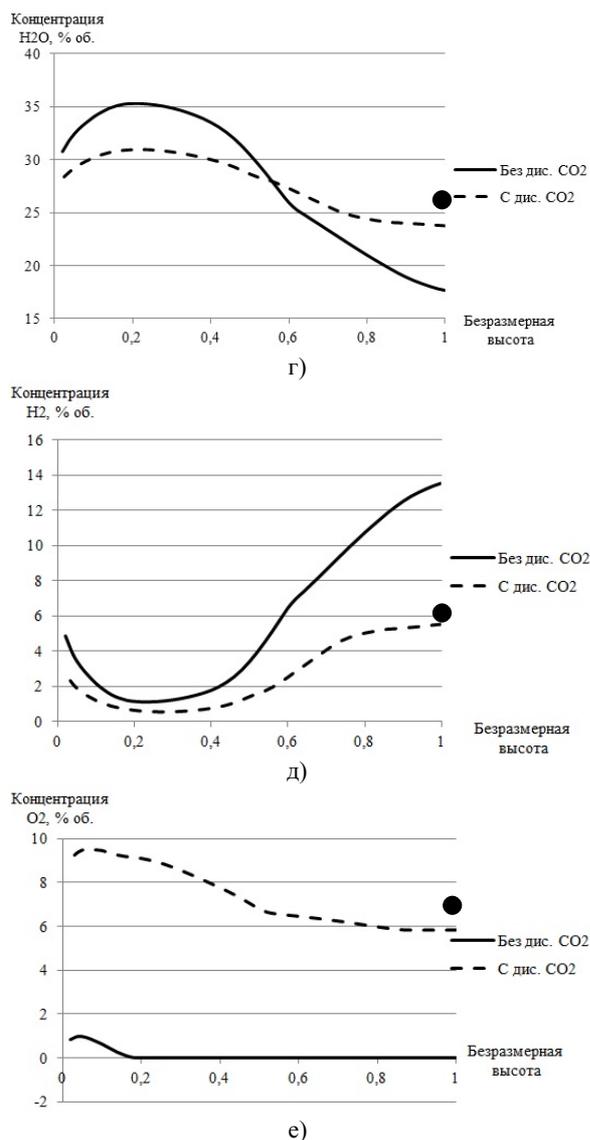


Рис. 3. Распределение параметров по высоте газификатора с диссоциацией CO_2 и без нее: а) температура; б) объемная концентрация CO ; в) CO_2 ; г) H_2O ; д) H_2 ; е) O_2 .

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 CO и 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 CO_2 выше, чем повышение содержания CO говорит о том, что процесс газификации влияет не только на

содержание CO и 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 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 CO_2 является важным элементом процесса кислородной высокотемпературной газификации. Диссоциация CO_2 снижает температуру процесса, и особенно сильно влияет на содержание CO , CO_2 , H_2 , и O_2 . Данное исследование показало, что нельзя пренебрегать процессом диссоциации 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 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 CO_2 dissociation and C ionization: application to atmospheric Martian entries // Journal of Physics: Conference Series 511. 2014.