

УДК 622.834:622.27

Оценка возможности провала земной поверхности

Для оценки возможности образования провалов земной поверхности, подработанной горными выработками мелкого заложения, обоснован и предложен в качестве расчетного способ послыного обрушения, в котором учитывается фактическое состояние углепородной толщи на момент оценки.

Ключевые слова: заброшенные горные выработки, оценка возможности провалообразования, послыный расчет, прочностные характеристики.

Контактная информация: andrei.feo@mail.ru

Проблеме образования провалов на угленосных территориях, несомненно актуальной, посвящены исследования [1–3] и немало других. Их суть сводится к поиску ответов на три основополагающих вопроса: возможен ли провал на данном участке (факт образования); где его ожидать (место проявления); когда он произойдет (время).

Участки земной поверхности, приуроченные к выходам угольных пластов и подработанные старыми шахтами, склонны к провалообразованию и проявлению повышенных деформаций. Известно, что основная причина образования провалов на подработанных угленосных территориях – сохранившиеся на небольших глубинах (по данным работы [4], до 160 м) заброшенные выработки или пустоты в них.

Дополнительную актуальность проблеме придает современный рыночный подход к добыче угля, когда в целях минимизации капиталовложений и, соответственно, извлечения максимальной прибыли в отработку вовлекаются ранее оставленные запасы на выходах угольных пластов. Причем добыча проводится как «дедовскими» способами (камерная отработка отбойными молотками), так и современными (очистными комплексами полосами по простиранию). При этом к уже имеющимся заброшенным выработкам добавляются новые, порой бесконтрольные и официально неучтенные.

Установлено [4], что провалы развиваются над сохранившимися участками протяженных выработок (штреки, уклоны, наклонные стволы) или над местами их пересечений. В некоторых случаях провал возможен и над очистным участком, когда размеры очистной выработки, например камеры, соизмеримы с размерами подготовительной.

Из-за слоистости карбоновой толщи механизм развития провала заключается в послыном обрушении пород кровли с накоплением обрушенного материала на подошве выработки (пустоты) и постепенном перемещении свода обрушения к поверхности (рис. 1). При этом возможны такие основные варианты развития провала в массиве: свод обрушения беспрепятственно достигает земной поверхности, образуя на ней воронку прова-



А. Н. ФЕОФАНОВ,
канд. техн. наук
(УкрНИМИ НАН Украины)



Т. И. СКОПИЧ,
инж.
(УкрНИМИ НАН Украины)

ла; свод обрушения встречает на своем пути крепкий слой и останавливается на неопределенное время; свод подбучивается обрушенными породами и затухает в массиве.

Бытующее мнение – чем ближе выработка (пустота) к поверхности, тем она опаснее – не всегда верно. Из параметров, обуславливающих склонность выработки (пустоты) к провалообразованию, наиболее значимы не только глубина ее залегания и размеры, но и прочностные свойства породных слоев в интервале выработка–земная поверхность.

Таким образом, оценка опасности заброшенной выработки или сохранившейся пустоты в случае возможного провалообразования заключается в определении высоты развития свода обрушения $H_{пр}$ над

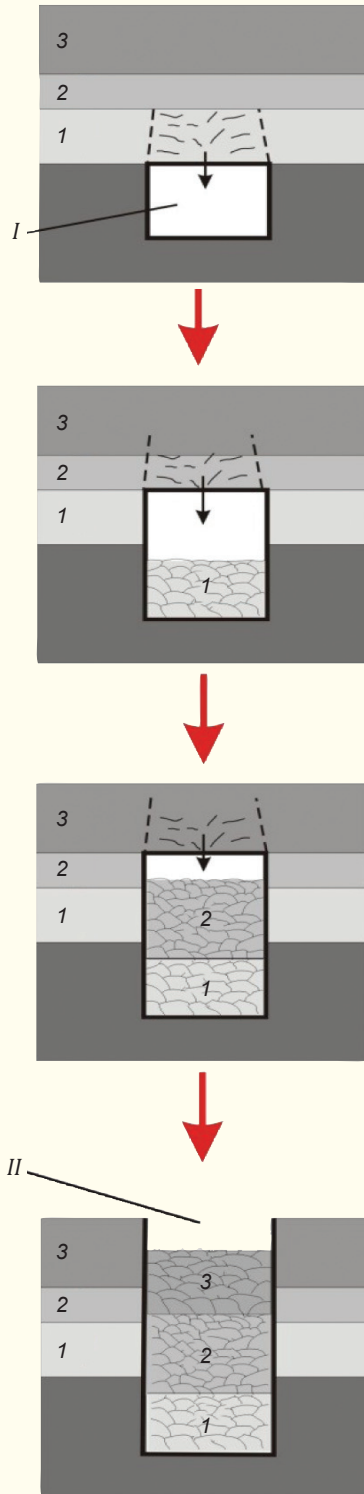


Рис. 1. Схема послыоного обрушения приповерхностного массива: I – выработка (пустота); II – провал на поверхности; 1, 2, 3 – обрушаемые слои.

выработкой (пустотой) и сравнении ее с глубиной расположения выработки (пустоты) по карбону $H_{кр}$. При $H_{пр} \geq H_{кр}$ свод обрушения выходит на земную поверхность с образованием воронки провала.

Обрушающиеся породы кровли разрыхляются. Их увеличение в объеме обуславливается коэффициентом разрыхления

$$k_p = 1 + (V_1 - V_0)/V_0, \quad (1)$$

где V_1 – объем пород в обрушенном состоянии;

V_0 – объем необрушенных пород.

В научной литературе нет однозначных данных о значениях этого коэффициента. Коэффициенты разрыхления основных литологических разностей Донбасса приведены в табл. 1 [5]. Например, для случаев посадки кровли, обрушений горных выработок рекомендуется, согласно данным работы [6], использовать следующие коэффициенты разрыхления: 1,15–1,30 – для глинистых и песчаных сланцев; 1,2–1,4 – для песчаников и известняков. В практике инженерных расчетов высоту зоны беспорядочного обрушения пород определяют по средним значениям коэффициента разрыхления для всех пород кровли независимо от их состава.

Беспорядочное обрушение породных слоев, залегающих над выработкой, завершится в том случае, когда выработка и образующийся в ходе послыоного обрушения свод полностью заполнятся разрыхленной породой, т. е. выработка подбутится.

Поскольку формирование провала в массиве – процесс длительный, то обрушенный на подошву выработки материал постепенно уплотняется под давлением вновь обрушаемых пород и разрушается под воздействием выветривания. Поэтому закономерно в расчетах применять коэффициент остаточного разрыхления, который в некоторых породах меньше (до 33 %) обычного коэффициента разрыхления (см. табл. 1).

В результате экспериментальных исследований [7] было предложено высоту развития свода провала в массиве оценивать по формуле

$$H_{пр} = 2,5h/(k_p - 1), \quad (2)$$

где h – высота сохранившейся выработки (пустоты), м.

Очевидно, чем больше значение коэффициента остаточного разрыхления, т. е. чем больше объем обрушенного материала, тем быстрее подбутится купол обрушения и, следовательно, тем на меньшую высоту он успеет распространиться в массиве. А так как крепкие породы имеют более высокий k_p , то преобладание их в рассматриваемом интервале выработка–земная поверхность предопределяет меньшую $H_{пр}$. И наоборот, в слабых породах свод обрушения может беспрепятственно достигнуть земной поверхности с глубин 80–100 м и более.

Учитывая слоистую структуру карбоневой толщи Донбасса, логично в формуле (2) использовать усредненный коэффициент разрыхления массива, наиболее полно учитывающий разрыхление всех залегающих над сохранившейся выработкой (пустотой) слоев:

$$k_p = \left(\sum_{i=1}^n k_i m_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n h_i \right), \quad (3)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – количество слоев коренных пород над выработкой (отсчет слоев ведется от непосредственной кровли);

k_i – коэффициент разрыхления пород i -го слоя при обрушении;

m_i – мощность i -го слоя, м.

Поскольку в породной толще Донбасса в основном преобладают аргиллиты, алевролиты и песчаники, то некоторые исследователи (в частности, автор работы [8]) с учетом данных табл. 1 и формулы (2) для практических расчетов предлагают использовать выражение

$$H_{пр} = (16,5 \Sigma m_{арг} + 12,5 \Sigma m_{ал} + 10 \Sigma m_{п}) h / H_{к}, \quad (4)$$

где $\Sigma m_{арг}$, $\Sigma m_{ал}$, $\Sigma m_{п}$ – суммарные мощности слоев аргиллита, алевролита и песчаника, залегающих в кровле выработки.

В то же время в Правилах [9, с. 16] рекомендуются: выражение (5.4), аналогичное формуле (2), – для расчета высоты свода обрушения и несколько отличное от формулы (3); выражение (5.5) – для расчета коэффициента остаточного разрыхления толщи переслаивающихся коренных пород.

Таким образом, формулы (2) и (3) предлагается применять при учете всех слоев, формулу (4), а также выражения (5.4) и (5.5) из Правил [9], – когда толща представлена тремя основными литологическими разностями.

Рассмотрим пример со следующими условиями:

а) обрушение развивается над локальной выработкой высотой $h = 3$ м, сохранившейся на глубине $H_{к} = 16,5$ м;

б) кровля представлена переслаивающимися основными литологическими разностями. Приводим очередность слоев в порядке их залегания над выработкой: *первый* – аргиллит, $m = 3$ м, $k_p = 1,15$; *второй* – алевролит, $m = 2,5$ м,

Таблица 1

Порода	Коэффициенты разрыхления		Усадка, %
	свежеобрушенной породы	остаточный	
Песчаник	1,50–1,80	1,25–1,30	17–28
Алевролит (песчаный сланец)	1,20–1,80	1,10–1,20	8–33
Аргиллит (глинистый сланец)	1,15–1,55	1,10–1,15	4–26

$k_p = 1,20$; *третий* – песчаник, $m = 6$ м, $k_p = 1,25$; *четвертый* – алевролит, $m = 1$ м, $k_p = 1,20$; *пятый* – аргиллит, $m = 4$ м, $k_p = 1,15$.

Выполним расчет высоты свода обрушения $H_{пр}$:

- по усредненному коэффициенту остаточного разрыхления (формулы (2) и (3));
- по формуле (4), как для основных литологических разностей;
- по формулам (5.4) и (5.5), приведенным в Правилах [9].

Закономерно предположить, что результаты должны совпасть или быть близкими в пределах погрешности расчетов, так как приведенные выше выражения общеприняты при оценке провалообразований. Однако этого не наблюдается.

При расчетах по формулам (2) и (3) высота распространения свода обрушения над выработкой $H_{пр}$ составит 37,5 м, по формуле (4) – 111,5 м, по формулам (5.4) и (5.5) из Правил [9] – 38,1 м. При глубине залегания выработки по карбону $H_{к} = 16,5$ м во всех трех результатах провал на земной поверхности произойдет, поскольку $H_{пр} \geq H_{к}$. Но результаты почти в 3 раза разнятся между собой. Это недопустимо, когда вопрос о безопасности поверхности решается

Таблица 2

№ слоя	Слой, залегающие над выработкой	k_p	Мощность, м			Высота пустого пространства, м
			слоя	разрыхленного слоя	пустоты и обрушаемого слоя	
5	Аргиллит	1,15	4,00	4,60	4,35	–
4	Алевролит	1,20	1,00	1,20	1,55	0,35
3	Песчаник	1,25	6,00	7,50	8,05	0,55
2	Алевролит	1,20	2,50	3,00	5,05	2,05
1	Аргиллит	1,15	3,00	3,45	6,00	2,55

Примечания: 1. Высота выработки 3 м, глубина ее залегания по карбону 16,5 м. 2. Высота купола обрушения $12,5 + X$, м.

в пределах нескольких десятков метров глубины H_k и доказывает неприемлемость используемых при расчетах формул.

Учитывая, что породы кровли обрушаются как правило послойно, логично рассматривать обрушение каждого слоя в отдельности и сравнивать размеры вновь образовавшейся пустоты с объемом разрыхленной при обрушении породы. И так до того момента, пока пустота или подбутится вследствие обрушения очередного слоя (самоликвидируется в массиве), или свод обрушения «выйдет» на поверхность в виде провала.

Для заданных условий выполним оценку возможности провала последовательно от слоя к слою (табл. 2). Из расчетов видно, что слои обрушаются до тех пор, пока сумма их мощностей и залегающей под ними пустоты больше их мощности в разрыхленном состоянии. На последнем (пятом) слое мощность аргиллита (4 м) вместе с образовавшейся под ним пустотой (0,35 м) меньше мощности этого слоя при разрыхлении (4,60 м), т. е. в этом слое на некотором интервале X свод обрушения окончательно подбутится (рис. 2). Высота распространения свода обрушения в рассматриваемом массиве составит сумму мощностей всех обрушенных слоев (12,5 м) и части X последнего слоя, которая определяется: $0,35 + X = 1,15X$, где $X = 2,33$ м.

Таким образом, купол обрушения подбутится на высоте 14,83 м в пятом слое – аргиллите. При этом $H_{пр} < H_k$, а значит провал на земной поверхности не образуется.

Результат расчета отличается от полученных по формулам (2) и (3) и по выражениям (5.4) и (5.5) из Правил [9] в 2,5 раза и почти в 7,5 раза – по формуле (4). Причина таких несовпадений в том, что в расчетах по формулам (2) и (3), а также по формуле (4), во-первых, применяется усредненный коэффициент остаточного разрыхления для всей рассматриваемой толщи, которую потом разрыхляют как один слой; во-вторых, расчет по формуле (4) или (5.5) построен только на трех основных литологических разностях, доминирующих в породной толще Донбасса, с изначально фиксированными k_p , без учета других слоев и пропластков.

В предлагаемом способе послойного расчета высоты свода обрушения принято, что:

- обрушение каждого слоя рассматривается отдельно и в соответствии с порядком их зале-

гания над выработкой; породные слои обрушаются последовательно, согласно их залеганию в толще с использованием коэффициентов остаточного разрыхления и мощностей на момент оценки;

- на каждом последующем слое учитывается пустота, оставшаяся после обрушения предыдущего слоя;

- в мощных слоях возможно затухание свода обрушения (подбучивание), и этот слой, как показано выше, вполне определяем.

Таким образом, расчет соответствует естественному механизму обрушения породных слоев в сохранившуюся выработку (пустоту).

Слабым звеном проблемы провалообразования остаются значения коэффициентов остаточного разрыхления, которые в основном определяются прочностными свойствами пород. Как отмечалось (см. табл. 1), значения k_p одних и тех же литологических разностей могут варьировать в пределах от 4 до 10 %. Часто для расчетов принимают средние значения. Однажды экспериментально полученные при определенных условиях значения k_p переходят из расчета в расчет и переносятся на литологию другого массива без учета его специфических свойств на момент оценки: степени метаморфизма, выветрелости, глубины залегания, обводненности, трещиноватости, подработанности и других, что в итоге отражается на результате.

Чтобы показать важность использования реальных значений коэффициентов остаточного разрыхления, на приведенном выше примере была выполнена оценка возможности провалообразования предлагаемым **способом послойного обрушения**: по минимальным значениям k_p породных слоев и по максимальным (см. табл. 1).

Расчеты показали, что при минимальных значениях k_p высота развития свода обрушения в массиве $H_{пр} = 16,95$ м, а при максимальных – $H_{пр} = 14,17$ м, т. е. при глубине залегания выработки по карбону 16,50 м в одном случае провал произойдет ($H_{пр} > H_k$) – такой участок потенциально опасен по провалообразованию, а в другом не произойдет ($H_{пр} < H_k$), следовательно безопасная эксплуатация участка земной поверхности возможна.

Необходимость определения точных значений k_p породных слоев, отражающих их факти-

РАЗРАБОТКА ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ

ческое состояние на момент возможного обрушения, очевидна. А так как состояние породных слоев можно оценить по результатам бурения скважин с поверхности до горизонта залегания заброшенной выработки, то прежде всего следует установить связь между прочностными свойствами пород и значениями k_p .

Частично такая работа была выполнена в 1987–1990 гг. Специалисты украинского филиала ВНИМИ (сейчас УкрНИМИ) совместно с Донецким филиалом УкрвостокГИИНТИЗа изучали прочностные свойства массива вдоль предполагаемой трассы строительства первой очереди Донецкого метрополитена над старыми горными выработками на глубине до 80 м. Прочностные свойства толщи на таких глубинах ранее не изучались, имелись данные только о физико-механических свойствах грунтов на глубинах до 10–12 м, полученные при строительстве отдельных объектов. Используя дифференцированный подход к оценке прочностных свойств коренных пород, были определены прочность пород на сжатие R_c для каждого из наиболее часто встречающихся характерных слоев песчаников (шесть видов), алевролитов (шесть видов) и аргиллитов (семь видов) на глубинах до 80 м. Слои разделяли на виды с учетом генезиса, литологии, возраста и текстурно-структурных особенностей пород [10].

Поскольку часть слоев залегала в зоне выветривания, их прочность оказалась сниженной. Наиболее ослабленными были аргиллиты и алевролиты, в меньшей степени – песчаники. Пределы колебаний R_c составили: 0,2–54 МПа для аргиллитов; 0,3–28 МПа для алевролитов; 0,5–84 МПа для песчаников.

В ходе обработки экспериментальных данных была получена зависимость между коэффициентом разрыхления k_i и сопротивлением пород сжатию R_i :

$$k_i = 0,95 + 10^{1/2} k_{pi} \sqrt{R_i} \quad (5)$$

где k_{pi} – переводной коэффициент, принимаемый в зависимости от R_i , МПа^{-1/2} (рис. 3).

При $R_{i \min} = 0,2$ МПа коэффициент $k_{pi} = 0,07$; при $R_{i \max} = 84$ МПа коэффициент $k_{pi} = 0,014$.

Данные о прочности пород получают в результате испытаний кернов на сжатие, извлекаемых при бурении скважин на горизонт за-

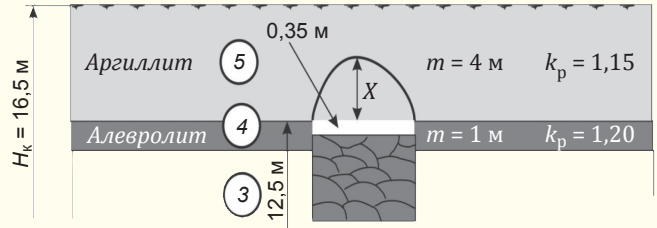


Рис. 2. Подбучивание свода обрушения в последнем слое: 3, 4, 5 – слои обрушения.

легания старой горной выработки (пустоты). Также по результатам бурения устанавливаются мощности слоев и размеры самой выработки (пустоты). При таком подходе расчет высоты свода обрушения будет точен, так как опирается на прочностные свойства литологических слоев, отражающих их реальное состояние на момент оценки.

В условиях приповерхностного массива, часть которого залегает в зоне выветривания, может оказаться, что слои одной и той же литологии существенно различаются по прочности, например один из них залегает в зоне выветривания, а второй – ниже. Тогда и коэффициенты разрыхлений будут отличаться, что в итоге отразится на процессе самоподбучивания. Несложные расчеты показывают, что уменьшение прочности слоя в 3 раза, допустим с 60 до 20 МПа, приводит к уменьшению коэффициента разрыхления на 13 % (с 1,27 до 1,11). При этом своды обрушений в таких слоях будут отличаться по высоте

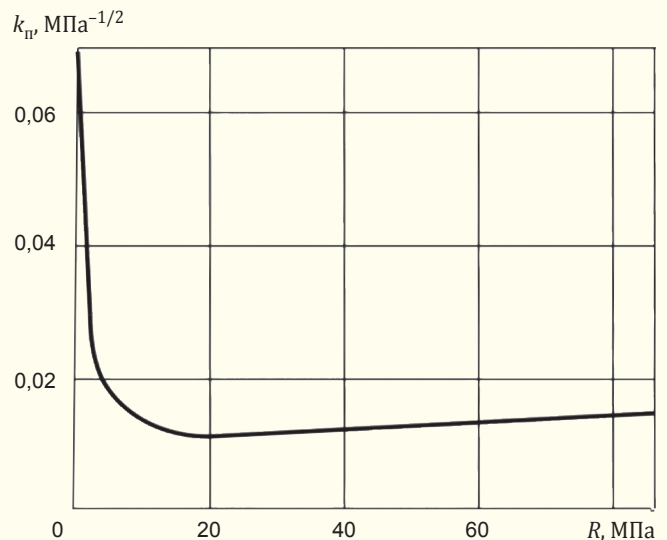


Рис. 3. Зависимость k_{pi} от R_i .

в 2,5 раза. С учетом небольшой глубины залегания старых выработок (пустот) это может кардинально отразиться на принятии решения о возможности провала.

В работе [11] показано, что на прочностные свойства пород, в том числе приповерхностной зоны, существенно влияет изменение гидрогеологии массива (затопление, обводнение, увлажнение), и это влияние для районов с различной степенью метаморфизма имеет характерные особенности. Например, в углях марки К (Донецко-Макеевский район) на малых глубинах увлажненные аргиллиты теряют 61–67 % прочности, а известняки – лишь 12 %, что отражается и на значениях коэффициентов остаточного разрыхления, а в итоге – на расчете высоты свода обрушения. Получение соответствующих результатов для породных слоев других степеней метаморфизма стало бы хорошим подспорьем в решении вопросов провалообразования в других углепромышленных районах Донбасса.

Выводы. Существующие нормативные требования при решении вопросов возможности провалообразования не учитывают реального состояния породного массива на момент оценки. В предлагаемом способе послойного обрушения используются фактические на момент оценки значения сопротивления пород сжатию R_i и соответствующие им коэффициенты разрыхления k_{pi} , отражающие реальное состояние породного массива любой степени обводненности.

При оценке возможности провалообразования важна точность установления не столько литологической принадлежности того или иного слоя, сколько его прочности на сжатие на момент оценки, что в конечном итоге предопределяет значения используемых в расчетах коэффициентов разрыхления.

Предлагаемый способ послойного обрушения базируется на принципе самоподбучивания сво-

да обрушенными породами, залегающими над локальной выработкой (пустотой), что на практике встречается не часто. Необходима адаптация этого способа для условий, когда к выработке примыкает дополнительное пространство (часть протяженной выработки, пересечение двух или нескольких выработок и т. п.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Пальчик В. Д. Оценка устойчивости горных пород над старыми выработками / В. Д. Пальчик // Метрострой. – 1990. – № 1. – С. 20.
2. Феофанов А. Н. Старые горные выработки на малых глубинах: история развития проблемы и ее актуальность / А. Н. Феофанов // Материалы 5-й науч.-техн. конф. вузов Украины. – Донецк, 1997. – С. 34–37.
3. Звягильский Е. Л. Предотвращение провалов земной поверхности над заброшенными шахтами / Е. Л. Звягильский // Уголь Украины. – 1999. – № 6. – С. 36–37.
4. Феофанов А. М. Обґрунтування параметрів урахування старих гірничих виробок на малій глибині для охорони поверхневих об'єктів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.01. / А. М. Феофанов. – Донецьк, 2003. – 19, [3] с.
5. Проскураков Н. М. Управление состоянием массива горных пород / Н. М. Проскураков. – М.: Недра, 1991. – 368 с.
6. Максимов А. П. Горное давление и крепь горных выработок / А. П. Максимов. – М.: Недра, 1973. – 288 с.
7. Медянец С. А. Сдвигание земной поверхности над выработками старых шахт в Донбассе / С. А. Медянец // Уголь Украины. – 1983. – № 7. – С. 20–22.
8. Медянец С. А. Оценка влияния на земную поверхность старых горных выработок угольных шахт / С. А. Медянец // Уголь Украины. – 1981. – № 12. – С. 15–16.
9. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом [Текст]: ГСТУ 101.00159226.001–2003. – К., 2004. – 128 с. – (Нормативный документ Минтопэнерго Украины).
10. Пальчик В. Д. О высоте зоны обрушения пород над старыми выработками под Донецком / В. Д. Пальчик // Уголь Украины. – 1993. – № 6. – С. 53.
11. Феофанов А. Н. Прочность пород при увлажнении на различных стадиях метаморфизма // Наук. праці УкрНДМІ НАН України. – 2014. – № 14. – С. 60–72.