

УДК 504.064

ПРИМЕНИМОСТЬ КВАЗИГОМОГЕННОЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

Николай Викторович Бучилин

кандидат технических наук, доцент

isk115599@rambler.ru

Алексей Васильевич Аксеновский

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

noky2002@mail.ru

Сергей Юрьевич Щербаков

кандидат технических наук, доцент

Scherbakov78@yandex.ru

Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

Аннотация. Неконтролируемое горение органических материалов и угля на сегодняшний день по-прежнему остаётся актуальной проблемой. Горение твёрдых сыпучих материалов представляет собой гетерогенные химические реакции окисления с участием газовой фазы. В работе рассматривается метод расчёта полноты сгорания угля с использованием квазигомогенной модели. Полнота сгорания угля определялась константой скорости реакции горения, а также открытой пористостью частиц угля. Получаемые расчётные значения полноты сгорания позволяют оценить вероятное время, необходимое для сгорания угля.

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

Процесс горения твёрдых и жидких веществ в воздушной среде протекает в несколько стадий. В общем случае выделяют стадию диффузии молекул кислорода из воздуха к зоне горения, стадию протекания химической реакции, стадию удаления продуктов реакции из зоны горения [1, 2]. Исследование скорости процесса горения является актуальной задачей так как позволяет производить оценку возможности возникновения неконтролируемого пожара. Горение твёрдых веществ в воздушной среде относится к гетерогенным химическим реакциям [3-5]. В данной статье рассматривается математическое описание процесса горения угля по квазигомогенной кинетической модели.

Частицы угля имеют преимущественно окатанную выпуклую форму, близкую к форме шара [6, 7]. При горении частиц, имеющих форму шара, площадь поверхности убывает со временем протекания реакции [8]. Согласно первому закону Фика количество газа, перенесённого за счёт диффузии в единицу времени через поверхность S , перпендикулярную направлению переноса, пропорционально градиенту концентрации этого вещества в данный момент времени τ :

$$dM = -D \frac{dC}{dx} S d\tau \quad (1)$$

где: M – масса частицы в данный момент времени τ ; S – площадь поверхности переноса; C – концентрация кислорода в реакционной зоне; D – коэффициент молекулярной диффузии; x – расстояние от поверхности частицы.

Изменение концентрации вещества во времени в результате молекулярной диффузии описывается вторым законом Фика:

$$\frac{dC}{d\tau} = D \frac{d^2C}{dx^2} \quad (2)$$

Из уравнения (1) скорость диффузии (ω) выражается в виде:

$$\omega = -\frac{1}{S} \frac{dM}{d\tau} = D \frac{dC}{dx} \approx D \frac{\Delta C}{\Delta x} \quad (3)$$

где ΔC – изменение концентрации кислорода на расстоянии $\Delta x = \delta$ – толщины слоя, через который проходит диффузионный поток (пограничного диффузионного слоя). Тогда:

$$\omega = \frac{D}{\delta} \Delta C \quad (4)$$

Сами частицы угля являются пористыми с объёмом открытого внутрипорового пространства до 50 %. Поэтому кинетическое уравнение, описывающее процесс горения угля, может быть описано квазигомогенной моделью, которая основана на представлении о том, что внешний газ проникает внутрь частицы и взаимодействует с веществом во всём объёме. При этом скорость реакции одинакова на различных участках частицы. Таким образом, всё вещество постепенно превращается в продукт реакции.

Так как в данной статье рассматривается случай стабильного горения угля с температурами в реакционной зоне до 1000°C, то можно допустить, что реакция горения проходит в кинетической области реагирования, т.е. протекает с равными скоростями как в глубине частиц угля, так и на их поверхности. В таком случае уравнение (4) примет вид:

$$\omega = k_0 e^{-\frac{E}{RT}} F_{\text{пов}} f(C) = k M F_{\text{уд}} C \quad (5)$$

где: $F_{\text{пов}}$ – общая площадь реакционной поверхности; $F_{\text{уд}}$ – удельная площадь поверхности; k – константа скорости реакции, зависящая от коэффициента молекулярной диффузии (D) и толщины пограничного диффузионного слоя (δ). Константа скорости реакции (k) определяется опытным путём и для реакции горения угля в интервале температур окружающей среды +15 ÷ +30 °C составляет $1,4 \times 10^{-6}$.

Представленные формулы и значения константы скорости горения угля позволяют производить оценку времени, которое необходимо для его сгорания. Результаты расчётов времени по среднему диаметру частиц угля и пористости представлены в таблице 1. При расчётах делалось допущение, что все частицы угля имеют одинаковый размер и идеально круглую форму, а удельная поверхность пропорциональна пористости. Концентрация кислорода в зоне горения принималась равной 20,9 %, а истинная плотность каменного угля – равной 1290 кг/м³.

Таблица 1.

Расчётные значения времени горения угля в зависимости от диаметра частиц.

Размер частиц угля, см	Пористость угля, %	Удельная поверхность, м ² /г	Время сгорания, сек
1	15	1	3417
1	30	3	1139
1	45	5	683
4	15	1	3417
4	30	3	1139
4	45	5	683
8	15	1	3417
8	30	3	1139
8	45	5	683

Расчёты показывают, что на скорость сгорания угля существенное влияние оказывает его пористость. Так, при 45 % пористости сгорание происходит за 11 минут, тогда как при 15 % – почти за час (порядка 3400 секунд). Увеличение открытой пористости на 30 % приводит к увеличению скорости горения в 5,5 раз. Таким образом, пористость материалов представляет немалую опасность при их возгорании. По рассматриваемой модели протекания гетерогенной реакции размер частиц угля не оказывает влияния на расчётные значения времени его полного сгорания. Связано это с тем, что модель оперирует площадью поверхности переноса вещества, которая пропорциональна пористости частиц, но не их размерам. Приближения, используемые в данной модели, пренебрегают влиянием площади внешней поверхности реагирующих частиц, а учитывают только поверхность внутрипорового пространства.

Представленная методика расчёта по квазигомогенной модели в кинетической области реагирования может быть использована для прогнозирования последствий горения твёрдых пористых гранулированных веществ. Для более точных расчётов в квазигомогенной модели необходимо учитывать диффузионную составляющую перемещения молекул кислорода к зоне реакции, а также реальные значения площади поверхности переноса.

Список литературы:

1. 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.
2. Бучилин Н.В., Никитина В.Ю., Луговой А.А., Варрик Н.М., Бабашов В.Г. Получение высокопористых керамических материалов на основе алюмо-магнезиальной шпинели // Стекло и керамика. 2020. № 10. С. 7-14.
3. 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.
4. Коломиец А.А., Манаенков К.А., Найденов А.А. Оценка показателей надежности автотранспортных средств // Наука и Образование. 2021. Т. 4. № 1. С. 47.
5. 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.
6. 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.
7. Ипполитов Е.Г., Артемов А.В., Батраков В.В. Физическая химия. М.: Издательский центр «Академия». 2005. 448 с.
8. 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 504.064

**APPLICABILITY OF THE QUASI-HOMOGENEOUS KINETIC
MODEL FOR THE DESCRIPTION OF COMBUSTION PROCESSES**

Nikolai V. Buchilin

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

isk115599@rambler.ru

Alexey V. Axenowskiy

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

noky2002@mail.ru

Sergey Yu. Sherbakov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Scherbakov78@yandex.ru

Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

Abstract. Uncontrolled burning of organic materials and coal today still remains an urgent problem. Combustion of solid bulk materials is a variety of heterogeneous chemical oxidation reactions involving the gas phase. The paper considers a method for calculating the completeness of coal combustion using a quasi-homogeneous model. The completeness of coal combustion was determined by the rate constant of combustion reaction, as well as the open porosity of coal particles. The calculated values of the combustion completeness obtained allow us to estimate the probable time required for the combustion of coal.

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

Статья поступила в редакцию 12.09.2022; одобрена после рецензирования 10.10.2022; принята к публикации 20.10.2022. The article was submitted 12.09.2022; approved after reviewing 10.10.2022; accepted for publication 20.10.2022.