

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.99.32.003

УДК 622.272:516.02

© С.В. Черданцев, П.А. Шлапаков, Е.А. Шлапаков, В.В. Колыхалов, С.А. Хаймин, 2025

**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



**Е. А. ШЛАПАКОВ**

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



**В. В. КОЛЫХАЛОВ**

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



**С. А. ХАЙМИН**

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



## О ВЛИЯНИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕСС ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО КАНАЛА В УГОЛЬНОМ ЦЕЛИКЕ

*Разработка угольных месторождений подземным способом, как правило, сопровождается процессами самонагрева и самовозгорания, следствием которых являются процессы горения как угольной пыли в горных выработках, так и угольных целиков. Процессы горения нередко перерастают в эндогенные пожары, которые приводят не только к существенному снижению безопасности горных работ, но и наносят значительный материальный урон, зачастую сравнимый со стоимостью основных фондов угольных предприятий. В данной статье обсуждается стационарная задача о горении фильтрационного цилиндрического канала в трещиновато-пористом*

угольном целике. Рассматривается диффузионная область горения канала, в которой учитывается как молекулярная диффузия, так и конвективный перенос газа. Особенность рассматриваемой задачи заключается в том, что в ней принимаются во внимание неизотермические условия протекания диффузионного горения. В ходе решения данной задачи искомая концентрация реагирующего газа в угольном канале определена не только с учетом размеров угольного канала и его теплофизических характеристик, но также с учетом начальной температуры газа и температуры стенки угольного канала.

Ключевые слова: УГОЛЬНЫЙ КАНАЛ, КОНЦЕНТРАЦИЯ РЕАГИРУЮЩЕГО ГАЗА, МОЛЕКУЛЯРНАЯ ДИФфуЗИЯ, КОНВЕКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС, УРАВНЕНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ ДИФфуЗИИ, СУММАРНАЯ СКОРОСТЬ РЕАКЦИИ, РЕАКЦИОННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ КАНАЛА, УРАВНЕНИЕ МЕНДЕЛЕЕВА – КЛАПЕЙРОНА, ЧИСЛО ПРАНДТЛЯ.

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение интенсивности отработки угольных пластов, как правило, сопровождается ростом их напряженно-деформированного состояния, что приводит, в свою очередь, к существенному увеличению трещиноватости пород-угольных массивов и, как следствие, к повышению проницаемости массивов. Это способствует более интенсивному течению газов в трещинах угольных целиков, к изменению их теплофизического состояния и обуславливает активизацию окислительных процессов в угольных целиках, сопровождающихся образованием очагов самонагрева и самовозгорания, что приводит к возникновению эндогенных пожаров.

Эндогенные пожары, как правило, существенно снижают безопасность труда в угольной промышленности и наносят огромный экономический ущерб угольным предприятиям и угольной промышленности в целом. Возникновению и протеканию эндогенных пожаров посвящено достаточно много публикаций, анализ которых показывает, что большая их часть посвящена изучению физико-химических процессов образования очагов самовозгорания и определению их местоположения [1–5].

Известно, что началу эндогенного пожара предшествуют процессы самонагрева и самовозгорания угля, протекающие без открытого пламени [3], а скачкообразное выделение тепла, вызывающее повышение температуры в рассматриваемой области, и появление пламени указывают на начало процесса горения, переход которого в неуправляемую стадию

характеризует возникновение эндогенного пожара [1, 2].

Известно, что процесс горения угля происходит в гетерогенном режиме [6, 7], протекающий либо на поверхности угольных частиц, либо на поверхности каналов, расположенных внутри угольных целиков.

Процессы стационарного, квазистационарного и нестационарного горения угольных частиц в диффузионной области, находящихся в горной выработке, уже рассматривались авторами в ряде работ [8–10]. Так, в работе [8] получена формула и построены графики, устанавливающие зависимость между концентрацией реагирующего газа в окрестности угольной частицы и расстоянием до ее поверхности, а также установлено, что зависимость концентрации газа от радиуса частицы является нелинейной. В работе [9] выявлено, что по мере удаления от поверхности угольной частицы концентрация реагирующего газа асимптотически стремится к своему начальному значению. В статье [10] вычислены значения концентрации реагирующего газа на поверхности частицы в различные промежутки времени и определено время, в течение которого рассматриваемая угольная частица полностью выгорает.

Однако эндогенный пожар, как правило, начинается и развивается не в горной выработке, а в угольном скоплении либо в угольном массиве, представляющий собой капиллярно-пористую среду, предрасположенную к фильтрационным процессам. Поэтому в статье [11] авторами рассмотрена задача, описывающая закономерности изменения

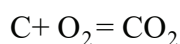
концентрации реагирующего газа в канале цилиндрической формы, расположенного в трещиноватом угольном массиве. В процессе ее решения установлено, что как по мере приближения к стенкам канала, так и по мере удаления от торцевого сечения вглубь канала концентрация газа нелинейно уменьшается, но значительно возрастает с увеличением скорости течения газа в канале.

Здесь мы рассмотрим задачу о горении угольного канала в условиях изменяющегося поля температур реагирующего газа внутри угольного канала. На наш взгляд, данная задача представляется более корректной по сравнению с задачей в статье [11], поскольку учет изменяющейся температуры внутри канала позволяет получить более объективные и точные результаты о горении угольного канала.

### ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ТЕЧЕНИИ РЕАГИРУЮЩЕГО ГАЗА В УГОЛЬНОМ КАНАЛЕ

Задачу о горении угольного канала рассмотрим в рамках следующих допущений:

1) считаем, что единственным источником теплоты в процессе горения угольного канала является химическая реакция окисления углерода



без учета промежуточных стадий;

2) канал имеет круглое поперечное сечение;

3) предполагается ламинарное течение реагирующего газа в канале;

4) диффузионные процессы внутри канала происходят за счет молекулярной диффузии и конвекции;

5) горение канала происходит в диффузионной области, но учитываются неизотермические условия горения.

Первой стадией процесса химического реагирования является подвод окислителя в зону реакции, осуществляемый посредством диффузии, описываемой следующим дифференциальным уравнением [12, 13]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c - \vec{v} \cdot \nabla c - W, \quad (1)$$

где  $t$  — время;  $c$  — концентрация окислителя в зоне реакции;  $D$  — коэффициент диффузии;  $\nabla$  и  $\nabla^2$  — операторы соответственно Гамильтона и Лапласа;  $\vec{v}$  — вектор скорости течения газа;  $W$  — скорость поглощения (или выделения) вещества в результате протекающей реакции в рассматриваемой области.

Скорость протекания реакции  $W$  определяется по формуле [6, 7, 12, 13]

$$W = k \cdot c(c_1, c_2, \dots, c_n),$$

где  $c_1, c_2, \dots, c_n$  — концентрации веществ, участвующих в химической реакции;  $k$  — константа скорости реакции.

Для реакции первого порядка скорость  $W$  в гетерогенном режиме представляет собой скорость изменения концентрации окислителя и может быть определена по формуле [13]

$$W = k' S c, \quad (2)$$

где величина  $S$  представляет собой реакционную поверхность в единице объема угольного канала диаметром  $d$ , которая определяется по формуле [12]

$$S = \frac{\pi d}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4}{d},$$

а величина  $k'$  является суммарной скоростью реакции на боковой поверхности канала [12]:

$$k' = \frac{k}{1 + \frac{8k\lambda}{\xi \cdot v}}, \quad (3)$$

где  $k$  — константа скорости химической реакции;  $\lambda$  — коэффициент молекулярной теплопроводности газа;  $\xi$  — коэффициент трения в процессе ламинарного течения газа.

Будем полагать, что концентрация окислителя не зависит от времени, и поэтому производная  $\partial c / \partial t = 0$ , в силу чего процесс горения угольного канала происходит стационарно. Ввиду малости диаметра  $d$  фильтрационного канала предположим, что в его поперечном сечении концентрация реагирующего газа

распределена равномерно. Поэтому канал представляется одномерной областью, в связи с чем уравнение (1) преобразуется к виду

$$D \frac{d^2 c}{dx^2} - v \frac{dc}{dx} - k'Sc = 0, \quad (4)$$

где  $x$  — декартова координата, направленная вдоль оси угольного канала.

Обратим внимание, что первый член в уравнении (4) характеризует молекулярную диффузию в направлении оси канала, а второй член характеризует конвективный поток, обусловленный скоростью газа в канале.

Так как уравнение (4) является однородным с постоянными коэффициентами, то его решение построим следующим образом [14]. Вначале составляем характеристическое уравнение:

$$r^2 - \frac{v}{D}r - \frac{k'S}{D} = 0,$$

соответствующее уравнению (4) и находим его корни:

$$r_1 = \frac{v}{2D} + \sqrt{\frac{v^2}{4D^2} + \frac{k'S}{D}}, \quad r_2 = \frac{v}{2D} - \sqrt{\frac{v^2}{4D^2} + \frac{k'S}{D}},$$

Поскольку оба корня являются действительными, то общее решение уравнения (4) представляется в виде [14]:

$$c = C_1 \exp \left[ \left( \frac{v}{2D} + \sqrt{\frac{v^2}{4D^2} + \frac{k'S}{D}} \right) x \right] + C_2 \exp \left[ \left( \frac{v}{2D} - \sqrt{\frac{v^2}{4D^2} + \frac{k'S}{D}} \right) x \right], \quad (5)$$

где  $C_1, C_2$  — постоянные интегрирования.

Из анализа полученного решения вытекает, что при  $x \rightarrow \infty$  величина:

$$\exp \left[ \left( \frac{v}{2D} + \sqrt{\frac{v^2}{4D^2} + \frac{k'S}{D}} \right) x \right] \rightarrow \infty$$

и, следовательно, искомая концентрация газа внутри канала также  $c \rightarrow \infty$ . Чтобы исключить эту неопределенность примем постоянную  $C_1 = 0$ , и тогда общее решение (5) упрощается:

$$c = C_2 \exp \left[ \left( \frac{v}{2D} - \sqrt{\frac{v^2}{4D^2} + \frac{k'S}{D}} \right) x \right]. \quad (6)$$

Поскольку на входе в угольный канал концентрация окислителя равна  $c_0$ , то граничное условие для искомой концентрации имеет вид:

$$c|_{x=0} = c_0. \quad (7)$$

Подставляя условие (7) в общее решение (6), находим:

$$C_2 = c_0,$$

в силу чего, общее решение (6) преобразуется в частное решение:

$$c = c_0 \exp \left[ \left( \frac{v}{2D} - \sqrt{\frac{v^2}{4D^2} + \frac{k'S}{D}} \right) x \right], \quad (8)$$

описывающее диффузию в угольном канале единственным образом.

Если скорость течения газа  $v$  в канале существенно превосходит коэффициент диффузии  $D$  ( $v \gg D$ ), то, очевидно, имеет место неравенство:

$$D \frac{d^2 c}{dx^2} \ll v \frac{dc}{dx},$$

в силу которого, уравнение (4) преобразуется в уравнение первого порядка:

$$v \frac{dc}{dx} + k'Sc = 0, \quad (9)$$

разделив в котором переменные и проинтегрировав с учетом граничного условия (7), получим следующую функцию

$$\frac{c}{c_0} = \exp \left( -\frac{k'S}{v} x \right), \quad (10)$$

которая описывает концентрацию реагирующего газа в угольном канале при условии, что диффузия газа вдоль канала существенно меньше его конвективного переноса.

Суммарная скорость реакции на участке канала длиной  $x$  может быть вычислена как разность величин  $vc_0 - vc$  [12]. Так, если

скорость газа близка к величине молекулярной диффузии, то, подставляя в разность величин формулу (8), найдем суммарную скорость реакции:

$$vc_0 - vc = vc_0 \left\{ 1 - \exp \left[ \left( \frac{v}{2D} - \sqrt{\frac{v^2}{4D^2} + \frac{k'S}{D}} \right) x \right] \right\}. \quad (11)$$

Если же скорость газа  $v$  значительно превосходит коэффициент диффузии, то в разность величин  $vc_0 - vc$  подставляем формулу (10):

$$vc_0 - vc = vc_0 \left[ 1 - \exp \left( -\frac{k'S}{v} x \right) \right]. \quad (12)$$

В конкретных практических расчетах удобно разложить показательную функцию в ряд Тейлора:

$$\exp(x) = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!}$$

и ограничиться только двумя первыми членами ряда. Тогда формулы (11), (12) соответственно будут выглядеть следующим образом:

$$vc_0 - vc = vc_0 \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{v}{2D} - \sqrt{\frac{v^2}{4D^2} + \frac{k'S}{D}} \right) x \right] \right\} =$$

$$= \frac{vc_0}{2D} x (\sqrt{v^2 + 4k'SD} - v),$$

$$vc_0 - vc = vc_0 \left\{ 1 - \left[ 1 + \left( -\frac{k'S}{v} x \right) \right] \right\} = c_0 k'S x.$$

Далее рассмотрим распределение концентраций реагирующего газа в угольном канале при неизотермических условиях. Для этого учтем, что скорость  $v$  в поперечном сечении канала зависит от температуры  $T$ .

Если пренебречь изменением объема канала и образованием газообразных продуктов химической реакции, то изменение скорости реагирующего газа будет происходить при постоянной массовой скорости

$$M = \rho v = \text{const}, \quad (13)$$

где плотность газа  $\rho$  в произвольном сечении можно определить из уравнения Менделеева – Клапейрона [12, 13]

$$\rho = \frac{p}{RT}, \quad (14)$$

где  $p$ ,  $T$  — соответственно давление и температура газа;  $R$  — газовая постоянная.

Из выражения (13) следует, что скорость газа  $v = M / \rho$  является постоянной величиной, и поэтому в уравнении (9) скорость мы можем внести под знак производной:

$$\frac{d(vc)}{dx} + k'Sc = 0, \quad (15)$$

а с учетом формулы (14) из выражения (13) найдем скорость:

$$v = \frac{MRT}{p}, \quad (16)$$

и подставим ее в уравнение (15):

$$\frac{MR}{p} \frac{d(Tc)}{dx} + k'Sc = 0. \quad (17)$$

В дополнение к уравнению (17) рассмотрим уравнение теплового баланса, которое для химической реакции первого порядка представляется в виде [14]:

$$Qk'Sc = \alpha S(T_{cm} - T), \quad (18)$$

где  $Q$  — тепловой эффект химической реакции;  $c_p$  — теплоемкость газа;  $T_{cm}$  — температура стенки угольного канала;  $\alpha$  — коэффициент теплообмена между стенкой канала и газом, которую можно определить по формуле [14]

$$\alpha = \frac{\lambda}{\mu} \frac{\xi}{8} M, \quad (19)$$

где  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости газа, связанный с коэффициентом кинематической вязкости  $\nu$  следующим образом [13, 14]

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (20)$$



Уравнение (18) выражает равенство тепловыделения химической реакции и отвода тепла потоком газа при отсутствии потерь тепла в окружающую среду.

Поскольку мы рассматриваем диффузионную область горения, то в знаменателе формулы (3) можно пренебречь единицей по сравнению со вторым членом, в силу чего формула (3) преобразуется к виду:

$$k' = \beta \cdot v, \quad (21)$$

где

$$\beta = \frac{\xi}{8\lambda} = \text{const}. \quad (22)$$

Подставив в (21) значение  $v$  из формулы (16), получим выражение:

$$k' = \beta \frac{MR}{p} T, \quad (23)$$

в силу которого, уравнение (17) приобретает следующий вид:

$$-\frac{d(Tc)}{dx} = \beta STc. \quad (24)$$

Разделив в уравнении (24) переменные и интегрируя, имеем:

$$\int \frac{d(Tc)}{Tc} = \int -\beta S dx + \ln C,$$

откуда

$$Tc = C \cdot \exp(-\beta Sx), \quad (25)$$

где  $C$  — постоянная интегрирования. Поскольку температура и концентрация газа во входном сечении канала соответственно равны  $T_0$  и  $c_0$ , то граничные условия представляются в виде

$$T|_{x=0} = T_0, \quad c|_{x=0} = c_0.$$

Подставляя граничные условия в (25), находим постоянную интегрирования

$$C = T_0 c_0,$$

с учетом которой формула (25) приводится к виду:

$$c = c_0 \frac{T_0}{T} \exp(-\beta Sx) \quad (26)$$

и может использоваться для определения концентрации газа при неизотермических условиях.

Температуру стенок канала найдем из уравнения (18)

$$T_{cm} = T + \frac{Qk'c}{\alpha}. \quad (27)$$

Подставим сюда формулы (21), (22) и (26):

$$T_{cm} = T + \frac{Q \frac{\xi}{8\lambda} \frac{1}{p} \frac{MRT}{\mu}}{\frac{\lambda \xi}{\mu} \frac{M}{8}} c_0 \frac{T_0}{T} \exp(-\beta Sx), \quad (28)$$

умножим в (28) числитель и знаменатель на  $\rho_0 c_p$  и, учтем, что имеет место соотношение:

$$\frac{Qc_0}{\rho_0 c_p} = T_{\max} - T_0, \quad (29)$$

где  $c_p$ ,  $T_0$  — соответственно теплоемкость и его температура газа в точке  $x = 0$ ;  $T_{\max}$  — максимальная температура, которую приобретает газ за счет теплового эффекта химической реакции.

Принимая во внимание формулу (29), преобразуем выражение (28) к виду:

$$T_{cm} = T + (T_{\max} - T_0) \frac{\rho_0 c_p}{\lambda} \frac{1}{\rho \cdot v} \exp(-\beta Sx)$$

и учитывая далее, что  $a = \lambda / (\rho_0 c_p)$  является коэффициентом температуропроводности, приходим к следующему выражению для температуры  $T_{cm}$  стенки канала:

$$T_{cm} = T + (T_{\max} - T_0) \frac{\text{Pr}}{\lambda} \exp(-\beta Sx), \quad (30)$$

где  $\text{Pr} = \nu/a$  — число Прандтля, которое для газов, как правило, равно единице. Но если принять  $\text{Pr} = 1$ , то величина  $\lambda = 1$  и поэтому выражение (30) представляется следующим образом:

$$T_{cm} = T + (T_{\max} - T_0) \exp(-\beta Sx). \quad (31)$$

Поскольку рассматриваемый процесс происходит стационарно, то температура стенки канала должна оставаться постоянной вдоль его оси и равной максимальной теоретической температуре газа, т. е.  $T_{cm} = T_{max}$ . Учитывая это обстоятельство, вначале перепишем формулу (31):

$$T_{max} = T + (T_{max} - T_0) \exp(-\beta Sx),$$

а затем вычитая из обеих частей полученного равенства величину  $T_0$ , преобразуем его к окончательному виду:

$$T - T_0 = (T_{max} - T_0) [1 - \exp(-\beta Sx)], \quad (32)$$

который можно использовать наряду с формулой (31).

Подставляя в формулу (26) значение  $T$ , выраженное из (31)

$$\frac{c}{c_0} = \frac{T_0}{T_{cm} - \theta \exp(-\beta Sx) + T_0 \exp(-\beta Sx)} \exp(-\beta Sx).$$

и выполнив преобразования, получим следующую формулу:

$$\frac{c}{c_0} = \frac{\frac{T_0}{T_{cm}}}{\exp(\beta Sx) - 1 + \frac{T_0}{T_{cm}}}, \quad (33)$$

в которой при вычислении концентрации реагирующего газа учитывается начальная температура газа  $T_0$  и температура стенки угольного канала  $T_{cm}$ .

Если концентрацию реагирующего газа в изотермических условиях обозначить как  $c_{iz}$ , а в неизомермических условиях — соответственно  $c_{niz}$ , то, сопоставляя формулы (10) и (33), получим следующее соотношение между указанными концентрациями:

$$c_{niz} = \frac{\frac{T_0}{T_{cm}}}{\frac{1}{c_{iz}} - 1 + \frac{T_0}{T_{cm}}}. \quad (34)$$

Обратим внимание, что если начальная температура реагирующего газа  $T_0$  равна температуре стенки угольного канала  $T_{cm}$ , то из

формулы вытекает, что концентрации газа  $c_{iz} = c_{niz}$ .

На рис. 1, рис. 2 показаны графики зависимости концентрации реагирующего газа, построенные по формуле (34). Из графика на рис. 1 следует, что при повышении температуры стенок канала концентрация реагирующего газа  $c_{niz}$  нелинейно уменьшается.

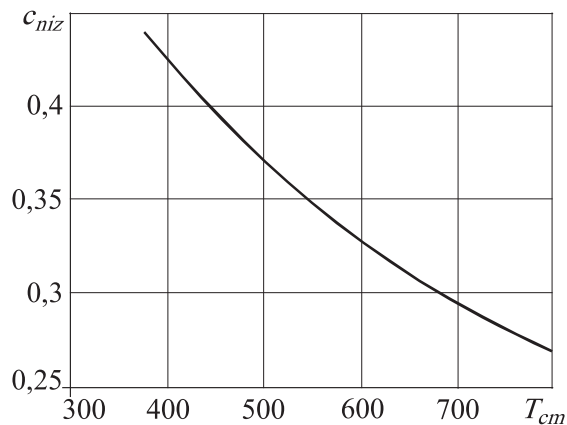


Рис. 1. График зависимости концентрации реагирующего газа от температуры боковой стенки угольного канала в диффузионном неизомермическом процессе

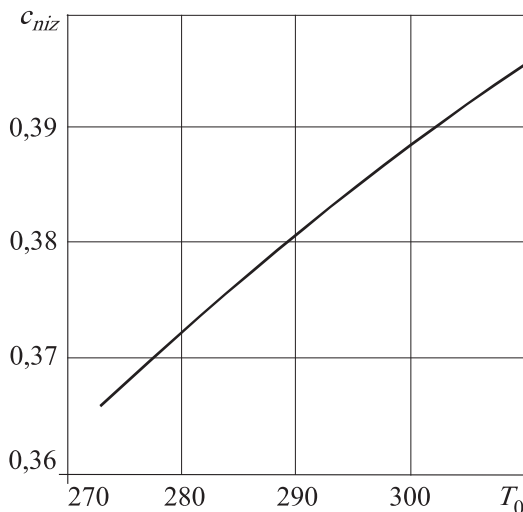


Рис. 2. График зависимости концентрации реагирующего газа от его начальной температуры в диффузионном неизомермическом процессе

Наоборот, с увеличением начальной температуры  $T_0$  концентрация  $c_{niz}$  возрастает, причем график функции  $c_{niz}(T_0)$  близок к прямой наклонной линии (рис. 2).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

— рассмотрена стационарная одномерная задача, описывающая диффузионный процесс реагирующего газа в цилиндрическом угольном канале в условиях изменяющегося температурного поля;

— представлены формулы для вычисления концентрации реагирующего газа в угольном канале как в изотермическом, так и в неизотермическом диффузионном процессе;

— получено соотношение, учитывающее влияние температуры стенки канала и начальной температуры реагирующего газа на его концентрацию в неизотермическом диффузионном процессе;

— выявлено, что при повышении температуры стенки канала концентрация реагирующего газа нелинейно уменьшается, а с повышением начальной температуры газа его концентрация практически, линейно возрастает.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линденау Н. И., Маевская В. М., Крылов В. Ф. Происхождение, профилактика и тушение эндогенных пожаров в угольных шахтах. М.: Недра, 1977. 320 с.
2. Глузберг Е. И. Теоретические основы прогноза и профилактики шахтных эндогенных пожаров. М.: Недра, 1986. 161 с.
3. Веселовский В. С., Виноградова Л. П., Орлеанская Г. Л. и др. Физические основы самовозгорания угля и руд. М.: Наука, 1972. 148 с.
4. Un L. K., Cherdantsev S. V., Popov V. B., Shlapakov P. A., Erastov A. Yu. Electrical Prospecting to Detect Places of Spontaneous Heating in Olzherasskaya-Novaya Coal // Journal of Mining Science. 2017. Vol. 53. P. 191–196.
5. Шлапаков П. А., Ерастов А. Ю., Хаймин С. А., Лебедев К. С., Колыхалов В. В., Шлапаков Е. А. Эндогенная пожаробезопасность на угольных предприятиях Кузбасса // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2019. № 1. С. 14–21.
6. Смирнов Н. Н., Зверев И. Н. Гетерогенное горение. М.: Изд-во МГУ, 1992. 446 с.
7. Виленский Т. В., Хзмалян Д. М. Динамика горения пылевидного топлива. М.: Энергия, 1978. 248 с.
8. Черданцев С. В., Шлапаков П. А., Ерастов А. Ю., Хаймин С. А., Лебедев К. С., Колыхалов В. В., Шлапаков Е. А. Моделирование процесса молекулярной диффузии реагирующего газа к покоящейся грубодисперсной угольной частице в горной выработке // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности, 2017. № 4. С. 13–21.
9. Черданцев С. В., Шлапаков П. А., Голоскоков С. И., Колыхалов В. В. Квазистационарная задача о концентрационном поле реагирующего газа в окрестности горящей угольной частицы // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 3. С. 7–13.
10. Cherdantsev S. V., Shlapakov P. A., Goloskokov S. I., Lebedev K. S., Erastov A. Yu. Unsteady Concentration Field of a Reacting Gas in the Vicinity of a Burning Coal Particle // Numerical Analysis and Applications. 2023. Vol. 16. Issue. P. 79–90.
11. Черданцев С. В., Шлапаков П. А., Шлапаков Е. А., Лебедев К. С., Ерастов А. Ю., Колыхалов В. В., Хаймин С. А. Течение реагирующего газа в фильтрационном канале угольного мас-сива // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2024. № 2. С. 46–56.
12. Канторович Б. В. Основы теории горения и газификации твердого топлива. М.: Книга по требованию, 2013. 601 с.
13. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987. 502 с.
14. Лыков А. В. Теплообмен. М.: Энергия, 1978. 480 с.
15. Понтрягин Л. С. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Наука, 1974. 331 с.



DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.99.32.003

UDC 622.272:516.02

© S. V. Cherdantsev, P. A. Shlapakov, E. A. Shlapakov, V. V. Kolykhalov, 2025

**S. V. CHERDANTSEV**

Doctor of Engineering Sciences,  
Chief 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**

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

**V. V. KOLYKHALOV**

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

**S. A. KHAYMIN**

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

**ON THE EFFECT OF THE TEMPERATURE FIELD ON THE PROCESS OF DIFFUSION COMBUSTION OF A FILTRATION CHANNEL IN A COAL COLUMN GORENJE**

*The underground mining of coal deposits is usually accompanied by processes of self-heating and spontaneous combustion, which result in the combustion of both coal dust in mining workings and coal pillars. Combustion processes often develop into endogenous fires, which lead not only to a significant reduction in mining safety, but also cause significant material damage, often comparable to the cost of fixed assets of coal enterprises. In this article, the stationary problem of the combustion of a cylindrical filtration channel in a fractured-porous coal column is discussed. The diffusion region of the channel combustion is considered, which takes into account both molecular diffusion and convective gas transport. The peculiarity of the problem under consideration lies in the fact that it takes into account the non-isothermal conditions of diffusion combustion. In the course of solving this problem, the desired concentration of reacting gas in the coal channel is determined not only taking into account the size of the coal channel and its thermophysical characteristics, but also taking into account the initial temperature of the gas and the temperature of the wall of the coal channel.*

**Keywords:** COAL CHANNEL, CONCENTRATION OF REACTING GAS, MOLECULAR DIFFUSION, CONVECTIVE TRANSPORT, STEADY-STATE DIFFUSION EQUATION, TOTAL

REACTION RATE, REACTION SURFACE OF THE CHANNEL, MENDELEEV–CLAPEYRON EQUATION, PRANDTL NUMBER.

## REFERENCES

1. Lindenau N. I., Maevskaya V. M., Krylov V. F. Origin, prevention and extinguishing of endogenous fires in coal mines. Moscow: Nedra, 1977. 320 p. [In Russ.].
2. Gluzberg E. I. Theoretical foundations of forecasting and prevention of mine endogenous fires. Moscow: Nedra, 1986. 161 p. [In Russ.].
3. Veselovsky V. S., Vinogradova L. P., Orleanskaya G. L. and others. The physical foundations of spontaneous combustion of coal and ores. Moscow: Nauka, 1972. 148 p. [In Russ.].
4. Un L. K., Cherdantsev S. V., Popov V. B., Shlapakov P. A., Erastov A. Yu. Electrical Prospecting to Detect Places of Spontaneous Heating in Olzherasskaya-Novaya Coal // Journal of Mining Science. 2017. Vol. 53. P. 191–196.
5. Shlapakov P. A., Erastov A. Yu., Khaimin S. A., Lebedev K. S., Kolykhalov V. V., Shlapakov E. A. Endogenous fire safety at Kuzbass coal enterprises // Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety. 2019. No. 1. P. 14–21. [In Russ.].
6. Smirnov N. N., Zverev I. N. Heterogeneous combustion. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1992. 446 p. [In Russ.].
7. Vilenskiy T. V., Khzmalyan D. M. Dynamics of gorenje pulverized fuel. Moscow: Energiya, 1978. 248 p. [In Russ.].
8. Cherdantsev S. V., Shlapakov P. A., Erastov A. Yu., Khaimin S. A., Lebedev K. S., Kolykhalov V. V., Shlapakov E. A. Modeling of the process of molecular diffusion of a reacting gas to a resting coarse-dispersed coal particle in a mining operation // Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety, 2017. No. 4. P. 13–21. [In Russ.].
9. Cherdantsev S. V., Shlapakov P. A., Goloskokov S. I., Kolykhalov V. V. Quasi-stationary problem of the concentration field of a reacting gas in the vicinity of a burning coal particle // Occupational safety in industry. 2022. No. 3. P. 7–13. [In Russ.].
10. Cherdantsev S. V., Shlapakov P. A., Goloskokov S. I., Lebedev K. S., Erastov A. Yu. Unsteady Concentration Field of a Reacting Gas in the Vicinity of a Burning Coal Particle // Numerical Analysis and Applications. 2023. Vol. 16. Issue. P. 79–90.
11. Cherdantsev S. V., Shlapakov P. A., Shlapakov E. A., Lebedev K. S., Erastov A. Yu., Kolykhalov V. V., Khaimin S. A. Flow of reacting gas in the filtration channel of the coal massif // Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety. 2024. No. 2. P. 46–56. [In Russ.].
12. Kantorovich B. V. Fundamentals of the theory of gorenje and gasification of solid fuels. Moscow: Book on demand, 2013. 601 p. [In Russ.].
13. Frank-Kamenetsky D. A. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics. Moscow: Nauka Publ., 1987. 502 p. [In Russ.].
14. Lykov A. V. Heat and mass transfer. Moscow: Energiya, 1978. 480 p. [In Russ.].
15. Pontryagin L. S. Ordinary differential equations. Moscow: Nauka, 1974. 331 p. [In Russ.].