

УДК 504.054

КИНЕТИКА ИНГИБИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ УГЛЯ

Николай Викторович Бучилин

кандидат технических наук, доцент

isk115599@rambler.ru

Алексей Васильевич Аксеновский

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

noxy2002@mail.ru

Сергей Юрьевич Щербаков

кандидат технических наук, доцент

Scherbakov78@yandex.ru

Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

Аннотация. Проблема контроля процесса горения органических материалов и угля на сегодняшний день по-прежнему остаётся актуальной. Горение твёрдых сыпучих материалов представляет собой гетерогенные химические реакции окисления с участием газовой фазы. В работе рассматриваются методы расчёта полноты сгорания угля при воздействии различных добавок. Степень превращения угля определялась константами скоростей реакций его сгорания в присутствии каталитических либо ингибирующих добавок. 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.

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 [1, 2]. В общем случае скоростью гетерогенной реакции называется количество частиц (молекул, ионов, атомов) данного вида, реагирующих в единицу времени в единице реакционного пространства [3-5]. В данной статье рассматривается математическое описание процесса горения угля.

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]. 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.

Площадь поверхности и масса частицы 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 более простого выражения скорости гетерогенной реакции используют понятие степени превращения (полноты сгорания) α , которая выражается в долях от единицы либо процентах:

$$\alpha = \frac{M_0 - M}{M_0} \quad (5)$$

В таком случае кинетическое уравнение для горящего порошкообразного материала, состоящего из сферических частиц одинакового размера, примет вид:

$$\alpha = 1 - \frac{r^3}{r_0^3} \Rightarrow r = r_0(1 - \alpha)^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

$$1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}} = \frac{k \times C \times \tau}{r_0 \times \rho} \quad (7)$$

Приведённые уравнения описывают полноту сгорания порошкообразных веществ при известных значениях констант скоростей реакций. Константы скоростей зависят от присутствия катализатора, либо ингибитора в реакционной зоне, поэтому уравнения позволяют произвести оценку влияния действия каталитических добавок на процесс горения. Константа скорости сгорания угля без использования каталитических добавок составляет 0,039; константа скорости при использовании ацетилацетоната железа (III) в качестве катализатора – 0,06; при использовании ортофосфата аммония в качестве ингибитора – 0,013. Для данных значений констант скоростей реакций получается зависимость полноты сгорания угля от времени, представленная на рисунке 1. В расчётах плотность угля принималась равной 1290 кг/м³, а средний диаметр частиц – равным 5 см.

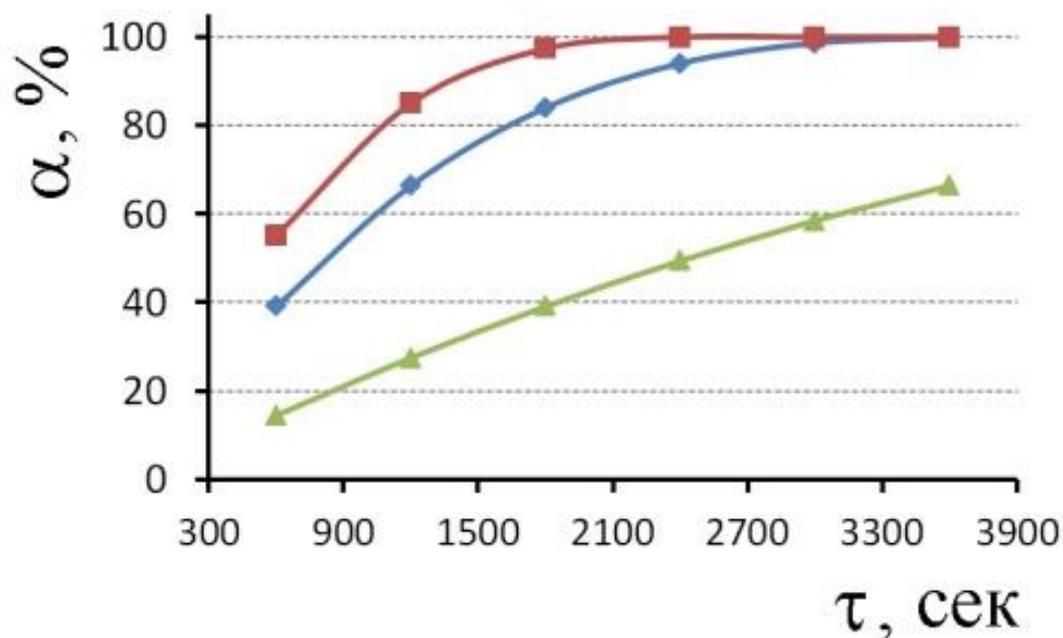


Рисунок 1 – Зависимость полноты сгорания α от продолжительности горения угля τ при различных условиях горения. ◆ - без катализаторов; ■ - с катализатором горения; ▲ - с ингибитором горения

Из расчётных данных видно, что при отсутствии каталитических добавок полное сгорание угля в воздушной среде происходит за 1 час, а более 80 % угля сгорает за первые 30 минут. Немалую опасность при возгораниях представляют катализирующие вещества, усиливающие скорость реакции горения и, следовательно, скорость экзотермического выхода избыточного тепла. Использование ингибиторов позволяет замедлить сгорание веществ, и таким образом, повысить вероятность их затухания за счёт интенсивного рассеивания выделяющегося тепла. Расчёты показывают, что присутствие катализаторов приводит к снижению времени полного сгорания угля до 30 минут, причём за первые 10 минут сгорает порядка 60 % угля. При использовании ингибиторов горения порядка 60 % угля сгорает только через 1 час.

Представленная методика расчёта может быть использована для прогнозирования последствий горения твёрдых порошкообразных и гранулированных веществ. Для более точных расчётов необходимо учитывать влияние скорости движения конвективных потоков воздуха и реальную геометрию частиц.

Список литературы:

1. Коломиец А.А., Манаенков К.А., Найденов А.А. Оценка показателей надежности 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., 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.
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. 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.

KINETICS OF COAL BURNING PROCESSES INHIBITION

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. The problem of organic materials and coal burning process control today remains relevant. Combustion of solid bulk materials is a variety of heterogeneous chemical oxidation reactions involving the gas phase. The paper discusses methods for calculating the completeness of coal combustion under the influence of various additives. The degree of coal conversion was determined by the rate constants of its combustion reactions in the presence of catalytic or inhibitory additives. 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.