



УДК 621.313.3

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТРАНСПОРТНОГО РЕАКТОРА ГОРЯЧЕЙ
СЕРООЧИСТКИ****NUMERICAL SIMULATION OF HOT
DESULFURIZATION TRANSPORT REACTOR**

Каграманов Юрий Александрович, аспирант каф. «Теплотехника и теплоэнергетика», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: KagramanovYA@yandex.ru, Тел.: +7(912)245-75-32

Курбанов Тимур Сабурович, магистрант каф. «Теплотехника и теплоэнергетика», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: kurbanov.t.94@yandex.ru, Тел.: +7(992) 016-21-40

Тупоногов Владимир Геннадьевич, д-р. техн. наук, профессор каф. «Теплотехника и теплоэнергетика», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.g.tuponogov@urfu.ru. Тел.: 375-45-67

Yuri A. Kagramanov, post graduated student, Department «Heat power and Heat power engineering», Ural Federal University, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: KagramanovYA@yandex.ru. Ph.: +7(912)245-75-32

Timur S. Kurbanov, student, Department «Heat power and Heat power engineering», Ural Federal University, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: kurbanov.t.94@yandex.ru. Ph.: +7(992)016-21-40

Vladimir G. Tuponogov, Doctor Sc., Prof., Department «Heat power and Heat power engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.g.tuponogov@urfu.ru. Ph.: 375-45-67

Аннотация: Разработана модель расчета транспортного реактора для сухой горячей сероочистки синтез газа от сероводорода при помощи сорбентов на основе окиси цинка. В ходе расчетов была определена зависимость порозности слоя в многофазном потоке от соотношения расхода газа к расходу сорбента при скорости потока 5 м/с. Была получена зависимость высоты реактора от основных входных параметров а так же определена критическая высота реактора.

Abstract: The model of hot desulfurization transport reactor was presented. Hydrogen sulfide was removing from syngas by sorbents based on zinc oxide. The function of dependence between volume fraction of solid phase in multiphase flow and relation of gas flow rate and sorbent flow rate was defined for flow velocity 5 m/s. The dependence of reactor height from main input parameters was presented, and critical reactor height was found.

Ключевые слова: сухая горячая сероочистка; синтез газа; CFD.

Key words: dry hot desulfurization; syngas; CFD.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых узлов схемы ПГУ с ВЦГ (парогазовые установки с внутрицикловой газификацией) является блок сероочистки. На сегодняшний день известны два основных вида систем сероочистки: холодная мокрая и горячая сухая.

Теоретические и расчетные данные показывают однозначное преимущество горячей сероочистки перед холодной, что можно видеть из табл. 1, построенной на основе данных [1, 2].

Таблица 1.
Сравнение КПД нетто ПГУ с кислородной и воздушной ВЦГ при использовании разных систем сероочистки

Система сероочистки	КПД, %
Холодная мокрая с кислородным дутьем	45,5
Холодная мокрая с воздушным дутьем	47,0
Горячая сухая с кислородным дутьем	50,0
Горячая сухая с воздушным дутьем	51,5

Проведенные ранее исследования кинетических характеристик процесса поглощения сероводорода оксидом цинка позволили оценить скорость реакции при разных температурных режимах [3]. Полученные данные были использованы в описанных в данной статье расчетах транспортного реактора.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСПОРТНОГО РЕАКТОРА

Рассматривался реактор с донной подачей газа через кольцевой зазор. Через квадратное отверстие длиной стороны 0,16 – 0,6 м подавался сорбент. Порозность сорбента на входе составляла 0,5, скорость подачи газа и сорбента составляла 5 м/с. Отношение массового расхода сорбента к расходу газа колебалось в пределах 5,78 – 12,6. Плотность частиц сорбента составляла 5610 кг/куб.м, размер частиц 80 мкм. Значение минимальной порозности плотного слоя сорбента составляло 0,63.

МЕТОД РАСЧЕТА МНОГОФАЗНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

Моделирование многофазного потока осуществлялось при помощи встроенного в CFD пакет решателя. Твердая среда представлялась уравнением Навье-Стокса и решалась методом Эйлера. Использовалась неявная конечно-разностная схема. Трение между газом и частицами, а так же между частицами рассчитывалось по уравнениям Гидаспова. В связи

с поточной схемой (отсутствие циркулирующей массы твердой фазы внутри рассматриваемого объема) была применена стационарная постановка решения задачи. Теплообмен между фазами проходил по закону Гуна.

МЕТОД РАСЧЕТА ВЫСОТЫ РЕАКТОРА

Исследования динамики окиси цинка показали, что 17 мг окиси цинка могут прореагировать полностью при избытке сероводорода за 20 минут. Если частица оксида цинка влетает в 56 метровый реактор со скоростью 5 м/с, то она преодолет это расстояние за 11 с. $11 \text{ с} \ll 20 \text{ мин}$, поэтому, если считать, что в реактор подается только чистый сорбент, а доля частиц задержавшихся в нем более 20 мин ничтожно мала, то можно предположить, что удельный расход сероводорода на реакцию с оксидом цинка одинаков по всей высоте реактора. Расход оксида цинка на реакцию приведенный к массе навески может быть вычислен, как

$$A_{ZnO} = 17 \frac{\text{мг}ZnO}{17\text{мг сорб.} \cdot 20 \cdot 60\text{сек.}} =$$

$$= 0,00083 \frac{\text{кг}ZnO}{\text{кг сорб.} \cdot \text{сек.}} \quad (1)$$

Расход сероводорода на реакцию приведенный к массе навески может быть вычислен, как

$$A_{H_2S} = 17 \frac{\text{мг}ZnO}{17\text{мг сорб.} \cdot 20 \cdot 60\text{сек.}} \cdot \frac{34}{81} =$$

$$= 0,00035 \frac{\text{кг}H_2S}{\text{кг сорб.} \cdot \text{сек.}} \quad (2)$$

CFD пакет оперирует переменной Source [кг/(куб.м*с)]. Переменная Source может быть выражена через приведенный расход сероводорода, как

$$S_{H_2S.1} = A_{H_2S} \cdot \rho_{ZnO} \cdot Vof =$$

$$= 0.00035 \cdot 5610 \cdot 0.6 = 1.18 \frac{\text{кг}H_2S}{\text{м}^3 \cdot \text{с}} \quad (3)$$

$$S_{H_2S.2} = A_{H_2S} \cdot \rho_{ZnO} \cdot Vof =$$

$$= 0.00035 \cdot 5610 \cdot 0.3 = 0.6 \frac{\text{кг}H_2S}{\text{м}^3 \cdot \text{с}} \quad (4)$$

Таким образом, приведенное поглощение сероводорода в кольцевом объеме будет равно 1,18 кг/(куб.м*с), а во внутреннем объеме всего 0,6 кг/(куб.м*с).

Отношение расхода сорбента к расходу сероводорода

$$\alpha_1 = \frac{G_s}{G_{H2S}} = \frac{G_s}{mf_{H2S} G_G} = \frac{\alpha}{mf_{H2S}} \quad (5)$$

Расход газа, поглощаемый сорбентом

$$G_{H2S}^P = k_{H2S} \cdot Vof \cdot \rho_{ZnO} \cdot H \cdot s \quad (6)$$

Зависимость высоты реактора от входных параметров

$$H = \frac{G_{H2S}^P}{k_{H2S} \cdot Vof \cdot \rho_{ZnO} \cdot s} = \frac{G_{H2S}^P}{k_{H2S} \cdot \frac{\alpha_1 - 2821.3}{27894} \cdot \rho_{ZnO} \cdot s} = \frac{G_G \cdot mf_{H2S} \cdot 27894}{k_{H2S} \cdot (\alpha_1 - 2821.3) \cdot \rho_{ZnO} \cdot s} \quad (7)$$

СВОЙСТВА СИНТЕЗ ГАЗА

Синтез газ, получаемый в газогенераторе, поступает в блок горячей сероочистки с температурой 650 °С и избыточным давлением в 29 атм. Расход синтез газа составляет 71,69 кг/с. Состав синтез газа представлен в табл. 2.

Таблица 2.

Состав синтез газа

Название компонента	Объемная доля компонента в синтез газе, %
Монооксид углерода, CO	31,22
Диоксид углерода, CO2	0,9861
Метан, CH4	0,3476
Водород, H2	17,71
Сероводород, H2S	0,074
Кислород, O2	0,00
Пар, H2O	1,171
Карбонил сульфид, COS	0,0042
Азот, N2	47,93
Аргон, Ar	0,5518

Плотность синтез газа составляла 6,33 кг/куб.м при 650 °С и 9,39 кг/куб.м при 350 °С.

РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ И СКОРОСТИ ВИТАНИЯ

Для нахождения скорости витания воспользуемся критерием Архимеда.

$$Ar = gd^3 \cdot (\rho_m / \rho_2 - 1) / \nu^2 = 9,81 \cdot 0,00008^3 (5610 / 6,33 - 1) / (7 \cdot 10^{-5})^2 = 1,021$$

$$Re_{kp} = \frac{Ar}{150(1 - \varepsilon_{kp}) / \varepsilon_{kp}^3 + \sqrt{1,75Ar / \varepsilon_{kp}^3}} = \frac{1,021}{150 \cdot (1 - 0,7) / 0,7^3 + \sqrt{1,75 \cdot 1,021 / 0,7^3}} = 0,0076$$

$$w_{kp} = \frac{Re_{kp} \cdot \nu}{d} = \frac{0,00767 \cdot 10^{-5}}{0,00008} = 0,0063 \text{ м/с} \quad (10)$$

Изменение величины w_{kp} при варьировании температуры зависит от размера частиц.

Для расчета скорости уноса частиц наиболее универсальной считается формула Годеса:

$$Re_y = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} = \frac{1,021}{18 + 0,61\sqrt{1,021}} = 0,055 \quad (11)$$

$$w_y = \frac{Re_y \cdot \nu}{d} = \frac{0,055 \cdot 7 \cdot 10^{-5}}{0,00008} = 0,045 \text{ м/с}.$$

РАСЧЕТ ЗАВИСИМОСТИ ПОРОЗНОСТИ ОТ ОТНОШЕНИЯ РАСХОДА СОРБЕНТА К РАСХОДУ ГАЗА

В ходе численного моделирования определялись контуры порозности твердой фазы в объеме реактора при разных режимах работы. Результаты сводились в табл. 3.

Таблица 3.

Зависимость порозности от отношения расходов сорбента и газовой смеси при скорости двухфазного потока 5 м/с

α	$Vof = 1 - \varepsilon$
5.78	0.037
12.6	0.2

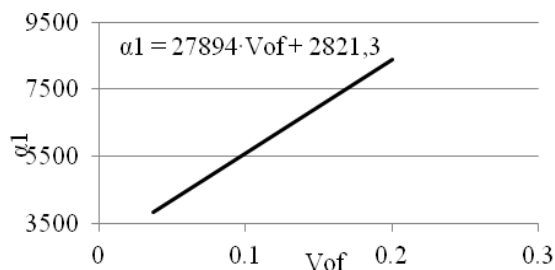
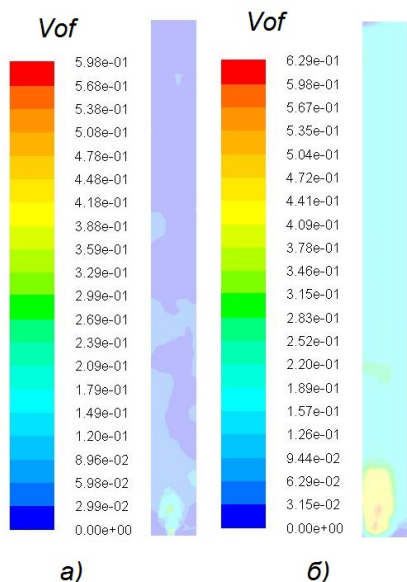


Рис. 1. Зависимость $\alpha_1 = f(Vof) = g(\varepsilon)$



Расчет показал, что средняя порозность в случае а) равняется 0,037, и 0,2 - в случае б), рис. 2

РАСЧЕТ ВЫСОТЫ РЕАКТОРА

Результаты расчетов выполненных по формуле (7) представлены в Табл. 4.

Таблица 4.

Зависимость высоты реактора от отношения расходов сорбента и газа при скорости двухфазного потока 5 м/с

H, м	α
0,66	5,78
0,12	12,6

Рис. 2. Контурсы порозности а) при стороне 0,16 м
б) при стороне 0,6 м

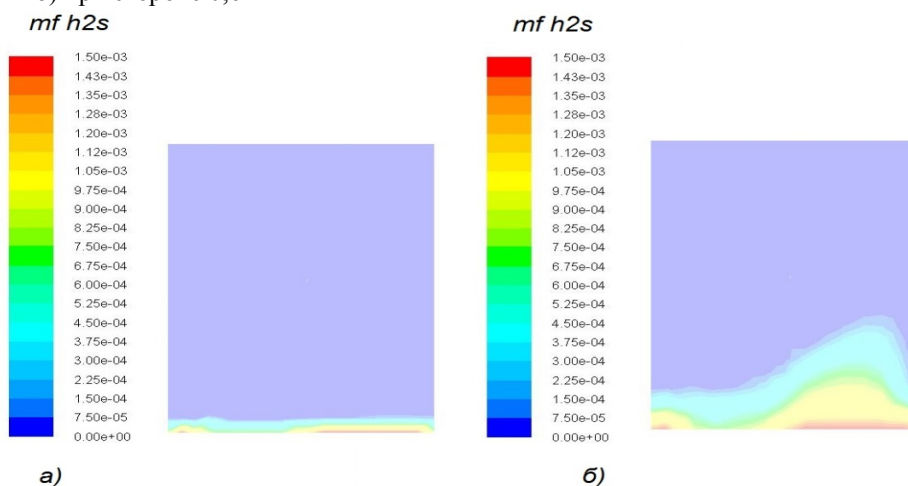


Рис. 3. Контурсы концентрации сероводорода в газе. а) соответствует соотношению расхода сорбента к расходу газа 12 б) и 0,66 метров при соотношении расходов 5,78

РАСЧЕТ КОНТУРОВ СОДЕРЖАНИЯ СЕРОВОДОРОДА В ГАЗЕ

CFD моделирование подтвердило аналитические расчеты высоты реактора. Из Рис. 3 видно, что содержание сероводорода падает до нуля на отметке 0,12 метров случае

ВЫВОДЫ

Численное моделирование реактора позволило оценить порозность потока твердой фазы в исследуемом участке реактора при скорости потока газа и потока твердой фазы 5 м/с. Исходя из полученных данных, выведена зависимость высоты реактора от соотношения расхода твердой фазы к расходу газа, а так же вычислена критическая высота реактора, уровень на котором содержание удаляемого компонента в газе стремится к нулю.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Giuffrida, A., Romano M.C., Lozza G. Efficiency enhancement in IGCC power plants with air-blown gasification and hot gas cleanup, Energy, 53 (2013), pp. 221-229
- Строков А.А. Повышение эффективности паргазовых установок с газификацией углей за счет высокотемпературной сероочистки генераторного газа с применением природного хемсорбента // Электрические станции. 2016. № 6. С.22-27.
- Каграманов Ю. А., Тупоногов В. Г., Рыжков А.Ф. Разработка системы глубокой сероочистки синтез-газов // Вестник Южно-Уральского государственного университета, 2016, Т-16, №4, с.5-10.