

Московский Энергетический Институт (технический университет), Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАСООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ КОНВЕРСИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

АННОТАЦИЯ

Проблема регенерации тепловых отходов топливных плавильных печей является важной в связи с экономией природного газа и улучшением экологии. Одним из наиболее перспективных способов снижения расхода топлива и уменьшения вредных выбросов является регенерация тепла отходящих газов с помощью термохимического реактора.

Для анализа процессов в этом устройстве составлены несколько различных математических моделей реакционного элемента реактора, используемого в стеклоплавильной промышленности. С их помощью найдены локальные характеристики конвертируемого газа.

Проведено сравнение предложенных математических моделей, которое показало, что при принятых допущениях они дают близкие результаты. В заключение работы сделан вывод о допустимости использования этих моделей при исследовании процессов тепло- и массообмена.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема экономии топлива и экологии важны при проведении технологических процессов, таких как плавка стекла. В настоящее время конверсия (реформинг) природного газа с помощью водяного пара – наиболее важный процесс для промышленного производства синтетического газа, равновесный состав которого определяется температурой, давлением и соотношением метана и водяного пара. Термин реформинг используется для описания физико-химических процессов, включающих в себя несколько параллельных и последовательных химических реакций. Природный газ под воздействием паров воды при высоких температурах преобразуется в синтетический газ, представляющий собой смесь водорода, окиси и двуокиси углерода. В последнее время появились работы, где обсуждается эта проблема [1-3]. Однако работ, касающихся моделирования локальных характеристик, практически нет.

В данной работе рассматривается задача об эндотермической реакции конверсии в реакционных элементах, которые расположены по периферии радиационного рекуператора.

2. ОПИСАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО РЕКУПЕРАТОРА

Моделирование процессов проведем для радиационного рекуператора, схема которого представлена на рис. 1.

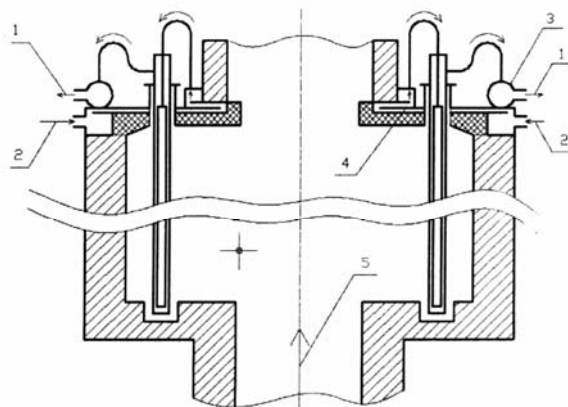


Рис. 1 Схема термохимического рекуператора
1 – выход конвертированного газа; 2 – вход парогазовой смеси; 3 – выходной коллектор; 4 – опорный коллектор; 5 – дымовые газы

Конструкция термохимического рекуператора на рис. 1 по сути аналогична конструкции традиционно используемого радиационного рекуператора [3].

Конструктивно он состоит из трех основных частей: опорного (входного) и выходного коллекторов и реакционных элементов, расположенных равномерно по осевой окружности. Теплообменник устанавливается наверху газохода плавильной печи.

Парогазовая смесь поступает в наружную кольцевую полость опорного коллектора и движется в щелевом зазоре к центру, затем к периферии и поступает во внутреннюю полость. Из последней по перепускным патрубкам направляется в реакционные элементы. Из реакционных элементов продукты конверсии по перепускным патрубкам поступают в выходной коллектор и далее направляются к горелкам.

Реакционные элементы выполнены по типу трубок Фильда (см. рис.2).

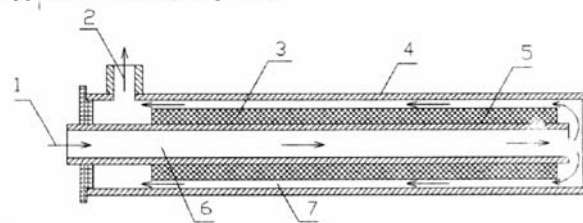


Рис. 2. Реакционный элемент рекуператора
1 - исходная парогазовая смесь, 2 – конвертированный газ, 3 – катализатор, 4 – наружная стенка реакционного элемента, 5 – внутренняя стенка реакционного элемента, 6 – внутренний канал, 7 – кольцевой зазор

На внутреннюю трубу элемента одеты кольцевые вставки из катализатора на основе нитратов никеля, алюминия и кальция. Парогазовая смесь по внутренней трубе опускается вниз, меняет направление движения в нижней части реакционного элемента, и далее по кольцевому зазору между каталитической вставкой и внешней трубой движется вверх, при этом происходит эндотермическая реакция каталитической паровой конверсии газового топлива.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА

Несмотря на конструктивную простоту, в реакционных элементах с каталитическими вставками имеет место сложный комплекс тепло- и массообменных явлений. В общем случае механизм суммарного процесса в реакционном элементе включает следующие основные стадии: конвективную теплоотдачу от трубы к парогазовой среде, излучение между трубой, вставкой и смесью, теплопроводность и нагрев смеси и конвективный теплообмен между ней и вставкой; химическое реагирование и определенное им теплотребление на вставке. [3]. Кроме того, затруднительным является определение теплофизических и термодинамических свойств газовой среды, изменяющей свой состав по длине трубки. Вследствие этого при разработке математических моделей элемента был введен ряд упрощений, позволивших осуществить тарировку основных расчетных алгоритмов, провести наглядное сравнение их результатов.

Были приняты следующие допущения:

- реакционный элемент с двойной циркулирующей нагреваемой среды упрощенно принимается прямоточным;
- от дымовых газов к стенке реакционного элемента теплота передается излучением;
- от стенки реакционного элемента к нагреваемой среде теплота передается конвекцией;
- скорость химической реакции постоянна по длине элемента;
- состав газовой среды не изменяется по длине трубки;
- температура трубки в поперечном сечении изменяется незначительно;
- теплопроводность трубки велика.

Предварительно согласно методике, предложенной в [4], были найдены температуры стенки реакционного элемента и коэффициенты теплоотдачи для входного и выходного участков реактора.

Расчет локальных характеристик реакционного элемента термохимического рекуператора по одномерным моделям проводился в вычислительной среде MathSoft MathCAD 12, двумерная модель была реализована посредством вычислительного комплекса Fluent.

3.1. Одномерная математическая модель реакционного элемента с сосредоточенными параметрами.

Для получения характеристик нагреваемой среды вначале была составлена модель с сосредоточенными параметрами, являющейся наиболее простой и наглядной моделью из предложенных. При ее создании был рассмотрен предельный случай процесса в реакционном элементе с неизотермическими условиями на входе. Принимается, что перенос тепла за счет теплопроводности (перемешивания) намного больше конвективного переноса. Мгновенное значение температуры потока газовой среды во всем объеме считается практически одинаковым.

Тогда в общем случае при отсутствии разделительной стенки, модель описывается следующей системой уравнений:

$$V \frac{\partial}{\partial t} (R_1 \rho_1 C_1 T_1) + M_1 C_1 (T_1 - T_{1,вх}) = q_{12} V, \quad (1)$$

$$V \frac{\partial}{\partial t} (R_2 \rho_2 C_2 T_2) + M_2 C_2 (T_2 - T_{2,вх}) = q_{21} V. \quad (2)$$

Данные соотношения были применены для определения выходных параметров взаимодействующих теплоносителей, при известных входных значениях. Для данной задачи эти уравнения сохранения были преобразованы к виду:

$$\bar{\alpha}_1 (T_1 - T_w) \cdot F \Phi = G_2 (C_{out} T_2'' - C_{in} T_2') + W. \quad (3)$$

3.2. Одномерные математические модели реакционного элемента с распределенными параметрами

Для того, чтобы найти распределение локальных характеристик газовой среды по длине реакционного элемента, были использованы одномерные математические модели с распределенными параметрами.

Анализ проблемы позволил сделать ряд допущений:

- а) для потока газовой среды можно выделить преимущественное направление движения;
- б) изменение всех свойств газовой среды поперек потока незначительно по сравнению с соответствующими продольными изменениями.

Одна из моделей имеет в своей основе дифференциальные уравнения внутреннего тепло- и массопереноса, имеющие следующий вид:

$$\rho U \frac{\partial \kappa}{\partial x} = S \quad (4)$$

$$\rho U \frac{\partial H}{\partial x} = -q_v + \alpha (T_w - T) \frac{F_{бок}}{V_{mp}} \quad (5)$$

где q_v - теплота, поглощаемая при протекании реакции, определяемая как: $q_v = S \cdot h$;

α - конвективный коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности реакционных элементов к реагирующей среде;

H - энтальпия реагирующей среды, которая определяется, как:

$$H = (C_{ПГС} \cdot T) + \kappa(h + C_{КГ} \cdot T).$$

При составлении второй модели с распределенными параметрами за основу была взята система энергетических балансов, составленная для малого участка реакционного элемента. Эти энергетические балансы имеют вид, аналогичный описанному в разделе 3.1.

При расчете согласно этим моделям в качестве граничных условий задавались температуры греющей среды на входе и выходе, температура и скорость нагреваемой среды на входе, степень завершения реакции конверсии на выходе, а также распределение температуры стенки элемента по его длине.

Для расчета локальных характеристик с использованием этих моделей расчетная область была разделена по длине на 100 одинаковых контрольных объемов.

3.3. Двумерная математическая модель реакционного элемента

Для анализа влияния различных факторов, не учитываемых в моделях с сосредоточенными и распределенными параметрами, была составлена двумерная осесимметричная математическая модель реакционного элемента.

В основе этой модели обобщенное уравнение сохранения, имеющее в тензорном виде следующую форму:

$$\frac{d(\rho \cdot \Phi_i)}{dt} + \text{div}(\rho_i \cdot V_i \cdot \Phi_i - \Gamma \Phi_i \cdot \text{grad}(\Phi_i)) = S_i$$

Данная двумерная математическая модель была составлена с помощью вычислительного комплекса FLUENT, со следующими граничными условиями: параметрами на непроницаемых границах объекта (распределение температуры материала по длине стенки), скоростью движения нагреваемой среды, и ее входной температурой. Для учета эндотермического эффекта химических реакций, происходящих в реакционном элементе, был введен источник поглощения теплоты, постоянный по длине элемента. При расчете была использована К-ε модель турбулентности.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчет локальных характеристик реакционного элемента по предложенным одномерным моделям позволил получить зависимости температуры газовой среды по длине реакционного элемента.

Расчеты с привлечением вычислительного комплекса FLUENT позволили определить локальные характеристики на входе в реакционные элементы, перепады давления и оценить изменения локальных величин при организации процесса взаимодействия смеси.

Распределение температуры газовой среды по длине реакционного элемента представлено на рис.3.

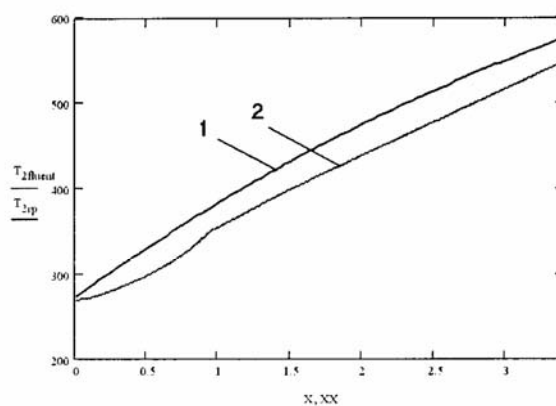


Рис 3. Распределение температуры газовой среды по длине реакционного элемента

1 – данные по моделям с распределенными параметрами; 2 – данные по двумерной модели.

Значения температур, полученные по моделям с распределенными параметрами, практически совпадают, и показаны на рис. единой кривой 1.

Кривая 2 представляет собой среднемассовые значения температур нагреваемой среды, полученных с помощью FLUENT, в различных поперечных сечениях элемента. Характерный обратный изгиб кривой на участке длиной около 1 м от входа и более низкие температуры газа объясняются влиянием начального участка на теплообмен. На оставшейся длине трубки течение носит установившийся характер, и динамика изменения температуры газа аналогична полученной в одномерной модели.

Температура газовой среды на выходе из реакционного элемента согласно этим моделям, равна 577 К. Выходная температура газа, рассчитанная по модели с сосредоточенными параметрами, составила 569 К, а по двумерной модели - 551 К.

Распределение давления газовой среды по длине реакционного элемента показано на рис. 4.

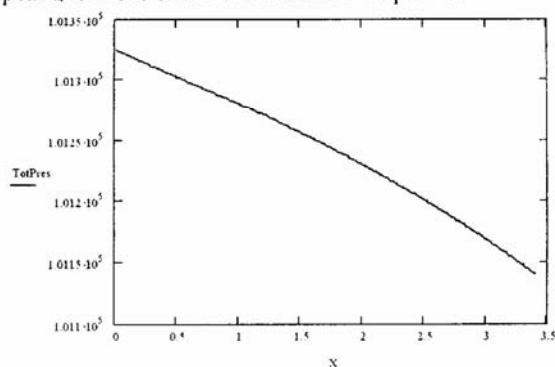


Рис. 4. Распределение давления газовой среды по длине реакционного элемента

Перепад давления на реакционном элементе, найденный с использованием двумерной осесимметричной модели, составил 185 Па.

Для того, чтобы оценить физические и химические процессы, происходящие в элементе

сложной геометрии, была создана приближенная математическая модель конверсии природного газа, с расчетом свойств смеси реагирующих газов – метана и водяного пара при атмосферном давлении и расчетом механизма реакции метана с водяным паром на никелевом катализаторе. Химическая реакция была реализована согласно теории Аррениуса, значения предэкспоненциальных множителей и энергии активации были выбраны приближенно.

Составленная модель является одномерной, с распределенными параметрами. Результаты, полученные с ее помощью, качественно согласуются с экспериментальными данными, представленными в работе [3].

Некоторые из полученных с ее помощью результатов представлены на рис. 5.

В результате прохождения потока смеси пара и природного газа в реакционных элементах, обогреваемых дымовыми газами, изменяется состав смеси. Характер изменения состава показан кривыми 1-4 на рис.5. Кривая 5 на рис. 5 отражает изменение скорости паровой конверсии по длине элемента.

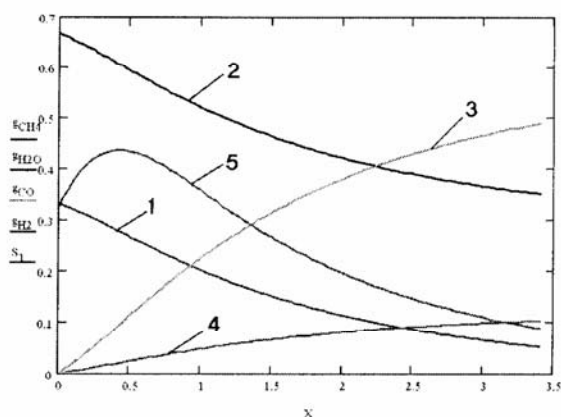


Рис. 5. Изменение концентрации компонентов газовой смеси и скорости паровой конверсии метана по длине реакционного элемента

1 – массовая доля CH_4 ; 2 - массовая доля H_2O ; 3 - массовая доля CO ; 4 - массовая доля H_2 ; 5 – скорость паровой конверсии метана.

Скорость конверсии природного газа зависит в наибольшей степени от температуры и содержания метана в смеси. В исходной парогазовой смеси усредненное содержание метана составляет 21.4%. С увеличением температуры скорость конверсии возрастает, но так как содержание метана падает, то и скорость конверсии также падает.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сравнение предложенных математических моделей показало, что при принятых допущениях они дают близкие результаты (расхождение составило 4.5%), что позволило сделать вывод о допустимости использования выбранных моделей

при исследовании процессов тепло- и массообмена в реакционном элементе.

2. Анализ двумерной модели показал, что влияние начального участка и неравномерностей в потоке не оказывает существенного влияния на характер тепломассообменных процессов на большей части реакционного элемента рекуператора.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ-05-08-18265.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ρ - плотность реагирующей среды;
 S - источник;
 T_W - температура внутренней поверхности реакционных элементов;
 T - температура реагирующей среды;
 $F_{бок}$ - площадь поверхности реакционных элементов;
 V_{mp} - объем реакционных элементов;
 $C_{пгс}$ - теплоемкость исходной парогазовой смеси;
 κ - степень завершения реакции паровой конверсии метана;
 h - эндотермический эффект реакции паровой конверсии;
 $C_{кг}$ - теплоемкость конвертированного газа;
 Φ_i - любая переменная i -ой фазы, такая как: энтальпия, момент на единицу массы, массовая доля химической компоненты, турбулентная энергия и т.д.;
 V_i - вектор скорости i -ой фазы;
 $\Gamma\phi_i$ - диффузионный коэффициент свойства Φ в i -ой фазе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anikeev Solar Energy Vol. 63, No.2 pp97-104,1998 стр. 97 .
2. Ruud G.C. Beerkenes and Hendrics P.H. Muysenberg, 1992, Comparative study on energy saving technologies for glass furnaces, Glastechn. Nr.8, 216-224.
3. М. Ф. Шопшин, В. Н. Новосельцев, А. И. Тюрин и др. Химическая регенерация тепловых отходов топливных печей Обзорн. инф. Сер. «Энерготехнологические процессы в химической промышленности». М., НИИТЭХИМ, 1981
4. Хмельницкий Стальные рекуператоры.Расчеты и основы проектирования. М.:МЭИ, 1970.