

УДК 622.831

## О МЕТОДЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛОВ И ЕГО ПРАКТИЧЕСКОМ ПРИМЕНЕНИИ

**П. Стржалковский**

*Факультет горного дела и геологии, Технологический университет Силезии,  
E-mail: piotr.strzalkowski@polsl.pl, ул. Академическая 2, 44-100, г. Гливиц, Польша*

Районы разработки мелкозалегающих месторождений характеризуются наличием многочисленных заброшенных горных выработок. Потеря их устойчивости с последующим обрушением является причиной образования провалов на поверхности даже после прекращения горных работ. Предлагается метод прогноза вероятности образования провала на основе теории А. Салюстовича и рассматривается его практическое применение.

*Выработки, обрушение пород, провалы, метод прогноза, практическое применение метода*

По мере истощения поверхностных запасов минерального сырья открытая добыча переходит в подземную, а часть мелкозалегающих выработок остается заброшенной. Со временем крепь, поддерживающая кровлю выработок, теряет стабильность и происходит обрушение выработок. Потеря устойчивости мелкозалегающих выработок часто приводит к образованию провалов на поверхности. Способ оценки вероятности образования провалов над карстовыми пустотами в известняке приведен в [1], где также дано описание стадий изменения формы и размера пустот, вызывающих провалы. Результаты численных расчетов подтверждают значительное влияние размеров пустот на процесс образования провалов. В [1] также сформулировано условие заполнения пустот породами участков разуплотнения. Результаты анализа позволили вывести формулу расчета размера провала.

Однако не только горные работы могут явиться причиной формирования провалов. Суффозия — пример образования провала по причинам, не связанным с горными работами. В [2] дано описание влияния аварии на трубе большого диаметра для ливневых вод на образование провала. Устойчивость выработок обычно оценивается численными методами. В [3] приведен пример анализа устойчивости выработки, образованной в результате проведения горных работ, с помощью программы FLAC, использующей модель Мора–Кулона для породного массива. Численные методы предполагают применение соответствующих компьютерных программ и, как правило, трудоемкую подготовку системы входных данных. На результаты вычислений влияют не только данные, характеризующие механические свойства горных пород, но и соответствующие критерии прочности.

Некоторые авторы [4] придерживаются мнения, что закономерностей формирования провалов нет, следовательно методы их прогноза сводятся к простой оценке вероятности образования провала. Нередко прогноз о вероятном формировании провала не сбывается. Такое состояние дел существенно затрудняет принятие проектных решений по использованию подработанных земель.

В настоящей работе даны теоретические основы предложенного в [5] простого детерминистического метода и показаны результаты его практического применения.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ СВОДА ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛА

Предложение использовать теорию свода давления для оценки вероятности образования провала подробно обсуждено в [5]. Согласно теории свода давления [6], вокруг тоннельной выработки формируется зона разуплотнения. Ее форма определяется размерами выработки, начальным напряженным состоянием и прочностью породы на разрыв. В [6] использована концепция Губера относительно полуплоскости с эллиптическим отверстием (рис. 1).

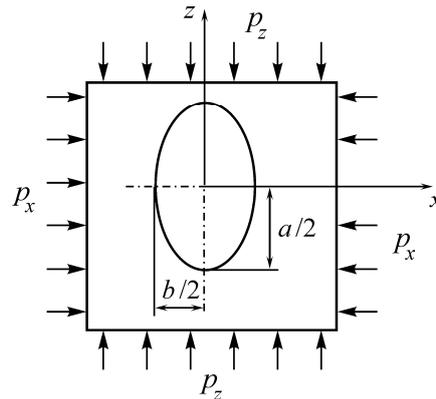


Рис. 1. Схема нагрузки, приложенной к плоскости с эллиптическим отверстием:  $p_x$ ,  $p_z$  — горизонтальная и вертикальная компоненты поля напряжений

Согласно этому методу, экстремальные значения напряжений на контуре выработки равны [6]: на боковой стенке выработки

$$\sigma_x = 0, \quad \sigma_z = \sigma_{z \max} = p_z \left( 1 + 2 \frac{b}{a} \right) - p_x, \quad (1)$$

в кровле и подошве выработки

$$\sigma_z = 0, \quad \sigma_x = \sigma_{x \max} = p_x \left( 1 + 2 \frac{a}{b} \right) - p_z, \quad (2)$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$  — горизонтальная и вертикальная компоненты напряжений;  $p_x$ ,  $p_z$  — горизонтальная и вертикальная компоненты исходного напряженного состояния массива;  $a$ ,  $b$  — вертикальная и горизонтальная оси эллипса.

Трещиноватая зона в кровле выработки появляется при  $\sigma_{x \max} \geq R_r$ , где  $R_r$  — прочность породы на разрыв. Отношение осей эллипса  $n$  получаем из уравнения (1), предположив, что  $\sigma_{x \max} = R_r$ :

$$\frac{a}{b} = \frac{R_r + p_z - p_x}{2p_x} = n.$$

При  $n < 0$  трещиноватая зона вокруг выработки не образуется, поскольку  $\sigma_{x \max} < R_r$ .

В [6] расчет нагрузки на крепь кровли выработки упрощен, так как часть эллипса рассматривается как парабола, однако при этом не учтена площадь зоны разуплотнения, ограниченная боковыми стенками выработки. Площадь зоны разуплотнения  $P_e$  (заштрихованные участки на рис. 2) равна площади верхней части эллипса  $S_1$  минус площадь верхней половины выработки над осью  $x$  и плюс две площади фигуры между эллипсом и боковыми стенками выработки.

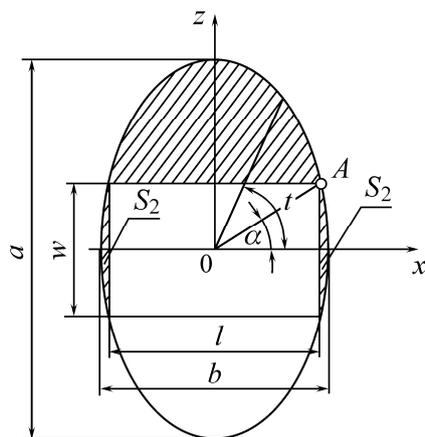


Рис. 2. Зона разуплотнения вокруг выработки в породном массиве [5]

Таким образом, площадь зоны разуплотнения  $P_e$  равна (рис. 2):

$$P_e = S_1 - \frac{wl}{2} + 2S_2 = \frac{\pi ab}{8} - \frac{wl}{2} + \frac{2abk - 2wl}{8} = \frac{ab(\pi + 2k) - 6wl}{8},$$

где  $S_1$  — площадь верхней половины эллипса;  $S_2$  — площадь между эллипсом и боковой стенкой выработки;  $w, l$  — ширина и высота горной выработки;  $k$  — радианная мера угла  $\alpha$ ,  $k = \pi/180^\circ \cdot \arctan(w/l)$ .

Можно утверждать, что в процессе разрушения породы в зоне разуплотнения перемещаются в направлении пустоты, заполняя выработку. Обозначим [5]:

$$P_1 = P_e k_r, \quad P_2 = P_e + wl,$$

где  $k_r$  — коэффициент разуплотнения горной породы.

При  $P_1 = P_2$  происходит самозакладка выработки; породы в зоне разуплотнения плотно заполняют выработку. При  $P_1 < P_2$  свободное пространство начинает формироваться на верхнем участке зоны разуплотнения, его объем равен разности площадей  $P_2 - P_1$  (рис. 3).

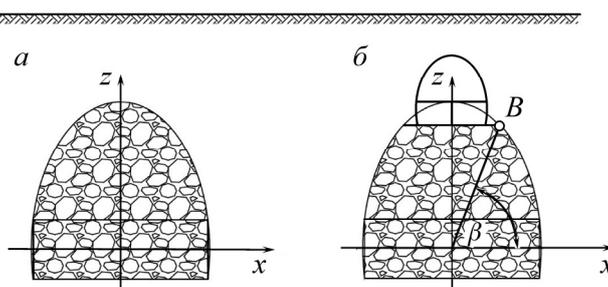


Рис. 3. Разрушение массива вблизи выработки [5]: а — горные породы в зоне разуплотнения после дробления плотно заполняют выработку и зону разуплотнения; б — выработка заполнена дробленой породой из зоны разуплотнения, свободное пространство формируется на вершине эллипса

В поперечном сечении сформированное свободное пространство — это участок, ограниченным эллипсом и прямой линией, параллельной оси  $x$ . Общая точка линии и эллипса  $B$  на рис. 3 имеет координаты, выраженные в параметрических уравнениях:

$$x_B = \frac{b}{2} \cos \beta, \quad z_B = \frac{a}{2} \sin \beta = p.$$

Угол  $\beta$ , определяющий местоположение точки  $B$ , можно рассчитать из отношения  $\beta = \arcsin(2p/a)$ , где  $s$  — радианная мера угла  $\beta$ , тогда  $s = \pi\beta/180^\circ$ .

Следовательно, площадь свободного пространства можно вычислить как

$$S_w = 2 \frac{1}{2} \int_s^{\pi/2} \left[ \frac{b}{2} \cos t \frac{a}{2} \cos t - \frac{a}{2} \sin t \frac{b}{2} (-\sin t) \right] dt - 2 \frac{pb \cos \beta}{2} = \frac{ab}{4} \left( \frac{\pi}{2} - s \right) - pb \cos \beta.$$

Учитывая, что  $S_w = P_2 - P_1$ , найдем значения  $p$  и  $s$ . На практике удобнее построить прямоугольник со сторонами  $a/2$  и  $p$ , площадью  $S_w$ . Этот прямоугольник можно рассматривать как свободное пространство, для которого следует повторить приведенный расчет. Зона разуплотнения, связанная с выработкой, может инициировать образование провала на поверхности (рис. 3).

Предположение, что свободное пространство имеет прямоугольную форму делается для упрощения предлагаемого решения. В случае, когда свободное пространство и соответствующий ей свод давления не достигают пластов сыпучей породы, в породном массиве создается определенное равновесие. Именно в этом случае предположение о прямоугольной форме устойчивой пустоты не имеет физического обоснования. Поскольку этот особый случай не приводит к образованию карстовой воронки, он не является предметом обсуждения в данной работе.

Отметим, что провалы могут образовываться в результате соффузии, когда ливневые воды вымывают рыхлую породу через трещины дробленной породы в пустоты. Для предупреждения данного процесса земная поверхность должна быть покрыта асфальтом для гравитационного дренажа ливневых вод.

Для проведения расчетов создана компьютерная программа, структурная схема которой представлена на рис. 4.

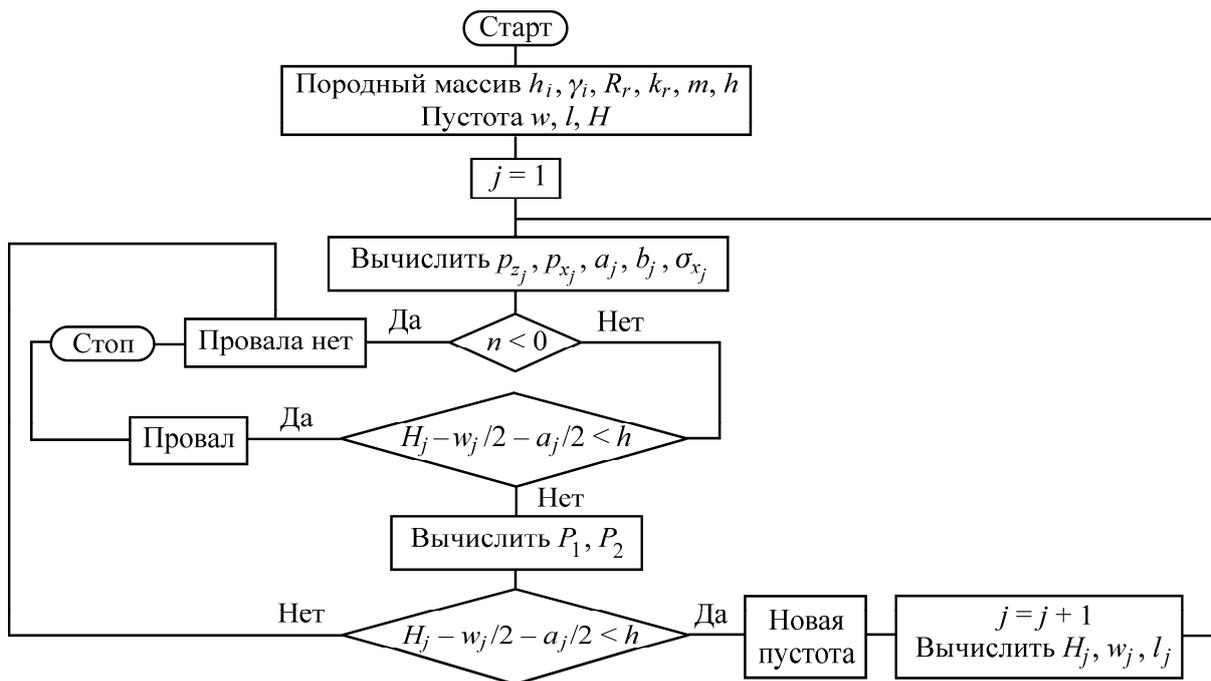


Рис. 4. Структурная схема программы:  $H$  — глубина горной выработки;  $m$  — величина, обратная коэффициенту Пуассона;  $\gamma$  — объемная плотность;  $R_r$  — прочность на растяжение;  $h_i$  — мощность пласта;  $h$  — мощность покрывающих пород

#### ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МОДЕЛИ

**Структура породного массива.** Породный массив в рассматриваемом районе сформирован из покрывающих пород алевролита и песчаной глины с зернами песка и алевролита. Мощность покрывающих пород составляет около 3 м. Сланец, каменноугольный пласт и пласт № 215

залегают непосредственно под покрывающими породами. Мощность пласта под местом провала составляет приблизительно 13 м, ниже залегают угольные пропластки вплоть до пласта № 318, который подлежал выемке. Параметры пластов породного массива приведены в таблице.

Параметры пластов

Породный массив	Объемная плотность $\gamma$ , МН/м <sup>3</sup>	Прочность на разрыв $R_r$ , МПа	Коэффициент разуплотнения горной породы $k_r$	Мощность пласта $h$ , м
Рыхлые покрывающие породы	0.021	0.00	1.00	3
Аргиллит	0.025	0.05	1.05	7
Угольный пласт	0.013	0.20	1.10	3

Фрагмент горной карты пласта № 215 с тоннелями и выработками, а также наземными структурами (дорогой и зданием), где сформировался провал, представлен на рис. 5. В изучаемом районе имеется зона сдвига, состоящая из трех плоскостей с амплитудой сброса  $h = 0.5 - 1.0$  м.

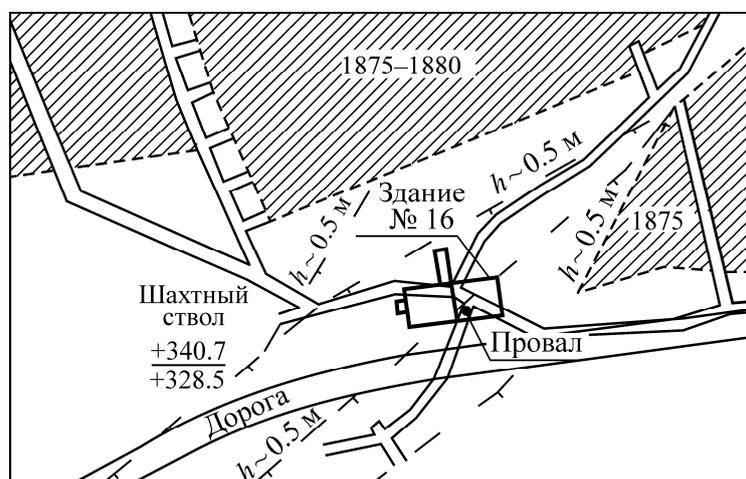


Рис. 5. Карта пласта № 215 с указанием места, где образовался провал

### Горные работы:

- под зданием (место провала) на глубине 13 м находится тоннель  $\sim 3 \times 3$  м, пройденный в 1878 г. в пласте № 215;
- в нижележащем пласте № 216 выработка пройдена на глубине 58 м в 17 м от здания к северу от провала;
- выемку следующего нижележащего угольного пласта № 217 под зданием осуществляли в 1908 г. на глубине 70 м. Уголь извлекали послойно с обрушением кровли на высоту 1.0 м;
- в 1909 г. пройдена выработка в пласте № 218/2 на глубине 94 м на расстоянии 46 м к западу от здания;
- в 1933 г. пройдена выработка в пласте № 303 на глубине 198 м в 16 м к северу от здания;
- в 1970 г. две выработки пройдены в пласте № 314 на глубине 260 и 340 м в 37 и 54 м от здания;
- последние горные работы в данном районе относятся к периоду 1980–1983 гг. на пласте № 318. Непосредственно под зданием выработка расположена на глубине 430 м, а на расстоянии 96 м от здания на глубине 430 м выемку пласта проводили с обрушением лавами.

Провал диаметром 3 м и глубиной 3 м образовался в 2004 г. в подвале здания.

Расчеты выполнены с помощью компьютерной программы, созданной на основе алгоритма, представленного на рис. 4, со следующими параметрами: высота выработки  $w = 3$  м, ширина выработки  $l = 3$  м, глубина выработки  $H = 13$  м,  $m = 1/\nu = 8$ , где  $\nu$  — коэффициент Пуассона. Для первичной пустоты (выработки): вертикальная компонента исходного поля напряжений  $p_z = -0.238$  МПа; горизонтальная компонента  $p_x = -0.034$  МПа; отношение длины осей эллипса  $n = a/b = 2.26$ ; вертикальная ось эллипса  $a = 7.43$  м; горизонтальная  $b = 7.43$  м. Согласно первичному разрушению, площадь  $P_1 = 7.98$  м<sup>2</sup>,  $P_2 = 16.60$  м<sup>2</sup>, поскольку  $P_2 > P_1$ , вычисления продолжают. Размеры вторичной пустоты  $2.94 \times 2.94$  м, новая глубина  $H = 10.72$  м.

На рис. 6 показана первичная выработка, динамика образования вторичных пустот в породном массиве, а также глубина отдельных пустот.

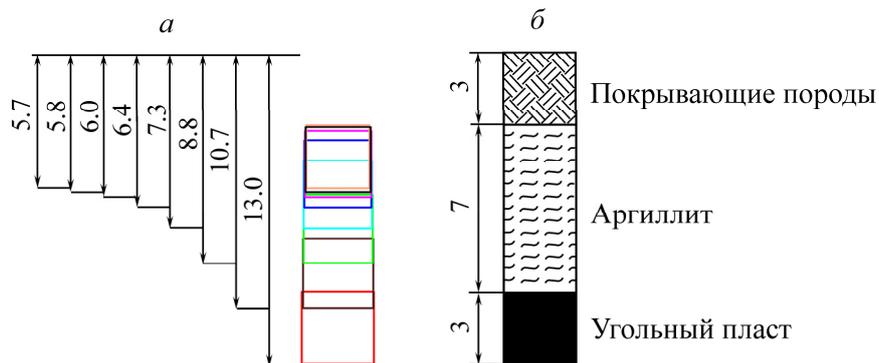


Рис. 6. Данные расчета пустот, образованных в породном массиве (а), и литографический профиль на глубину 13 м (б)

## ВЫВОДЫ

Прогноз образования провалов на земной поверхности сохраняет свою актуальность для обеспечения безопасности зданий и сооружений в горнодобывающих районах. Для условий разработки месторождений, залегающих на малой глубине, предложен инженерный метод оценки возможности образования провалов на земной поверхности.

Разработанный метод применен для расчета процесса последовательного формирования зон разуплотнения в подработанном массиве и выхода их на земную поверхность в условиях выемки пластов Верхнесилезского угольного бассейна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baryakh A. A., Fedoseev A. K. Sinkhole formation mechanism, Journal of Mining Science, 2011, Vol. 47, No. 4. — P. 404–412.
2. Scarborough J. A. Risk and reward: pipes and sinkholes in east Tennessee, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1996, Vol. 33, No. 2. — P. 97A.
3. Strzalkowski P., Tomiczek K. Proposal of a methodology assessing the risk of sink holes formation in mining areas, International Journal of Mining Sciences and Technology, 2015, Vol. 25, No. 1. — P. 85–89.
4. Chudek M., Janusz W., and Zych J. Study on diagnosis and prognosis of the formation of discontinuous deformation due to underground mining, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo, zeszyt, 1988, No. 141, Gliwice, Polish. — 161 p.
5. Strzalkowski P. Mathematical model of forecasting the formation of sinkhole using Salustowicz's theory, Archives of Mining Science, 2015, Vol. 60, No. 1. — P. 63–71.
6. Salustowicz A. An outline of rock mass mechanics, Wydawnictwo Śląsk., 1956, Katowice, Polish. — 192 p.