

По някои въпроси за прогнозиране на взривоопасните зони на въглищни пластове на основа геометрията на тяхното залягане

Евтим Кърцелин¹, Михаил Зборщик², Владимир Дворников², Владимир Пилюгин²

¹ Минно-геоложки университет "Св.Ив.Рилски" - Република България

² Донецки Национален технически университет - Украйна

РЕЗЮМЕ. В доклада е предложен нов метод за моделиране пространственото залягане на въглищния пласт, основан на построяването на апроксимираща функция на две променливи с използване на изходни данни от геоложкото проучване и маркшейдерски измервания. Предлага се горната граница на главните нормални огъващи напрежения в локална област от повърхнината на пласта да се извършва с помощта на главните стойности за деформациите на пласта. Прогнозата за потенциално аномални състояния на пласта се оценява по максималната стойност на средната и гаусовската крива в дадена зона.

ASPECTS OF THE PREDICTION OF HAZARDOUS ZONES IN COAL SEAMS BASED ON GEOMETRY OF OCCURRENCE

ABSTRACT. A new approach is presented in the paper for describing the occurrence of a coal seam. The approach is based on the compilation of an approximating function of two variables according to geological and mine surveying data. It is suggested that the upper boundary of main normal bending stress in the local planes to be performed by the main values for deformation of the seam. Prediction for potentially anomalous conditions of the seam is assessed according to the maximum values of average and Gaussian distribution in a certain zone.

За изминалия геологически период са се формирали пространствени геометрични конфигурации на пластове от утаечни скали, към които принадлежат и въглищните пластове. Този процес е обусловен от следните два най-вероятни фактора:

- формата на тези пластове се явява така да се каже "копие" на преди това формирали се профили на повърхности, служещи като основа за по-горе лежащи пластове;

- формообразуването на пластовете е настъпило в резултат на тектонични процеси под действието на постоянно действащи сили в продължение на един сравнително дълъг период от време.

Разбира се, през различните геологически периоди посочените фактори е било възможно да се редуват в трудно предсказуема последователност, както и някой от факторите да е имал доминиращ характер.

Съдейки по данните от геоложките проучвания, в района на съвременен Донбас са образувани мощни остатъци от растителна маса, които са послужили като суровина за образуването на бъдещите каменни въглища. Тяхното "покривие" с минерални утайки е протичало в почти равнинна местност, периодически потапяна с вода, в продължение на милиони години. Впоследствие, в резултат на тектонични процеси тези пластове са придобили форма, която се открива през настоящия етап при разработването на полезното изкопаемо. С други думи, пространствената геометрична конфигурация на въглищните пластове и вместващите ги скали са се оформили преди всичко, в резултат от действието на втория от посочените фактори с първоначално плоска форма. Тази концепция е и приета в основата на по-нататъшните теоретични построения, изложени в доклада.

Твърде бавното тектонично движение на пластовете, имащо реологичен характер, в съчетание с метаморфози-

те за техния състав е възможно да предизвика, както е известно, значителни изменения във формата на пластовете, тяхната деформация в различни посоки, понякога даже без видими разломи, пропукване или подуване.

При все това големината на деформациите при огъване не може да не окаже влияние на микроструктурата за строежа на пласта, особено в тези негови участъци, които са били подложени на деформационно огъване от действието на напреженията на разтегляне. Следователно, възможно е да се твърди, че физическите нарушения в целостта на пласта са най-вероятни в тези негови места, където пласта има максимална кривина, тъй като нормалните напрежения на разтегляне при огъване са пропорционални именно на тази геометрична характеристика на деформируемия обект.

Действително, добре е известно, че максималните стойности на нормалните напрежения σ_x , σ_y по двете взаимно перпендикулярни направления x и y на деформируема еднородна и изотропна плоча с дебелина h при относително малки нейни напречни провисвания $w(x)$ в границите на линейната теория на еластичността се определят със зависимостта [1]

$$\sigma_x = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad \sigma_y = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (1)$$

където E и ν - съответно модул на еластичност и коефициент на Пуансон, като последния в сеизмологията и минното дело приема стойност, равна на 0,25.

Строго казано, във формула (1) вторите производни на $w(x, y)$ по x и y се явяват нарастване на тензора на кривината на пространствено огъната повърхност $z = z(x, y)$, при което $w(x, y)$ има малки нараствания по координатата Z . При такава интерпретация глав-

ните напрежения, записани с израза (1), е възможно да се представят по следния начин.

$$\sigma_1 = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)}(K_1 + \nu K_2), \quad \sigma_2 = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)}(K_2 + \nu K_1) \quad (2)$$

където K_1 и K_2 - нараствания за стойностите на кривината на повърхността $z = z(x, y)$ в две взаимно перпендикулярни главни нормални сечения.

Тъй като от нас се приема, че реално съществуващата на терена повърхност $z = z(x, y)$, имайки първоначално равнинна повърхност, се е изменила и е получила днешните формообразувания в резултат на бавно действащи, но постоянни сили, то в зависимост (2) кривините K_1 и K_2 следва да се приемат като техни реални и фактически стойности. Отчитайки това определяните по формула (2) напрежения $\sigma_{1,2}$ е възможно да се използват за оценка на максималните стойности за фактическите напрежения, тъй като релаксационните, реологическите и метаморфните процеси, естествено, неизбежно водят до "нивелиране" на действителното напрегнато състояние.

При все това, нарушаването в целостта на пласта и образуването на микропукнатини е най-вероятно именно в тези места, където оценъчните огъващи напрежения $\sigma_{1,2}$ по формула (2) приемат максимални стойности, то е налице в тези места и най-голяма кривина на повърхността. На свой ред, микропукнатините способстват за интензификация на газоотделянето и е възможно да се приемат за реална причина, предизвикваща внезапно изхвърляне на въглища и газ при разкриване на даден пласт.

По такъв начин, идеята за прогнозиране на опасностите по внезапно изхвърляне на въглища и газ участващи от въглищните пластове е възможно да бъде разработена върху основата за изчисляване на пространствената кривина на пласта, например по хипсометрични данни от геологическо-учувателни работи и маркшейдерски измервания. Разбира се, точността на такъв вид прогноза в значителна степен зависи не само от достоверността на хипсометричните данни, но и от метода за аналитично представяне на пространствената конфигурация на пласта, което представлява задача за построяване на интерполационна функция, която има най-голямо приближение до измерените вертикални координати на пласта в зададени опорни точки на рудничното поле.

И така, нека в декартова координатна система XYZ , свързана по съответен начин към изследваното руднично поле има n триади числа x_i, y_i, z_i ($i = 1, 2, \dots, n$),

където X_i и Y_i са хоризонтални координати на i -та опорна точка, а Z_i - вертикална координата на залягане на изследвания пласт в същата тази точка. Нека също така функцията $z = F(x, y)$ е такава, че скаларната величина

$$\delta = \sum_{i=1}^n [F(x_i, y_i) - z_i]^2 \quad (3)$$

приема минимални стойности от всички възможни представяния на $F(x, y)$ в класа на непрекъснатите функции. Тогава $F(x, y)$ е търсената интерполационна функция, която има най-малко отклонение в точките X_i, Y_i от Z_i .

Такава функция ще се построи във форма на билинейно разложение по известни линейно независими функции $\varphi_k(x)$ и $\psi_k(y)$, които е възможно да бъдат, например, ортогонални полиноми на Лежандр, Ермит, Лагер, Чебишев и др. [2]. С други думи, приемайки че,

$$F(x, y) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N a_{jk} \varphi_j(x) \psi_k(y), \quad (4)$$

където N - някакво предварително зададено число ($N^2 < n$), явяващо се най-високата степен на приетата система полиноми $\varphi_k(x)$ и $\psi_k(y)$; a_{jk} - някакво подлежащо на определяне число, осигуряващо минимизацията на функционала (3), което се достига с приравняване на нула на първите производни от δ по всяко a_{jk} . Изпълнението на тези изисквания при заместването на (4) в (3) води до система от N^2 линейни алгебрични уравнения спрямо търсените a_{jk} :

$$\sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N a_{jk} \varphi_j(x_i) \psi_k(y_i) - z_i \right] \varphi_\alpha(x_i) \psi_\beta(y_i) = 0, \quad (5)$$

където $\alpha, \beta = 1, 2, \dots, N$. Определяйки по такъв начин всички стойности за a_{jk} , може да се счита, че функцията (4) е построена с известна степен на точност.

Изборът на рационална система линейно независими функции $\varphi_k(x)$ и $\psi_k(y)$ се явява самостоятелна задача, и на този въпрос подробно разглеждане няма да се прави. Само ще се отбележи, като сравнително най-просто представяне е възможно да бъдат приети също така системите степенни функции от типа $1, x, x^2, (\dots), x^N$ и $1, y, y^2, (\dots), y^N$. Възможно е също така използването и на тригонометрични функции с кратни аргументи.

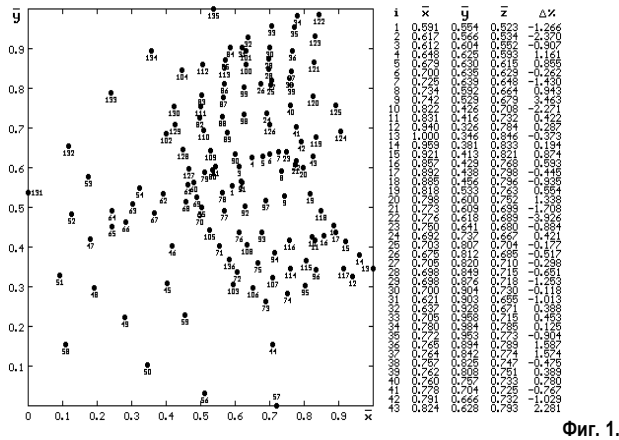
Като пример на фиг. 1 е представено разпределението на опорните точки за руднично поле в координати на канонически безразмерни променливи

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= (x - \min x_i) / (\max x_i - \min x_i), \\ \bar{y} &= (y - \min y_i) / (\max y_i - \min y_i), \\ \bar{z} &= (z - \min z_i) / (\max z_i - \min z_i), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

получени на основата на данни от проучването в резултат на извършването на контролни сондажи на въглищния пласт на един от рудниците в Донбас. По условието (6) всички променливи са определени в интервала $[0, 1]$.

Опорните точки са номерирани от 1 до 43 (тяхната номерация е означена на фигурата). Отдадено за всяка от

тези точки са приведени техните канонични координати, изчислени по формула (6), при което в последната колона са дадени стойности за относителните отклонения (в проценти) на фактическите стойности на Z_i от изчисления с помощта на апроксимиращите функции (4).



Фиг. 1.

Разпределение на опорните точки в пласта на рудничното поле

Апроксимацията е била изпълнена чрез използване на ортогоналните полиноми на Чебишев $T_j(x)$, като в изразите (4) и (5) са представени

$$\left. \begin{aligned} \varphi_j(x) &= 2^{-j+2} T_{j-1}(x), \\ \psi_j(y) &= 2^{-j+2} T_{j-1}(y), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

при $j = 1, 2, \dots, N$, което е отчетено с рекурентните зависимости

$$T_{j+1}(x) - 2xT_j(x) + T_{j-1}(x) = 0 \quad (8)$$

като при $T_0(x) = 1$ и $T_1(x) = x$ позволява да се получи пълна система функций за построяване на интерполационния многочлен (4), като при това е било прието $N = 5$. Тъй като от зависимостта (8) следва, че

$$T_2(x) = 2xT_1(x) - T_0(x), \quad T_3(x) = 2xT_2(x) - T_1(x),$$

и т.н. Формата на представяне на функцията (7) е обусловена със същите съображения, както и многочленът $2^{-j+1} T_j(x)$, или с аналогичния на него $2^{-j+1} T_j(y)$, в интервала $[0, 1]$ има най-малко отклонение от нула в сравнение с всички други полиноми от същата степен с най-голям коефициент, равен на 1. На свой ред това определя най-малко разсейване на изчисляваните интерполационни стойности на функцията.

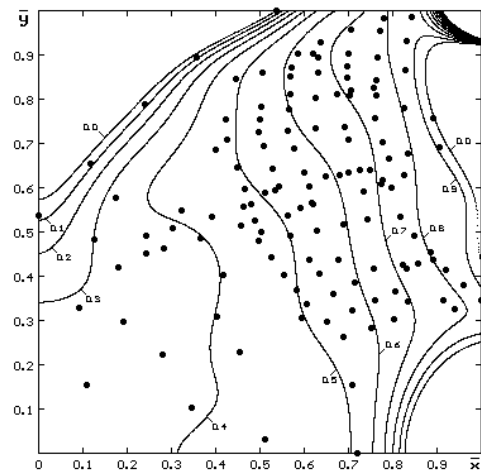
От числовите данни, показани на фиг.1, следва, че построяването по посочения по-горе метода на интерполационните функции с достатъчна степен на точност описват фактическите (по данни от сондирането) стойности на вертикалното изместване на изследвания пласт – максималните относителни отклонения в по-голяма част от случаите не превишават 10%, а средно са от порядъка на $\approx 2\%$. Във връзка с това ще се отбележи, че точността на измерване на стойността на Z_i при прокарването на сондажи значително отстъпва от получената тук точност при интерполационните изчисления.

На фиг. 2 са построени изохипси на пласта (линии с еднакви стойности на $\bar{Z}$, означени за всяка от кривите) с интервал $\Delta \bar{Z} = 0,1$ с помощта на апроксимиращата функция (4). Изохипсите дават нагледно представяне за релефа на пласта и ни убеждават в това, че в крайна сметка, в областите, където има опорни точки, намерената интерполационна функция принципно правилно отразява действителната картина.

Построяването на изохипсите е направено чрез решаване на уравнението от типа

$$F(\bar{x}, \bar{y}) = const$$

спрямо например $\bar{x}$ при последователно задаване на конкретни стойности на $\bar{y}$.



Фиг. 2. Изохипси на изследвания пласт

Благодарение на аналитично определената функция $z = F(x, y)$, която по същество се явява уравнение за повърхността на пласта, се явява възможно да се намери формален израз за кривината на такава повърхност. Като е известно, всяка точка от повърхността, ако тя е непрекъсната и върху нея отсъстват изломи, се характеризира с два така наречени главни радиуси на кривината R_1 и

R_2 , от които R_1 се явява най-голям, а R_2 най-малък. Главните радиуси на кривината [3] се определят като корени на уравнението от втора степен

$$(rt - s^2)R^2 + h[2pqs - (1 + p^2)t - (1 + q^2)r]R + h^4 = 0, \quad (9)$$

в което са приети означенията:

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad q = \frac{\partial z}{\partial y}, \quad r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \quad s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}, \quad t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}, \quad h = \sqrt{1 + p^2 + q^2}. \quad (10)$$

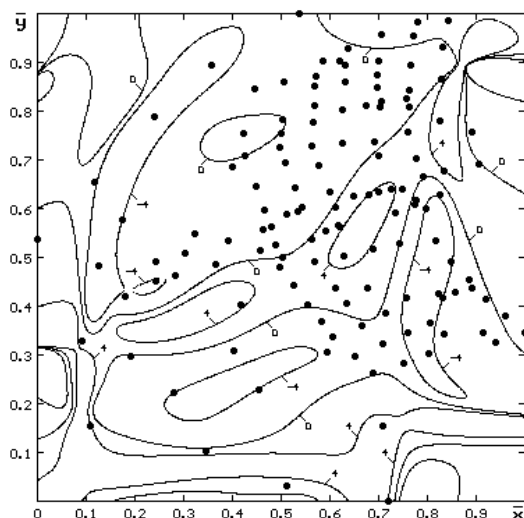
В диференциалната геометрия е прието да се оценява кривината на повърхност по средната и гаусовата крива, които се изчисляват по формулите

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad K = \frac{1}{R_1 R_2},$$

при което, както следва от (9) и означенията (10)

$$H = \frac{r(1 + q^2) - 2pqs + t(1 + p^2)}{2\sqrt{(1 + p^2 + q^2)^3}}, \quad K = \frac{rt - s^2}{(1 + p^2 + q^2)^2}. \quad (11)$$

На фиг. 3 в изследваното поле на пласта са построени линии с еднаква средна кривина за три стойности на безразмерната средна кривина $\bar{H} = -4; 0; 4$.



Фиг. 3. Линии с еднаква средна кривина на пласта

Следва да се отбележи, че всички числени операции в (9), (10) и (11) са изпълнени с безразмерни променливи $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$, ето защо размерната величина H е възможно да се получи от $\bar{H}$ чрез отчитане на каноничните преобразувания (6) с помощта на безразмерните параметри

$$\xi_x = \frac{\max z_i - \min z_i}{\max x_i - \min x_i}, \quad \xi_y = \frac{\max z_i - \min z_i}{\max y_i - \min y_i},$$

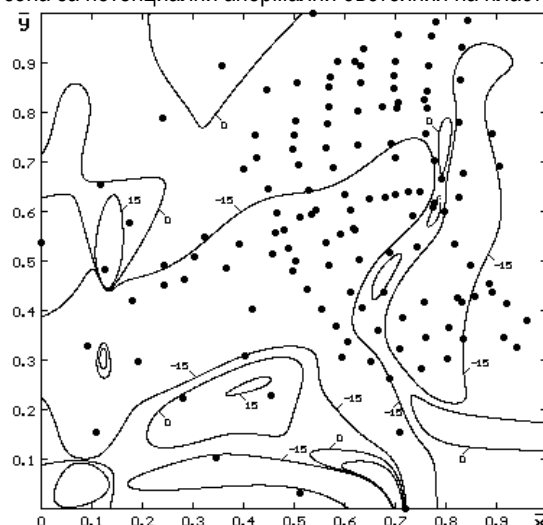
и съответните очевидни алгебрични замествания.

Предварителният анализ на показаната на фиг. 3 картина позволява да се направи извода за това, че най-голямата средна положителна кривина на пласта се среща в тези области, ограничени от линиите на ниво «4.0» и обхващащи точки с номера 3, 4, 5, 6, 7, 8 и точки 17, 18, 33 (виж фиг. 1). Както показват изчисленията, вътре в тези области максималната стойност на безразмерната средна кривина не превишава 7.3, както тук пласта образува един вид огъване с котлообразна форма. Тези две области са разделени от зоната с отрицателна кривина от линията на ниво «0.0». Зоната с отрицателна средна кривина, ограничена с линията на ниво «-4.0», обхваща точки 1, 2, 20, 21, 22, където пластът образува куполообразна форма.

Както се вижда от фигурата, съществуват още няколко области с отрицателна и положителна кривина, все пак тези области са разположени в местата или с единичен контролен сондаж (например, точка 14), или в места, където въобще не е извършено сондиране. По тази причина наличието в действителност на такива области е възможно да бъде установено в резултат на допълнителни изследвания.

Линии с еднаква гаусова кривина са показани на фиг. 4, от която се вижда, че преобладаващата част от изследвания пласт (долната част на фигурата) има отрицателна гаусова кривина, следователно, в тази област пласта има

седлообразна форма, при което «истинския» купол на пласта се намира в областта между точки 12 и 13. Ще се отбележи, че от фиг. 3 следва, че в тази зона има също така и екстремум за средната кривина. Съдейки по всичко, тази област представлява по същество предполагаема зона за потенциални аномални състояния на пласта.



Фиг. 4. Линии с еднаква гаусовска кривина на пласта

По-нататъшните изследвания в това направление е възможно да се проведат преди всичко за съпоставяне на прогнозируемите теоретически опасни зони с фактическите наблюдения на практике. Първа стъпка в този посока е направена в [4].

Изводи

1. Предложеният метод за апроксимация на пространствената форма на залягане на пласта по геологопроучвателни и маркшейдерски данни се явява ново направление в теорията и практиката на разработване на полезни изкопаеми.
2. Горните граници на нормалните напрежения в локална равнина на пласта се оценява с помощта на главните стойности на кривината на пласта, изчислени с помощта на апроксимиращи функции.
3. Потенциално опасни зони от гледна точка на възникването на динамични явления, свързани с внезапното изхвърляне на въглища и газ се явяват области от пласта с максимални стойности на средната гаусова кривина.

Литература

- Лейбензон Л. С. *Курс теории упругости*. ОГИЗ, Гостехиздат, М.-Л., 1947. – 464 с.
- Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике*. – М. – Наука, 1968. – 720 с.
- Рашевский П. К. *Дифференциальная геометрия*. Физматгиз, М., 1956.
- Зборщик М. П., Дворников В. И., Пилугин В.И. *Прогноз природных аномальных зон напряженного состояния и свойств пород в горном массиве*. Уголь Украины, 11, 2003, с. 16-19.