

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.27.25.005

УДК 622.272:516.02

© С.В. Черданцев, П.А. Шлапаков, Е.А. Шлапаков, В.В. Колыхалов, С.А. Хаймин, К.С. Лебедев, А.Ю. Ерастов, 2023



С.В. ЧЕРДАНЦЕВ

д-р техн. наук, главный научный сотрудник
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: svch01@yandex.ru



П.А. ШЛАПАКОВ

канд. техн. наук,
заведующий лабораторией
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: shlapak1978@mail.ru



С.А. ХАЙМИН

старший научный сотрудник
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: hsa007@mail.ru



Е.А. ШЛАПАКОВ

научный сотрудник
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: lairxx@yandex.ru



К.С. ЛЕБЕДЕВ

старший научный сотрудник
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: lebedevks1987@yandex.ru



В.В. КОЛЫХАЛОВ

старший научный сотрудник
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: X77kem@mail.ru



А.Ю. ЕРАСТОВ

старший научный сотрудник
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово
e-mail: eractov_a_y@mail.ru

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВРЕМЕНИ ЗАЖИГАНИЯ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

В статье рассматривается задача о нестационарном процессе зажигания газозвушных смесей в горных выработках на угольных шахтах. При постановке задачи предполагается, что в различных точках рассматриваемой области в фиксированный момент времени температура изменяется незначительно и поэтому пространственное распределение температур не учитывается. В ходе решения рассматриваемой задачи получены формулы для вычисления как времени зажигания газозвушной смеси, так и промежутка времени, в течение которого температура смеси достигнет значения температуры ее горения.

Ключевые слова: ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ, ГАЗОВОЗДУШНЫЕ СМЕСИ, УРАВНЕНИЕ УМОВА, ЗАКОН ТЕПЛООБМЕНА НЬЮТОНА, КИНЕТИКА ПРОТЕКАНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ, ЗАКОН АРРЕНИУСА, ВРЕМЯ ЗАЖИГАНИЯ.

ВВЕДЕНИЕ

Горение является одним из опаснейших физико-химических процессов при освоении угольных месторождений подземным способом. С одной стороны, горение является химическим процессом, который сопровождается превращением веществ. С другой стороны, развитие химического превращения связано с различными физическими явлениями, в первую очередь, с процессами теплопроводности и диффузии, которые обеспечивают перенос тепла и реагирующего газа в зону химической реакции.

Таким образом, процесс горения обусловлен протеканием сразу нескольких химических и физических процессов, при этом общая скорость протекания процесса горения определяется скоростью того физического процесса, который, участвуя в процессе горения, протекает с наименьшей скоростью.

Так, например, в случае горения угольной частицы при высокой температуре реакционная способность углерода весьма значительна. Однако скорость горения будет определяться не тем, с какой скоростью мог бы реагировать углерод, а тем, с какой скоростью к угольной частице будет поступать кислород из окружающего пространства. Подача кислорода в покоящемся воздухе может осуществляться только посредством диффузии, скорость которой достаточно мала. Именно эта скорость и будет определять скорость процесса горения

угольной частицы при высокой температуре.

Кроме этого, при зажигании холодной газозвушной смеси посредством, например, искры, вблизи нее создается зона повышенной температуры, в которой начинается быстрое протекание химической реакции, обуславливая появление небольшого очага пламени. Для того, чтобы это пламя распространилось по всему объему холодной смеси, необходимо, чтобы из области очага тепло перешло в соседние слои газа и нагрело их до необходимой температуры. Следовательно, в этом случае скорость процесса горения будет определяться скоростью распространения тепла. Таким образом, процесс горения в общем случае необходимо рассматривать как сложный физико-химический процесс, скорость которого определяется интенсивностью физических и химических явлений и особенностями их взаимодействия.

Далее мы сделаем краткий обзор наиболее значимых с нашей точки зрения работ, посвященных процессам зажигания и горения, опубликованных за последние годы.

Так, в работах [1, 2] рассмотрены модели ламинарного горения мелкодисперсных частиц в диффузионной области. Получено аналитическое выражение для нормальной скорости горения и отмечено, что она увеличивается с уменьшением размера частиц и увеличением концентрации реагирующего газа.

В работе [3] экспериментально исследованы физико-химические и гидродинамические условия ламинарного горения пыли, выявлены основные причины неустойчивости ламинарного пламени и закономерности турбулентного горения пыли.

В статьях [4, 5] выполнено сравнение расчетных параметров горения с экспериментальными данными с учетом стехиометрического соотношения различных газо- и пылегазовоздушных смесей на угольных шахтах и рассмотрены возможные случаи воспламенений и взрывов различных видов смесей в шахтах.

В статье [6] рассмотрен стационарный процесс зажигания микронеоднородных пылегазовоздушных смесей в выработках. Вычислена критическая температура зажигания смесей и выявлены закономерности влияния некоторых параметров смесей на температуру их зажигания.

В статье [7] выявлен экспоненциальный характер изменения концентрации реагирующего газа в зоне горения мелкодисперсных пылегазовоздушных смесей в диффузионной области.

В статье [8] рассмотрены условия протекания различных режимов горения мелкодисперсных пылегазовоздушных смесей в атмосфере горных выработок, находящихся вблизи очагов самонагрева. С помощью полученных в статье формул и построенных графиков обнаружен ряд закономерностей горения смесей в различных режимах.

В статье [9] рассмотрена одномерная модель горения метановоздушной смеси в стационарном режиме, в которой учтена химическая кинетика реакции, диффузия и теплопроводность. В ходе реализации модели вычислены скорость ламинарного горения смеси и толщина зоны реакции. В статье показано, что скорость горения увеличивается с ростом удельного количества теплоты и коэффициента теплопроводности и уменьшается с ростом плотности, теплоемкости и энергии активации метана.

В работе [10] представлены результаты экспериментального измерения массовой

скорости детонационной волны на границе раздела двух сред, получены профили химпиков и выявлен неклассический механизм распространения волны взрывного горения.

В статье [11] установлено нарушение регулярности структуры волн детонации и их скорости с уменьшением доли водорода в двухкомпонентном горючем.

Особенность рассматриваемой здесь задачи заключается в том, что она описывает нестационарный тепловой процесс, обуславливающий зажигание газозвушных смесей в горных выработках.

При формулировании и построении решения задачи приняты следующие допущения:

1) считаем, что единственным источником теплоты является химическая реакция окисления метана [12]



протекающая без учета промежуточных стадий. Результатом реакции является образование из одного моля метана одного моля углекислого газа, двух молей воды и тепловой энергии, равной 880 кДж;

2) изменением концентрации газов, участвующих в реакции (1) при определении температуры зажигания пренебрегаем;

3) температура в различных точках рассматриваемой области в фиксированный момент времени изменяется незначительно;

4) теплообмен внутри области горения осуществляется только за счет теплопроводности без учета конвекции и лучистого теплообмена.

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОМ ПРОЦЕССЕ В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ

Известно, что такие процессы, как сушка, прогрев, термическое разложение и выделение летучих веществ, предшествующие зажиганию смесей тесно связаны с процессом теплообмена, который внутри рассматриваемой области может быть реализован за счет теплопроводности, конвекции и излучения.

Однако, в силу четвертого допущения влиянием конвекции и излучения мы пренебрегаем. Поэтому связь между выделившимся в результате химической реакции теплом, его переносом и отводом в окружающую среду внутри реакционной области можно выразить уравнением Н.А. Умова, которое часто называют уравнением теплопроводности [13, 14]

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + F, \quad (2)$$

где c_p , λ , ρ , T — соответственно теплоемкость, теплопроводность, плотность и температура газовой смеси, t — время.

Левая часть уравнения (2) представляет собой изменение количества тепла в единице рассматриваемой области за единицу времени. А первое слагаемое в правой части характеризует распределение температуры внутри рассматриваемой области в фиксированный момент времени. В силу третьего допущения градиент температуры мал и поэтому его можно принять $\operatorname{grad} T \approx 0$. Это означает, что далее мы не будем учитывать пространственного распределения температур, в силу чего уравнение (2) существенно упрощается и приобретает следующий вид:

$$c_p \rho \frac{dT}{dt} = F. \quad (3)$$

Величина F представляет собой разницу между тепловыми источниками q_1 и стоками q_2 :

$$F = q_1 - q_2 \quad (4)$$

находящиеся внутри рассматриваемой области V .

В данной статье в качестве теплового источника рассматривается только тепловой эффект, обусловленный химической реакцией сгорания метана, описываемой уравнением (1). Тепловой эффект от сгорания метана обозначим Q , а скорость протекания реакции (1) обозначим W , и тогда приток теплоты q_1 мы можем определить по формуле [12, 14, 15]

$$q_1 = Q \cdot W. \quad (5)$$

Часть теплоты затрачивается на увеличение температуры внутри области V , другая же часть теплоты q_2 (сток) в результате теплообмена попадает в окружающий выработку массив горных пород через боковую поверхность S , ограничивающую область выработки V .

Согласно закону Ньютона количество теплоты q_2 , передаваемое единицей области V с единицы поверхности S в окружающую среду, может быть найдено по формуле [13–15]:

$$q_2 V = \alpha (T - T_*) S, \quad (6)$$

Откуда

$$q_2 = \frac{\alpha (T - T_*)}{\eta}, \quad (7)$$

где α — коэффициент теплообмена; T_* — некоторая фиксированная температура, значение которой зависит от конкретных условий задачи. Так, если рассматривается задача о зажигании смеси, то за температуру T_* следует принять начальную температуру смеси T_0 , а для исследования процесса горения температуру T_* следует заменить температурой зажигания смеси T_z .

Постоянная величина η , характеризующая форму выработки, согласно равенствам (6) и (7) находится по формуле:

$$\eta = \frac{V}{S}. \quad (8)$$

Так, например, если выработка круглого поперечного сечения радиуса r , то

$$\eta = \frac{\pi r^2 \cdot L}{2\pi r \cdot L} = \frac{r}{2}, \quad (9)$$

где L — длина выработки. Если же выработка прямоугольного поперечного сечения, ширина и высота которого соответственно a , b , то

$$\eta = \frac{a \cdot b \cdot L}{2(a+b) \cdot L} = \frac{a}{2(\chi+1)}, \quad (10)$$

где $\chi = a/b$. Подставляя формулы (5) и (7) в выражение (4), определяем величину F :

$$F = Q \cdot W - \frac{\alpha (T - T_*)}{\eta}, \quad (11)$$

с учетом которой уравнение (3) представляется в следующем виде:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q}{c_p \rho} \cdot W - \frac{\alpha(T - T_*)}{c_p \rho \eta}. \quad (12)$$

Тепловые условия протекания реакции (1) неразрывно связано с распределением концентраций. Поэтому скорость протекания реакции W обусловлена не только изменением температур, но также изменением концентраций веществ, участвующих в реакции.

В общем виде скорость реакции W представляет собой произведение двух функций, одна из которых является функцией температуры $W(T)$, а другая — концентрации $W(c)$ [12, 15]

$$W = W(T, c) = W(T) \cdot W(c). \quad (13)$$

Функция $W(T)$ описывается законом Аррениуса [13–15]:

$$W(T) = k_0 e^{-E/RT}, \quad (14)$$

где k_0 — предэкспоненциальный множитель; E — энергия активации, необходимая для протекания реакции; R — универсальная газовая постоянная.

Концентрационная функция $W(c)$ в формуле (13) определяется количеством элементарных химических актов, которые происходят в единице объема за единицу времени [12, 15]. Для того, чтобы частицы реагента вступили в реакцию, они должны встретиться, а вероятность встречи прямо пропорциональна произведению их концентраций. Поэтому скорость реакции должна быть прямо пропорциональна произведению концентрации реагирующих веществ

$$W(c) = c_A^{n_A} \cdot c_B^{n_B}. \quad (15)$$

Поскольку в рассматриваемом случае химическая реакция описывается уравнением (1), то в ней участвует одна молекула метана и две молекулы кислорода. Следовательно, в нашем случае $n_A = 1$, $n_B = 2$ и поэтому по метану порядок реакции первый, по кислороду — второй и соответственно формула (15) преобразуется к виду:

$$W(c) = c_A \cdot c_B^2, \quad (16)$$

в котором молярные концентрации углерода и кислорода находим по формулам [12]:

$$c_A = \frac{\rho_A m_A}{M_A}, \quad c_B = \frac{\rho_B m_B}{M_B}, \quad (17)$$

где ρ_A , ρ_B — плотности соответственно метана и кислорода при начальной температуре T_0 ; $M_A = 16$ г/моль, $M_B = 32$ г/моль — молярные массы метана и кислорода; m_A , m_B — относительные массы углерода и кислорода в уравнении (1), которые соответственно равны $m_A = 1/3$, $m_B = 2/3$.

Подставляя формулы (14) и (16) в равенство (13), получаем формулу для определения скорости реакции окисления углерода:

$$W = k_0 c_A c_B^2 \cdot e^{-E/RT}, \quad (18)$$

в силу чего уравнение (12) представляется в виде:

$$\frac{dT}{dt} = \Phi \cdot e^{-E/RT} - \frac{T - T_*}{\tau_Q}, \quad (19)$$

где параметры Φ и τ_Q определяются по формулам:

$$\Phi = \frac{Q k_0 c_A c_B^2}{c_p \rho}, \quad \tau_Q = \frac{c_p \rho}{\alpha} \eta \quad (20)$$

Разделив в уравнении (19) переменные

$$\frac{dT}{\Phi \cdot e^{-E/RT} - \frac{T - T_*}{\tau_Q}} = dt, \quad (21)$$

а затем, интегрируя полученное уравнение (21) в пределах заданного интервала температуры $T \in [T_0; T_z]$, найдем время τ_z :

$$\tau_z = \int_{T_0}^{T_z} \frac{dT}{\Phi \cdot e^{-E/RT} - \frac{T - T_0}{\tau_Q}}, \quad (22)$$

в течение которого температура метановоздушной смеси достигнет значения T_z , при котором происходит зажигание смеси.

Промежуток времени τ_e , в течение которого температура зажигания смеси T_z достигает температуры ее горения T_e , мы определим исходя из следующих рассуждений. Известно [14, 15], что в процессе горения скорость реакции вследствие разогрева растет гораздо быстрее, чем снижается вследствие выгорания

смеси. В этом случае температура горения достигается за время, в течение которого выгорает незначительная часть веществ исходной смеси. Иначе говоря, скорость реакции горения в большей степени зависит от температуры, чем от концентраций веществ данной смеси. Поэтому для определения промежуточного времени τ_e можно использовать начальные значения концентрации c_A и c_B исходных веществ, вычисленных по формулам (17).

В силу сказанного, для определения времени τ_e мы можем также использовать формулу (22), в которой пределами интегрирования будут температура зажигания смеси T_z и температура ее горения T_e

$$\tau_e = \int_{T_z}^{T_e} \frac{dT}{\Phi \cdot e^{-E/RT} \cdot \frac{T-T_z}{\tau_Q}} \quad (23)$$

Таким образом, представленные в статье формулы (22) и (23) позволяют нам вычислить время зажигания газовой смеси τ_z и промежуток времени τ_e , в течение которого температура зажигания T_z достигнет значения температуры горения T_e .

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Далее мы проведем вычислительные процедуры, выполним анализ полученных результатов. В качестве исходных данных мы приняли следующие значения: выработка круглого поперечного сечения $r = 1,5$ м; $\eta = 0,75$ м; $R = 8,314$ Дж/(К·моль); $k_0 = 3,5 \cdot 10^3$ с⁻¹; $E = 30 \cdot 10^3$ Дж/моль; $Q = 50 \cdot 10^6$ Дж/м³; $\rho = 0,97$ кг/м³; $\rho_A = 0,6682$ кг/м³; $\rho_B = 1,225$ кг/м³; $\lambda = 0,0341$ Вт/(м·К); $\alpha = 8$ Вт/(м²·К); $sr = 2,252 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); $T_0 = 293$ °К; $T_z = 650$ °К; $T_e = 1670$ °К. Исходные значения параметров смеси приняты при начальной температуре T_0 .

Вычисления начнем с определения молярных концентраций по формулам (17):

$$c_A = \frac{0,6682 \text{ кг/м}^3 \cdot 1/3}{16 \text{ г/моль}} = \frac{0,6682 \text{ кг/м}^3 \cdot 1/3}{16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/0,0224 м}^3} = 0,312,$$

$$c_B = \frac{1,225 \text{ кг/м}^3 \cdot 2/3}{64 \text{ г/моль}} = \frac{1,225 \text{ кг/м}^3 \cdot 2/3}{64 \cdot 10^{-3} \text{ кг/0,0224 м}^3} = 0,286.$$

Затем по формулам (20) вычисляем параметры Φ и τ_Q :

$$\Phi = \frac{50 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3 \cdot 3,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \cdot 0,312 \cdot 0,286^2}{2,252 \cdot 10^3 \cdot \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 0,97 \text{ кг/м}^3} = 2,041 \cdot 10^6 \frac{\text{К}}{\text{с}},$$

Подставив вычисленные значения в формулы (22) – (23), найдем промежутки времени τ_z , τ_e , характеризующие соответственно процессы зажигания и горения газовой смеси. Анализ интегралов в формулах (22), (23) показывает, что их нельзя преобразовать к табличному виду и воспользоваться формулой Ньютона – Лейбница.

Поэтому в статье эти интегралы найдены численно с использованием математического программного пакета MathCAD, предназначенного для работы с числами, формулами и графиками. В результате, найдены промежутки времени $\tau_z = 3,175$ с, $\tau_e = 0,023$ с.

Отметим, что для выработки прямоугольного сечения, размеры которого $a = 3$ м; $\chi = 1,27$; $b = 2,357$ м, параметр η , вычисленный по формуле (10) равен $\eta = 0,66$ м, а промежутки времени, вычисленные по формулам (22), (23), составляют $\tau_z = 3,177$ с, $\tau_e = 0,023$ с и практически не отличаются от промежутков τ_z , τ_e для выработки круглого сечения.

Далее выполним анализ влияния различных параметров смеси на промежуток времени τ_z применительно к выработке круглого поперечного сечения. В ходе вычислительных процедур построены графики, показанные на рис. 1–6, анализ которых позволил выявить некоторые закономерности.

Так, графики, представленные на рис. 1, 2, показывают, что с увеличением начальной температуры смеси время ее зажигания существенно уменьшается. При этом график функции $\tau_z(T_0)$ является вогнутой кривой на рассматриваемом отрезке, значения которой

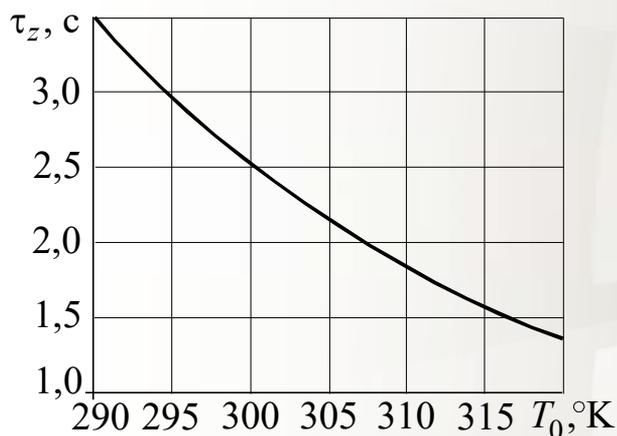


Рис. 1. Графики зависимости времени зажигания смеси от ее начальной температуры

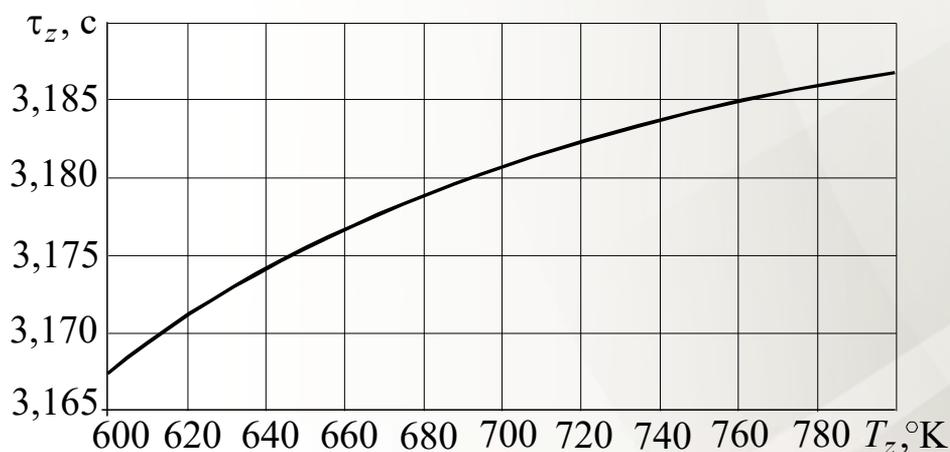


Рис. 2. График зависимости времени зажигания смеси от ее температуры зажигания

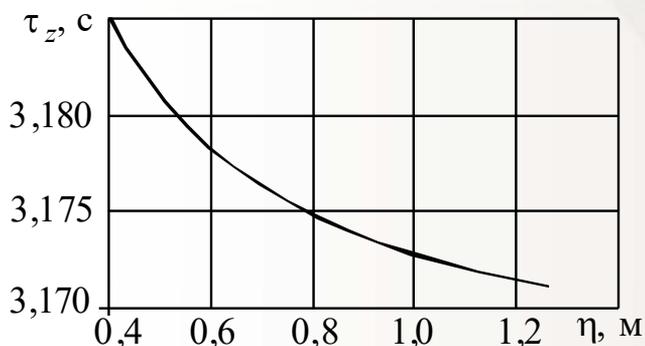


Рис. 3. График зависимости времени зажигания смеси от параметра η

монотонно убывают (рис. 1). Наоборот, функция $\tau_z(T_z)$ на отрезке $T_z \in [600 \text{ } ^\circ\text{K}; 800 \text{ } ^\circ\text{K}]$ всюду монотонно возрастает, а ее график представляет собой выпуклую кривую (рис. 2).

С ростом параметра η , характеризующего форму выработки, время зажигания τ_z уменьшается, при этом график функции $\tau_z(\eta)$ пред-

ставляет вогнутую монотонно убывающую кривую, не имеющую экстремальных точек (рис. 3).

Рост коэффициента теплообмена приводит к более интенсивному теплообмену с окружающим породным массивом, что сопровождается ростом времени зажигания τ_z (рис. 4).

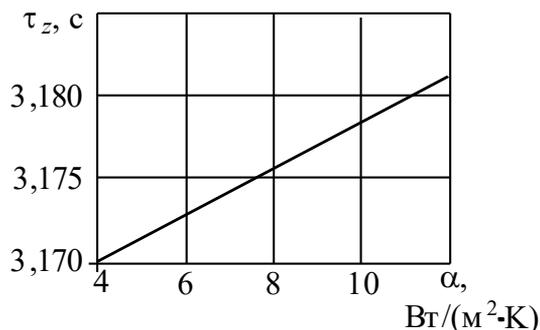


Рис. 4. График зависимости времени зажигания смеси от ее коэффициента теплообмена

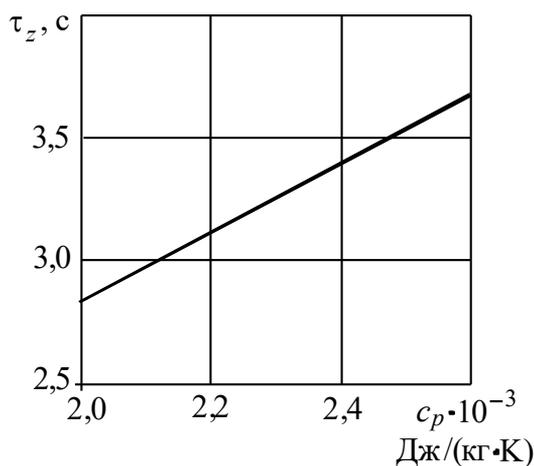


Рис. 5. График зависимости времени зажигания смеси от ее удельной теплоемкости

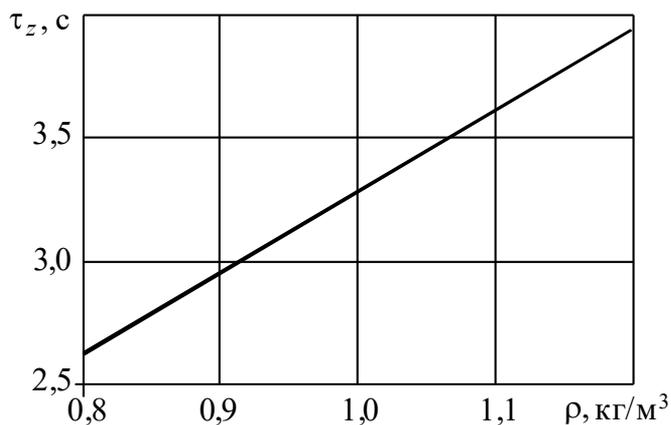


Рис. 6. Графики зависимости времени зажигания смеси от ее плотности

Более существенное влияние на время τ_z оказывают теплоемкость и плотность смеси, с ростом которых период зажигания линейно увеличивается (рис. 5, 6).

Таким образом, построенная в рамках принятых допущений модель зажигания газовоздушных смесей в горных выработках позволяет определить не только время зажигания, но также промежуток времени, в течение которого температура смеси достигнет значения температуры ее горения.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена задача о нестационарном зажигании газовоздушной смеси в горной выработке. На базе решения данной задачи найдены промежутки времени, в течение которых происходит зажигание смеси и ее горение.

2. Построены графики зависимостей времени зажигания газовоздушной смеси от некоторых ее параметров, анализ которых позволил выявить:

- а) с повышением начальной температуры смеси существенно снижается время ее зажигания; а с повышением температуры зажигания смеси, наоборот, время зажигания увеличивается;
- б) увеличение параметра, характеризующего размеры выработки, приводит к незначительному уменьшению времени зажигания;
- в) с увеличением коэффициента теплообмена, теплоемкости и плотности смеси время зажигания увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sidorov A.E., Shevchuk V.G. Laminar flame in fine-particle dusts // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2011. Vol. 47. Issue 5. P. 518–522.
2. Sidorov A.E., Shevchuk V.G., Kondrat'ev Conductive-radiative model of a laminar flame in dust suspensions // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2013. Vol. 49. Issue 3. P. 257–263
3. Shevchuk V.G., Kondrat'ev E.N., Zolotko A.N., Sidorov A. E., Oparin A.S. Wave regimes of dust combustion // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2014. Vol. 50. Issue 1. P. 80–86.
4. Vasilev A.A., Pinaev A.V., Trubisyn A.A., Crachev A.Y., Trotsyuk A.V., Fomin P.A., Trilis A.V. What is burning in coal mines: methane or coal dust? // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2017. Vol. 53. Issue 1. P. 8–14.
5. Васильев А.А., Васильев В.А. Расчетные и экспериментальные параметры горения и детонации смесей на основе метана и угольной пыли // *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2016. № 2. С. 8–39.
6. Черданцев С.В., Ли Хи Ун, Филатов Ю.М., Шлапаков П.А. Определение критической температуры зажигания микрогетерогенных пылегазовоздушных смесей в горных выработках // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018. № 1. С. 117–125.
7. Черданцев С.В., Филатов Ю.М., Шлапаков П.А. Режимы диффузионного горения пылегазовоздушных смесей в атмосфере горных выработок // *Уголь*. 2020. № 2. С. 27–32.
8. Черданцев С.В., Шлапаков П.А., Шлапаков Е.А., Лебедев К.С., Ерастов А.Ю. Теплофизические и газодинамические условия протекания процессов дефлаграции и детонации в пылегазовоздушных потоках горных выработок вблизи очагов самонагревания // *Химическая физика и мезоскопия*. 2019. № 2. С. 179–189.
9. Черданцев С.В., Шлапаков П.А., Голоскоков С.И., Батраков Д.Н. Построение и реализация термической модели горения в рудничной атмосфере метановоздушной смеси с учетом ее кинетики // *Безопасность труда в промышленности*. 2021. № 9. С. 7–14.
10. Ershov A.P., Rubtsov I.A. Detonation of low-density explosives // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2019. Vol. 55. No. 1. P. 114–120.
11. Bykovskii F.A., Zhdan S.A., Vedernikov E.F. Continuous detonation of methane/hydrogen-air mixtures in an annular cylindrical combustor // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2018. Vol. 54. Issue 4. P. 472–481.
12. Денисов Е.Т., Саркисов О.М., Лихтенштейн Г.И. *Химическая кинетика: Учебник для вузов*. М., 2000. 568 с.
13. Кутателадзе С.С. *Основы теории теплообмена*. М., 1979. 416 с.
14. Канторович Б.В. *Основы теории горения и газификации твердого топлива*. М., 2013. 601 с.
15. Франк-Каменецкий Д.А. *Диффузия и теплопередача в химической кинетике*. М., 1987. 502 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2023.27.25.005

UDC 622.272:516.02

© S.V. Cherdantsev, P.A. Shlapakov, V.V. Kolykhalov, S.A. Khaymin, K.S. Lebedev,
A.Yu. Erastov, 2023

S.V. CHERDANTSEV

Doctor of Engineering Sciences,
Leading Researcher
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: svch01@yandex.ru

P.A. SHLAPAKOV

Candidate of Engineering Sciences,
Head of Laboratory
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: shlapak1978@mail.ru

E.A. SHLAPAKOV

Researcher
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: lairxx@yandex.ru

A.Yu. ERASTOV

Senior Research Associate
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: eractov_a_y@mail.ru

K.S. LEBEDEV

Senior Research Associate
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: lebedevks1987@yandex.ru

S.A. KHAYMIN

Senior Research Associate
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: hsa007@mail.ru

V.V. KOLYKHALOV

Senior Research Associate
JSC «NC VostNII», Kemerovo
e-mail: X77kem@mail.ru

TO DETERMINE IGNITION TIME OF GAS-AIR MIXTURES IN MINING PASSAGES

The article discusses the problem of the unsteady process of ignition of gas-air mixtures in mining mines in coal mines. When setting the problem, it is assumed that at different points of the considered area at a fixed moment in time, the temperature changes slightly and therefore the spatial temperature distribution is not taken into account. In the course of solving the problem, formulas are obtained

for calculating both the ignition time of the gas-air mixture and the period of time during which the temperature of the mixture reaches the value of its combustion temperature.

Keywords: MINING, GAS-AIRMIXTURES, UMOVEQUATION, NEWTON HEAT EXCHANGE LAW, CHEMICAL REACTION KINETICS, ARRHENIUS LAW, IGNITION TIME.

REFERENCES

1. Sidorov A.E., Shevchuk V.G. Laminar flame in fine-particle dusts // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2011. Vol. 47. Issue 5. P. 518–522.
2. Sidorov A.E., Shevchuk V.G., Kondrat'ev Conductive-radiative model of a laminar flame in dust suspensions // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2013. Vol. 49. Issue 3. P. 257–263
3. Shevchuk V.G., Kondrat'ev E.N., Zolotko A.N., Sidorov A. E., Oparin A.S. Wave regimes of dust combustion // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2014. Vol. 50. Issue 1. P. 80–86.
4. Vasilev A.A., Pinaev A.V., Trubisyn A.A., Crachev A.Y., Trotsyuk A.V., Fomin P.A., Trilis A.V. What is burning in coal mines: methane or coal dust? // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2017. Vol. 53. Issue 1. P. 8–14.
5. Vasiliev A.A., Vasiliev V.A. Calculated and experimental parameters of gorenje and detonation of mixtures based on methane and coal dust // *Bulletin of the Scientific Center for safety of work in the coal industry [Vestnik Nauchnogo centra po bezopasnosti rabot v ugolnoj promyshlennosti]*. 2016. No. 2. P. 8–39. [In Russ.].
6. Cherdantsev S.V., Li Hee Un, Filatov Yu.M., Shlapakov P.A. Determination of the critical ignition temperature of microheterogenic dust-gas-air mixtures in mine workings. // *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal) [Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten (nauchno-tehnicheskij zhurnal)]*. 2018. No. 1. P. 117–125. [In Russ.].
7. Cherdantsev S.V., Filatov Yu.M., Shlapakov P.A. Modes of diffusion gorenje dust-gas-air mixtures in the atmosphere of mining // *Coal [Ugol]*. 2020. No. 2. P. 27–32. [In Russ.].
8. Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Shlapakov E.A., Lebedev K.S., Erastov A.Yu. Thermophysical and gas-dynamic conditions of deflagration and detonation processes in dust-gas-air flows of mine workings near the foci of self-heating // *Chemical physics and mesoscopy [Himicheskaya fizika i mezoskopiya]*. 2019. No. 2. P. 179–189. [In Russ.].
9. Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Goloskokov S.I., Batrakov D.N. Construction and implementation of a thermal model of gorenje in a mine atmosphere of a methane-air mixture taking into account its kinetics // *Safety of labor in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]*. 2021. No. 9. P. 7–14. [In Russ.].
10. Ershov A.P., Rubtsov I.A. Detonation of low-density explosives // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2019. Vol. 55. No. 1. P. 114–120.
11. Bykovskii F.A., Zhdan S.A., Vedernikov E.F. Continuous detonation of methane/hydrogen-air mixtures in an annular cylindrical combustor // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2018. Vol. 54. Issue 4. P. 472–481.
12. Denisov E.T., Sarkisov O.M., Lichtenstein G.I. *Chemical kinetics: Textbook for universities*. M., 2000. 568 p. [In Russ.].
13. Kutateladze S.S. *Fundamentals of the theory of heat transfer*. M., 1979. 416 p. [In Russ.].
14. Kantorovich B.V. *Fundamentals of solid fuel combustion and gasification theory*. M., 2013. 601 p. [In Russ.].
15. Frank-Kamenetsky D.A. *Diffusion and heat transfer in chemical kinetics*. M., 1987. 502 p. [In Russ.].