

УДК 504.054

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ УГЛЯ ПО ГЕТЕРОГЕННОЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Николай Викторович Бучилин

кандидат технических наук, доцент

isk115599@rambler.ru

Алексей Васильевич Аксеновский

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

nokey2002@mail.ru

Иван Павлович Криволапов

кандидат технических наук, доцент

ivan0068@bk.ru

Сергей Юрьевич Щербаков

кандидат технических наук, доцент

Scherbakov78@yandex.ru

Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

Аннотация. Проблема возникновения пожаров и контроля процесса горения органических материалов и угля на сегодняшний день остаётся актуальной. Работа посвящена изучению методик расчёта степени превращения (полноты сгорания) угля по гетерогенной кинетической модели реакции. Рассматривается влияние геометрической формы сгораемых частиц на полноту сгорания. Получаемые расчётные значения степени превращения позволяют оценить вероятное время, необходимое для сгорания угля.

Ключевые слова: сжигание угля, неконтролируемое горение, кинетика гетерогенных реакций, константа скорости реакции

Пожарную опасность представляют вещества и материалы, которые в силу своих свойств способны приводить к возникновению или развитию пожара. Математическое моделирование процессов горения позволяет производить оценку пожарной опасности веществ и материалов [1-3]. В проведённой ранее работе приводилось математическое описание процесса горения твёрдых частиц угля идеальной сферической формы [4]. В данной статье рассматривается математическое описание процесса горения твёрдых частиц различной формы.

При горении частиц площадь поверхности убывает со временем протекания реакции [5-7]. Кинетическое уравнение, описывающее этот процесс, имеет следующий вид:

$$-\frac{dM}{d\tau} = kFC \quad (1)$$

где: M – масса частицы в данный момент времени τ ; k – константа скорости химической реакции; F – площадь поверхности частицы; C – концентрация кислорода в реакционной зоне.

Большинство частиц угля имеют преимущественно окатанную форму, близкую к форме шара [8-9]. Для таких частиц площадь поверхности и масса в данный момент времени сгорания вычисляются по формулам:

$$F = 4\pi r^2 \Rightarrow M = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho \quad (2)$$

где: r – радиус частицы; ρ – плотность частицы.

Следовательно:

$$F = 4\pi \left(\frac{3}{4\pi\rho}\right)^{\frac{2}{3}} \times M^{\frac{2}{3}} \Rightarrow -\frac{dM}{d\tau} = 4k\pi \left(\frac{3}{4\pi\rho}\right)^{\frac{2}{3}} \times M^{\frac{2}{3}} \times C \Rightarrow$$

$$-\int_{M_0}^M \frac{dM}{M^{\frac{2}{3}}} = k' \int_0^{\tau} d\tau \Rightarrow 3 \left(M_0^{\frac{1}{3}} - M^{\frac{1}{3}} \right) = k' \tau \quad (3)$$

где k' – приведённая константа скорости горения продукта при условии постоянной концентрации кислорода в зоне горения:

$$k' = 4k\pi \left(\frac{3}{4\pi\rho}\right)^{\frac{2}{3}} \times C \quad (4)$$

Для частиц в форме куба используются уравнения:

$$F = 4r^3 \Rightarrow M = r^3\rho \quad (5)$$

где: r – длина ребра кубической частицы; ρ – плотность частицы.

Подставляя формулы (3) в формулу (1), получаем:

$$r = \left(\frac{M}{\rho}\right)^{\frac{1}{3}} \Rightarrow F = 6\left(\frac{M}{\rho}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

где: r – радиус частицы; ρ – плотность частицы.

$$-\frac{dM}{d\tau} = 6k\left(\frac{M}{\rho}\right)^{\frac{2}{3}} C = k'M^{\frac{2}{3}} \Rightarrow 3\left(M_0^{\frac{1}{3}} - M^{\frac{1}{3}}\right) = k'\tau \quad (7)$$

Получается уравнение, идентичное уравнению для идеального шара.

Для частиц вытянутой цилиндрической формы, у которых длина (l) много больше радиуса (r), можно пренебречь реакцией на торцах. Поэтому в процессе протекания реакции их длина остаётся постоянной ($l = \text{const}$). Получим следующие уравнения:

$$F = 2\pi r l \Rightarrow M = \pi r^2 l \rho \quad (8)$$

Подставляя формулы (8) в формулу (1), получаем:

$$r = \left(\frac{M}{\pi l \rho}\right)^{\frac{1}{2}} \Rightarrow F = 2\pi l \left(\frac{M}{\pi l \rho}\right)^{\frac{1}{2}} = 2\left(\frac{\pi l}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$-\frac{dM}{d\tau} = k\left(\frac{\pi l}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} C = k'M^{\frac{1}{2}} \Rightarrow -\int_{M_0}^M \frac{dM}{M^{\frac{1}{2}}} = k' \int_0^{\tau} d\tau \quad (10)$$

$$2\left(M_0^{\frac{1}{2}} - M^{\frac{1}{2}}\right) = k'\tau \quad (11)$$

Как было описано ранее в статье [4], для более простого выражения скорости реакции используется понятие степени превращения (полноты сгорания) α , которая выражается в долях от единицы либо процентах:

$$\alpha = \frac{M_0 - M}{M_0} \quad (12)$$

Формулы для расчёта степени превращения горящего порошкообразного материала, состоящего из частиц различной формы, и имеющих одинаковый размер, приведены ниже:

Сферические частицы. В формулах r – радиус частицы.

$$\alpha = 1 - \frac{r^3}{r_0^3} \Rightarrow r = r_0(1 - \alpha)^{\frac{1}{3}}, \quad (13)$$

$$1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}} = \frac{k \times C \times \tau}{r_0 \times \rho} \quad (14)$$

Кубические частицы. В формулах r – длина стороны частицы.

$$\alpha = 1 - \frac{r^3}{r_0^3} \Rightarrow r = r_0(1 - \alpha)^{\frac{1}{3}}, \quad (15)$$

$$1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}} = \frac{2k \times C \times \tau}{r_0 \times \rho} \quad (16)$$

Вытянутые цилиндрические (стержневидные) частицы. В формулах r – радиус цилиндрической частицы.

$$\alpha = 1 - \frac{r^2}{r_0^2} \Rightarrow r = r_0(1 - \alpha)^{\frac{1}{2}}, \quad (17)$$

$$1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{2}} = \frac{k \times C \times \tau}{r_0 \times \rho} \quad (18)$$

Приведённые уравнения в общем виде позволяют производить математическое описание гетерогенных химических реакций с различной геометрией поверхности раздела. В частности, этими уравнениями описывается

полнота сгорания угля при известных значениях констант скорости реакции горения. Константа зависит от присутствия катализатора, либо ингибитора в реакционной зоне, однако не зависит от геометрии сгораемых частиц. В расчётах константу скорости сгорания угля без использования каталитических добавок принимали равной 0,039. Таким образом, получаются зависимости полноты сгорания частиц угля определённой геометрии от времени, представленные на рисунке 1. В расчётах плотность угля принималась равной 1290 кг/м^3 , а средний размер частиц (r) – равным 5 см.

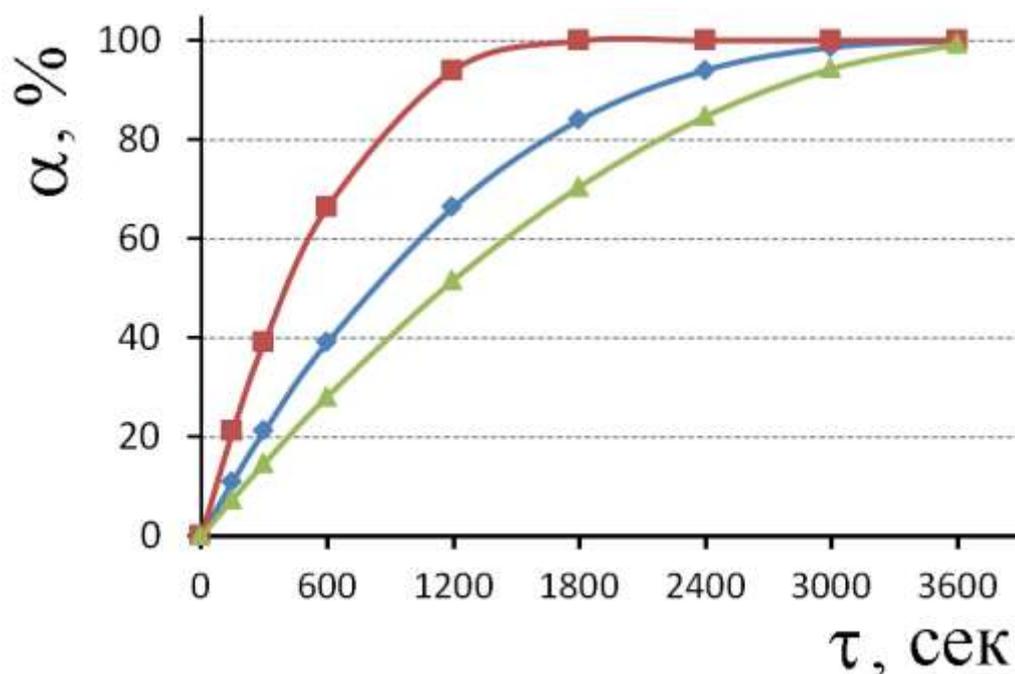


Рисунок 1 – Зависимость полноты сгорания (α) от продолжительности горения (τ) угля с различной геометрией частиц. — ромб — сферические частицы; — квадрат — кубические частицы; — треугольник — цилиндрические (стержневидные) частицы

Как видно из представленных формул, для частиц идеальной кубической и сферической формы зависимость полноты сгорания от времени пропорциональна кубическому корню, а для частиц стержневидной цилиндрической формы – квадратному корню. Расчётные данные показывают, что за 1 час (3600 секунд) будет происходить полное сгорание частиц угля с любой геометрией. Наибольшей скоростью сгорания обладают частицы идеальной кубической формы – они полностью сгорают через 30 минут (1800

секунд) после начала возгорания. Объясняется это двумя факторами: в расчётах величина (r) соответствует полной длине стороны куба, а для сферических частиц – только половине диаметра, т.е. фактически кубические частицы в длину в 2 раза меньше кубических. Кроме того, в выбранных математических приближениях кубическая форма частиц диктует проявление вдвое большей скорости горения относительно частиц сферической формы (см. формулы 14 и 16).

Наименьшей скоростью горения обладают частицы стержневидной формы: полнота их сгорания достигает 100 % только через час горения. При этом так как для данных частиц зависимость полноты сгорания от времени пропорциональна не кубическому, а квадратному корню, то их сгорание происходит наиболее плавно.

Представленная методика расчёта может быть использована для прогнозирования последствий горения твёрдых порошкообразных и гранулированных веществ. Для более точных расчётов необходимо учитывать влияние более сложной геометрии реальных частиц, а также влияние скорости движения конвективных потоков воздуха при горении.

Список литературы:

1. Коломиец А.А., Манаенков К.А., Найденов А.А. Оценка показателей надёжности автотранспортных средств // Наука и Образование. 2021. Т. 4. № 1. С. 47.
2. Щербаков С.Ю., Криволапов И.П., Стрельников Д.И., Коробельников А.П. Характеристика методов проведения анализа риска // Наука и Образование. 2019. Т. 2. № 4. С. 253.
3. Клименко Н.Н., Нистратов А.В., Киселева К.И., Делицын Л.М., Сигаев В.Н. Применение вторичного углеродного волокна для армирования композиционного материала на основе щелочеактивированного доменного шлака // Стекло и керамика. 2020. № 11. С. 28-31.

4. Бучилин Н.В., Аксеновский А.В., Щербаков С.Ю. Кинетика ингибирования процессов горения угля // Наука и Образование. 2022. Т. 5. № 3.
5. Картечина Н.В., Макова Н.Е., Шацкий В.А., Дорохова А.М. Информационная модель учета сельскохозяйственной техники // Наука и Образование. 2021. Т. 4. № 1. С. 40.
6. Ипполитов Е.Г., Артемов А.В., Батраков В.В. Физическая химия. М.: Издательский центр «Академия». 2005. 448 с.
7. Бучилин Н.В., Никитина В.Ю., Луговой А.А., Варрик Н.М., Бабашов В.Г. Получение высокопористых керамических материалов на основе алюмомагнезиальной шпинели // Стекло и керамика. 2020. № 10. С. 7-14.
8. Строкова Я.А., Клименко Н.Н. Комплексная щелочно-щелочноземельная активация гранулированного доменного шлака // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. № 4. С. 130-132.
9. Щербаков С.Ю., Аксеновский А.В., Криволапов И.П., Куденко В.Б. Оценка уровня обеспеченности и повышение пожарной безопасности на складах хранения нефтепродуктов предприятий АПК // Сб. научн. Трудов, посвящённый 85-летию Мичуринского государственного аграрного университета. Мичуринск. 2016. Т. 4. С. 110-114.

UDC 504.054

DETERMINATION OF COAL BURNING RATE USING A HETEROGENEOUS KINETIC MODEL

Nikolai V. Buchilin

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

isk115599@rambler.ru

Alexey V. Axenowskiy

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

noky2002@mail.ru

Ivan P. Krivolapov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

ivan0068@bk.ru

Sergey Yu. Sherbakov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Scherbakov78@yandex.ru

Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

Abstract. The problem of the occurrence of fires and control of the combustion processes of organic materials and coal remains relevant today. The work is devoted to the study of methods for calculating the degree of conversion (combustion completeness) of coal using a heterogeneous kinetic model of the reaction. The effect of the geometric shape of combustible particles on the completeness of combustion is considered. The resulting calculated values of the degree of conversion allow us to estimate the probable time, required for the coal combustion.

Keywords: coal burning, uncontrolled combustion, kinetics of heterogeneous reactions, reaction rate constant.

Статья поступила в редакцию 12.11.2022; одобрена после рецензирования 02.12.2022; принята к публикации 20.12.2022.

The article was submitted 05.11.2022; approved after reviewing 02.12.2022; accepted for publication 20.12.2022.