

УДК 628.492

Численное моделирование теплообмена в плазменной шахтной электропечи при утилизации техногенных отходов

А.И. Алиферов², А.С. Аньшаков¹, В.А. Сеницын¹

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск*

E-mail: beam@itp.nsc.ru

Представлена математическая модель теплообмена между встречными потоками газа и пористым материалом шихты техногенных отходов в рабочем пространстве шахтной печи. В модели учтены химические превращения в отдельных компонентах шихты и радиационный теплообмен между газовой и твердой фазами. Приведены результаты расчета.

Ключевые слова: теплообмен, излучение, техногенные отходы, плазменная электропечь.

ВВЕДЕНИЕ

Среди экологических проблем, которые в настоящее время стоят перед человечеством, важное место занимает обезвреживание и уничтожение техногенных образований и отходов, количество которых постоянно увеличивается с ростом населения, изменением экономических, социальных и технологических условий существования человека. Одним из возможных путей переработки органической компоненты твердых отходов (в том числе промышленных и бытовых отходов) является их газификация в шахтных печах с применением электродугового плазмотрона для нагрева окислителя и плавления неорганической части сырья. Получаемый синтез-газ может быть использован как для энергетических целей (в газовых турбинах и котельных), так и в технологических целях (для производства новых продуктов). Разработка технологии переработки техногенных отходов требует создания методик расчета, учитывающих тепломассообмен между встречными потоками газа и пористым материалом шихты с учетом фазовых и химических превращений отдельных компонентов отходов.

Теплообмен в рассматриваемых условиях осложнен протеканием экзо- и эндотермических химических реакций в газовой фазе и на поверхности твердого материала. В высокотемпературной зоне печи значительный вклад в теплоперенос может вносить тепловое излучение.

К настоящему времени накоплен достаточно большой научный опыт по изучению переноса тепла и массы в пористых средах. Здесь можно упомянуть работу [1]. Сходные проблемы, возникающие при исследовании металлургических процессов, описаны в монографии [2]. Среди работ, в которых наиболее глубоко исследованы процессы газификации техногенных отходов, необходимо выделить работы [3–4]. Авторы детально изучили процессы конвективного и кондуктивного теплообменов в зонах сушки и пиролиза. Однако процессы радиационного переноса, существенно влияющие на тепловые процессы в средне- и высокотемпературных зонах печи, остались без рассмотрения. Расчеты оптимальных параметров технологического процесса плазменного газификатора представлены в работах [5–6].

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Моделирование механики движения и теплообмена в шихте представляет сложную задачу. На рис. 1 представлена схема шахтной электропечи для переработки техногенных отходов.

В верхнюю часть шахты печи ($x = h$) подается шихта техногенных отходов. Навстречу движущейся вниз шихте поднимается газовый поток, нагретый в нижней части печи плазменными генераторами. Шихта, перемещаясь по шахте, подвергается последовательно сушке, пиролизному разложению, газификации (органической компоненты). Не подвергающаяся газификации часть техногенных отходов переходит в нижней части печи в расплав. Поднимающийся газовый поток насыщается переходящей в газообразное состояние органической составляющей и водой. При организации непрерывного технологического процесса в камере печи формируется установившийся газодинамический и тепловой режим.

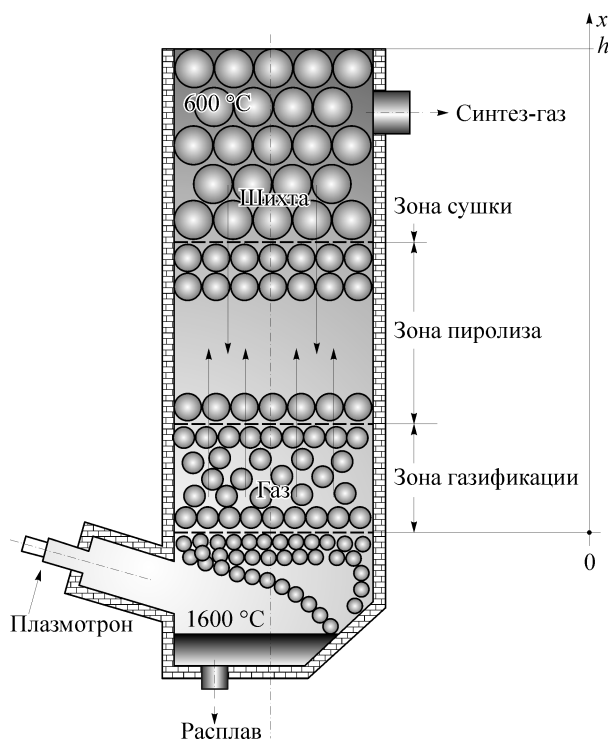


Рис. 1. Схема зон переработки техногенных отходов в плазменной шахтной электропечи.

Поэтому процессы тепломассообмена в этих условиях в системе встречных потоков твердой и газообразной фаз можно считать стационарными.

Разработанная модель создавалась при следующих граничных условиях. Техногенные отходы подаются сверху ($x = h$) в печь при начальной температуре t_0 с начальным удельным расходом G_M^0 . Снизу в печь поступает окислитель (воздух) с начальной температурой T_0 и удельным расходом G_T^0 .

В результате тепломассообмена между шихтой и газом формируется температурное поле в шихте и в газовой фазе.

Основные допущения в модели:

1. Не учитываются тепловые потери через стенки печи;
2. Теплообмен между твердой фазой и газом описывается законом Ньютона–Рихмана;
3. Теплообмен в объеме шихты осуществляется теплопроводностью и излучением (теплопроводностью — внутри куска твердого материала и через поверхность контакта между соседними кусками, излучением — между стенками пор, газ предполагается прозрачным для излучения);
4. Теплообмен между газом и твердой шихтой происходит только за счет конвекции.

Для моделирования пористой структуры системы применяется модель двух взаимопроникающих континуумов.

Теплообмен в слое шихты можно описать следующей системой уравнений:

– уравнение энергии в шихте ef

$$\frac{d}{dx} \left[\lambda_{ef}(t) \frac{dt}{dx} \right] - G_M c \frac{dT}{dx} - \alpha_v (t - T) + q_v(t) = 0, \quad (1)$$

– уравнение энергии в газе

$$G_T c_p \frac{dT}{dx} - \alpha_v (t - T) = 0. \quad (2)$$

Здесь

$$\lambda_{ef}(t) = (1 - m) \lambda_k + \frac{md}{\frac{(1 - \varepsilon)d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{л}}}} \quad (3)$$

— эффективный коэффициент теплопроводности шихты [7],

$$\alpha_v = 160 \frac{v^{0.9} t^{0.3}}{d^{0.75}} m$$

— объемный коэффициент теплоотдачи,

$$\alpha_{\text{л}} = 4\sigma t^3$$

— коэффициент радиационной теплопроводности, m — порозность, λ — коэффициент теплопроводности кусков шихты, λ_k — коэффициент контактной теплопроводности при соприкосновении кусков, d — средний размер кусков, v — скорость движения газа, T — температура газа, t — температура шихты, c — удельная теплоемкость шихты, c_p — удельная теплоемкость газа, G_M — удельный расход шихты, G_T — удельный расход газа, x — координата по высоте печи, ε — степень

черноты поверхности пор, σ — постоянная Стефана–Больцмана, $q_v(t)$ — объемная удельная мощность тепловыделения за счет химических реакций.

Граничные условия, применяемые при решении уравнений (1) и (2), — в верхнем сечении печи ($x = h$) температура шихты равна ее начальной температуре

$$t = t_0.$$

Задан удельный расход шихты

$$G_m = G_m^0,$$

в нижнем сечении печи ($x = 0$) температура газа равна его начальной температуре

$$T = T_0,$$

задан удельный расход газа

$$G_r = G_r^0.$$

Эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эф}(t)$, определяемый по формуле (3), учитывает следующие виды теплопередачи в шихте: контактная теплопроводность между кусками шихты, теплопроводность в куске шихты, лучистый теплообмен между стенками пор.

Система уравнений (1) и (2) является нелинейной из-за учета радиационного теплообмена (нелинейность в $\alpha_n = 4\sigma t^3$) и тепловыделения при химических реакциях газификации шихты (член $q_v(t)$). Последняя нелинейность связана с зависимостью скорости химических реакции от температуры. Поэтому для решения этой системы применялся итерационный метод. На каждой итерации проводилось понижение порядка уравнения (1) введением новой неизвестной функции dt/dx . Таким образом, исходная система сводилась к решению системы трех дифференциальных уравнений первого порядка, для которой возможно решение задачи Коши. Численная реализация этого решения проводилась методом Рунге–Кутта. При решении системы дифференциальных уравнений использовалось дополнительное граничное условие в верхнем сечении печи:

$$dt/dx = 0 \text{ при } x=h.$$

Точность расчетов регулировалась изменением шага по координате и количеством итераций. Расчет температурного поля в шахте электропечи выполнялся по следующему алгоритму:

- решая систему уравнений (1) и (2), рассчитываем температурное поле по высоте печи $t(x)$ без учета объемной плотности тепловыделений за счет химических реакций ($q_v = 0$);
- по полученной зависимости $t(x)$ определяем с помощью системы уравнений химических реакций (4) распределение объемной плотности тепловыделений $q_v(t)$ по высоте печи;
- рассчитываем уточненное распределение функции $t(x)$ для вычисленного по п. 2 $q_v(t)$ без учета изменения состава газа;
- уточняем объемную плотность тепловыделений $q_v(t)$ по найденному температурному полю $t(x)$ с учетом изменения состава газа;
- вычисляем температурное поле $t(x)$ при найденной $q_v(t)$ с учетом изменения состава газа.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

На рис. 2 представлены результаты расчета распределений температуры газа и шихты по высоте печи, которые иллюстрируют влияние радиационного теплообмена. Их сравнение показывает, что радиационный перенос приводит к интен-

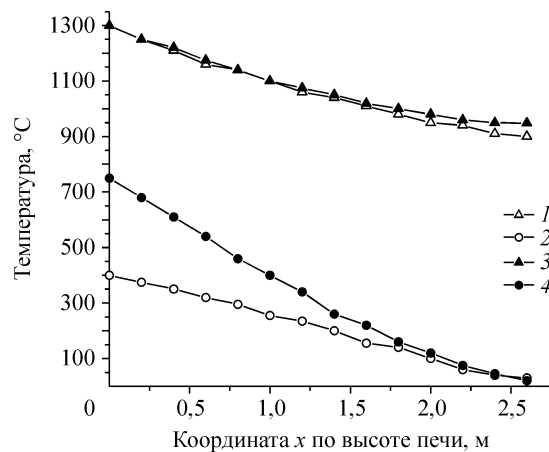


Рис. 2. Влияние излучения на температурные поля: температуры газа (1) и шихты (2) без учета излучения, температуры газа (3) и шихты (4) с учетом излучения.

сивному разогреву шихты. Особенно значительно этот эффект проявляется в нижней зоне печи. На распределение температуры газа излучение влияет меньше. Это связано с тем, что теплообмен между газом и шихтой в модели происходит только конвекцией, поскольку газ прозрачен для излучения.

Интенсивность конвективного теплообмена характеризуется объемным коэффициентом теплоотдачи α_v , который пропорционален $t^{0,3}$, тогда как коэффициент радиационной теплопроводности α_r , отвечающий за радиационный перенос, пропорционален t^3 . Поэтому излучение влияет на температуру шихты гораздо сильнее (особенно в области высоких температур), чем конвективный теплообмен с газом.

Из рис. 2 видно также, что излучение приводит к увеличению температурного градиента в шихте и росту перепада температур шихты по высоте печи, перепад температур в газе меняется слабо.

Для выяснения влияния расхода подаваемого в печь газа были проведены расчеты при повышенном удельном расходе газа ($G_T = 0,1 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$) по сравнению с условиями, которые соответствуют результатам, приведенным на рис. 2 ($G_T = 0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$). На рис. 3 представлены результаты таких расчетов, которые проводились с учетом теплопереноса излучением в шихте.

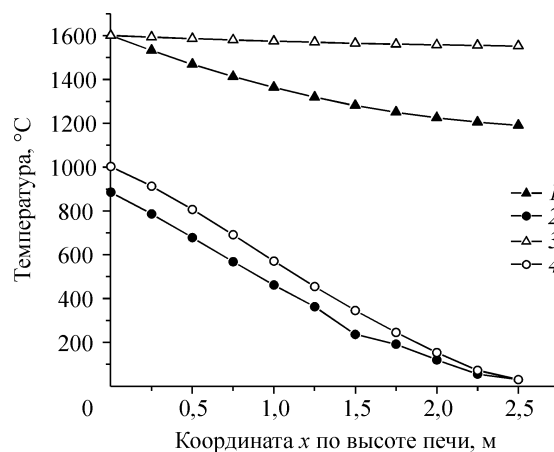


Рис. 3. Зависимость температурных полей от удельного расхода газа: температура газа (1, 3), температура шихты при $G_T = 0,01 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ (2, 4).

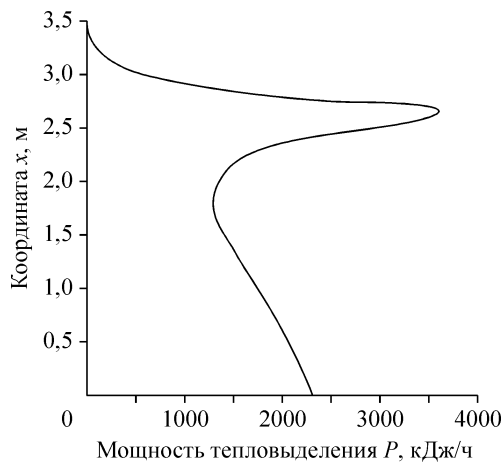
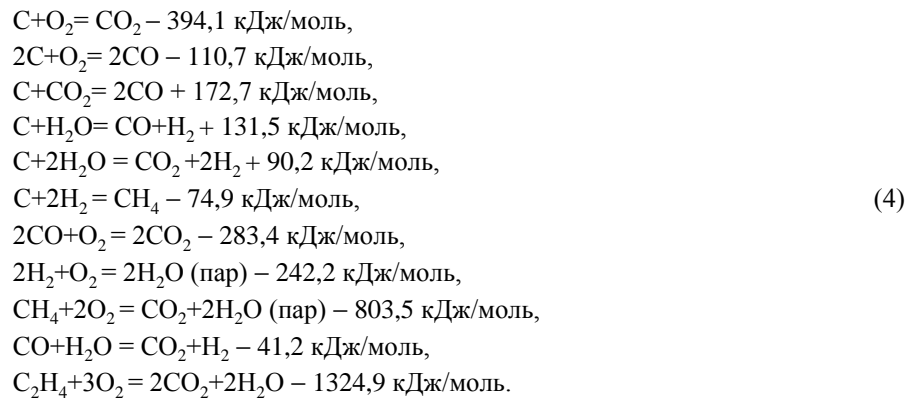


Рис. 4. Распределение мощности тепловыделения от химических реакций по высоте печи.

Прежде всего, необходимо отметить небольшой перепад температуры газа по высоте печи. Это связано с тем, что поток энтальпии в газе значительно выше, чем в шихте, поэтому теплоотвод в шихту слабо влияет на изменение потока энтальпии, а значит и на температуру газа.

Расчет удельной мощности тепловыделения $q_v(t)$, обусловленной протеканием химических реакций,

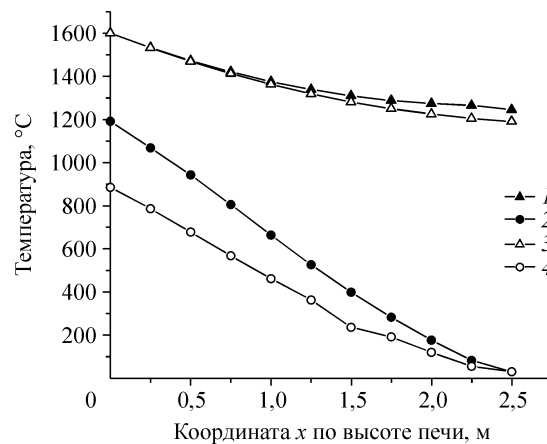
проводился в приближении химического равновесия. Применялся следующий комплекс химических реакций:



Если использовать зависимость константы равновесия фаз при окислении и газификации твердых отходов от температуры, то в предположении линейного распределения температуры шихты по высоте печи можно получить следующее распределение мощности тепловыделения $P(x)$ за счет химических реакций, которое показано на рис. 4, взятом из работы [8]. Полученное распределение $P(x)$ использовалось для получения зависимости $q_v(t)$.

На рис. 5 представлены результаты расчета температурного распределения с учетом тепловыделения в объеме шихты и радиационного теплообмена. Прежде всего, отмечается

Рис. 5. Влияние источника тепловыделения за счет химических реакций на температурные поля: температура газа с учетом (1) и без учета (3) химических реакций, температура шихты с учетом (2) и без учета (4) химических реакций.



значительный разогрев шихты в высокотемпературной зоне за счет экзотермических реакций. В низкотемпературной зоне, где скорости реакций значительно ниже, прогрета шихты за счет источников тепла не происходит.

ВЫВОДЫ

Результаты расчетов температуры в плазменной шахтной электропечи показывают значительное влияние излучения на теплообмен в порах шихты.

Показано, что неоднородное тепловыделение за счет химических реакций, имеющее ярко выраженный максимум (см. рис. 4), вызывает интенсивный прогрев шихты.

Установлено значительное влияние расхода высокотемпературного газа, с помощью которого можно оптимизировать габаритные размеры плазменной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горин А.В. Конвективный перенос в пористых средах и зернистых слоях. — Автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук. — Новосибирск: ИТ СО РАН, 1999. — 27 с.
2. Китаев Б.И., Тимофеев В.Н. и др. Тепло- и массообмен в плотном слое. — М.: Металлургия, 1972. — 315 с.
3. Любина Ю.Л., Сурис А.Л. Численное моделирование процессов газификации в плазмохимическом реакторе шахтного типа // Тр. МГАХМ: Состояние и перспективы развития научных работ в химическом машиностроении. — М.: МГАХМ, 1997. — Вып. 1. — С. 31–32.
4. Любина Ю.Л., Сурис А.Л. Исследование процесса плазменной газификации твердых органических веществ в шахтном реакторе // Теплоэнергетика. — 1999. — № 11. — С. 64–67.
5. Аньшаков А.С., Фалеев В.А., Даниленко А.А. и др. Исследование плазменной газификации углеродсодержащих техногенных отходов // Теплофизика и аэромеханика. — 2007. — Т. 14, № 4. — С. 639–650.
6. Чердниченко В.С., Казанов А.М., Аньшаков А.С. и др. Современные методы переработки твердых бытовых отходов. — Новосибирск: ИТ СО РАН, 1995. — 55 с.
7. Канторович Б.В. Введение в теорию горения и газификации твердого топлива. — М.: Металлургиздат, 1961. — 355 с.
8. Алиферов А.И., Синицын В.А., Власов Д.С., Домаров П.В., Даниленко А.А. Исследование теплообмена в рабочей камере шахтной электропечи для переработки техногенных отходов // Тр. 3-й Межд. научно-техн. конф. “Электротехника, Электромеханика. Электротехнологии. — ЭЭЭ-2007”, 25-26 октября 2007, Новосибирск. — Изд-во НГТУ, 2007. — С. 149–153.

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2008 г.