

УДК 621.365.91

Исследование энергетических параметров плазменно-резистивной печи*

А.С. Аньшаков^{1,2}, А.И. Алиферов², П.В. Домаров^{1,2}

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

²Новосибирский государственный технический университет

E-mail: Anshakov@itp.nsc.ru

Исследованы электрические и тепловые характеристики плазменно-резистивной печи в зоне сушки при утилизации техногенных отходов. Получены зависимости выделения мощности в зоне сушки при различных удельных электросопротивлениях шихты. Показано, что введение дополнительного резистивного нагрева в зоне сушки снижает нагрузку на плазмотрон, увеличивая ресурс работы электродов.

Ключевые слова: плазменно-резистивная электропечь, плазмотрон, математическая модель, техногенные отходы, плазменный нагрев, нагрев сопротивлением.

Введение

Обезвреживание и уничтожение техногенных отходов является одной из актуальных проблем, которые стоят перед человеческим обществом. В настоящее время технологии переработки техногенных отходов смещаются в сторону высоких температур, превышающих 1400–1500 °С. Этому условию хорошо соответствуют плазменные электротехнологии, одним из недостатков которых является их высокая энергоемкость (до 1 МВт на 1 тонну отходов). В связи с этим разработка методических подходов к созданию плазменных электротехнологических установок с улучшенными энергетическими параметрами для задач переработки техногенных отходов является весьма востребованной в настоящее время. К таким энергоэффективным установкам относятся электропечи с комбинированным плазменно-резистивным нагревом, применяемые для переработки отходов. При этом плазменный нагрев обеспечивает высокотемпературный стартовый нагрев отходов при пуске и выходе электроплазменной установки на установившиеся тепловой и технологический процессы, а резистивный нагрев обеспечивает дополнительное выделение энергии в зоне сушки отходов, создавая условия для понижения установленной мощности плазмотронов, применяемых в высокотемпературной технологии переработки техногенных отходов.

Моделирование теплообмена для условий шахтной плазменно-резистивной печи осложнено различными электрофизическими и физико-химическими процессами: комбинированным тепломассообменом в двухфазной системе, сопровождаемым в зоне сушки отходов выделением активной мощности от протекающего по отходом электрического тока, а во всем рабочем пространстве печи — комплексом химических реакций,

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по соглашению о субсидии № 14.607.21.0118 (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60715X0118).

фазовыми переходами (сублимация, плавление, испарение), и поэтому требует применения современных численных методов.

К настоящему времени накоплен уже достаточно большой опыт по изучению переноса тепла и массы в пористых средах [1–3], электромагнитных процессов, протекающих в электропроводящих средах [4, 5]. Теоретические и экспериментальные исследования параметров технологического процесса плазменного газификатора представлены в работах [6–8], конструктивные особенности и режимные параметры плазменных генераторов, применяемых в таких установках, можно найти, например, в работе [9].

Предлагаемая работа является развитием проведенных исследований в направлении создания энергоэффективных плазменных электропечей для переработки/утилизации техногенных отходов и посвящена разработке численной модели выделения энергии в шихте при пропускании через нее электрического тока в зоне сушки с целью уменьшения энергозатрат при переработке техногенных отходов.

Термохимические процессы в зоне сушки

На рис. 1 представлена модельная схема шахтной плазменно-резистивной электропечи для переработки техногенных отходов (отвод газа в верхней части не показан) [7]. В верхнюю часть шахты печи (при $x = h$) подается шихта техногенных отходов с начальной температурой t_0 и удельным расходом G_M^0 . Навстречу движущейся вниз шихте поднимается газовый поток, нагретый в нижней части печи одним или несколькими плазмотронами с начальной температурой T_0 и удельным расходом G_T^0 (при $x = 0$). Шихта, перемещаясь по шахте, подвергается последовательно сушке, пиролизу и газификации органической компоненты отходов. Неорганическая часть техногенных отходов переходит в зоне плавления в расплав. Поднимающийся газовый поток насыщается переходящей в газообразное состояние органической составляющей и водяным паром.

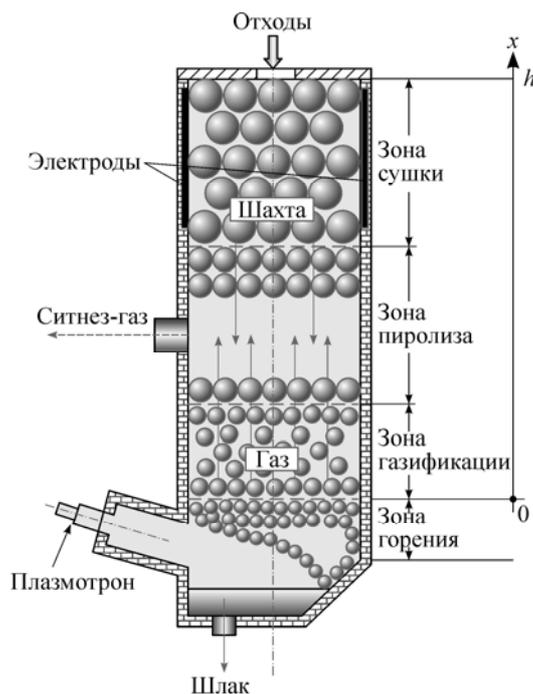
При организации непрерывного технологического процесса в камере печи формируются установившиеся газодинамический и тепловой режимы. Таким образом, процессы теплообмена в условиях встречных потоков твердой и газообразной фаз можно считать стационарными. Поперечное сечение шахты печи имеет переменную форму. В зоне сушки оно квадратное, в зоне пиролиза — коническое. В зоне сушки по всей поверхности двух противоположных стен камеры печи установлены графитовые электроды, обеспечивающие токоподвод к массе шихты отходов.

Модель теплофизических процессов в камере шахтной плазменной печи приведена в работах [7, 8], а теплообмен в слое шихты зоны сушки можно описать уравнениями

$$\begin{cases} (1-m) \frac{d}{dx} \left[\left(\lambda_K + \frac{md}{(1-\varepsilon)d/\lambda + 1/\alpha_L} \right) \frac{dt}{dx} \right] - G_M c \frac{dt}{dx} - \alpha_V (t-T) + q_{V_{\text{хим}}} + q_{V_{\text{эм}}} - q_{\text{тп}} = 0, \\ G_T c_p \frac{dT}{dx} - \alpha_V (t-T) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\alpha_V = 160v^{0,9}t^{0,3}/d^{0,75} \cdot m$ — объемный коэффициент теплоотдачи, $\alpha_L = 4\sigma t^3$ — коэффициент радиационной теплоотдачи, m — порозность, λ — коэффициент теплопроводности кусков шихты, λ_K — коэффициент контактной теплопроводности при соприкосновении кусков шихты, d — средний размер куска, 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, $q_{V_{\text{хим}}}(x)$ — объемная удельная мощность тепловыделения за счет химических реакций, $q_{V_{\text{эм}}}(x)$ — объемная удельная мощность тепловыделения, получаемая в зоне сушки при протекании в ней электрического тока, $q_{\text{тп}}(x)$ — приведенная объемная удельная мощность тепловых потерь через футеровку электропечи.

Рис. 1. Схема технологических зон переработки техногенных отходов в плазменно-резистивной шахтной электропечи.



Граничные условия, применяемые при решении системы уравнений (1), выглядят следующим образом: в верхнем сечении печи ($x = h$) температура отходов равна начальной температуре $t = t_0$, в нижнем сечении ($x = 0$) температура газа равна его начальной температуре $T = T_0$, а температура шихты равна заданному значению $t = t_{пл}$. Задан удельный расход шихты $G_M = G_M^0$ и удельный расход газа $G_\Gamma = G_\Gamma^0$.

В работах [7, 8] также приведена методика расчета удельной мощности тепловыделения $q_{V_{хим}}(x)$, обусловленной протеканием химических реакций. Для вычисления объемной удельной мощности тепловыделения $q_{V_{эм}}(x)$, получаемой в зоне сушки при протекании в ней электрического тока, используется программный комплекс конечно-элементного моделирования ANSYS. Полученное распределение объемной удельной мощности тепловыделения $q_{V_{эм}}(x)$ в виде матрицы исходных данных вводится в модель теплофизических процессов, описываемую системой уравнений (1).

Электромагнитные процессы в зоне сушки электропечи

Анализ литературных источников показал, что удельное электросопротивление, например, твердых бытовых отходов в летний период может составлять $\rho_{эл} = 3 \div 5$ Ом·м. Кроме этого, в зависимости от влажности и морфологического состава электросопротивление может принимать значения, сильно отличающиеся от приведенных выше. Поэтому при проведении модельных расчетов было принято $\rho_{эл} = 1 \div 10$ Ом·м.

При переработке отходы находятся во влажном состоянии в зоне их подачи только в пределах области сушки. В зону пиролиза отходы попадают обезвоженными и сухими с удельным электросопротивлением, в десятки раз превышающим его значение в начале зоны сушки. Исходя из этого, резистивный нагрев током промышленной частоты будем реализовывать только в зоне сушки. Форма поперечного сечения зоны сушки выбрана квадратной для обеспечения равномерного распределения мощности $q_{V_{эм}}(x)$ по сечению шихты отходов.

При разработке модели электромагнитных процессов был принят ряд допущений: токами смещения можно пренебречь; электромагнитное поле является переменным, синусоидально изменяющимся во времени; свободные заряды в расчетной области отсутствуют.

Математическое описание непрерывных в пространстве и во времени процессов электромагнитного поля в зоне сушки печи производится с помощью дифференциальных уравнений электродинамики в частных производных, записанных относительно векторного магнитного (A) и скалярного электрического (φ) потенциалов в (2) и (3), и уравнения непрерывности (4):

$$\nabla^2 A - \nabla(\nabla A + \varepsilon_a \mu_a \partial \varphi / \partial \tau) - \varepsilon_a \mu_a \partial^2 A / \partial \tau^2 = -\mu_a, \quad (2)$$

$$\nabla^2 \varphi + (\partial \nabla A / \partial \tau) \nabla A = -\rho_q / \varepsilon_a, \quad (3)$$

$$\nabla \delta = -\partial \rho_q / \partial \tau, \quad (4)$$

где δ — вектор плотности тока, ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость, ρ_q — плотность свободных зарядов, τ — время.

При принятых допущениях уравнения (2)–(4) могут быть представлены в виде

$$\nabla^2 \dot{A} = -\mu_a \dot{\delta}, \quad (5)$$

$$\nabla \dot{\delta} = 0, \quad (6)$$

$$\delta = -\gamma j \omega \dot{A}, \quad (7)$$

где $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота электромагнитного поля, j — плотность тока проводимости, f — частота, γ — удельная проводимость среды.

Система уравнений (5)–(7) решается при следующих граничных условиях:

– на границе расчетной области касательная и нормальная составляющие векторного магнитного потенциала удовлетворяют условию:

$$\partial \dot{A}_\tau / \partial n = 0, \quad A_n = 0, \quad (8)$$

где n — нормаль к границе расчетной области;

– при формировании электрической цепи задачи «электрод–шихта–электрод» на торцевой поверхности электродов задавалась величина вводимого в систему тока (расчет проводился при стабилизированном переменном токе промышленной частоты).

Решение системы уравнений (5)–(7) при граничном условии (8) выполняется в программном комплексе ANSYS методом конечных элементов.

Алгоритм расчета

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

1. Проводится расчет электромагнитной задачи в ПК ANSYS и определение величины выделяемой мощности $q_{V_{эм}}(x)$ в поперечном сечении камеры печи в зоне сушки.

2. Решается система уравнений (1) с вычислением распределения температурного поля по высоте печи для шихты $t(x)$ и газа $T(x)$ без учета тепловыделения, получаемого от химических реакций ($q_{V_{хим}} = 0$), но с учетом объемной удельной мощности тепловыделения в зоне сушки при протекании в ней электрического тока $q_{V_{эм}}(x)$.

3. По полученному температурному распределению шихты $t(x)$ с помощью системы уравнений химических реакций определяется распределение объемной плотности тепловыделения $q_{V_{хим}}(x)$ по высоте печи.

4. Определяется распределение тепловых потерь через футеровку печи по ее высоте.

5. После уточнения распределений температуры шихты $t(x)$ и газа $T(x)$ при данных $q_{V_{хим}}(x)$ и $q_{тп}(x)$ вычисляется температурное распределение $t(x)$.

Результаты математического моделирования

Для электродинамической задачи необходимо знать электрический параметр $\rho_{эл}$, который является одним из обобщенных параметров электрической цепи. В связи с этим в рассматриваемом случае он не идентифицируется с влажностью отходов, которая определяется их морфологическим составом, условиями хранения и количеством.

Выделение интегральной мощности в шихте при протекании через нее электрического тока рассчитывалось в программном комплексе ANSYS. Диапазон приложенного напряжения к электродам $U = 250 \div 1000$ В и сила тока $I = 100$ А. На рис. 2 представлена

зависимость интегральной мощности, выделяемой в зоне сушки в процессе резистивного нагрева от приложенного к электродам напряжения. Видно, что при увеличении удельного электросопротивления отходов уменьшается выделение мощности в загрузке. Связано это со снижением влажности техногенных отходов.

На рис. 3 приведены зависимости температурного поля по высоте шахтной электропечи для шихты и газа при отсутствии и наличии резистивного нагрева в зоне сушки. В случае протекания тока между графитовыми электродами температура газа (1) и шихты (2) примерно на 200 °С превышает температуру газа (3) и шихты (4) без омического нагрева. Этот перепад температур сохраняется до зоны газификации. Как видно из графика, омический нагрев осуществляется на расстоянии 1 м от места загрузки отходов, т.е. в месте расположения электродов.

Как было показано в работе [10], удельные энергозатраты на переработку техногенных отходов существенно зависят от их влажности. На рис. 4 приведена расчетно-экспериментальная зависимость, устанавливающая связь между энергозатратами, требуемыми на переработку техногенных отходов, от их влажности.

В процессе сушки под действием резистивного нагрева влага из отходов испаряется с уменьшением ее содержания от (60÷50) % до 20 %. Как показано в публикации [11], отходы при минимальной влажности 20 % содержат все химические элементы, необходимые для их полной газификации. Резистивный нагрев, как и нагрев прямой, в рассматриваемой плазменно-резистивной печи обладает высокой эффективностью. Его КПД без учета тепловых потерь через футеровку близок к 100 %. При этом нагрев зоны сушки газовым потоком косвенным методом от плазмотронов, мощность которых передается плазмообразующему газу с КПД ≈ 80 %, будет проходить менее эффективно, чем при резистивном нагреве.

Как видно из рис. 4, при уменьшении влажности отходов с 50 до 30 % заметно снижаются удельные энергозатраты на их газификацию (почти в два раза — с 0,75 до 0,4 кВт·ч/кг). Таким образом, при реализации комбинированного плазменно-резистивного нагрева шихты техногенных отходов обеспечивается значительное снижение удельных энергозатрат с использованием подвода тепла только от плазмотрона. Для переработки 1 кг техногенных отходов эти затраты составляют менее 0,4 кВт·ч/кг.

Рассмотрим конкретный пример влияния омического нагрева шихты твердых бытовых отходов на энергетику газификатора. Как видно из расчетно-экспериментальных данных, изображенных на рис. 5, который был представлен в публикации [11], при газификации органических отходов с влажностью 50 % при производительности печи $G_M = 90$ кг/час требуются плазмотроны с мощностью около 120 кВт. Уменьшение влажности

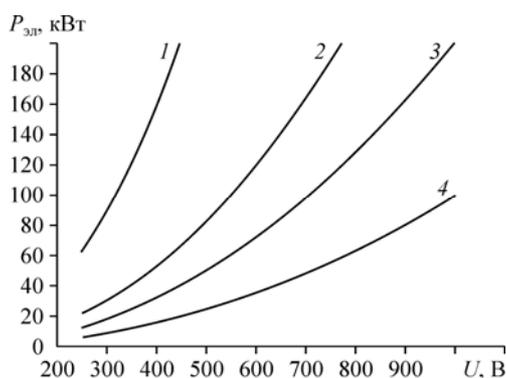


Рис. 2. Зависимость мощности $P_{эл}$, выделяемой в зоне сушки, от напряжения U на электродах при резистивном нагреве.

$$\rho_{эл} = 1 (1), 3 (2), 5 (3), 10 (4) \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

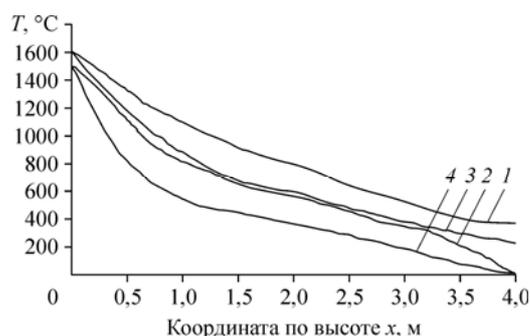


Рис. 3. Распределение температуры по высоте печи при наличии и отсутствии резистивного нагрева.

Температура газа (1) и шихты (2) с резистивным нагревом, температура газа (3) и шихты (4) без резистивного нагрева.

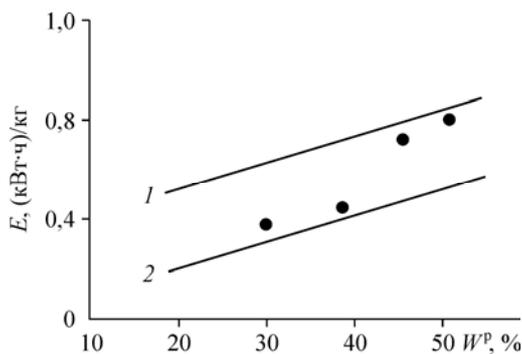


Рис. 4. Зависимость удельных энергозатрат на пиролиз 1 кг отходов от их влажности.

1 — расход плазмообразующего воздуха отсутствует,
2 — расход воздуха 0,15 г/с на 1 кг отходов в час,
символы — эксперимент.

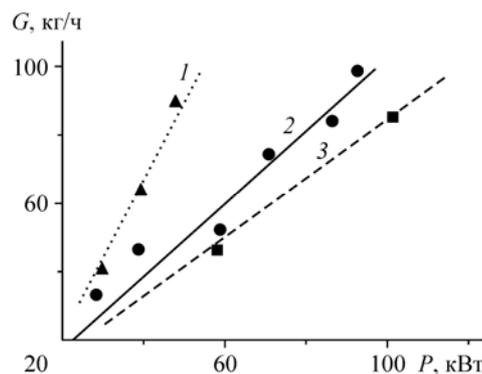


Рис. 5. Влияние мощности плазматронов на производительность газификатора.

Влажность твердых отходов: 29 (1), 45 (2), 50 (3) %.

отходов до 29 % приводит к снижению необходимой мощности плазматрона до 50 кВт. Следовательно, ввод дополнительной мощности посредством резистивного нагрева $P = 120 - 50 = 70$ кВт в зоне сушки позволяет уменьшить мощность плазматрона на 58 % для заданной производительности электропечи. Уменьшение требуемой мощности плазматрона дает возможность заметно повысить ресурсные характеристики плазменного блока установки благодаря переходу на плазматроны с меньшими рабочими токами, увеличивая срок службы электродов.

Подводя итог вышесказанному, следует отметить, что организация резистивного нагрева влажных отходов в верхней части шахтной электропечи является аналогом предварительного технологического процесса подсушивания отходов перед загрузкой их в печь для снижения удельных энергозатрат на газификацию органической составляющей смешанных отходов.

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., Боковиков Б.А., Малкин В.М., Швыдкий В.С., Шкляр Ф.Р., Ярошенко Ю.Г. Тепло- и массообмен в плотном слое. М.: Металлургия, 1972. 315 с.
3. Любина Ю.Л., Сурис А.Л. Исследование процесса плазменной газификации твердых органических веществ в шахтном реакторе // Теплоэнергетика. 1999. № 11. С. 64–67.
4. Lupi S., Forzan M., Aliferov A. Induction and direct resistance heating: theory and numerical modeling: monograph. Heidelberg: Springer, 2015. 370 p.
5. Алиферов А.И., Луни С. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 410 с.
6. Аньшаков А.С., Фалеев В.А., Даниленко А.А., Урбах Э.К., Урбах А.Э. Исследование плазменной газификации углеродсодержащих техногенных отходов // Теплофиз. и аэромех. 2007. Т. 14, № 4. С. 639–650.
7. Алиферов А.И., Аньшаков А.С., Сеницын В.А. Численное моделирование теплообмена в плазменной электропечи при утилизации техногенных отходов // Теплофиз. и аэромех. 2009. Т. 16, № 1. С. 165–171.
8. Алиферов А.И., Аньшаков А.С., Сеницын В.А., Домаров П.В., Власов Д.С. Теплообмен в рабочей камере шахтной плазменной печи при переработке техногенных отходов // Альтернативная энергетика и экология. 2011. № 10. С. 154–159.
9. Аньшаков А.С., Домаров П.В. Исследование энергетических характеристик в электродуговом плазматроне с выходным ступенчатым электродом // Научный вестник НГТУ. 2013. Т. 53, № 4. С. 139–143.
10. Кузьмин М.Г., Чердиченко В.С., Аньшаков А.С., Алиферов А.И., Домаров П.В., Радько С.И., Урбах Э.К., Фалеев В.А. Электроплазменная переработка/утилизация углеродсодержащих техногенных отходов // Сб. тр. XVII конгресса 21–25 мая, 2012, С-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. С. 127–131.
11. Чердиченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 602 с.

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2016 г.,
после доработки — 2 марта 2016 г.