

УДК 622.822.225

Метод определения группы эндогенной пожароопасности шахтопластов

На основании ранее выполненных теоретических исследований предложен комплексный параметр эндогенной пожароопасности шахт, где использована математическая модель гетерогенного окисления углей с учетом испарения влаги и дросселирования метана. Получена зависимость для критерия пожароопасности с учетом выделения теплоты и теплоотдачи. Дано обоснование группирования шахт по пожарной опасности с использованием данных о 256 эндогенных пожарах на 46 шахтопластах за 10-летний период с различными горно-геологическими и горнотехническими условиями.

Ключевые слова: шахтопласт, самовозгорание, пожароопасность, инкубационный период.

Контактная информация: sentyabr.eger@inbox.ru

Постановка проблемы. Согласно нормативному документу [1] ежегодно в производственных объединениях составляется список шахтопластов угля, склонных к самовозгоранию, и выполняется группирование их по пожароопасности.

Эндогенная пожароопасность, т. е. вероятность возникновения пожара от самовозгорания угля, зависит от многих горно-геологических и горнотехнических факторов, а также от свойств угля, определяющих его склонность к самовозгоранию. Практикой установлены качественные характеристики отдельных факторов пожароопасности, способствующих повышению вероятности самовозгорания угля при разработке пласта.

Известно, что опасность возникновения эндогенного пожара возрастает в местах нарушений залегания пластов, резкого изменения мощности, при низкой скорости подвигания очистных забоев, активных утечках воздуха через выработанное пространство и т. д. Известно также, что уголь некоторых пластов обладает очень высокой химической активностью и самовозгорается даже при благоприятных условиях залегания и разработки. Другие угли, имеющие низкую химическую активность, самовозгораются только при крайне неблагоприятных горно-геологических и горнотехнических условиях.

Существует несколько методов прогноза пожароопасности выемочных участков или шахтопластов, на основании которых определяют группы пожароопасности:

- эмпирические, или практические;
- статистические;
- физические, основанные на изучении факторов пожароопасности.

Эмпирические, или практические, методы оценки эндогенной пожароопасности строятся на основе экспериментальных данных о пожарах от самовозгорания угля в различных условиях.



П. С. ПАШКОВСКИЙ,
доктор техн. наук



С. П. ГРЕКОВ,
доктор техн. наук



А. А. ВСЯКИЙ,
инж.



К. В. ГЛУШЕНКО,
инж.

Правильность оценки зависит от квалификации лиц, дающих оценку.

Статистические методы в простейшем виде используют уже давно для сравнительной оценки пожароопасности шахт, отдельных шахтопластов, горно-геологических и горнотехнических условий. Поскольку пожароопасность зависит от многих факторов, достоверная оценка одного из них путем простого сопоставления статистических данных возможна только при условии, что остальные факторы равноценны. Поэтому получаемые результаты рассматривают как ориентировочные.

Значительную группу составляют методы, предусматривающие изучение закономерностей развития процесса самовозгорания. Эти методы базируются в основном на математическом моделировании процесса самонагрева угля, что имеет преимущество перед эмпирическими и статистическими методами в интерпретации полученных результатов, позволяет определить пожароопасные параметры и т. п. Надежность результатов при этом определяет адекватность математической модели, что характеризуется полнотой учета факторов, оказывающих влияние на развитие процесса самонагрева в конкретных условиях.

Группирование шахт по пожароопасности выполняют путем расчета комплексной количественной оценки основных факторов пожароопасности.

Автором работы [2] предложен метод определения комплексной количественной оценки основных факторов пожароопасности, позволяющий установить категорию опасности выемочного поля (участка) или шахтопласта и выявить условия, от которых зависит повышенная эндогенная пожароопасность отдельных участков. Этот метод включает в себя несколько положений.

1. Отдельные природные и технические факторы пожароопасности могут быть охарактеризованы относительным количественным показателем $0 < K_{ji} < 1$, причем значение каждого показателя $K_j \approx 1$ соответствует максимально возможной степени пожарной опасности.

2. Значимость отдельных факторов, т. е. их роль в образовании пожароопасной обстановки, может быть охарактеризована показателем весомости M_j , причем для удобства практических расчетов принимается $0 < M_j < 1$ и $\sum^n M_j \approx 1$, где n – количество учитываемых факторов.

3. Суммарное действие нескольких однородных факторов пожароопасности оценива-

ют их средневзвешенным показателем, получаемым с учетом показателя весомости каждого фактора, т. е.

$$K_i = \sum^n M_j / [\sum^n (M_j / K_{ij})]. \quad (1)$$

4. Суммарное действие всех учитываемых факторов пожароопасности оценивают суммарным показателем, определяемым как среднее геометрическое относительных оценок отдельных групп факторов, т. е.

$$K_0 = \sqrt[3]{K_1 K_2 K_3}. \quad (2)$$

В методе комплексной количественной оценки эндогенной пожароопасности учитывают следующие группы факторов:

- склонность угля к самовозгоранию: объемная доля серы в угле S_c , %; зольность угля A^c , %; марка угля (объемная доля летучих V^r , %); коэффициент диффузии кислорода в поры угля D , м²/с;

- геологические условия залегания пласта: толщина пласта H , м; плотность выемки угля (наличие нерабочих пластов-спутников) P_B ;

- условия эксплуатации пласта: скорость подвигания очистного забоя v , м/мес; расход воздуха, подаваемого в забой Q , м³/с; наличие междуэтажных целиков C ; схема проветривания B ; способ отбойки угля M ; способ управления горным давлением.

Для каждой группы факторов значение коэффициентов относительной оценки пожароопасности находится как среднее гармоническое по формуле (1).

На основании выполненных в работе [2] исследований по 123 шахтопластам предложено следующее группирование шахтопластов по пожарной опасности:

I группа – весьма пожароопасные участки, комплексный показатель пожароопасности K_0 превышает 0,5;

II группа – пожароопасные участки, K_0 находится в пределах от 0,3 до 0,5;

III группа – умеренно пожароопасные участки, K_0 находится в пределах от 0,1 до 0,3;

IV группа – непожароопасные участки, K_0 не превышает 0,1.

В более простом виде, с использованием некоторых из перечисленных выше параметров, приведенных в работе [3], был предложен метод оценки пожароопасности, который нашел применение в действующем нормативном документе [4]. В нем

влияние взаимодействующих факторов на интенсивность возникновения эндогенных пожаров λ_{ϕ} , мес^{-1} , предложено определять по формуле

$$\lambda_{\phi} = -0,008 + 0,029m + 0,0007\alpha + 0,008S - 0,0008v - 0,0035Hg, \quad (3)$$

где 0,008 – свободный член;

m – толщина пласта, м;

α – угол падения пласта, ...°;

S – доля общей среды в угле, %;

v – скорость подвигания очистного забоя, м/мес;

Hg – диффузионное сопротивление, мм, определяемое по эмпирической зависимости

$$Hg = 18 \cdot 10^{-4} k^{-1}, \quad (4)$$

k – скорость химической реакции, выраженная в размерности с^{-1} .

Вероятность возникновения пожаров определяется по формуле

$$P = 1 - \exp(-\lambda_{\phi}\tau), \quad (5)$$

где τ – время отработки выемочного поля (участка), мес.

С учетом полученных результатов предложено группирование шахт по пожарной опасности, приведенное в работе [1] и во многом совпадающее с данными труда [2].

В отличие от существующего вероятностно-метода определения пожароопасности как многофакторной системы в работе [5] рассмотрен аналитико-вероятностный подход, основанный на протекающих в угольных скоплениях физико-химических процессах, а также предложен комплексный критерий эндогенной пожароопасности угольных пластов и групп пожароопасности, не отличающийся от помещенных в нормативном документе [4], но отражающий физическую сущность происходящих в скоплениях угля процессов.

Сложность вычислений критериев пожароопасности по статистическим и аналитико-вероятностным методам [2, 5] и ограниченность применения нормативного метода, описанного в Руководстве [4], выявили необходимость проведения дальнейших теоретических исследований с использованием статистического материала [2] о пожарах.

В статье [6] на основании теоретических исследований [7] предложена математическая модель самовозгорания угля за счет химических реакций окисления и теплообмена с окружающей средой, имеющая решение в виде

$$T/T_0 = 1 + \{1 - [\exp(\Gamma_T Fo)]^{-b}/b\}, \quad (6)$$

где T – температура скопления породы в начале процесса самовозгорания, К;

T_0 – начальная температура скопления породы, К;

b – критерий скорости нагревания угольного скопления,

$$b = 3Vi/\Gamma_T - 1, \quad (7)$$

Vi – критерий Био, определяемый зависимостью

$$Vi = \alpha m/\lambda; \quad (8)$$

α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

m – толщина скопления угля, м;

λ – коэффициент теплопроводности угля, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;

Γ_T – комплексный критерий генерации теплоты,

$$\Gamma_T = \{[\xi a_{O_2} q k - q_{др} J_m - q_v k_v w]/\rho c_v T_0\} \cdot (m^2/a), \quad (9)$$

ξ – доля реакционной поверхности угля, принимающей участие в окислении, выражение для определения которой дано в работе [5];

a_{O_2} – концентрация кислорода в угле, моль/ м^3 ;

q – теплота реакции окисления угля, Дж/моль;

k – константа скорости окисления угля, с^{-1} ;

$q_{др}$ – теплота дросселирования метана, Дж/моль;

J_m – скорость выделения метана из угля, моль/ $(\text{м}^3 \cdot \text{с})$,

$$J_m = G/t_n, \quad (10)$$

G – газоносность пласта, моль/ м^3 ;

t_n – пороговое время самовозгорания угля, равное $3 \cdot 10^6$ с;

q_v – теплота испарения влаги, Дж/моль;

k_v – константа скорости испарения влаги, с^{-1} ;

w – концентрация влаги в угле, моль/ м^3 ;

ρ – плотность угля, $\text{кг}/\text{м}^3$;

c_v – удельная теплоемкость угля, Дж/(кг·К);

a – коэффициент температуропроводности угля, $\text{м}^2/\text{с}$;

Fo – критерий Фурье,

$$Fo = at/m^2, \quad (11)$$

t – время, с.

Из формулы (6) получено выражение для критерия $\Gamma_T Fo$ в виде

$$\Gamma_T Fo|_{Vi \neq 0} = -\{\ln[-(T/T_0 - 1 - 1/b)b]\}/b. \quad (12)$$

Критерий $\Gamma_T Fo$ (обозначим его через G_{Π}) зависит только от двух параметров: T/T_0 и b . Он полностью характеризует угольное скопление толщиной m при условии наличия кислорода для реакции окисления, дросселирующего эффект истечения метана из угля на метанообильных пластах, испарения влаги и теплоотвода в окружающую среду и поэтому может быть назван универсальным критерием пожароопасности.

Если принять, что в формуле (12) $T = T_{кр}$, подставить значения Γ_T и F_0 из уравнений (9) и (11) и разрешить равенство относительно t , то получим время инкубационного периода самовозгорания угля $t_{инк}$, приведенное в работе [6].

В целях обоснования полноты использования отдельных факторов пожароопасности, предложенных разными авторами, для нахождения комплексного параметра пожароопасности $G_{п}$ обратимся к данным автора работы [2], изучавшего условия образования пожароопасных скоплений угля при ведении горных работ в шахтах. В работе [2] проанализированы основные горно-геологические факторы, обуславливающие вероятность образования концентрированных потерь угля и доступа к ним воздуха при разработке пласта. Так, к факторам, которые приводят к выемке пласта не на всю толщину, относятся: породные прослойки значительной толщины, вынуждающие оставлять пачку угля; геологические нарушения, возле которых необходимо оставлять целики угля; нерабочие пласты и пропластки, обнажаемые при выемке пластов, и др.

Основными горно-геологическими факторами, определяющими пожароопасность пласта, обычно считают его толщину и угол падения. Известно, что с увеличением толщины пласта увеличивается абсолютное значение потерь угля, в том числе концентрированных, расширяется зона обрушения во вмещающих породах, что облегчает приток воздуха к скоплениям разрыхленного угля. Повышенная пожароопасность крутых пластов объясняется значительным количеством отбитого угля, теряемого в выработанном пространстве, большими прососами воздуха, сползанием почвы с обнажением нерабочих пластов, деформированием целиков и т. п.

К основным горнотехническим факторам, определяющим пожароопасность разработки пластов, относятся: способ вскрытия месторождения и подготовки выемочного поля, система разработки, способ и режим проветривания. Все эти факторы необходимо оценивать с учетом возможности образования концентрированных потерь угля, доступа к ним воздуха и условий теплонакопления. На практике при оценке горнотехнических условий разработки угольных пластов исходя из эндогенной пожароопасности особое внимание уделяют таким факторам, как размеры целиков, скорость подвигания очист-

ных забоев, способ управления горным давлением, возможность изоляции выработанного пространства до полной отработки выемочного участка, перепад вентиляционной депрессии в пределах участка и др.

Для исследования параметров пожароопасности выбраны шахтопласты угля разных угольных районов Донбасса, причем исследовались как опасные, так и неопасные по самовозгоранию пласты.

По данным геологомаркшейдерской документации изучены условия залегания и выемки 161 шахтопласта Донбасса, по актам расследования причин самовозгорания угля – места и причины эндогенных пожаров, наблюдавшихся на этих пластах. Установлено, что наибольшее количество эндогенных пожаров произошло при выемке пластов угля не на полную мощность (42 %), а также при подработке или надработке пластов угля (углистого сланца) нерабочей мощности, попадающих в зону обрушения разрабатываемого пласта (38 %). Значительно меньше эндогенных пожаров возникало в скоплениях отбитого угля (14 %) и в целиках, оставленных в выработанном пространстве (6 %).

Из проведенного анализа следует, что основными факторами пожароопасности угольных скоплений в шахтах являются их размеры, химическая активность углей и условия теплоотдачи. Все они учтены в предлагаемом авторами параметре пожароопасности $G_{п}$ критерием b через критерии V_i и Γ_T . Такие факторы, как сернистость углей и диффузионное сопротивление, используемые при определении группы пожароопасности в действующем нормативном документе [1], также учитываются при анализе углей в лабораторных условиях и входят через параметр константы скорости реакции окисления в критерий Γ_T .

Таким образом, предлагаемый для оценки пожароопасности углей критерий $G_{п} = \Gamma_T \cdot F_0$ полностью учитывает все горно-геологические и горнотехнические факторы разработки угольных пластов.

Для обоснования группы пожароопасности шахтопластов с использованием предлагаемого метода обратимся к статистическому материалу о случившихся пожарах за 10-летний период на шахтах Донбасса с самыми разными горно-геологическими и горнотехническими условиями разработки пластов в работе [2]. Было проанализировано 256 эндогенных пожаров на

46 шахтопластах. Полученные данные о количестве пожаров в виде кривой их зависимости от параметра $G_{\text{п}}$ изображены на рис. 1.

Параметр $G_{\text{п}}$ рассчитывался по данным лабораторных исследований углей, где определялись критическая температура самовозгорания, дробимость, константа скорости химической реакции, теплота реакции окисления, скорость выделения метана, коэффициент теплоотдачи, доля реакционной поверхности углей, принимающей участие в окислении. Значения угольных скоплений, приводящие к эндогенному пожару, брались по данным шахт.

Как видно из рис. 1, большинство пожаров (68,4 %) произошло при значении комплексного показателя пожароопасности $G_{\text{п}} < 0,23$; 26,6 % – при $G_{\text{п}} = 0,23...0,33$; около 5 % – при $G_{\text{п}} = 0,33...0,53$.

С учетом ранее выполненных исследований и на основании полученных результатов предлагается следующее разделение шахтопластов по группам эндогенной пожароопасности в зависимости от комплексного показателя $G_{\text{п}}$: I – особо опасные шахтопласты (участки), $G_{\text{п}} \leq 0,23$; II – пожароопасные пласты (участки), $0,23 < G_{\text{п}} \leq 0,33$; III – малоопасные пласты (участки), $0,33 < G_{\text{п}} \leq 0,53$.

Предлагаемая градация шахтопластов не противоречит нормативным документам [1, 4].

При определении склонности углей к самовозгоранию используют критерий $t_{\text{п}}$ – пороговое время, при превышении которого предполагают, что пласты будут не склонны к самовозгоранию [2].

В проведенных авторами исследованиях пороговый комплексный показатель склонности угля к самовозгоранию является безразмерной величиной ($G_{\text{п}} = 0,53$), выше которой не было ни одного пожара. Чтобы сравнить его с применяемым в настоящее время критерием, достаточно $G_{\text{п}}$ умножить на среднее значение параметра $1/A$, приведенного в работе [6]. Получаем $2,6 \cdot 10^6$ с, что близко к используемому в настоящее время значению $G_{\text{п}} = 3 \cdot 10^6$.

Выводы. На основании теоретических и экспериментальных исследований описана математическая модель расчета комплексного параметра пожароопасности углей и предложен метод определения группы эндогенной пожароопасности шахтопластов. Расчет параметра по-

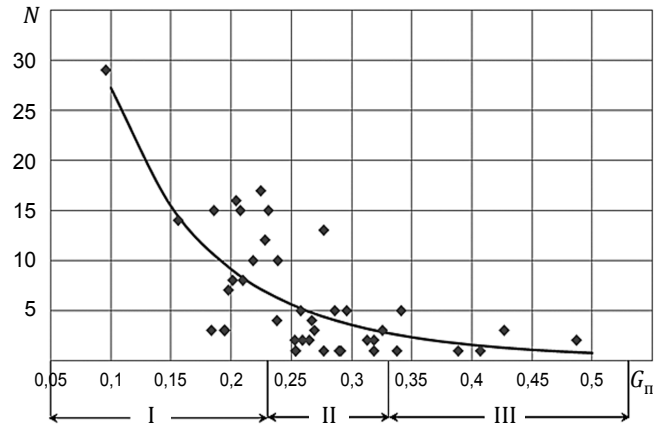


Рис. 1. Зависимость количества эндогенных пожаров N от комплексного показателя пожароопасности $G_{\text{п}}$ и группы пожароопасности (I–III).

жароопасности на примере 256 эндогенных пожаров, произошедших в Донбассе на 46 шахтопластах, свидетельствует о том, что полученный критерий не противоречит существующим, а уточняет методы определения эндогенной пожароопасности и позволяет достоверно прогнозировать пожароопасность пласта.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Эндогенные пожары на угольных шахтах Донбасса. Предупреждение и тушение. Инструкция: КД 12.01.401–96.* – Донецк: НИИГД, 1996. – 70 с.
2. *Пашковский П. С.* Эндогенные пожары в угольных шахтах / П. С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 791 с.
3. *Каледин Н. В.* Метод оценки эндогенной пожароопасности выемочных полей шахт / Н. В. Каледин, И. А. Шайтан, Т. Г. Зайцева // *Безопасность труда в промышленности.* – 1991. – № 9. – С. 38–39.
4. *Руководство по предупреждению и тушению эндогенных пожаров на угольных шахтах Украины: КД 12.01.402–2000.* – Донецк: НИИГД, 2000. – 216 с.
5. *Пашковский П. С.* Актуальные вопросы борьбы с самонагреванием угля [Текст]: сб. науч. тр. / П. С. Пашковский, С. П. Греков, И. Н. Зинченко. – Донецк: ЧП «Арпи», 2012. – 653 с.
6. *Пашковский П. С.* Критические параметры самовозгорания угля / П. С. Пашковский, С. П. Греков, В. П. Орликова // *Уголь Украины.* – 2016. – № 1. – С. 23–27.
7. *Греков С. П.* Неизотермическая адсорбция вещества сферическим микропористым зерном, сопровождаемая химическими реакциями второго порядка / С. П. Греков, А. Е. Калюсский, В. В. Баклан, Б. И. Кошовский // *Теоретические основы химической технологии.* – 1998. – Т. 32, № 2. – С. 122–125.