

А. В. БОЛОТОВ, С. В. МАШКИНА

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ
ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ
ПОЛУЧЕНИЯ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ**

The mathematical interpretation of the energy transformation in the electro-technological process of activated carbon producing is presented. It reflects the diversity of parameters of the process, their dependence on temperature and the properties of the particles of the dispersed raw material. The presence of temperature periods connected with water evaporation and decomposition of hydrocarbons are noted. The mechanism of formation of electrical conductivity in the reactor is described. Energy balance of the process in the conditions of variable voltage and electric current in the reactor is compiled.

Широкому использованию эффективного сорбента – активированных углей препятствуют дорогое сырье, сложная технология производства и, как следствие, его высокая стоимость. Совершенствование производства предполагает упрощение технологии, снижение энергоемкости и использование дешевых и широко доступных сырьевых ресурсов [1].

Разрабатываемый новый способ получения активированного угля и реактор для его осуществления характеризуются возможностью повышения выхода и качества готового продукта с одновременным получением содержащих углеводороды газов [2]. В качестве сырья используются дисперсные отходы растительного происхождения, например выведенные из пищевого применения зерновые материалы злаковых культур, фруктовая косточка.

В перерабатываемом дисперсном неэлектропроводном сырье находится дисперсный инициатор процесса – электропроводный уголь, образующий

проводники между электродами технологического реактора, так называемый «стартовый слой». При пропускании по нему тока он разогревается и сырье подвергается вначале косвенному нагреву от дисперсного угольного резистора снизу и с боков от электродов, нагреваемых тем же током, что протекает через дисперсные проводники стартового слоя. После карбонизации сырья его частицы, ставшие электропроводными, создают общую объемную проводимость и нагреваются проходящим по ним током. Соблюдение оптимального электрического и температурного графика процесса нагрева обеспечивается системой автоматического управления источником питания. Распределение энергетических потоков в технологическом реакторе можно представить состоящими из двух частей – расходной и приходной (рис. 1).

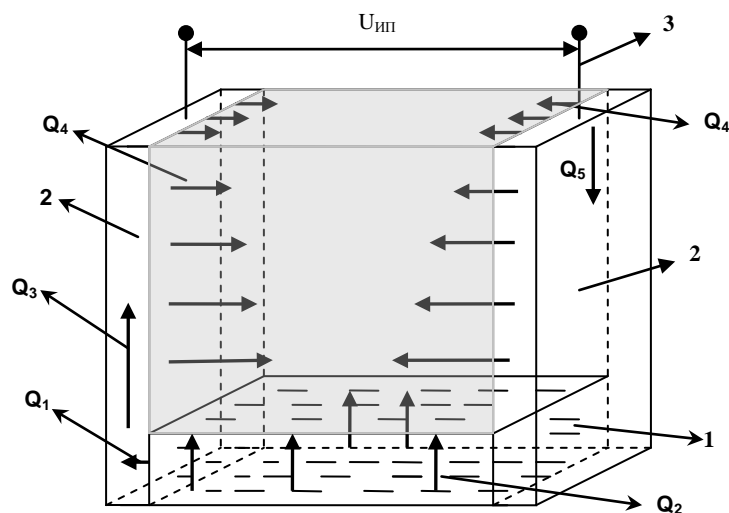


Рис. 1. Энергетическая структура реактора для получения активированного угля: — — электропроводный стартовый слой; — — электроды; 3 — подвод напряжения источника питания; Q_1 — тепловой поток в электроды; Q_2 — тепловой поток стартового слоя в нагреваемый материал; Q_3 — тепловой поток вверх по электроду реактора; Q_4 — тепловой поток от электродов в нагреваемый материал, Q_5 — резистивный нагрев

электрода при протекании тока от точки подвода энергии до стартового слоя; серым цветом обозначен перерабатываемый материал – садка

1. Расходная часть преобразования энергии имеет следующий состав:

$$Q_{расх} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \quad (1)$$

где Q_1 – энергия нагрева сырья до температуры кипения влаги ($T = T_0 \div 100$ °C); Q_2 – энергия, затраченная на испарение и удаление влаги ($T = 100 \div 140$ °C); Q_3 – энергия нагрева среды до начала разложения углеводов ($T = 140 \div 450$ °C); Q_4 – энергия испарения и удаления углеводов ($T = 450 \div 600$ °C); Q_5 – энергия активации ($T = 600 \div 950$ °C); Q_6 – тепловые потери в окружающую среду через футеровку и крышку реактора; минимальные в начале процесса и максимальные на стадии активации.

Величины $Q_1 \div Q_5$ содержат теплофизические параметры перерабатываемого материала и характеризуется общими значениями – весом G , теплоемкостью C и разностью температур соответствующих уровней нагрева.

Потери энергии в окружающую среду через тепловую защиту реактора и крышку определяются теплоизоляцией реактора.

Таким образом, расходная часть преобразования энергии имеет вид

$$Q_{преоб} = G_{сырья} \cdot C_1 \cdot (T_K - T_0) + G_{воды} \cdot C_{воды} \cdot (T_{140} - T_{100}) + Q_3 + Q_4 + G_{угл.скелета} \cdot C_{600 \div 950} \cdot (T_{950} - T_{600}) + Q_6. \quad (2)$$

2. Приходная часть энергии. Энергия, поступающая из электрической сети $Q(t)$, определяется подводимым к электродам реактора напряжением U , величиной протекающего тока I , длительностью процесса t , выделяется в стартовом слое и разделяется на две части:

1) электрический нагрев стартового слоя и прилегающего к нему материала за счет теплопроводности;

2) электрический нагрев электродов за счет контактной разности потенциалов в месте контакта с дисперсным проводником и прохождения тока от точки подвода энергии до точки контакта со стартовым слоем и нагрев с боков всего объема сырья.

При проведении процесса выполняются следующие условия:

объем стартового слоя с контролируемой его высотой на площади реактора должен быть минимальным;

сопротивление стартового слоя должно соответствовать возможности протекания стартового тока при высшем напряжении источника питания.

Садка в реакторе – электропроводящий стартовый слой и перерабатываемое неэлектропроводное сырье – представляет собой активное сопротивление с изменяющимися в процессе нагрева параметрами – удельным электрическим сопротивлением, сечением электропроводности и плотностью тока.

Электропроводность канала в стартовом слое образуется соединением частиц в единую цепь за счет касания в отдельных точках (рис. 2).

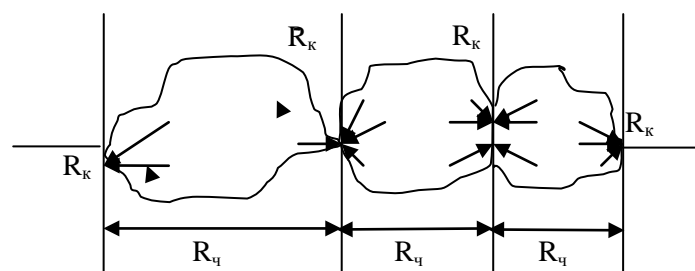


Рис. 2. Схема электрической цепи в дисперсном проводнике: R_k – контактное сопротивление; $R_ч$ – сопротивление частицы

Энергию Q , выделяющуюся в цепи тока, можно описать следующим уравнением:

$$Q = I^2 \cdot \sum (R_q + R_k) \cdot t, \quad (3)$$

где R_q – сопротивление частицы, Ом; R_k – переходное сопротивление контактов между частицами, Ом, которое определяется следующим образом:

$$R_k = R_c + R_n, \quad (4)$$

где R_c – сопротивление участков стягивания тока, зависящее от температуры частиц, и при отсутствии в них удаляющихся при повышении температуры компонентов (вода, углеводороды, разлагающиеся соединения) является нелинейной функцией:

$$R_c = f(T); \quad (5)$$

R_n – сопротивление пленок, покрывающих контактирующие поверхности:

$$R_n = \rho \Delta / S, \quad (6)$$

где ρ – удельное сопротивление пленки, Ом·см²; Δ – толщина пленки, мм; S – площадь контакта по пленке, мм².

При нагревании из сырья выделяются входящие в его состав компоненты: вода, жиры, белки и углеводы, образующие при соответствующих температурах пар, метанол, этанол и высшие углеводородные газы. При дальнейшем увеличении температуры сырье карбонизируется, проходит стадию активации при температурах от 890 до 950°С. Все пространство между электродами приобретает одинаковую электропроводность, поскольку находится между электродами, имеющими одинаковую температуру по всей площади поверхности, что определяет полную и однородную переработку сырья и получение активированных углей высокого качества.

Напряжение между электродами регулируется на различных стадиях технологического процесса. В структуре напряжения можно выделить следующие переменные компоненты:

$$U = (U_{a1} + U_{к1}) \cdot \frac{1}{2} + E(T) \cdot l + 2 \cdot IR_{эл} + (U_{a2} + U_{к2}) \cdot \frac{1}{2}, \quad (7)$$

где U_a и U_k – контактное падение потенциала (соответственно анодное и катодное), возникающее в точках контакта дисперсного проводника с электродами 1 и 2, В; E – линейный градиент потенциала по межэлектродному пространству, заполненному садкой, В/см, параметр, изменяющийся в течение всего технологического процесса и зависящий от статического давления, температуры и сечения электропроводного канала [3]; l – расстояние между электродами реактора, см; I – ток реактора, А, его величина изменяется от минимального значения при старте процесса до максимального значения в конце процесса; $R_{эл}$ – нелинейное активное сопротивление садки, Ом, представляемое зависимостью

$$R = \frac{\rho \cdot L}{S}, \quad (8)$$

где ρ – удельное сопротивление садки, зависящее от температуры и уменьшающееся при ее повышении, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{см}^2}{\text{мм}}$; L – расстояние от точки токоподвода до электропроводного слоя, мм; S – поперечное сечение электрода, см^2 .

Величины анодного и катодного падения потенциала – первое и последнее слагаемые в (7) в процессе преобразования сырья не являются постоянными и имеют падающую вольт-амперную характеристику [4]. В электродной паре «дисперсный проводник – металлический электрод» мощность, выделяющаяся в контактной разности потенциалов, расходуется следующим образом:

- на нагрев прилегающего сырья;
- на нагрев собственно электрода.

Ход технологического процесса связан с плотностью тока в электропроводном канале и соответственно на электродах. Максимальная плотность тока на электроде наблюдается в начале процесса при

протекании тока через стартовый слой. В дальнейшем при расширении зоны электропроводности плотность тока снижается и становится одинаковой по всей поверхности электрода. Диапазон изменения плотности тока на поверхности электрода составляет от 0,4 до $0,238 \cdot 10^{-2}$ А/мм². При повышении температуры сырья возрастает его электропроводность и для протекания заданного тока требуется снижение напряжения, что достигается регулированием подводимого напряжения.

Таким образом, на величину тока, протекающего через реактор, оказывают влияние переменная проводимость среды γ и уровень подаваемого напряжения:

$$I = f(\rho, U) = \frac{U}{R} = \frac{U}{\frac{\rho \cdot l}{S}} = \frac{1}{l} f(\gamma \cdot S \cdot U). \quad (9)$$

Энергия, расходуемая на технологический процесс, записывается в виде

$$Q_p = \int_0^{t_k} \left[(U_{a1} + U_{к1}) \cdot \frac{1}{2} + E(T) \cdot l + 2 \cdot IR_{эл} + (U_{a2} + U_{к2}) \cdot \frac{1}{2} \right] \cdot \left[\frac{1}{l} f(\gamma \cdot S \cdot U) \right] (t) dt. \quad (10)$$

Общая энергетическая структура процесса с учетом (2) и (10)

представляется в следующем виде:

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^{t_k} \left[(U_{a1} + U_{к1}) \cdot \frac{1}{2} + E(T) \cdot l + 2 \cdot IR_{эл} + (U_{a2} + U_{к2}) \cdot \frac{1}{2} \right] \cdot \left[\frac{1}{l} f(\gamma \cdot S \cdot U) \right] (t) dt = \\ &= G_{сырья} \cdot C_1 \cdot (T_K - T_0) + G_{воды} \cdot C_{воды} \cdot (T_{140} - T_{100}) + Q_3 + \\ &+ Q_4 + G_{угл.скелета} \cdot C_{600 \div 950} \cdot (T_{950} - T_{600}) + Q_6. \end{aligned} \quad (11)$$

Выход продукта «по массе» и «по энергии», а также длительность процесса находятся в зависимости от содержания в сырье летучих компонентов. Представленная структура преобразований энергии в реакторе отражает многообразие параметров процесса, зависимость их от температуры и свойств частиц в условиях изменения в широких пределах

подводимого напряжения и протекающего в реакторе тока, формирует направления экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Болотов А.В., Машикина С.В.* Оборудование и технологии производства активированных углей // *Новости науки Казахстана*. 2007. №4. С. 59-63.
2. *Болотов А.В., Болотов С.А.* Способ Болотова получения активированного угля и устройство для его осуществления // Предварительный патент РК № 18852, Опубл. Бюл. 2007.№10.
3. *Болотов А.В., Леонтьева Н.С.* Электропроводность углеродной массы как основа технологии производства активированного угля и оценки его активности // *Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан*. 2004. №1. С. 121-127.
4. *Бричкин А.В., Болотов А.В., Борисова Т.В.* К динамике электродных пятен электрической дуги // *Журнал технической физики*. 1966. Т. XXXVI, № 7. С. 1251-1258.