

Определение промежутков времени, характеризующих различные этапы горения газовоздушной смеси в горной выработке

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-1-26-32>



ЧЕРДАНЦЕВ С.В.

Доктор техн. наук,
главный научный сотрудник
АО «НЦ ВостНИИ»,
650002, г. Кемерово, Россия,
e-mail: svch01@yandex.ru



ШЛАПАКОВ П.А.

Канд. техн. наук,
заведующий лабораторией
АО «НЦ ВостНИИ»,
650002, г. Кемерово, Россия,
e-mail: shlapak1978@mail.ru



ГОЛОСКОКОВ С.И.

Канд. техн. наук,
заведующий лабораторией
АО «НЦ ВостНИИ»,
650002, г. Кемерово, Россия,
e-mail: s.golosokov@nc-vostnii.ru



ЕРАСТОВ А.Ю.

Старший научный сотрудник
АО «НЦ ВостНИИ»,
650002, г. Кемерово, Россия,
e-mail: erastov_a_y@mail.ru



ХАЙМИН С.А.

Старший научный сотрудник
АО «НЦ ВостНИИ»,
650002, г. Кемерово, Россия,
e-mail: hsa007@mail.ru

Непрерывным атрибутом при разработке угольных месторождений подземным способом является метан, опасность которого проявляется двояко. С одной стороны, являясь газообразной субстанцией, метан негативно проявляется в различных аэро- и газодинамических процессах, в первую очередь, суфлярных выделениях из подземных полостей и внезапных выбросах в горные выработки, которые традиционно относятся к опасным явлениям при отработке угольных пластов. С другой стороны, смешиваясь с воздушными потоками в атмосфере горных выработок, метан образует газовоздушные смеси, которые предрасположены к химическому реагированию, проявляющемуся в форме горения или детонации, что в условиях угольных шахт может привести к катастрофическим последствиям. В данной работе рассматривается задача о нестационарном процессе горения газовоздушной смеси в горной выработке круглого поперечного сечения. При постановке задачи предполагается, что внутри рассматриваемой области градиент температур очень мал, в силу чего не учитывается пространственное распределение температур. В ходе построения решения задачи получены формулы для определения различных промежутков времени, характеризующих процесс горения газовоздушной смеси. Построены графики зависимостей периода зажигания смеси от ряда ее параметров и выявлены некоторые закономерности их влияния на период зажигания смеси.

Ключевые слова: горные выработки, газовоздушные смеси, уравнение теплопроводности, закон теплообмена Ньютона, скорость протекания химической реакции, закон Аррениуса, период индукции.

Для цитирования: определение промежутков времени, характеризующих различные этапы горения газовоздушной смеси в горной выработке / С.В. Черданцев, П.А. Шлапаков, С.И. Голоскоков и др. // Уголь. 2022. № 1. С. 26-32. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-1-26-32.

ВВЕДЕНИЕ

Горение является одним из первых сложных физико-химических процессов, освоенных человечеством и использовавшихся им на протяжении многих тысячелетий. Всякий процесс горения является прежде всего химическим процессом, поскольку он сопровождается превраще-

нием веществ. Однако при его внимательном рассмотрении оказывается, что во многих случаях, имеющих принципиальное значение, процесс горения подчиняется в первую очередь чисто физическим закономерностям. Такое положение оказывается следствием того, что развитие химического превращения не происходит независимо, а связано с различными физическими явлениями, которые развиваются по свойственным им законам. Химическое превращение при некоторых условиях, например при высокой температуре, может протекать с очень большими скоростями. Вследствие этого протекание химических реакций горения оказывается подчиненным более медленным физическим процессам, таким как перенос тепла, диффузия и другие, и ими регулируется. Это означает, что химические превращения, обладая очень большими потенциальными возможностями в смысле скорости их протекания, во многих случаях подчиняются закономерностям различных физических процессов, протекающих с меньшими скоростями.

Так, при горении неперемешанных систем, например в случаях горения капель или частиц горючего в атмосфере газообразного окислителя, скорость горения определяется не кинетической скоростью химической реакции между горючим и окислителем при данной температуре, а скоростью поступления кислорода из окружающей среды к частице горючего посредством диффузии. Этот чисто физический процесс характеризуется сравнительно небольшими скоростями, которые в основном и определяют скорость сгорания частиц топлива.

В данной статье рассматриваются задачи горения газозооных смесей в горных выработках. При зажигании холодных газозооных смесей посредством, например, искры, обладающей достаточной мощностью, создается зона повышенной температуры, в которой начинается быстрое протекание химической реакции, обуславливая появление небольшого очага пламени. Для того чтобы это пламя распространилось дальше по всему объему холодной смеси, необходимо, чтобы из области очага определенное количество тепла передалось в соседние слои газа и нагрело их до нужной температуры. В нормальных условиях передача тепла осуществляется путем теплопроводности, и в этом случае, естественно, скорость сгорания смеси будет характеризоваться величиной, характерной для скорости чисто физического процесса распространения тепла.

Таким образом, базой процесса горения являются химические реакции, связанные с тепловыделением. Химическая реакция в процессе своего развития и распространения влечет за собой появление различных физических процессов, таких как перенос тепла и перенос реагирующих веществ в результате диффузии, конвекции и теплопроводности, прогрев при помощи ударной волны, фазовые переходы и т.д.

Физические процессы на известной стадии горения становятся основными и определяют условия и интенсивность химического превращения, послужившего причиной их возникновения. Возможны также случаи, когда на определенной стадии развития конечная скорость химических реакций начинает ограничивать какой-либо физический процесс и качественно меняет характер его проте-

кания. Этим обусловлено появление спиновой детонации в некоторых смесях. Все это означает, что 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 работ, наиболее значимых с нашей точки зрения, опубликованных за последние годы.

Так, в работах [1, 2] рассмотрены модели ламинарного распространения пламени в мелкодисперсных пылях, частицы которых горят в диффузионном режиме. В работе [1] доказано, что нормальная скорость пламени возрастает с уменьшением размера частиц и увеличением концентрации горючего и окислителя.

В работе [2] авторы учитывают кондуктивную и радиационную теплопередачи в волне горения, различие температур и скоростей твердой и газовой фаз. Получено аналитическое выражение для нормальной скорости пламени, описывающее ее зависимость от концентраций горючего и окислителя и размера частиц. Проведены оценки относительной роли радиационной теплопередачи и седиментации частиц во взвеси.

В работе [3] экспериментально исследована скорость ламинарного пламени в пылевых облаках в зависимости от физико-химических параметров и гидродинамических условий процесса горения. Установлено, что преимущественный вклад в общий теплоперенос в волне горения вносит кондуктивная теплопроводность. Экспериментально изучены основные причины неустойчивости ламинарного пламени, переходные явления и закономерность вибрационного и турбулентного горения пыли.

В статье [4] выполнено сравнение расчетных параметров горения с экспериментальными данными с учетом стехиометрического соотношения различных газо- и пылегазовоздушных смесей на угольных шахтах. В работах [5, 6] рассмотрены возможные случаи воспламенений и взрывов в шахтах.

В работе [7] установлено, что процесс горения мелкодисперсных пылегазовоздушных смесей в диффузионной области имеет место только в том случае, если концентрация реагирующего газа в зоне горения изменяется экспоненциально.

В статье [8] обсуждены условия протекания различных режимов горения мелкодисперсных пылегазовоздушных смесей в атмосфере горных выработок, имеющих зоны подвода теплоты от находящихся поблизости очагов самонагревания. Получены формулы, характеризующие изменения скоростей, давлений, плотностей, пылегазовоздушного потока, пересекающего зону подвода теплоты. Построены графики, на базе которых обнаружены некоторые закономерности протекания процесса горения смесей в режимах дефлаграции и детонации.

В статье [9] рассмотрена одномерная стационарная задача о горении метановоздушной смеси, в которой учтены химическая кинетика реакции, диффузия и теплопроводность. В ходе решения задачи получены формулы для вычисления скорости ламинарного горения смеси и толщины зоны реакции. Построены графики зависимостей скорости ламинарного горения от ряда параметров смеси,

анализ которых показал, что скорость горения увеличивается с ростом удельного количества теплоты и коэффициента теплопроводности и уменьшается с ростом плотности, удельной теплоемкости и энергии активации метана.

В статье [10] получены нижние пределы непрерывной детонации по удельному расходу смеси для некоторых горючих составов, а также по массовой доле водорода в составе горючего метан/водород. Обнаружено нарушение регулярности структуры волн непрерывной детонации и их скорости с уменьшением доли водорода в двухкомпонентном горючем.

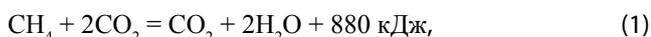
В работе [11] проведены результаты измерения массовой скорости при выходе детонационной волны на границу раздела порошкового взрывчатого вещества и инертного окна из оргстекла. Получены профили химиков и выявлен неклассический механизм распространения волны взрывного горения.

Особенность рассматриваемой здесь задачи заключается в том, что она описывает нестационарный процесс горения газозвушной смеси. При формулировании и построении решения задачи нами приняты следующие допущения:

- химическая реакция предполагается одноступенчатой, протекающей без отдельных элементарных реакций, а исходные реагенты и продукты реакции являются идеальными газами;
- температура в различных точках рассматриваемой области в фиксированный момент времени изменяется незначительно;
- передачей теплоты путем конвекции и излучения мы пренебрегаем;
- рассматривается выработка круглого поперечного сечения.

**ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ
О НЕСТАЦИОНАРНОМ ГОРЕНИИ
МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ**

В силу первого допущения химическую реакцию горения метана в рудничной атмосфере мы опишем следующим термохимическим уравнением [12]:



из которого следует, что в результате реакции сгорания одного моля метана образуются один моль углекислого газа, два моля воды и выделяется 880 кДж тепловой энергии.

Для описания распространения тепловой энергии, характеризваемой температурой, мы воспользуемся уравнением теплопроводности [13, 14]:

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

где c_p , λ , r , T – соответственно теплоемкость, теплопроводность, плотность и температура газозвушной смеси, t – время, ∇ – оператор Гамильтона:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}.$$

Величина F представляет собой тепловые источники и стоки, находящиеся внутри рассматриваемой области W .

На основании второго допущения внутри области W температура изменяется незначительно, следовательно, ее градиент мал, и поэтому будем полагать $\nabla T \approx 0$. Это означает, что далее мы не будем учитывать пространственного распределения температур, в силу чего уравнение (2) существенно упрощается и приобретает следующий вид:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = F. \quad (3)$$

Как следует из уравнения (1), химическая реакции сгорания метана обладает тепловым эффектом, который мы обозначим Q , а скорость ее протекания обозначим W . Следовательно, химическая реакция является тепловым источником, приток теплоты q_1 от которого в рассматриваемую область мы можем определить по формуле [14, 15]:

$$q_1 = Q \cdot W. \quad (4)$$

Часть теплоты затрачивается на увеличение температуры внутри области W , другая же часть теплоты q_2 в результате теплообмена попадает в окружающую выработку среду через поверхность S , ограничивающую область W .

Тогда, согласно закону Ньютона [13], количество теплоты q_2 , передаваемое единицей области W с единицы поверхности S в окружающую среду, может быть найдено по формуле [13]:

$$q_2 \Omega = \alpha(T - T_*)S, \\ \text{откуда:} \\ q_2 = \frac{\alpha(T - T_*)S}{\Omega}, \quad (5)$$

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 .

Таким образом, в рассматриваемой задаче величина q_1 обусловлена тепловым источником, а q_2 – тепловым стоком. Тогда величину F мы найдем как разность между q_1 и q_2 :

$$F = q_1 - q_2 = Q \cdot W - \frac{\alpha(T - T_*)S}{\Omega} \quad (6)$$

и, подставив полученную формулу (6) в уравнение (3), предварительно разделив его на $c_p \rho$, получим следующее уравнение:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q}{c_p \rho} \cdot W - \frac{\alpha(T - T_*)S}{c_p \rho \Omega}. \quad (7)$$

Поскольку мы рассматриваем процесс горения в выработке круглого поперечного сечения, то отношение W/S является постоянной величиной, определяемой как:

$$\frac{\Omega}{S} = \frac{\pi r^2 L}{2\pi r L} = \frac{r}{2}, \quad (8)$$

где L – длина исследуемого участка выработки, а r – радиус ее поперечного сечения.

Скорость реакции W представляет собой произведение двух функций, одна из которых является функцией температуры $W(T)$, а другая – концентрации $W(c)$ [12, 15]:

$$W = W(T, c) = W(T) \cdot W(c). \quad (9)$$

Функция $W(T)$ описывается законом Аррениуса [15, 18]:

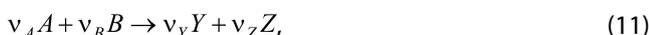
$$W(T) = k_0 e^{-E/RT}, \quad (10)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации, представляющая собой количество энергии, которое необходимо для протекания реакции; R – универсальная газовая постоянная.

Из закона Аррениуса вытекает, что скорость химической реакции никогда не обращается в ноль. Она только экспоненциально падает с понижением температуры. Следовательно, как бы низка ни была начальная температура смеси, эта смесь все равно должна прореагировать за достаточно длительный промежуток времени.

Если не пренебречь скоростью реакции при начальной температуре, то начальное состояние нельзя считать стационарным. Если же допустить, что скорость реакции обращается в ноль точно при начальной температуре, мы приходим к заключению, что начальное состояние должно быть стационарным, но неустойчивым, так как равновесие нарушится от сколь угодно малого начального возмущения. Поэтому необходимо пренебречь скоростью реакции еще и в конечном интервале температур выше начальной температуры.

Концентрационная функция $W(c)$ в формуле (9), от которой также зависит скорость протекания химической реакции, определяется количеством элементарных химических актов, которые происходят в единице объема за единицу времени [12, 15]. Так, например, химическая реакция, описываемая уравнением:



содержащим стехиометрические коэффициенты реагентов ν_A, ν_B и продуктов реакции ν_Y, ν_Z , выражает закон сохранения массы, заключающийся в сохранении количества атомов в процессе протекания реакции.

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. В общем случае скорость реакции зависит от концентраций реагентов в виде произведения степенных функций [12, 15]:

$$W(c) = c_A^{n_A} \cdot c_B^{n_B} \dots = \prod_i c_i^{n_i}, \quad (12)$$

где показатели степени n_A, n_B, \dots, n_i называют частными порядками реакции соответственно по реагентам A, B и т.д.; c_A, c_B, \dots – молярные концентрации реагентов, участвующих в реакции. Показатели n_A, n_B, \dots представляют собой число частиц реагентов A, B, \dots участвующих в реакции. Общий порядок реакции равен $n = \sum n_i$.

Анализируя химическую реакцию (1), замечаем, что в ней участвуют одна молекула метана и две молекулы кислорода. Следовательно, $n_A = 1, n_B = 2$, и поэтому по метану

порядок реакции первый, по кислороду – второй, и, соответственно, формула (12) приводится к виду:

$$W(c) = c_A \cdot c_B^2. \quad (13)$$

На основании принятого допущения об идеальности газов, участвующих в реакции (1), находим молярные концентрации углерода и кислорода по формулам [12]:

$$c_A = \frac{\rho_A m_A}{M_A}, \quad c_B = \frac{\rho_B m_B}{M_B}, \quad (14)$$

где $M_A = 16$ г/моль, $M_B = 32$ г/моль – молярные массы соответственно метана и кислорода; ρ_A, ρ_B – их плотности при начальной температуре T_0 , а 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 (10) и (13) в равенство (10), получаем формулу для определения скорости реакции окисления углерода:

$$W = k_0 c_A c_B^2 \cdot e^{-E/RT}. \quad (15)$$

Время отвода тепла t_Q мы можем определить по формуле [13]:

$$\tau_Q = \frac{c_p \rho \Omega}{\alpha S},$$

которую перепишем с учетом формулы (8):

$$\tau_Q = \frac{c_p \rho}{\alpha} \cdot \frac{r}{2}, \quad (16)$$

тогда, учитывая формулу (15), представим уравнение (7) в виде:

$$\frac{dT}{dt} = \Psi \cdot e^{-E/RT} - \frac{T - T_*}{\tau_Q} \quad (17)$$

и, разделив в нем переменные, а затем интегрируя, получим время протекания реакции горения:

$$t = \int \frac{dT}{\Psi \cdot e^{-E/RT} - \frac{T - T_*}{\tau_Q}} + \text{const}, \quad (18)$$

где $\Psi = \frac{Q k_0 c_A c_B^2}{c_p \rho}$. (19)

В зависимости от конкретной задачи неопределенный интеграл в формуле (18) удобнее заменить определенным интегралом, пределы интегрирования в котором зависят от условий рассматриваемой задачи. Так, для определения времени t_z , в течение которого происходит зажигание смеси, пределами интегрирования являются границы отрезка $[T_0; T_z]$, и поэтому формула (18) преобразуется к виду:

$$\tau_z = \int_{T_0}^{T_z} \frac{dT}{\Psi \cdot e^{-E/RT} - \frac{T - T_0}{\tau_Q}}. \quad (20)$$

Период индукции t_i , в течение которого температура зажигания смеси достигает температуры ее горения t_e , мы определим исходя из следующих рассуждений. Известно [14, 15], что процессы горения характеризуются тем, что рост скорости реакции вследствие разогрева проис-

ходит гораздо быстрее, чем ее снижение вследствие выгорания. В этом случае температура горения достигается за время, в течение которого выгорает незначительная часть исходных веществ. Это значит, что скорость реакции горения гораздо сильнее зависит от температуры, чем от концентраций. Следовательно, для определения периода индукции t_i можно пренебречь изменением концентрации реагирующих веществ и за концентрации c_A и c_B исходных веществ, участвующих в реакции (1), можно принимать их начальные значения, вычисленные по формулам (14).

В силу сказанного, для определения периода индукции мы можем также использовать формулу (18), полагая, что пределами интегрирования являются начальная температура T_0 и температура горения смеси T_e :

$$\tau_i = \int_{T_0}^{T_e} \frac{dT}{\Psi \cdot e^{-E/RT} - \frac{T - T_z}{\tau_Q}} \quad (21)$$

В области горения разность температур $T - T_e \approx 0$, и поэтому второе слагаемое в знаменателе подынтегрального выражения (21) тоже равно нулю. Следовательно, в этом случае теплоотдачей можно пренебречь, в силу чего процесс горения можно рассматривать как адиабатический, период индукции которого t_{ad} мы можем определить по формуле:

$$\tau_{ad} = \frac{1}{\Psi} \int_{T_0}^{T_{max}} e^{E/RT} dT, \quad (22)$$

следующей из (21).

Полученные нами формулы позволяют вычислить время различных периодов горения и выполнить анализ влияния ряда параметров смеси на периоды горения.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В качестве исходных данных приняты следующие их значения: $r = 1,25$ м; $R = 8,314$ Дж/(К·моль); $k_0 = 3,5 \times 10^3$ с⁻¹; $E = 30 \cdot 10^3$ Дж/моль; $Q = 55 \times 10^6$ Дж/м³; $r = 0,97$ кг/м³; $r_A = 0,6682$ кг/м³; $r_B = 1,225$ кг/м³; $\lambda = 0,0341$ Вт/(м·К); $\alpha = 12$ Вт/(м²·К); $c_p = 2,252 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); $T_0 = 300$ °К; $T_z = 923$ °К; $T_e = 1670$ °К, $T_{max} = 1970$ °К, где исходные значения параметров смеси приняты при температуре T_0 .

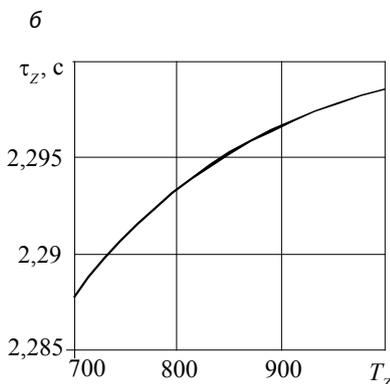
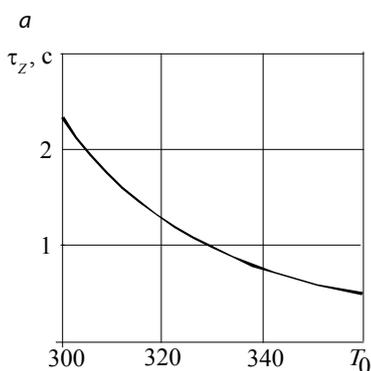


Рис. 1. Графики зависимости времени зажигания смеси от ее начальной температуры (а) и от температуры зажигания (б)

Fig. 1. Graphs of the dependence of the ignition time of the mixture on its initial temperature (a) and on the ignition temperature (b)

Вычислительные процедуры начнем с определения молярных концентраций по формулам (14):

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

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

Затем по формуле (17) вычислим время t_Q :

$$\tau_Q = \frac{2,252 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} \cdot 0,97 \text{ кг/м}^3 \cdot 1,25 \text{ м}}{12 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}} \cdot \frac{1}{2} = 113,773 \text{ с},$$

и параметр Y :

$$\Psi = \frac{55 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3 \cdot 3,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \cdot 0,312 \cdot 0,286^2}{2,252 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} \cdot 0,97 \text{ кг/м}^3} = 2,245 \cdot 10^6 \frac{\text{К}}{\text{с}}.$$

Подставив вычисленные значения в формулы (20), (21), (22), найдем промежутки времени t_z, t_i, t_{ad} , характеризующие различные этапы горения газозудной смеси. Особенность интегралов в формулах (20), (21), (22) заключается в том, что их нельзя привести к табличному виду. Другими словами, интегралы не выражаются через элементарные функции и, следовательно, для их вычисления нельзя воспользоваться формулой Ньютона-Лейбница.

Поэтому в статье эти интегралы найдены численно с использованием математического программного пакета MathCAD, являющегося универсальной программой для работы с числами, формулами, графиками и текстами. В результате, найдены промежутки времени $t_z = 2,297$ с, $t_i = 1,97$ с, $t_{ad} = 2,294$ с.

В ходе вычислительных процедур построены графики зависимостей периода зажигания t_z от ряда параметров смеси (рис. 1, рис. 2, рис. 3), анализ которых позволяет выявить некоторые закономерности.

Так, из графика, представленного на (рис. 1, а), следует, что чем выше начальная температура смеси, тем ниже период ее зажигания. При этом график функции $t_z(T_0)$ представляет собой вогнутую кривую на всем рассматриваемом интервале, значения функции на которой монотонно убывают и не имеют локальных экстремумов. Наоборот, функция $t_z(T_z)$ на рассматриваемом отрезке всюду монотонно возрастает, а ее график является выпуклой кривой (см. рис. 1, б), не содержащей экстремальных точек.

Сувеличением коэффициента теплообмена период зажигания t_z линейно увеличивается, но незначительно (см. рис. 2, а). Более существенно влияние на t_z оказывают теплоемкость и плотность смеси,

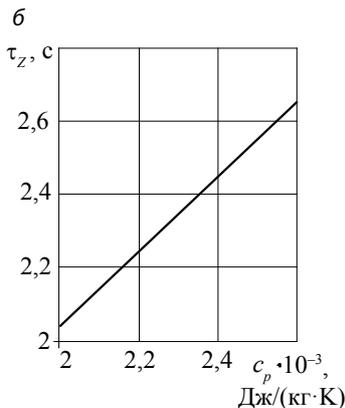
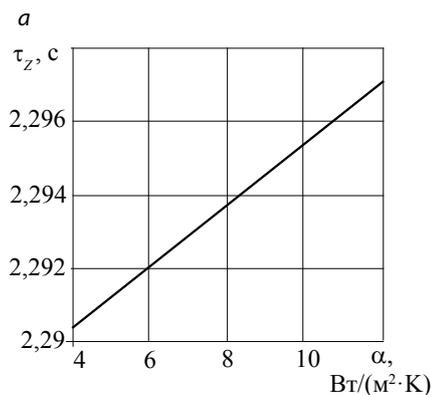


Рис. 2. Графики зависимости времени зажигания смеси от коэффициента теплообмена (а) и от удельной теплоемкости (б)

Fig. 2. Graphs of the dependence of the ignition time of the mixture on the heat transfer coefficient (a) and on the specific heat capacity (b)

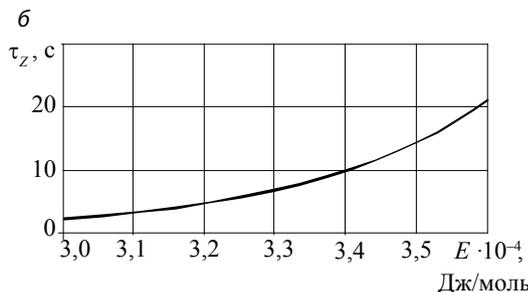
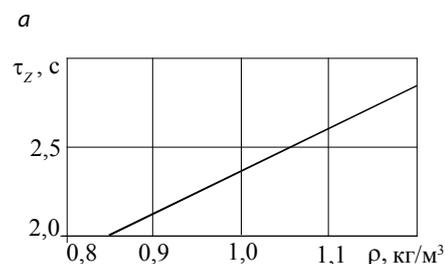


Рис. 3. Графики зависимости времени зажигания смеси от ее плотности (а) и от энергии активации (б)

Fig. 3. Graphs of the dependence of the ignition time of the mixture on its density (a) and on the activation energy (b)

с ростом которых период зажигания линейно увеличивается (см. рис. 2, б и рис. 3, а).

Еще более существенное влияние на период зажигания t_z оказывает энергия активации смеси, с ростом которой период зажигания нелинейно увеличивается. При этом функция $t_z(E)$ представляет собой монотонную вогнутую кривую без локальных экстремумов (см. рис. 3, б).

Таким образом, построенная в рамках принятых допущений модель горения смеси в горных выработках позволяет определить период зажигания и периоды индукции, а также выполнить анализ влияния различных параметров смеси на периоды их зажигания и индукции.

ВЫВОДЫ

1. Сформулирована задача о нестационарном горении газозвушной смеси в горной выработке и с учетом принятых упрощающих допущений получены формулы для определения промежутков времени, характеризующих различные этапы горения газозвушной смеси.

2. Построены графики зависимостей периода зажигания смеси от ряда ее параметров, анализ которых позволил установить:

- чем выше начальная температура смеси T_0 , тем ниже период ее зажигания t_z . При этом график функции $t_z(T_0)$ представляет собой вогнутую монотонно убывающую кривую, не имеющую локальных экстремумов;

- чем выше температура зажигания смеси T_z , тем больше период ее зажигания t_z . Функция $t_z(T_z)$ является выпуклой монотонно возрастающей функцией без экстремальных точек;

- с увеличением коэффициента теплообмена, теплоемкости и плотности смеси период зажигания t_z линейно увеличивается.

- наиболее существенное влияние на период зажигания t_z оказывает энергия активации смеси, с ростом которой период зажигания увеличивается нелинейно.

Список литературы

- Sidorov A.E., Shevchuk V.G. Laminar flame in fine-particle dusts // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2011. Vol. 47. P. 518-522.
- Sidorov A.E., Shevchuk V.G., Kondrat'ev E.N. Conductive-radiative model of a laminar flame in dust suspensions // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2013. Vol. 49. P. 257-263.
- Wave regimes of dust combustion / V.G. Shevchuk, E.N. Kondrat'ev, A.N. Zolotko et al. // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2014. Vol. 50. P. 80-86.
- What is burning in coal mines: methane or coal dust? / Vasilev A.A., Pinaev A.V., Trubisyn A.A. et al. // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2017. Vol. 53. Is. 1. P. 8-14.
- 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.
- Kurlenya M.V., Skritsky V.A. Methane Explosions and Causes of Their Origin in Highly Productive Sections of Coal Mines // Journal of Mining Science. 2017. Vol. 53. Is. 5. P. 861-867.
- Черданцев С.В., Филатов Ю.М., Шлапаков П.А. Режимы диффузионного горения пылегазовоздушных смесей в атмосфере горных выработок // Уголь. 2020. № 2. С. 27-32. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-2-27-32.
- Теплофизические и газодинамические условия протекания процессов дефлаграции и детонации в пылегазовоздушных потоках горных выработок вблизи очагов самонагрева / С.В. Черданцев, П.А. Шлапаков, Е.А. Шлапаков и др. // Химическая физика и мезоскопия. 2019. № 2. С. 179-189.
- Построение и реализация термической модели горения в рудничной атмосфере метановоздушной смеси с учетом ее кинетики / С.В. Черданцев, П.А. Шлапаков, С.И. Голоскоков и др. // Безопасность труда в промышленности. 2021. № 9. С. 7-14.

10. 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. Is. 4. P. 472–481.

11. Ershov A.P., Rubtsov I.A. Detonation of low-density explosives // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2019. Vol. 55. No 1. C. 114–120.

12. Денисов Е.Т., Саркисов О.М., Лихтенштейн Г.И. Химическая кинетика. М.: Химия. 2000. 568 с.

13. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат. 1979. 416 с.

14. Бартльме Ф. Газодинамика горения (перевод с немецкого) М.: Энергоиздат, 1981. 280 с.

15. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука. 1987. 502 с.

Original Paper

UDC 622.272:516.02 © S.V. Cherdantsev, P.A. Shlapakov, S.I. Goloskokov, A.Yu. Erastov, S.A. Khaymin, 2022
ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 1, pp. 26-32
DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-1-26-32>

Title DETERMINATION OF THE TIME INTERVALS CHARACTERIZING THE VARIOUS STAGES OF COMBUSTION OF THE GAS-AIR MIXTURE IN THE MINE WORKING

Authors

Cherdantsev S.V.¹, Shlapakov P.A.¹, Goloskokov S.I.¹, Erastov A.Yu.¹, Khaymin S.A.¹

¹ Join-stock company “Scientific centre VOSTNII on industrial and ecological safety in mountain industry” (JC “NC VOSTNII”), Kemerovo, 650002, Russian Federation

Authors Information

Cherdantsev S.V., Doctor of Engineering Sciences, Chief Researcher, e-mail: svch01@yandex.ru

Shlapakov P.A., PhD (Engineering), Laboratory Head, e-mail: shlapak1978@mail.ru

Goloskokov S.I., PhD (Engineering), Laboratory Head, e-mail: s.goloskokov@nc-vostnii.ru

Erastov A.Yu., Senior Researcher, e-mail: erastov_a_y@mail.ru

Khaymin S.A., Senior Researcher, e-mail: hsa007@mail.ru

Abstract

An indispensable attribute in the underground mining of coal deposits is methane, the danger of which manifests itself in two ways. On the one hand, being a gaseous substance, methane negatively manifests itself in various aero- and gas-dynamic processes, first of all, souffle emissions from underground cavities and sudden emissions into mine workings, which traditionally refer to dangerous phenomena during the mining of coal seams. On the other hand, mixing with air flows in the atmosphere of mine workings, methane forms gas-air mixtures that are predisposed to chemical reaction, manifested in the form of gorenje or detonation, which in coal mines can lead to catastrophic consequences. In this paper, the problem of the non-stationary gorenje process of a gas-air mixture in a mining of circular cross-section is considered. When setting the problem, it is assumed that the temperature gradient inside the considered region is very small, which is why the spatial distribution of temperatures is not taken into account. In the course of constructing the solution to the problem, formulas were obtained for determining the various time intervals characterizing the combustion process of the gas-air mixture. Gorenje Graphs of the dependences of the ignition period of the mixture on a number of its parameters are constructed, and some patterns of their influence on the ignition period of the mixture are revealed.

Keywords

Mining, Gas-air mixtures, Thermal conductivity equation, Newton's law of heat transfer, Rate of chemical reaction, Arrhenius law, Induction period.

References

- Sidorov A.E. & Shevchuk V.G. Laminar flame in fine-particle dusts. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2011, Vol. 47, pp. 518-522.
- Sidorov A.E., Shevchuk V.G. & Kondrat'ev E.N. Conductive-radiative model of a laminar flame in dust suspensions. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2013, Vol. 49, pp. 257-263.
- Shevchuk V.G., Kondrat'ev E.N., Zolotko A.N et al. Wave regimes of dust combustion. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2014, Vol. 50, pp. 80-86.

4. Vasilev A.A., Pinaev A.V., Trubisyn A.A. et al. What is burning in coal mines: methane or coal dust? *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2017, Vol. 53, Is. 1, pp. 8-14.

5. Vasilev A.A. & Vasilev V.A. Calculated and experimental parameters of combustion and detonation of mixtures of methane and coal dust. *Scientific Bulletin of the center for safety in the coal industry*, 2016, (2), pp. 8–39. (In Russ.).

6. Kurlenya M.V. & Skritsky V.A. Methane Explosions and Causes of Their Origin in Highly Productive Sections of Coal Mines. *Journal of Mining Science*, 2017, Vol. 53, Is. 5, pp 861-867.

7. Cherdantsev S.V., Filatov Yu.M. & Shlapakov P.A. Modes of diffusion combustion of fine dust-gas-air mixtures in the atmosphere of mine workings. *Ugol'*, 2020, (2), pp. 27–32. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-2-27-32.

8. Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Shlapakov E.A. et al. Thermophysical and gas-dynamic conditions of deflagration and detonation processes in dust-gas-air flows of mine workings near the centers of self-heating. *Chemical Physics and Mesoscopy*, 2019, (2), pp. 179-189. (In Russ.).

9. Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Goloskokov S.I. et al. Construction and implementation of a thermal model of aeromethane mixture combustion in mine atmosphere, considering its kinetics. *Safety in industry*, 2021, (9), pp. 7-14. (In Russ.).

10. 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, Is. 4, pp. 472-481.

11. Ershov A.P. & Rubtsov I.A. Detonation of low-density explosives. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2019, Vol. 55, (1), pp. 114-120.

12. Denisov E.T., Sarkisov O.M. & Lichtenstein G.I. Chemical kinetics: Textbook for universities. Moscow: Chemistry, 2000, 568 p. (In Russ.).

13. Kutateladze S.S. Fundamentals of heat transfer theory. Moscow, Atomizdat Publ., 1979, 416 p. (In Russ.).

14. Bartlme F. Burning gasdynamics (translated from German). Moscow, Energoizdat Publ, 1975, 280 p. (In Russ.).

15. Frank-Kamenetsky D.A. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics. Moscow, Nauka Publ, 1987, 502 p. (In Russ.).

For citation

Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Goloskokov S.I., Erastov A.Yu. & Khaymin S.A. Determination of the time intervals characterizing the various stages of combustion of the gas-air mixture in the mine working. *Ugol'*, 2022, (1), pp. 26-32. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-1-26-32.

Paper info

Received November 12, 2021

Reviewed November 24, 2021

Accepted December 15, 2021