

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ЗНАЧИМЫХ ИНФОРМАТИВНЫХ ФАКТОРОВ ВЫБРОСООПАСНОСТИ УГЛЯ И ГАЗА

Применен экспертно-статистический метод для установления значимости факторов, влияющих на проявление газодинамических явлений в угольных шахтах.

Застосовано експертно-статистичний метод для встановлення значущості факторів, що впливають на прояв газодинамічних явищ у вугільних шахтах.

Expert-statistical method is used to determine the main factors that affect manifestation of gas-and-dynamic phenomena in coal mines.

С увеличением глубины разработки угольных пластов, а, следовательно, и величины горного давления, породы переходят в предельное состояние, характеризующееся высокой концентрацией напряжений и возможностью возникновения газодинамических явлений (ГДЯ). К ним относят выбросы угля, породы и газа, которые являются наиболее сложными из всех явлений и представляют собой быстро развивающееся разрушение (частичное или полное) очистного забоя, бурное выделение газа и образование потока угля или породы, взвешенных в газе. На протяжении многих лет при реализации наиболее мощных явлений исследователями фиксировались объем выброшенного полезного ископаемого, породы и газа, обследовались образованные полости, выявлялись особенности геологических условий в местах развития ГДЯ. На этой основе сформированы представления о причинах ГДЯ, установлены закономерности и тенденции.

Несмотря на наличие большого числа работ, посвященных ГДЯ, в которых рассматривались многие влияющие факторы, основные из них до сих пор не выявлены, т.е. до последнего времени не было сформировано так называемое «факторное пространство», обуславливающее проявление и развитие газодинамических явлений.

Цель данной работы – выделить наиболее значимые факторы, обуславливающие ГДЯ, опираясь на данные многолетних наблюдений и мнений специалистов, имеющих непосредственное отношение к данной проблеме. Для достижения цели использовались статистические методы, позволяющие установить доминирующие информативные факторы возникновения выбросоопасных ситуаций на угольных шахтах.

Формирование факторного пространства. Опыт разработки выбросоопасных угольных пластов и многочисленные шахтные исследования позволили сформировать основные факторы, определяющие возникновение на шахтах выбросоопасных ситуаций. К ним в первую очередь следует отнести: повышенное горное давление (напряженно-деформированное состояние); физико-механические свойства углей; глубина залегания пластов; содержание газа в угольном пласте; строение угольного пласта; скорость разработки пластов; используемая система разработки пластов; химические свойства и состав углей; наличие горно-геологических нару-

шений; состав и строение близлежащих пород; сезонная нестабильность; субъективный фактор, характеризующий прочие неучтенные причины (рис. 1).



Рис. 1. Факторы выбросоопасности в угольных шахтах

Формализация факторных взаимосвязей внезапных выбросов на угольных шахтах реализуется с помощью различных математических методов, выбор которых зависит от объема статистической информации, доступной для обработки.

Иногда формализация факторных взаимосвязей объекта исследования связана с наличием избыточного количества показателей, признаков и др. Это затрудняет анализ степени их влияния на изучаемое явление, что требует, в первую очередь, установления наиболее приоритетных факторов. Применительно к проблеме ГДЯ, которая по-прежнему не достаточно формализована, наиболее приемлемым является использование экспертно-статистических методов и факторного анализа, в частности метода главных компонент. Эти методы успешно использовались при установлении признаков такого сложного явления, как выдавливания угля в горных выработках [1]. Для оценки степени выбросоопасности аномальной зоны на угрожаемом пласте и выявление приоритетных (значимых) информативных факторов также может быть использован метод ранговой корреляции, в основу которого положена аргументированность суждения высококвалифицированных специалистов в данной отрасли. Состав влияющих факторов наиболее точно определяется следующим алгоритмом системного подхода к получению экспертных оценок [2]:

- выделение из сравнительно большой совокупности приоритетных факторов выбросоопасности;
- установление формы проведения опроса (по анкетам, анонимно);

- формирование экспертной группы, в которую входят специалисты по изучению газодинамических явлений, руководители служб, эксплуатационный персонал и д.р. (количественный состав экспертной группы составляется в пределах $5 \leq m \leq 10$);
- формирование правил и порядка работы экспертной группы, основанных на принципах системы экспертных оценок.

В соответствии с этим алгоритмом, применительно к проблеме ГДЯ, экспертиза проводилась по специально разработанной опросной анкете, в которую на основании теоретического анализа исследуемого процесса и оперативных сведений включено 12 информативных факторов: x_1 – напряженно-деформированное состояние горного массива; x_2 – физико-механические свойства углей; x_3 – глубина залегания пластов; x_4 – содержание газа в угольном пласте; x_5 – строение угольного пласта; x_6 – скорость разработки пластов; x_7 – система разработки пластов; x_8 – химические свойства и состав углей; x_9 – горно-геологические нарушения; x_{10} – состав и строение близлежащих пород; x_{11} – сезонная нестабильность; x_{12} – субъективный фактор.

В качестве экспертов выступили ведущие специалисты горных предприятий, технологических служб угольных шахт, проектных организаций, а именно: работники соответствующих отделов шахт ГП «Угольная компания «Шахта Краснолиманская», ГП «Шахта им. А.А. Скочинского», объединение «ДТЭКПавлоградуголь», ПАО «Шахтоуправление «Покровское»; структурные подразделения компании ДТЭК: «Шахта «Днепровская», «Шахта им. Героев Космоса», а также ГП «Днепрогипрошахт», Институт геотехнической механики (ИГТМ НАН Украины). Опрос специалистов-экспертов выполнен в несколько упрощенной форме по сравнению с требованиями классического метода экспертных оценок. В каждой из предложенных анкет шесть экспертов, независимо от своих коллег, качественно оценивали тот или иной фактор выбросоопасности.

В табл. 1 приведен пример заполнения опросной анкеты для шахты «Краснолиманская». В основу экспертной оценки положена семибалльная шкала, согласно которой 12-ти принятым факторам присваивается соответствующий номер (ранг). При этом наиболее значимому фактору приписывается первый ранг, а наименее важному – седьмой. Для удобства последующей обработки полученной от экспертов информации ранги соответствующим факторам присваивались только в виде натуральных чисел (в анкете не должно содержаться нулевых или дробных рангов).

В табл. 1 приведена первоначальная (исходная) матрица рангов, полученная на основе анкет шести экспертов. Поскольку не все эксперты установили ранговое различие между несколькими смежными факторами (разным факторам присвоен один и тот же ранг), оказалось, что число рангов N не равно числу ранжируемых объектов (факторов) n . В таких случаях объектам приписывают так называемые стандартизированные ранги. Так, меньшему значению начисляется меньший ранг, а наибольшему значению начисляется ранг, соответствующий количеству ранжируемых значений (n). В случае, если несколько значений равны, им начисляется ранг, представляющий собой среднее значение из тех рангов, которые они получили бы, если бы не были равны. В соответствии с

этим исходная матрица была преобразована таким образом (табл.2), чтобы в j -ой строке преобразованной матрицы выполнялось условие [3]:

$$S_{N_j} = \sum_{i=1}^n x_i = \frac{n(n-1)}{2},$$

где S_{N_j} – сумма рангов, полученная в результате ранжирования принятых факторов в j -ой строке преобразованной матрицы; x_i – ранг (место) i -го фактора среди остальных $(n-1)$ факторов строки; n – общее количество ранжируемых наблюдений (значений).

Таблица 1

Первоначальная матрица рангов (мест)

Эксперт $j = 1, m$	Информативный фактор $i = 1, n$											
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
1	2	1	3	2	3	3	6	2	3	4	4	7
2	1	3	2	3	3	4	7	2	3	4	5	7
3	2	1	3	2	2	5	4	4	4	3	3	6
4	1	2	3	2	4	5	6	3	3	5	4	5
5	1	2	4	3	3	4	5	4	4	4	5	7
6	2	2	4	2	2	5	4	4	4	3	5	5

Несовпадение реальной и расчетной сумм рангов будет свидетельствовать об ошибке, допущенной при начислении рангов или их суммировании.

Статистическая обработка информации, полученная от экспертов, должна включать в себя оценку степени согласованности мнений экспертов о влиянии перечисленных выше факторов на возникновение и развитие ГДЯ.

В качестве критерия оценки принят коэффициент конкордации Кендалла W , т.е. общий коэффициент ранговой корреляции для группы из m специалистов-экспертов, который рассчитывается как [4]:

$$W = \frac{12}{m^2(n^3 - n)} \cdot \sum_{i=1}^n S_i^2,$$

где S_i – отклонение суммы рангов i -го объекта, рассчитываемое по формуле

$$S_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m a_{ijk} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m a_{ijk},$$

n – число оцениваемых объектов (число факторов);

m – число ранговых последовательностей (число экспертов);

a_{ij} – преобразованные ранги суждений группы экспертов.

Таблица 2

Преобразованная матрица рангов (мест)

Эксперт ($j=1, m$)	Информативный фактор $i = (1, n)$												S_N
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	
1	3	1	6,5	3	6,5	6,5	11	3	6,5	9,5	9,5	12	78
2	1	5,5	2,5	5,5	5,5	8,5	11,5	2,5	5,5	8,5	10	11,5	78
3	3	1	6	3	3	11	9	9	9	6	6	12	78
4	1	2,5	5	2,5	7,5	10	12	5	5	10	7,5	10	78
5	1	2	7	3,5	3,5	7	10,5	7	7	7	10,5	12	78
6	2,5	2,5	7,5	2,5	2,5	11	7,5	7,5	7,5	5	11	11	78
$\sum_{j=1}^m a_{ij}$	11,5	14,5	34,5	20	28,5	54	61,5	34	40,5	46	54,5	68,5	468
Место	1	2	6	3	4	9	11	5	7	8	10	12	78
коэффициент значимости Z_i	0,15 3	0,14 5	0,09 5	0,13 1	0,11 0	0,04 5	0,02 7	0,09 6	0,08 0	0,06 6	0,04 4	0,00 9	—

Величина $\sum_{i=1}^n S_i^2$ имеет максимальное значение S_{\max} в случае, когда все эксперты дают одинаковые оценки, т.е. наблюдается наилучшая согласованность мнений экспертов.

Тогда коэффициент конкордации

$$W = \frac{1}{S_{\max}} \cdot \sum_{i=1}^n S_i^2$$

может изменяться от 0 до 1. При $W = 1$ все мнения специалистов-экспертов согласуются полностью и при $W = 0$ соответственно расходятся [3,5].

При «связанных» рангах, когда какой-либо эксперт не может установить ранговое различие между несколькими смежными факторами и приписывает им одинаковые ранги, коэффициент конкордации определяется формулой

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^n S_i^2}{m^2(n^3 - n) - m \sum_{j=1}^m T_j},$$

где $T_j = \sum_{k=1}^l (t_k^3 - t_k)$ – поправочный коэффициент для j -ой переменной.

В поправочном коэффициенте для j -го эксперта через t_k обозначено число одинаковых значений в k -й группе (связке), l – число связок (групп с одинаковыми значениями) в ранговой последовательности j -го эксперта.

В рассматриваемом случае для шахты “Краснолиманская”, в соответствии с табл. 2, коэффициент конкордации равен $W=0,77$. Поэтому мнения специалистов можно считать согласованными. Значимость коэффициента W проверяют по критерию Пирсона χ^2 [4]. Для этого вычисляется фактический параметр критерия Пирсона

$$\chi_{\Phi}^2 = m(n - 1)W .$$

При «связанных» рангах

$$\chi_{\Phi}^2 = \frac{12 \sum_{i=1}^n S_i^2}{m \cdot n \cdot (n+1) - \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^m T_j^2} ,$$

Для данных, приведенных в табл. 1 значения χ_{Φ}^2 составляет 30,89. Табличное значение критерия $\chi_{\tau}^2(\alpha_{\chi}, n_{\chi})$ составляет 19,7 где α_{χ} - уровень значимости ($\alpha_{\chi} = 0,05$); n_{χ} - число степеней свободы ($n_{\chi} = n - 1$) [6].

Как видим, $\chi_{\Phi}^2 = 30,89 > \chi_{\tau}^2 = 19,7$, т.е. подтверждается достаточно высокая степень согласованности мнений экспертов по всей совокупности рассматриваемых характеристик.

Аналогичные расчеты выполнены для анализа экспертных оценок специалистов других угольных шахт и проектных организаций. Результаты приведены в табл. 3, из которой следует, что коэффициент конкордации располагается в области положительных значений, отличных от нуля. Это свидетельствует о согласованности мнений экспертов по всем принятым объектам.

На рис. 2 представлена априорная гистограмма распределения сумм рангов экспертных оценок и аппроксимирующая ее зависимость между значимыми факторами выбороопасности угля породы и газа.

Значения относительных уровней значимости факторов z_i определяются как

$$z_i = \frac{m \cdot n - \sum_{j=1}^m a_{ij}}{0.5 \cdot m \cdot n \cdot (n - 1)} ,$$

и приведены в табл. 2.

При выделении из n факторов n_0 наиболее значимых факторов определяется пороговое значение

$$z_{кр} = \frac{1}{n} .$$

Для факторов удовлетворяющих условию $z_i > z_{кр}$ рассчитывается коэффициент значимости $z_{i,0}$

$$z_{i,0} = \frac{m \cdot n - \sum_{j=1}^m a_{ij}}{m \cdot n \cdot n_0 - \sum_{j=1}^{n_0} a_{ij}} .$$

Для обрабатываемых данных $z_{кр}$ составляет $\frac{1}{12}$, т.е. 0,083.

Таблица 3

Результаты расчета и проверки коэффициента конкордации W

Шахта, организация	W	χ^2_{Φ}	χ^2_{T}
ПСП «Шахта «Днепровская»	0,75	30,3	19,7
ГП «Шахта им. А.А. Скочинского»	0,76	29,76	19,7
ПАО «Шахтоуправление «Покровское»	0,73	30,08	19,7
ПСП «Шахта им. Героев Космоса»	0,75	29,84	19,7
ГП «Днепрогипрошахт»	0,74	30,37	19,7
ГОО «Шахта «Терновская»	0,76	29,81	19,7
ПСП «Шахта «Павлоградская»	0,76	30,06	19,7
Институт геотехнической механики им. М.С.Полякова НАН Украины	0,78	29,91	19,7
ГП «Угольная компания «Шахта Краснолиманская»	0,77	30,87	19,7
ПСП «Шахта «Западно-Донбасская»	0,74	29,51	19,7

Гистограмма распределения информативных факторов по значимости их влияния на выбросоопасность условно разбита на две совокупности (рис. 3): $z_i > 0,083$ для факторов I совокупности (наиболее значимые), $z_i < 0,083$ для факторов II совокупности (менее значимые).

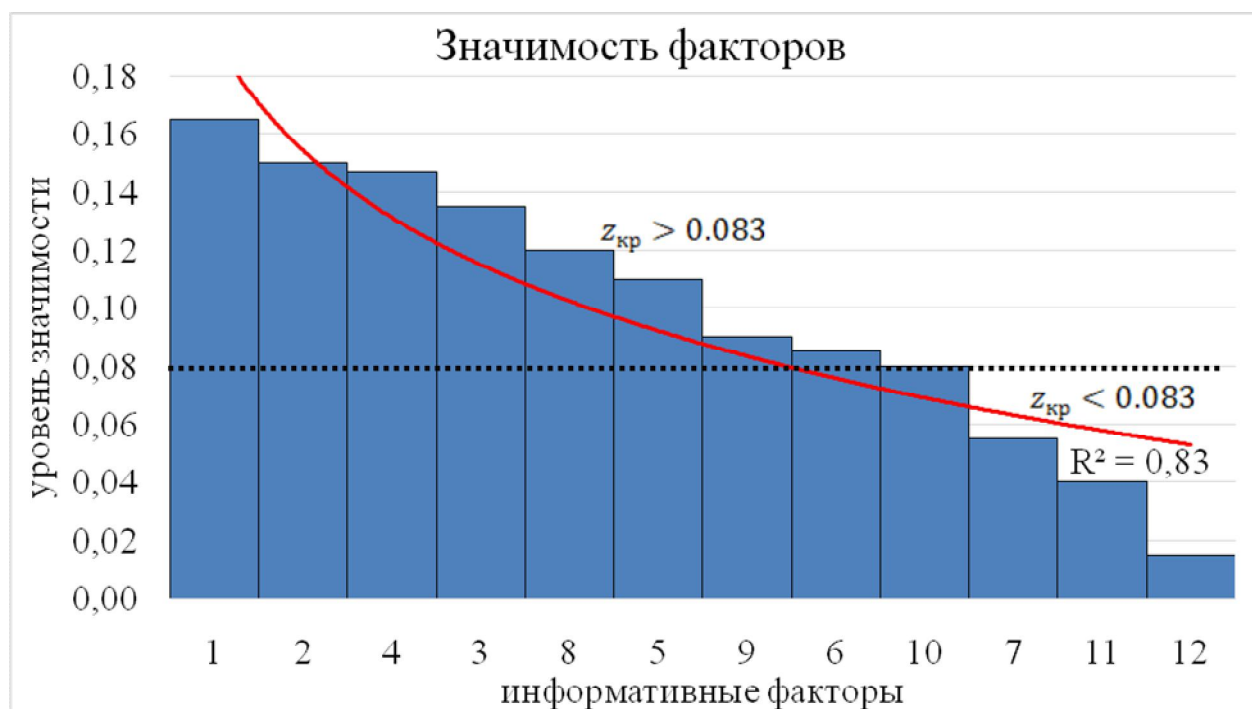


Рис. 3. Гистограмма значимости информативных факторов

Из рис. 3 видно, что напряженно-деформированное состояние горного массива, физико-механические свойства углей, содержание газа в угольном пласте, глубина залегания пластов, химические свойства и состав углей, строение угольного пласта и горно-геологические нарушения являются значимыми факторами, влияющими на возникновение внезапных выбросов угля породы и газа. К малозначимым факторам развития ГДЯ относятся: состав и строение близлежащих пород, система разработки пластов, сезонная нестабильность и субъективный фактор. Такой фактор, как скорость осуществления горных работ занимает пограничное значение и требует отдельного обсуждения.

Выводы. С помощью экспертно-статистического метода предопределена возможность формирования факторного пространства выбороопасности угольных пластов. Определены значимые и малозначимые факторы. Так к значимым факторам, влияющими на возникновение внезапных выбросов угля породы и газа относятся напряженно-деформированное состояние горного массива, физико-механические свойства углей, содержание газа в угольном пласте, глубина залегания пластов, химические свойства и состав углей, строение угольного пласта и горно-геологические нарушения, а к малозначимым факторам – состав и строение близлежащих пород, и система разработки пластов, сезонная нестабильность и субъективный фактор. Выявлена достаточная согласованность мнений специалистов в области возникновения и развития внезапных выбросов угля и газа

Список литературы

1. Тихолиз А.М., Галемский П.В., Евдокимова В.П. Признаки, характеризующие внезапные выдавливания угля// Уголь Украины, 2004, №9.-С. 33-35.
2. Китов Н.И. Групповые экспертные оценки. – М.: Знание, 1975.–180 с.
3. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. – М. : Статистика, 1980. – 263 с.
4. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. – М. :Физматгиз, 1961. – 364 с.
5. Методика применения экспертных методов оценки качества продукции. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 120 с.
6. Плескунин В.И., Воронина Е.Д. Теоретические основы организации и анализа выборочных данных в эксперименте / Под ред. А.В. Башарина. – Л.: ЛГУ, 1979. - 320 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бузилом В.І.
Надійшла до редакції 25.03.2013*