



УДК 620.178.16;66.045.12

## СОСТАВЛЕНИЕ МОДЕЛИ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА ПОВОРОТНОЙ КАМЕРЫ ГАЗООХЛАДИТЕЛЯ ПГУ-ВЦГ В ПАКЕТЕ CFD

## THE CFD MODELING OF THE EROSION WEAR OF THE GAS REVERSING CHAMBER OF A SYNGAS COOLER FOR A IGCC PROCESS

**Масленников Георгий Евгеньевич**, магистрант каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: g26m12@gmail.com. Тел.: +7(912)289-13-16

**Микула Владимир Анатольевич**, канд. техн. наук, доцент каф. «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: mikoula@yandex.ru. Тел.: +7(912)664-87-89

**Georgy E. Maslennikov**, Master student, Department «Thermal Power Plant», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: g26m12@gmail.com. Ph.: +7(912)647-66-10

**Vladimir A. Mikula**, Candidate of Engineering Sc., Associate Prof., Department «Thermal power plants», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: mikoula@yandex.ru. Ph.: +7(912)664-87-89

**Аннотация:** В данной работе проводится численное моделирование поворотной камеры конвективного газоохладителя (ГО) парогазовой установки с внутрицикловой газификацией угля (ПГУ-ВЦГ) по схеме Shell с помощью программного пакета CFD. Основной целью является верификация модели эрозионного износа, которую в дальнейшем планируется использовать для детального расчета эрозии поверхностей ГО. Сравнивая полученные результаты с аналогом, делается вывод, что верификация модели не закончена: полученные скорости эрозии занижены приблизительно в 2 раза, отсутствует область эрозии у противоположной от входа стенки поворотной камеры. Далее планируется усложнить модель при помощи пористой поверхности, которая бы имитировала сопротивление всей длины ГО.

**Abstract:** Numerical modeling of the gas reversing chamber of a convection gas cooler for the Shell integrated gasification combined cycle (IGCC) process is carried out using the CFD software. The main scope is the verification of the abrasive wear model, which is planned to be used for detailed simulation of erosion of syngas cooler surfaces. Comparing the results with the analogue, it is concluded that the verification of the model is not completed. The obtained erosion rates are underestimated by approximately 2 times. There is no erosion region at the opposite side of the gas reversing chamber. The next step is to complicate the model with a porous surface that specifies the pressure drop of the entire length of the gas cooler.

**Ключевые слова:** ПГУ-ВЦГ; конвективный газоохладитель; поворотная камера; эрозионный износ; CFD.  
**Key words:** IGCC; convective gas cooler; gas reversing chamber; erosion wear; CFD.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время парогазовая установка с внутрицикловой газификацией угля (ПГУ-ВЦГ) рассматривается как перспективная технология для производства электроэнергии, обеспечивающая более высокий КПД и более масштабное снижение выбросов CO<sub>2</sub> в противовес прямому сжиганию твердого топлива. Однако по техническим показателям такие установки ещё далеки от совершенства. Одним из путей повышения эффективности ПГУ-ВЦГ является применение теплообменных аппаратов – газоохладителей (ГО) для утилизации физической

теплоты синтез-газа, полученного в газогенераторе. Оптимальной считается двухступенчатая компоновка ГО, где на первой стадии (охлаждение до температуры затвердевания шлака) возможно применение трех способов охлаждения: газовый, химический, радиационная рекуперация, на второй стадии возможна только конвективная рекуперация [1]. По нашему мнению, наиболее перспективной является конструкция конвективного ГО с трубными мембранными спиралями.

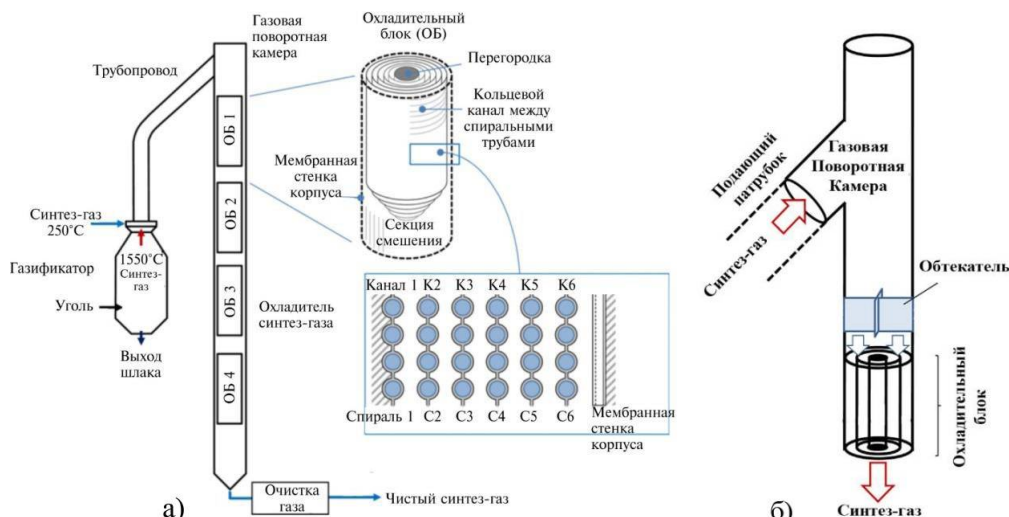


Рис. 1. Схема газификационного блока с конвективным газоохладителем и поворотной камерой ПГУ-ВЦГ схемы Shell

### ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

На рис. 1 изображен газификационный блок ПГУ-ВЦГ схемы Shell [2]. Синтез-газ после первой ступени охлаждения при помощи газорециркуляции поступает во вторую конвективную ступень через поворотную камеру. В ней поток газа резко разворачивается вниз и затем распределяется по каналам газоохладителя. Поверхности нагрева конвективного ГО подвержены газовой коррозии, абразивному износу и загрязнению. Абразивный износ, вызываемый потоком твердых частиц, также называется эрозийным износом или эрозией.

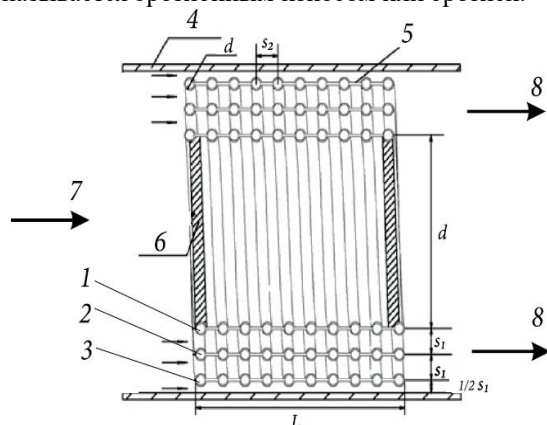


Рис. 2. Охлаждающий блок конвективного ГО со спиралевидными трубами: 1-3 – мембранные спирали; 4 – корпус; 5 – мембрана; 6 – перегородка; 7,8 – вход и выход синтез-газа

В данной работе для получения характеристик потока синтез-газа с шлаковыми частицами на входе в конвективный ГО был выполнен расчет поворотной камеры в программном пакете CFD. Синтез-газ поступает в поворотную камеру по расположенному под углом в 45° подающему патрубку с диаметром 1,6 м. Затем в поворотной

камере с диаметром 1,9 м и высотой 9,4 м поток разворачивается вниз и поступает в первую секцию конвективного ГО, состоящую из 6 мембранных трубных спиралей. На 0,7 м выше ГО установлен крестообразный обтекатель (рис. 1 б) [2]. Наружный диаметр труб  $d = 66$  мм; относительный шаг между витками спирали  $s_2/d = 2$ ; расстояние от оси труб внешней спирали до корпуса  $0,5s_2$ ; центральная часть внутренней спирали закрыта перегородкой (рис. 2) [6]. Поскольку данная работа не сосредоточена на исследовании характеристик газа в каналах газоохладителя, для упрощения расчета спирали смоделированы в виде цилиндрических поверхностей.

Таблица 1.

Исходные данные		
Синтез газ	Параметры	Величина
Синтез газ	массовый расход, кг/с	113,1
	температура, °C	782
	рабочее давление (абс.), бар	43
	CO (% об.)	59,2
	CO <sub>2</sub> (% об.)	5,1
	H <sub>2</sub> (% об.)	28,5
Шлак	N <sub>2</sub> (% об.)	7,2
	массовый расход, кг/с	1,83
	плотность, кг/м <sup>3</sup>	2800
	количество частиц	44632

Расчетная модель состоит из газовой среды и твердых частиц. В табл. 1 представлены основные начальные параметры синтез-газа [2]. Диаметр частиц варьируется от 2 до 100 мкм, их плотность 2800 кг/м<sup>3</sup>. Турбулентность учитывается с использованием k-ε модели. Расчетная сетка выполнена гексаэдрической с количеством ячеек 1600740. Значения детерминанта 3x3x3 составляют более 0,85 для 97% клеток, а самое

низкое значение было 0,67, что указывает на то, что сетка достаточно регулярна. Минимальный внутренний угол составляет более 60° для 90% клеток, а наименьшее значение - около 32°. Косые клетки были обнаружены вблизи соединения подающего патрубка и самой поворотной камеры. Как правило, для большинства решателей приемлемыми считаются минимальный угол более 18° и детерминант, превышающий 0,2 [2].

На скорость эрозии влияет большое число параметров: угол падения; скорость удара; твердость, форма и размер частицы; твердость и прочность материала мишени и др. [3]. По этой причине существует порядка 30 моделей эрозии, разработанных для конкретных специфических условий и рассматривающих различные параметры [4].

Для расчета эрозии была принята модель Табакова-Гранта (Tabakoff-Grand) [5]:

$$E = f(\beta) \left( \frac{V}{V_1} \right)^2 \cos^2 \beta (1 - R_T^2) + f(V_N), \quad (1)$$

$$f(\beta) = 1 + C_K K_{12} \sin \left( \beta \frac{90}{\beta_0} \right), \quad (2)$$

$$R_T = 1 - \frac{V}{V_3} \sin \beta, \quad (3)$$

$$f(V_N) = \left( \frac{V}{V_2} \sin \beta \right)^4, \quad (4)$$

где  $E$  – скорость эрозии, определяется как отношение потери массы преграды к массе ударяющих частиц, мг/кг;  $V$  – скорость соударения, м/с;  $\beta$  – угол падения частиц в градусах;  $\beta_0$  – угол падения частиц, при котором достигается максимальная скорость эрозии;  $C_K$  – коэффициент восстановления при ударе в тангенциальном направлении,  $C_K = 0$  при  $\beta \leq 3\beta_0$  и  $C_K = 1$  при  $\beta > 3\beta_0$ ;  $K_{12}$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  – эмпирические константы. В нашем случае для стальной поверхности, подверженной воздействию частиц угольной золы, эмпирические константы в соответствии с [7] равны:  $K_{12} = 0,296077$ ;  $V_1 = 248,4$  м/с;  $V_2 = 203,8$  м/с;  $V_3 = 198,8$  м/с;  $\beta_0 = 25^\circ$ .

Данная модель обладает следующими преимуществами [3]:

- разработана для эрозии стальных поверхностей частицами летучей золы; применима к малым, промежуточным и большим углам падения, а также их сочетанию;
- прогнозируемые результаты находятся в хорошем согласии с измерениями;

- нет зависимости скорости эрозии при разном содержании углерода в углеродистой стали.

РЕЗУЛЬТАТЫ

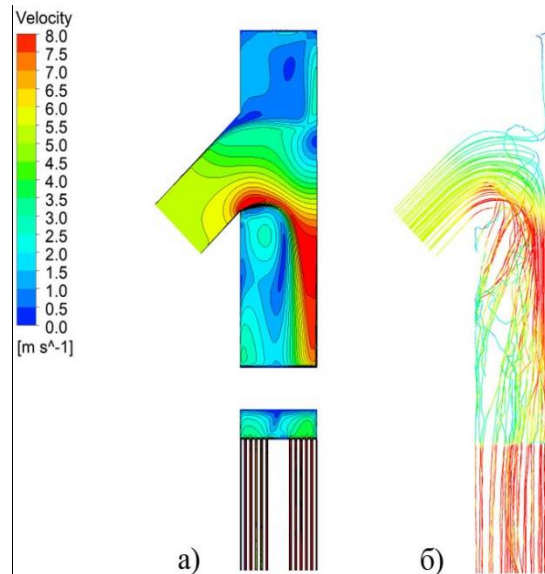


Рис. 3. Скорости синтез-газа и частиц в поворотной камере

На рис. 3а показано поле скоростей газа по сечению поворотной камеры. Можно видеть, что поток распределяется неравномерно: основная часть прилегает к противоположной от входа стенке, в этой области скорость достигает 8 м/с, что превышает скорость газа на входе – 5,5 м/с. Как следствие, неравномерно распределяется поток частиц по каналам ГО (рис. 3б), это также приводит к более интенсивному износу поверхностей ГО, расположенных у дальней от входа стенки (рис. 4), здесь скорость эрозии соответствует 0,26 мм/год. Также эрозии подвержено место соединения подающего патрубка и поворотной камеры (рис. 4б).

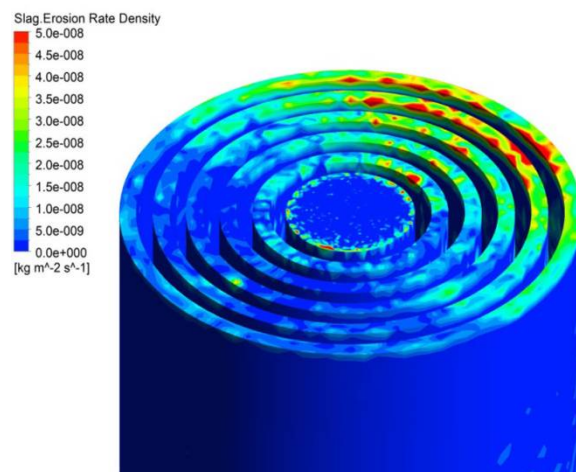


Рис. 4. Распределение скорости эрозии на входной поверхности ГО

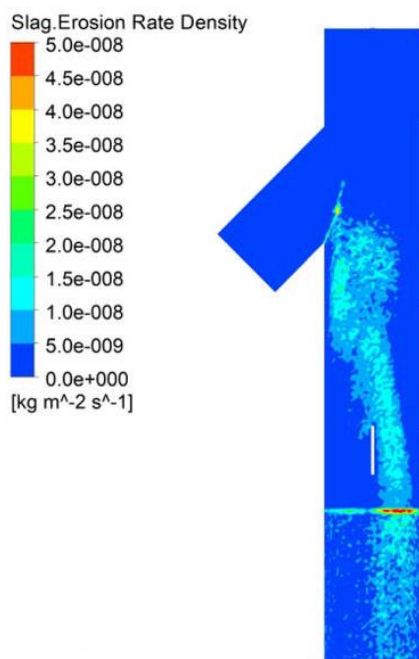


Рис. 5. Распределение скорости эрозии на стенках поворотной камеры

Сравнивая полученные результаты с аналогичной работой корейских ученых [2], можно сделать вывод, что верификация модели не закончена: отсутствует область эрозии у дальней стенки, полученные скорости эрозии занижены приблизительно в 2 раза (0,44 мм/год). Предположительно это вызвано ошибкой в моделировании потока синтез газа, в нашем расчете в отличие от аналога не было учтено сопротивление всей длины ГО.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следующим шагом планируется усложнить модель при помощи пористой поверхности, которая бы имитировала сопротивление всей длины газоохладителя. Надеемся, что это позволит закончить верификацию модели поворотной камеры и приступить к целевому

расчету абразивного износа поверхностей газоохладителя.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализ технологических решений для ПГУ с внутрицикловой газификацией угля: монография / Н.А. Абаимов, И.Б. Амарская, В.С. Белоусов [и др.] / под ред. А.Ф. Рыжкова. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 564 с.
2. Sangbin P., In-Soo Y., Junho O., Changkook R. Gas and particleflow characteristics in the gas reversing chamber of a syngas cooler for a 300 MWe IGCC process // Applied Thermal Engineering.– 2014. – №70. – P. 388–396
3. Li M.J., Tang S.Z., Wang F.L., Zhao Q.X., Tao W.Q. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchangers for middle/low temperature waste heat utilization: A review on simulation and experiment // Applied Thermal Engineering. 2017. № 126. P. 737–761.
4. Parsi M., Najmi K., Najafifard F., Hassani S., McLaury B.S., Shirazi S.A. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications // J. Nat. Gas Sci. Eng. 2014. № 21. P. 850–873.
5. Маслеников Г.Е., Марчкова Ю.А., Микула В.А. Анализ механизмов эрозии в газоохладителе ПГУ-ВЦГ // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 11–15 декабря 2017 г.). — Екатеринбург : УрФУ, 2017. — С. 270-273.
6. Junho O., In-Soo Y., Sangbin P., Changkook R., Sung Ku P. Modeling and analysis of a syngas cooler with concentric evaporator channels in a coal gasification process // Korean J. Chem. Eng.– 2014. – №31(12). –P. 2136–2144.
7. Tabakoff W., Kotwal R., Hamed A. Erosion study of different materials affected by coal ash particles // Wear. 1979. № 52. P. 161–173.