

УДК 504.054

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСЧЁТНЫХ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ
ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ УГЛЯ**

Николай Викторович Бучилин

кандидат технических наук, доцент

isk115599@rambler.ru

Аксеновский Алексей Васильевич

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент

nokey2002@mail.ru

Сергей Юрьевич Щербаков

кандидат технических наук, доцент

Scherbakov78@yandex.ru

Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

Аннотация. Изучение процесса горения является актуальной задачей т.к. позволяет прогнозировать поведение реальных материалов при их возгорании. В настоящей работе экспериментально определена полнота сгорания каменного угля со средним размером гранул 5 см, а также проведено сравнение экспериментальных данных с расчётами по кинетической модели. Показано, что на 50 % горение завершается через полчаса, а через час уголь полностью сгорает. Расчёты полноты сгорания показали сходимость с экспериментальными данными, что свидетельствует о возможности применения модели для расчётов процесса горения.

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

Горючими являются подавляющее большинство органических веществ. Знание основных физико-химических свойств необходимо для оценки пожарной опасности химических объектов и веществ, анализа причин возникновения пожаров, взрывов и загораний, для правильной постановки профилактической работы по охране предприятий от пожаров и взрывов, а также для правильного выбора огнетушительных средств. Физико-химические свойства и показатели пожарной опасности связаны между собой [1-2]. Использование расчётных моделей для прогнозирования скорости горения веществ позволит производить оценку последствий возгораний.

Настоящая статья посвящена изучению скорости горения каменного угля. Сравниваются данные, получаемые расчётным путём по кинетической модели горения, с экспериментально полученными данными. Методики расчёта скорости горения угля описаны в ранее проведённой нами работе [3]. Отметим, что за основу расчётов бралась модель гетерогенной химической реакции частиц с непрореагировавшим ядром, причём в результате реакции образуются только газообразные продукты [4-6]. Также допущением в принятой модели являлось то, что все сгорающие частицы угля имеют идеальную сферическую форму и одинаковый размер. Кинетическое уравнение, описывающее этот процесс, имеет следующий вид [7-8]:

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

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

Степени превращения (полноты сгорания) (α) выражается в долях от единицы либо процентах:

$$\alpha = \frac{M_0 - M}{M_0} \quad (2)$$

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

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

$$1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}} = \frac{k \times C \times \tau}{r_0 \times \rho} \quad (4)$$

При экспериментальном определении кинетических зависимостей горение угля проводилось в лабораторной электрической печи SNOL 3986. Определение полноты сгорания производилось весовым методом на электронных весах Mertech CAL SF-400D с точностью до 0,05 г. Для горения брались образцы угля со средней начальной массой частиц 150 гр. Через заданные временные интервалы уголь извлекался из печи, производилось его тушение погружением в ванну с углекислотой. Температура частично сгоревших частиц угля доводилась до 20-25 °С, после чего производилось взвешивание частиц. Изменения массы на каждом новом временном отрезке оценивали по новой партии загружаемого в печь угля. Частично сгоревший уголь не использовался в дальнейших экспериментах.

В результате проведённых экспериментов получены теоретическая и экспериментальная зависимости значений полноты сгорания угля от времени горения (рисунок 1). При расчётах плотность угля принималась равной 1290 кг/м³, а средний диаметр частиц – 5 см. Константа скорости сгорания угля без использования каталитических добавок составляет 0,039.

Результаты показывают в целом сходимость экспериментальных данных и значений, полученных по расчётной модели. Практически полное сгорание угля без использования каталитических и ингибирующих добавок происходит через 1 час с момента начала возгорания.

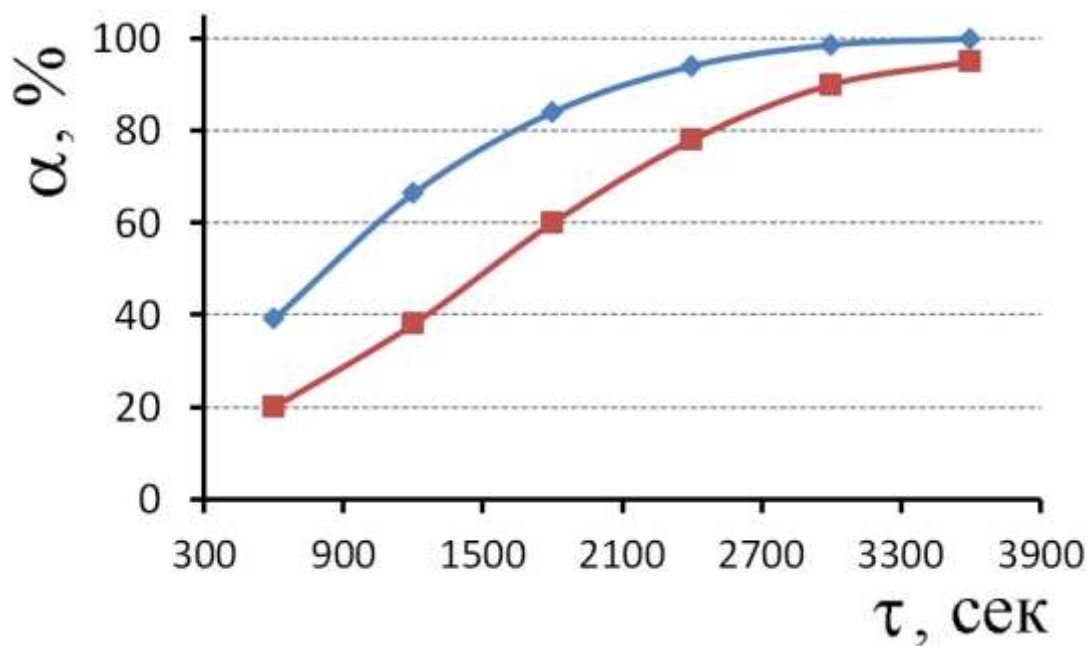


Рисунок 1 – Зависимость полноты сгорания α от продолжительности горения угля τ .

— ромб — расчётные значения; — квадрат — экспериментально полученные значения;

Однако реальная степень превращения угля ниже расчётной в среднем на 10-20 %. Связано это с тем, что при расчётах использовалась заранее заданная константа скорости реакции, а также в модели не учитывается влияние конвективных потоков газовой фазы при горении. Кроме того, в модели не учитывались поправки на геометрию реальных частиц угля и их распределение по размерам: в модели все частицы принимаются одинакового размера и идеально круглой формы. Поэтому расчётная зависимость степени превращения от продолжительности представляет собой идеальную функцию степени $1/3$ (т.е. кубический корень). Экспериментально наблюдаемая зависимость ближе к линейной, что может быть объяснено формой частиц угля ближе к вытянутой и имеющей большое число плоских граней.

Таким образом, модель расчёта показала относительную сходимость с экспериментально полученными данными, что свидетельствует о возможности её использования для прогнозирования последствий горения твёрдых порошкообразных и гранулированных веществ. Для более точных расчётов необходимо учитывать влияние геометрии частиц угля и константы скорости реакции.

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. Бучилин Н.В., Аксеновский А.В., Щербаков С.Ю. Кинетика ингибирования процессов горения угля // Наука и Образование. 2022. Т. 5. № 3. <http://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/4940/5019> (электронный журнал) (РИНЦ)
4. 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.
5. 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.
6. 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
7. 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.
8. Ипполитов Е.Г., Артемов А.В., Батраков В.В. Физическая химия / – М.: Издательский центр «Академия». 2005. – 448 с.

UDC 504.054

**COMPARATIVE ANALYSIS OF CALCULATED AND EXPERIMENTAL
KINETIC DEPENDENCES OF THE COAL COMBUSTION PROCESS**

Nikolai V. Buchilin

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

isk115599@rambler.ru

Alexey V. Axenowskiy

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

noky2002@mail.ru

Sherbakov Sergey Yurievich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Scherbakov78@yandex.ru

Michurinsk State Agrarian University

Michurinsk, Russia

Abstract. The study of combustion process is an actual task because it allows to predict the behavior of real materials in burning process. In this paper, the completeness of combustion of coal with an average granule size of 5 cm is experimentally determined. Obtained experimental data are compared with calculations based on the kinetic model. It was shown that 50 % of the combustion is completed in half an hour, and in one hour the coal is completely burned. The calculations of the combustion completeness showed convergence with experimental data, that indicates the possibility of using the model for calculations of the combustion process.

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.