

- океан : Підруч. — Миколаїв : Нац. ун-т кораблебудування, 2007. — 596 с.
2. Mench M. Fuel Cell Engines. — New Jersey : John Wiley & Sons, 2008. — 515 p.
 3. Fuel cell ship in the real world // The Naval Architect. — 2008. — Nov. — P. 56–57.
 4. Viking Lady tests fuel cell power // Marine Power & Propulsion Supplement. — 2009. — Oct. — P. 30.
 5. Liu K., Song C., Subramani V. Hydrogen and syngas production and purification technologies. — New Jersey : John Wiley & Sons, 2010. — 546 p.
 6. Kolb G. Fuel processing for fuel cells. — Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH, 2008. — 424 p.
 7. Коровин Н.В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. — М. : Моск. энергет. ин-т, 2005. — 208 с.

Поступила в редакцию 13.09.11

The Configuration of Ship Electrochemical Power Plant Operating on Natural Gas Development

Gorbov V.M., Karpov M.A.

National University of Shipbuilding, Nikolaev

The configuration of ship power plant with electrochemical generator on molten carbonate fuel cells basis operating on natural gas is formulated. The installation function is to obtain of additional electricity for ship needs. The analysis of the main methods of hydrocarbon fuels conversion is executed and natural gas reforming scheme for electrochemical generator of ship power plant operation is proposed. The scheme of secondary power resources utilization in electrochemical power plant towards its efficiency increase is aduced.

Key words: ship power plant, electrochemical power plant, electrochemical generator, molten carbonate fuel cell, reformer, conversion.

Received September 13, 2011

УДК 66.011:66.040.2

Математическое моделирование процесса дегидратации мелкодисперсных частиц в псевдооживленном слое инертных частиц. 1. Математическое описание процесса

Хвастухин Ю.И., Колесник В.В., Орлик В.Н., Цюпяшук А.Н.

Институт газа НАН Украины, Киев

Разработано математическое описание процесса дегидратации мелкодисперсных частиц в псевдооживленном слое инертных частиц для детального его исследования, цель которого проектирование нового эффективного оборудования либо модернизация существующего.

Ключевые слова: дегидратация мелкодисперсных частиц, псевдооживленный слой, математическая модель.

Розроблено математичний опис процесу дегідратації дрібнодисперсних частинок у псевдозрідженому шарі інертних частинок для детального його дослідження, мета якого проектування нового ефективного обладнання або модернізація існуючого.

Ключові слова: дегідратація дрібнодисперсних частинок, псевдозріджений шар, математична модель.

Стеклянные и керамические, в том числе зольные, полые микросферы, размер которых может быть от нескольких десятков до нескольких сотен микрон, получили широкое распространение как наполнители для композитных облегченных теплоизоляционных материалов и изделий. Их формирование происходит при быстром разогреве до 800–1500 °С размолотого сырьевого материала (специального стекла, вулканического гидратированного стекла и глины), обладающего способностью к газообразованию в этом температурном диапазоне.

При совпадении периодов размягчения до вязкопластического состояния поверхности частицы и газовой выделения из ее глубины происходит увеличение размера частицы — вспучивание. Обычно этот процесс осуществляют в газовом потоке. В качестве побочного продукта полые микросферы образуются как часть золы-уноса в факеле горения энергетических котлов, работающих на пылеугольном топливе. Неизбежная неравномерность температурного поля газового потока приводит к ухудшению качества вспученного материала. Для увеличения скорости и равномерности нагрева размолотого вспучивающегося материала (50–200 мкм) предлагается использовать аппараты с псевдооживленным слоем (ПС) инертного материала. Сжигание топлива (жидкого или газообразного) можно при этом осуществлять непосредственно в слое.

В работе исследуется процесс дегидратации мелкодисперсного материала в ПС инертных частиц. Ожижающим агентом являются продукты сгорания предварительно смешанной смеси воздуха и природного газа. Мелкодисперсные частицы содержат химически связанную воду, удаление которой в процессе прогрева частиц приводит к их вспучиванию и образованию микросфер, что, собственно, и составляет цель технологического процесса.

При формировании математического описания процессов, происходящих при сжигании природного газа, запыленного мелкими частицами гидратированного стекла, в ПС инертных частиц используются следующие предположения.

1. Средняя температура θ крупнодисперсных инертных частиц принимается постоянной во всем объеме ПС как результат очень интенсивного их перемещения по всем направлениям, то есть принимается модель полного перемешивания по всему объему слоя.

2. Для газовой фазы и мелкодисперсных частиц принимается модель идеального вытеснения в направлении движения и отсутствие

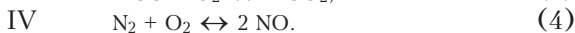
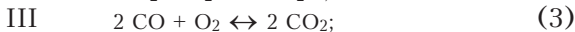
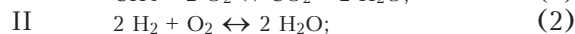
градиента по температуре и концентрациям отдельных компонентов потока по сечению потока.

3. Распределение температуры $\theta_{p(r)}$, $0 \leq r \leq R_p$ по радиусу частичек пыли R_p одинаковое для всех частичек, которые находятся в данном поперечном сечении газового потока.

4. Условием устойчивого функционирования системы в целом есть равенство между теплом, которое ПС инертных частичек отдает пылегазовому потоку на этапе его подогрева, и теплом, получаемым от газового потока, разогретом в результате сгорания метана.

Газовая фаза характеризуется текущим значением температуры t и массовыми расходами отдельных компонентов G_i .

Рассматриваются следующие реакции, которые происходят в газовой фазе:



Реакция I в рассматриваемом температурном диапазоне является необратимой и протекает со скоростью [1]:

$$W_{\text{CH}_4} = K_{\text{CH}_4}^f(t) C_{\text{CH}_4} C_{\text{O}_2}. \quad (5)$$

Остальные реакции являются обратимыми. Реакции II и III отображают процессы диссоциации соответствующих молекул при высоких температурах (выше 1800 °С) и имеют очень большую скорость протекания, поэтому для их описания применимы условия равновесия:

$$K_{\text{H}_2\text{O}}^p(t) = P_{\text{H}_2\text{O}}^2 / (P_{\text{H}_2}^2 P_{\text{O}_2}); \quad (6)$$

$$K_{\text{CO}_2}^p(t) = P_{\text{CO}_2}^2 / (P_{\text{CO}}^2 P_{\text{O}_2}). \quad (7)$$

Скорость протекания реакции IV описывается соотношением [2]:

$$W_{\text{N}_2} = K_{\text{N}_2}^f(t) C_{\text{N}_2} C_{\text{O}_2}^{0,5} \times \left[1 - \frac{1}{K_{\text{N}_2}^p(t) P_{\text{N}_2} P_{\text{O}_2}} \right]. \quad (8)$$

Зависимости констант скоростей реакций I и IV от температуры:

$$K_{\text{CH}_4}^f(t) = 16 \left[\frac{7,08 \cdot 10^{14}}{(t + 273,15)} \times \exp\left(-\frac{31400}{1,987(t + 273,15)}\right) \right];$$

$$K_{N_2}^f(t) = 28[5,72 \cdot 10^{11} \times \exp(-\frac{135000}{1,987(t+273,15)})] / (22,4 \cdot 100).$$

Зависимость констант равновесия $K_{H_2O}(t)$, $K_{CO_2}(t)$, $K_{N_2}(t)$ от температур определялась по процедуре термодинамических расчетов равновесного состояния соответствующих реакций в интересующем диапазоне изменения температуры (с определенным шагом) и последующим вычислением для каждой температуры значения константы равновесия по полученным значениям парциальных давлений всех компонентов реакции. В дальнейшем константы равновесия для текущего значения температуры рассчитывались путем интерполяции по табулированным расчетным данным этих величин.

Соотношения (6), (7) можно переписать в терминах расходов отдельных парциальных потоков газовой фазы в таком виде:

$$K_{H_2O}^p(t) G_{H_2}^2 G_{O_2} = M R_{H_2O} G_{H_2O}^2; \quad (6')$$

$$K_{CO_2}^p(t) G_{CO}^2 G_{O_2} = M R_{CO_2} G_{CO_2}^2, \quad (7')$$

где

$$R_{H_2O} = M_{H_2}^2 M_{O_2} / (P M_{H_2O}^2);$$

$$R_{CO_2} = M_{CO}^2 M_{O_2} / (P M_{CO_2}^2);$$

$$M = \sum_i \frac{G_i}{M_i}.$$

При дифференцировании левой и правой частей соотношений (6'), (7') получим:

$$2 K_{H_2O}^p(t) G_{H_2} G_{O_2} \frac{dG_{H_2}}{dh} + K_{H_2O}^p(t) G_{H_2}^2 \frac{dG_{O_2}}{dh} + G_{H_2}^2 G_{O_2} \frac{dK_{H_2O}^p(t)}{dt} \frac{dt}{dh} = R_{H_2O} G_{H_2O}^2 \frac{dM}{dh} + \quad (6'')$$

$$+ 2 M R_{H_2O} G_{H_2O} \frac{dG_{H_2O}}{dh};$$

$$2 K_{CO_2}^p(t) G_{CO} G_{O_2} \frac{dG_{CO}}{dh} + K_{CO_2}^p(t) G_{CO}^2 \frac{dG_{O_2}}{dh} + G_{CO}^2 G_{O_2} \frac{dK_{CO_2}^p(t)}{dt} \frac{dt}{dh} = R_{CO_2} G_{CO_2}^2 \frac{dM}{dh} + \quad (7'')$$

$$+ 2 M R_{CO_2} G_{CO_2} \frac{dG_{CO_2}}{dh}.$$

Для преодоления определенных вычислительных осложнений, связанных с нулевыми начальными значениями расходов отдельных компонентов, перепишем соотношение (6'') и (7'') в другом виде.

Поскольку, согласно (6'), (7'), значения

$$S_{H_2O} = \frac{G_{H_2O}}{G_{H_2}} = \sqrt{\frac{K_{H_2O}^p(t) G_{O_2}}{M R_{H_2O}}};$$

$$S_{CO_2} = \frac{G_{CO_2}}{G_{CO}} = \sqrt{\frac{K_{CO_2}^p(t) G_{O_2}}{M R_{CO_2}}},$$

окончательно получим:

$$2 K_{H_2O}^p(t) G_{O_2} \frac{dG_{H_2}}{dh} + K_{H_2O}^p(t) G_{H_2} \frac{dG_{O_2}}{dh} + G_{H_2} G_{O_2} \frac{dK_{H_2O}^p(t)}{dt} \frac{dt}{dh} = R_{H_2O} S_{H_2O} G_{H_2O} \frac{dM}{dh} + \quad (9)$$

$$+ 2 M R_{H_2O} S_{H_2O} \frac{dG_{H_2O}}{dh};$$

$$2 K_{CO_2}^p(t) G_{O_2} \frac{dG_{CO}}{dh} + K_{CO_2}^p(t) G_{CO} \frac{dG_{O_2}}{dh} + G_{CO} G_{O_2} \frac{dK_{CO_2}^p(t)}{dt} \frac{dt}{dh} = R_{CO_2} S_{CO_2} G_{CO_2} \frac{dM}{dh} + \quad (10)$$

$$+ 2 M R_{CO_2} S_{CO_2} \frac{dG_{CO_2}}{dh};$$

$$\frac{dM}{dh} = \sum_i \frac{1}{M_i} \frac{dG_i}{dh}. \quad (11)$$

Кроме приведенных реакций I–IV, при записи материального и энергетического балансов для газовой фазы нужно также учитывать поступление в нее паров воды вследствие преобразований материала частичек пыли, которые связаны с высвобождением связанной воды. Объемная скорость этого процесса равняется $W^{(p)}_{H_2O}$. Далее приводятся соотношения для вычисления этой величины.

Согласно стехиометрии реакций I–IV, имеем следующие соотношения для массовых скоростей изменения отдельных компонентов газового потока:

$$W_{O_2} = W_{O_2}^{(I)} + W_{O_2}^{(II)} + W_{O_2}^{(III)} + W_{O_2}^{(IV)} = M_{O_2} \left(\frac{2 W_{CH_4}}{M_{CH_4}} - \frac{W_{H_2O}^{(II)}}{2 M_{H_2O}} - \frac{W_{CO_2}^{(III)}}{2 M_{CO_2}} + \frac{W_{N_2}}{M_{N_2}} \right); \quad (12)$$

$$W_{H_2O} = W^{(I)}_{H_2O} + W^{(II)}_{H_2O} + W^{(p)}_{H_2O} = - (2 M_{H_2O} W_{CH_4} / M_{CH_4}) + W^{(II)}_{H_2O} + W^{(p)}_{H_2O}; \quad (13)$$

$$W_{CO_2} = W^{(I)}_{CO_2} + W^{(III)}_{CO_2} - (M_{CO_2} W_{CH_4} / M_{CH_4}) + W^{(III)}_{CO_2}; \quad (14)$$

$$W_{CO} = W^{(III)}_{CO} = - (M_{CO} W^{(III)}_{CO_2} / M_{CO_2}); \quad (15)$$

$$W_{H_2} = W^{(II)}_{H_2} = - (M_{H_2} W^{(II)}_{H_2O} / M_{H_2O}); \quad (16)$$

$$W_{NO} = W^{(IV)}_{NO} = -(2M_{NO} W_{N_2} / M_{N_2}), \quad (17)$$

где $W_i^{(j)}$ – скорость изменения i -го компонента в связи с протеканием j -й реакции.

Скорости изменения по высоте расходов парциальных потоков газовой фазы с учетом порозности ПС:

$$dG_i/dh = F \varepsilon W_i.$$

Отсюда с учетом (5), (8), (12)–(17) имеем:

$$dG_{CH_4}/dh = F \varepsilon W_{CH_4}; \quad (18)$$

$$dG_{N_2}/dh = F \varepsilon W_{N_2}; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{dG_{O_2}}{dh} + \frac{M_{O_2}}{2M_{H_2O}} \frac{dG_{H_2O}^{(II)}}{dh} + \frac{M_{O_2}}{2M_{CO_2}} \frac{dG_{CO_2}^{(III)}}{dh} = \\ = \frac{2M_{O_2}}{M_{CH_4}} \frac{dG_{CH_4}}{dh} + \frac{M_{O_2}}{M_{N_2}} \frac{dG_{N_2}}{dh}; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{dG_{H_2O}}{dh} - \frac{dG_{H_2O}^{(II)}}{dh} = -\frac{2M_{H_2O}}{M_{CH_4}} \frac{dG_{CH_4}}{dh} + \frac{dG_{H_2O}^{(p)}}{dh}; \quad (21)$$

$$\frac{dG_{CO_2}}{dh} - \frac{dG_{CO_2}^{(III)}}{dh} = -\frac{M_{CO_2}}{M_{CH_4}} \frac{dG_{CH_4}}{dh}; \quad (22)$$

$$\frac{dG_{CO}}{dh} + \frac{M_{CO}}{M_{CO_2}} \cdot \frac{dG_{CO_2}^{(III)}}{dh} = 0; \quad (23)$$

$$\frac{dG_{H_2}}{dh} + \frac{M_{H_2}}{M_{H_2O}} \frac{dG_{H_2O}^{(II)}}{dh} = 0; \quad (24)$$

$$\frac{dG_{NO}}{dh} = -\frac{2M_{NO}}{M_{N_2}} \frac{dG_{N_2}}{dh}. \quad (25)$$

В процессе движения газовая фаза при контакте с инертными частичками ПС получает и отдает им тепло и в то же время отдает тепло частичкам пыли. Поэтому уравнение энергетического (теплового) баланса для газовой фазы имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dh} \sum_i G_i I_i^F(t) = F[S_{in}^S \alpha_{in}(\theta-t) + \\ + \varepsilon(1-\varepsilon_p) + S_p^S \alpha_p(\theta_{Rp}-t) + \\ + \varepsilon W_{H_2O}^{(p)}(I_{H_2O}^{(v)}(\theta_{Rp}) - I_{H_2O}^{(v)}(t))]. \end{aligned}$$

Удельная поверхность теплообмена газовой фазы с инертными частичками ПС S_{in}^S рассчитывается относительно свободного объема аппарата, а удельная поверхность теплообмена газовой фазы с частичками пыли S_p^S рассчитывается относительно текущего объема запыленного газового потока.

После осуществления дифференцирования в левой части уравнения имеем:

$$\begin{aligned} \sum_i \frac{dG_i}{dh} I_i^F(t) + \sum_i G_i c_i^F \frac{dt}{dh} = F[S_{in}^S \alpha_{in}(\theta-t) + \\ + \varepsilon(1-\varepsilon_p) + S_p^S \alpha_p(\theta_{Rp}-t) + \\ + \varepsilon W_{H_2O}^{(p)}(I_{H_2O}^{(v)}(\theta_{Rp}) - I_{H_2O}^{(v)}(t))], \end{aligned} \quad (26)$$

где $c_i^F = dI_i^F/dt$.

Таким образом, изменение параметров газовой фазы при прохождении через ПС описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений (9–11), (18–26).

Значения производных dG_{CH_4}/dh , dG_{N_2}/dh находятся непосредственно из уравнений (18), (19). Значение остальных основных производных dG_{O_2}/dh , dG_{H_2O}/dh , dG_{CO_2}/dh , dG_{CO}/dh , dG_{H_2}/dh , dG_{NO}/dh , dt/dh и промежуточных $dG_{H_2O}^{(II)}/dh$, $dG_{CO_2}^{(III)}/dh$, dM/dh находятся одновременно из решения системы алгебраических уравнений (9–11), (20–26), линейных относительно перечисленных производных.

Указанная процедура может быть осуществлена, если известны текущее значение температуры поверхности частичек пыли и объемная скорость удаления связанной воды.

При разработке математического описания процессов, которые происходят при нагреве мелкодисперсных частичек, были приняты следующие предположения.

1. Частички пыли перемещаются с текущей линейной скоростью газовой фазы в точке $h - w_g(h)$.

2. Процесс удаления гидратной воды происходит при постоянной температуре θ_{ev} . Энергия выделения составляет ΔH_{ev} .

3. На этапе нагрева от начальной температуры θ_p^0 до θ_{ev} и при дальнейшем прогреве после удаления всей гидратной воды частичка ввиду ее небольшого размера рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами, то есть имеет одинаковую температуру по всему объему.

4. При достижении частичкой температуры θ_{ev} образуется подвижный фронт радиусом R_{ev} , который является текущей границей между материалом, содержащим гидратную воду при температуре $\theta_{ev} = \text{const}$, и слоем материала $R_{ev} \leq r \leq R_p$, освобожденного от гидратной воды. В пределах фронта температура меняется от $\theta_{ev} = \text{const}$ при $r = R_{ev}$ до температуры на поверхности θ_{Rp} , которая непрерывно меняется за счет контакта с газовой фазой.

5. Профиль температуры на участке от R_{ev} до R_p вследствие его малой толщины в каждый момент отвечает установившемуся состоянию. Дополнительно принимается, что этот профиль достаточно близкий к профилю, который отвечает условию пренебрежения процессом подогрева паров высвобожденной воды от температуры высвобождения θ_{ev} до температуры на поверхности частички θ_{Rp} . Опосредованно этот процесс дополнительного подогрева паров воды учитывается в общем тепловом балансе для частички пыли.

6. Начальная порозность частички пыли, которая состоит из твердого материала, содержащего гидратную воду, и имеет плотность ρ_p и удельную теплоемкость c_p' , равняется ε_p' . После удаления связанной воды твердый материал частички имеет плотность ρ_p , удельную теплоемкость c_p и коэффициент теплопроводности λ_p .

Доля объема твердого материала, который не содержит связанной воды, по отношению к начальному объему равняется γ . Порозность обезвоженного участка частички при этом равняется $\varepsilon_p = \varepsilon_p' + (1 - \varepsilon_p')(1 - \gamma)$.

Согласно предположению 3, на этапах чистого нагрева частички пыли собственно процесс нагрева частички описывается следующими зависимостями:

— при нагреве до температуры θ_{ev}

$$1/3 R_p \rho_p c_p' d\theta_{Rp}/dh = \alpha_p (t - \theta_{Rp});$$

— после удаления всей связанной воды

$$1/3 R_p \rho_p c_p d\theta_{Rp}/dh = \alpha_p (t - \theta_{Rp}).$$

При этом $W^{(p)}_{H_2O} = 0$.

На этапе удаления связанной воды, согласно предположениям 4, 5, используются следующие соотношения [3]:

— для плотности теплового потока

$$\begin{aligned} \lambda_p (\theta_{ev} - \theta_{Rp}) / (1/R_{ev} - 1/R_p) = \\ = R_p^2 (1 - \varepsilon_p) \alpha_p (\theta_{Rp} - t); \end{aligned} \quad (27)$$

— для температурного профиля

$$\begin{aligned} \theta_p(r) = \theta_{ev} - (r - R_{ev}) / (R_p - R_{ev}) \times \\ R_p / r (\theta_{ev} - \theta_{Rp}), R_{ev} \leq r \leq R_p, \end{aligned} \quad (28)$$

где θ_{Rp} — текущая температура поверхности частички пыли.

Количество тепла, накопленного в этом слое, равняется:

$$\begin{aligned} Q = 4\pi \rho_p c_p (1 - \varepsilon_p) \gamma \int_{R_{ev}}^{R_p} \theta_p(r) r^2 dr = 4\pi \rho_p c_p (1 - \\ - \varepsilon_p) \gamma \left\{ \frac{1}{3} [\theta_{ev} + \frac{R_p}{R_p - R_{ev}} (\theta_{Rp} - \theta_{ev})] (R_p^3 - R_{ev}^3) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \left[\frac{R_{ev} R_p}{R_p - R_{ev}} (\theta_{Rp} - \theta_{ev}) \right] (R_p^2 - R_{ev}^2) \right\}. \end{aligned} \quad (29)$$

Расчеты процесса прогрева частички пыли на этапе удаления связанной воды основываются на учете теплового баланса.

Участок ПС высотой Δh частичка пыли проходит за время $\Delta \tau$, который равняется:

$$\Delta \tau = \Delta h / w_g (h).$$

За это время в результате контакта с газовой фазой частичка получит тепло в количестве:

$$\begin{aligned} \Delta Q^{(+)} = 4\pi R_p^2 (1 - \varepsilon_p) \times \\ \times \alpha_p [t(h) - \theta_{Rp}'] \Delta \tau, \end{aligned} \quad (30)$$

где θ_{Rp}' — средняя температура поверхности частички за интервал $\Delta \tau$, $\theta_{Rp}' = 0,5[(\theta_{Rp}(h) + \theta_{Rp}(h + \Delta h))]$.

В результате удаления связанной воды изменится значение радиуса R_{ev} . Вода в количестве

$$\begin{aligned} \Delta m^{ev}_{H_2O} = 4/3 \pi (1 - \varepsilon_p) (1 - \gamma) \times \\ \times \rho_{H_2O} [R_{ev}^3(h) - R_{ev}^3(h + \Delta h)] \end{aligned} \quad (31)$$

в виде пара поступит в газовую фазу. За счет этого частичка потеряет тепло в количестве

$$\begin{aligned} \Delta Q^{(-)} = \Delta m^{ev}_{H_2O} [\Delta H_{ev} + \\ + c^v_{H_2O} (\theta_{Rp}' - \theta_{ev})]. \end{aligned} \quad (32)$$

Здесь член $c^v_{H_2O} (\theta_{Rp}' - \theta_{ev})$ отображает процесс подогрева паров удаленной воды при их движении на участке $[R_{ev}, R_p]$.

Разность $\Delta Q = \Delta Q^{(+)} - \Delta Q^{(-)}$ расходуется на нагревание слоя частички, освобожденного от связанной воды, следствием чего будет одно-временное повышение температуры внешней поверхности частицы до значения $\theta_{Rp} = (h + \Delta h)$. То есть, согласно (29), имеем соотношение:

$$\Delta Q = Q(h + \Delta h) - Q(h), \quad (33)$$

где (см. формулы (34), (35))

$$Q(h + \Delta h) = 4 \pi \rho_p c_p (1 - \varepsilon_p) \gamma \times \left\{ \frac{1}{3} \left[\theta_{ev} + \frac{R_p}{R_p - R_{ev}(h + \Delta h)} (\theta_{R_p}(h + \Delta h) - \theta_{ev}) \right] (R_p^3 - R_{ev}^3(h + \Delta h)) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \left[\frac{R_{ev}(h + \Delta h) R_p}{R_p - R_{ev}(h + \Delta h)} (\theta_{R_p}(h + \Delta h) - \theta_{ev}) \right] (R_p^2 - R_{ev}^2(h + \Delta h)) \right\}; \quad (34)$$

$$Q(h) = 4 \pi \rho_p c_p (1 - \varepsilon_p) \gamma \times \left\{ \frac{1}{3} \left[\theta_{ev} + \frac{R_p}{R_p - R_{ev}(h)} (\theta_{R_p}(h) - \theta_{ev}) \right] (R_p^3 - R_{ev}^3(h)) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \left[\frac{R_{ev}(h) R_p}{R_p - R_{ev}(h)} (\theta_{R_p}(h) - \theta_{ev}) \right] (R_p^2 - R_{ev}^2(h)) \right\}; \quad (35)$$

Согласно (29), новому значению $R_{ev}(h + \Delta h)$ отвечает новое значение температуры поверхности:

$$\theta_{R_p}(h + \Delta h) = \left[\frac{\theta_{ev}}{(R_{ev}(h + \Delta h))^{-1} - R_p^{-1}} + \frac{R_p^2(1 - \varepsilon_p)\alpha_p}{\lambda_p} t \right] / \left[\frac{1}{(R_{ev}(h + \Delta h))^{-1} - R_p^{-1}} + \frac{R_p^2(1 - \varepsilon_p)\alpha_p}{\lambda_p} \right]. \quad (36)$$

Таким образом, расчеты процесса удаления связанной воды и одновременного подогрева частички пыли сводятся к нахождению таких значений величин $R_{ev}(h + \Delta h)$, $\theta_{R_p}(h + \Delta h)$, которые удовлетворяют совокупности уравнений (30)–(36), отображающих условия материального и теплового балансов для частички на текущем шаге.

Текущая скорость удаления связанной воды для одной частички пыли равняется, кг/с:

$$q_{H_2O}^{ev} \Delta m_{H_2O}^{ev} / \Delta \tau,$$

а следовательно, объемная скорость общего удаления связанной воды:

$$W^{(p)}_{H_2O} = q_{H_2O}^{ev} \eta_p,$$

где $\eta_p = n_p / V_g$; $n_p = G_p / [4/3 \pi R_p^3 (1 - \varepsilon_p') \rho_p]$.

Текущий объемный расход газовой фазы V_g зависит от текущего массового расхода газовой фазы, ее состава и температуры.

Текущая линейная скорость газовой фазы:

$$w_g = V_g / (F \varepsilon).$$

Удельная поверхность теплообмена газовой фазы с частичками пыли рассчитывается согласно соотношению:

$$SS_p = 4 \pi R_p^2 \eta_p.$$

Разработанное математическое обеспечение позволяет рассчитывать значения всех параметров газовой фазы и частичек пыли в процессе дегидратации мелкодисперсных частиц в ПС инертных частиц, ожижаемых продуктами сгорания природного газа.

При этом соотношение

$$dQ_{in}/dh = F S_{in}^S \alpha_{in} (\theta - t), \quad 0 \leq h \leq H$$

или

$$Q_{in}(\theta) = F \int_0^H S_{in}^S \alpha_{in} (\theta - t) dh \quad (37)$$

отображает процесс теплообмена газовой фазы с ПС инертных частичек. Условием устойчивости процесса есть выполнение равенства:

$$Q_{in}(\theta) = 0, \quad (38)$$

которое реализуется выбором соответствующего значения θ — температуры ПС.

Наличие математического обеспечения позволяет проводить вычислительные эксперименты по изучению влияния конструктивных и технологических параметров вновь разрабатываемой установки или при исследовании существующей с целью оптимизации ее функционирования.

Выводы

Разработано математическое описание процесса дегидратации мелкодисперсных частиц в ПС инертных частиц, ожижаемых продуктами сгорания природного газа.

На основе полученного математического описания разработано математическое обеспечение, проведены вычислительные эксперименты по детальному исследованию процесса дегидратации дисперсного материала в ПС.

Условные обозначения

θ	– средняя температура крупнодисперсных инертных частиц, °C
t	– текущее значение температуры, °C
R	– радиус, м
g	– текущее значение радиуса, м
G	– массовый расход, кг/с
W	– массовая скорость протекания химической реакции, кг/(м ³ ·с)
C	– концентрация в газовой фазе, моль/м ³
P	– парциальное давление, Па
M_i	– молекулярная масса, кг/кмоль
M	– мольный расход газового потока, кмоль/с
K_p	– константа равновесия
K_f	– константа скорости реакции окисления (горения), (кг·м ³)/(моль ² ·с)
F	– площадь сечения аппарата, м ²
ε	– порозность ПС
$I_i^F(t)$	– полная энтальпия компонентов газовой фазы при температуре t , кДж/кг
$I_{H_2O}^{(v)}(\theta_{Rp})$	– энтальпия паров воды при температуре поверхности частички пыли, кДж/кг
$I_{H_2O}^{(v)}(t)$	– энтальпия паров воды температуре газовой фазы, кДж/кг
SS	– удельная поверхность теплообмена газовой фазы, м ² /м ³
α	– коэффициент теплоотдачи от газовой фазы, кВт/(м ² ·°C)
c	– удельная теплоемкость, кДж/(кг·°C)
h	– текущая высота ПС, м

τ	– время, с
w	– линейная скорость, м/с
η	– текущее количество частичек в единице объема газовой фазы, 1/м ³
n	– количественный расход частичек, 1/с
V	– текущий объемный расход, м ³ /с
ρ	– плотность, кг/м ³

Индексы: p – частичка пыли; i – компонент химической реакции, $i = O_2, N_2, H_2O, CH_4, CO_2, NO, CO, H_2$; O_2 – кислород; N_2 – азот; H_2 – водород; H_2O – вода; CH_4 – метан; CO_2 – диоксид углерода; NO – оксид азота; CO – оксид углерода; j – порядковый номер реакции, $j = I-IV$; in – инертные частички ПС; ev – испарение; g – газовая фаза.

Список литературы

1. Devis H.G., Farrell T.J. Relative and Absolute Rates of Decomposition of Light Paraffins Under Practical Operating // Ind. and Eng. Chem. Proc. Des. Dev. – 1973. – Vol. 12, № 2. – P.171–181.
2. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966. – 688 с.
3. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 418 с.

Поступила в редакцию 11.10.11

The Mathematical Simulation of Fine-Dispersed Particles Dehydration Process in Inert Particles Fluidized Bed.

1. The Process Mathematical Model

*Khvastukhin Yu.I., Kolesnik V.V.,
Orlyk V.N., Tsyupyashuk A.N.*

The Gas institute of NASU, Kiev

The mathematical model of fine-dispersed particles dehydration process in fluidized bed of inert particles is developed for detailed process research. The investigation purpose is new efficient equipment design or existing equipment modernisation.

Key words: fine-dispersed particles dehydration, fluidized bed, mathematical model.

Received October 11, 2011