

УДК.622.831

Солодянкин А.В., профессор, д.т.н., Прокудин А.З., научный сотрудник  
Государственное ВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепр, Украина

## НОВАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА РАЗВИТИЯ ПУЧЕНИЯ ПОЧВЫ И СПОСОБА ЕГО СНИЖЕНИЯ

Проведение подземных выработок в породном массиве приводит к образованию значительных зон разрушенных пород, что вызывает необходимость возведения крепи соответствующей несущей способности и податливости, а также выполнения дополнительных мероприятий для обеспечения их длительной устойчивости.

В [1] отмечается, что при сооружении подготовительных выработок размеры зон разрушенных пород достигают 5 м, а коэффициент их расширения – 1,1. По данным шахтных исследований в [2, 3] также получен средний коэффициент разрыхления  $k_p = 1,15$ . Однако, как показывают результаты исследований глубоких шахт Донбасса, в отдельных группах выработок или их участках разрыхление пород приконтурной зоны достигает значительных величин [1]. Размеры зона разрушенных пород на сопряжении с очистным забоем и позади него, на участках охранных сооружений может превышать 10 м, а коэффициенты разрыхления пород – 1,15 и более. Максимальные коэффициенты разрыхления пород наблюдаются после перекрепления выработки за очистным забоем. Размеры зоны разрушенных пород в зоне влияния очистных работ при повторном использовании выработки достигают 15 м и более, а коэффициенты разрыхления отдельных слоев пород – 1,2. Коэффициент разрыхления метрового слоя у контура иногда достигает 1,3 (т.е.  $\varepsilon^*_v = 0,3$ ).

Максимальное относительное объемное разрыхление пород  $\varepsilon^*_v$  – тот параметр, который оказывает существенное влияние на состояние выработки и который можно изменять с помощью эффективных технических средств или технологических мероприятий, воздействуя на контур выработки, управлять процессом деформирования массивом в приконтурной зоне [4, 5]. Очевидно, что таким образом можно снизить, а в некоторых случаях и предупредить развитие пучения почвы.

В контексте последующих рассуждений и обоснования физической модели механизма развития пучения почвы, отметим следующее.

1. Отпор крепи  $P_0$  на глубоких шахтах несоизмеримо меньше гравитационного давления  $\gamma H$  и, как показано в [6], чрезвычайно мало влияет на размеры зоны неупругих деформаций и на разупрочнение пород во внешней области ЗНД, где  $\bar{\varepsilon}_v \rightarrow 0$ .

Однако, говоря о контуре выработки, где породы достигают максимального

разрыхления ( $\varepsilon^*_{\nu} = 0,2 \div 0,3$ ), а их остаточная прочность составляет  $0,1R_c$ , отпор крепи играет существенную роль и может оказывать управляющее воздействие на процесс деформирования пород в пределах приконтурного массива.

2. Зона неупругих деформаций по глубине от контура выработки включает зону пластических разрушений породы без раскрытия трещин ( $\bar{\varepsilon}_{\nu} = 0$ ) и зону разрушенных пород – ЗРП, где происходит раскрытие трещин ( $\bar{\varepsilon}_{\nu} > 0$ ) с их постепенным расширением к контуру выработки до значений  $\varepsilon^*_{\nu} = 0,2 \div 0,3$ .

Рассмотрим физическую модель механизма деформирования приконтурного массива и явления вспучивания пород почвы.

Одной из характерных особенностей процесса вспучивания в условиях формирования вокруг выработки ЗНД больших размеров, является смещение приконтурного слоя пород не только в радиальном направлении, но и по направлению к почве выработки. Такой механизм смещений пород отмечен многими исследователями. В [7] показан характер деформирования массива пород в магистральном откаточном штреке ш. Западодонбасской ГХК «Павлоградуголь» после 7-ми лет эксплуатации, в течение которых было проведено три подрывки вспученных пород. Характер деформирования массива в окрестности выработки представлен на рис. 1.

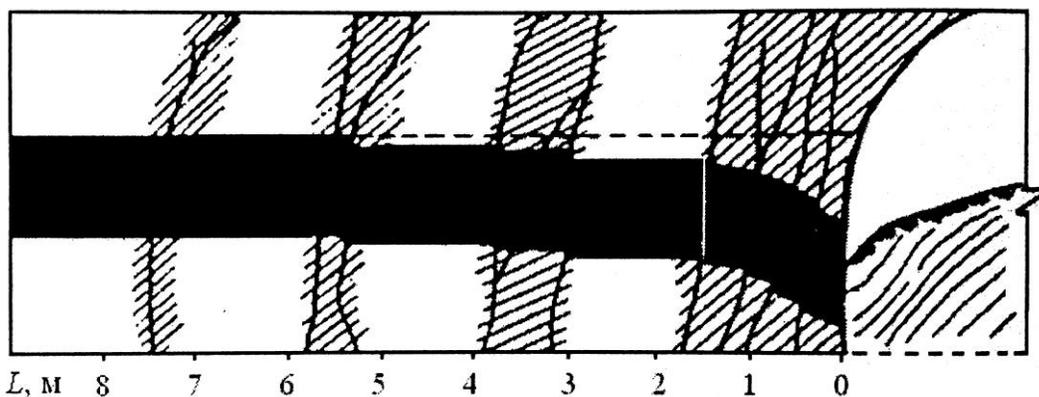


Рис. 1. Характер деформирования угленородного массива со стороны боков выработки [6]

Вертикальные смещения пород в окрестности выработки, замеренные по смещениям угольного пласта в качестве маркирующего слоя, составили на контуре выработки –  $0,5 \div 0,6$  м.

Аналогичный характер деформирования отмечался в выработках других шахт [8], в боках которых наблюдались 3...4 зоны разрушенных пород со смещением их относительно друг друга и опусканием приконтурного слоя к почве. В табл. 1 приведены параметры процесса пучения пород в выработках шахт ГХК «Павлоградуголь».

---

Таблица 1

Результаты исследований состояния выработок шахт ГХК «Павлоградуголь» [8]

Шахта	Выработка	Вертикальное смещение пород на контуре выработки $h_i$ , м	Глубина зоны разрушения, $H_n$ , м	Коэфф. разрыхления, $K_p$	Величина пучения с учетом подрывок
Имени Героев космоса	1-й зап. магистр. штрек гор. 370 м	0,60	5	1,2	2,0
	3-й вост. магистр. штрек гор. 370 м	0,4	4,5	1,2	1,7
Зап.-Донбасская	3-й вост. Магистр. штрек гор. 370 м	0,55	4,0	1,1	1,8

Комплекс исследований, выполненный в пластовых выработках глубоких шахт Центрального Донбасса [9], позволил получить картину деформирования пород в окрестности выработки, представленную на рис. 2. Под воздействием преобладающего вертикального давления за пределами области  $S$ , толща пород и пласт разрушаются с разрывом сплошности перпендикулярно напластованиям и отрывами отдельных блоков сползания  $\Pi$ . Перемещения и просадка «отдельностей» в боках совместно с контуром выработки составляют 50...160 мм

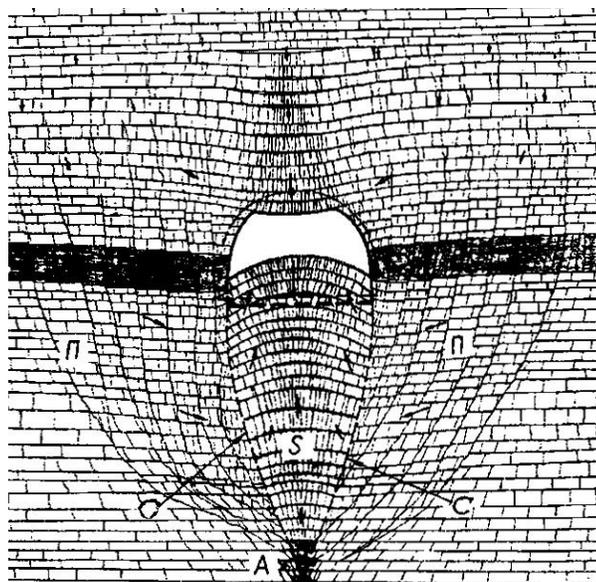


Рис. 2. Деформирование пород в приконтурной зоне выработки по [8]

и протекают длительно, чаще всего дискретно. Просадка массива в боках выработки захватывает зону до одного пролета и более ее ширины. Перемещения точек массива показаны на рис. 2 стрелками.

Результаты исследований М.А. Выгодина [10] в выработках шахт Западного Донбасса показали, что характерной особенностью разрушения приконтурного массива является вертикальное смещение боковых слоев пород и постепенное выдавливание пород почвы внутрь выработки, вследствие чего происходит их пучение.

Еще одним условием предлагаемого механизма развития пучения является то, что начало вспучивания всегда принимается в почве. Это объясняется рядом очевидных причин. Породный свод выработки является конструкцией самоподдерживающейся, а напряжения в нем в процессе

деформирования всегда остаются сжимающими. В почве же с течением времени наблюдается искривление в сторону выработки. Этому способствует значительные сжимающие усилия с боков и выдавливающее действие со стороны нижележащих слоев почвы [11]. Кроме того, почва выработки, как правило, обводнена, что снижает прочность пород.

Таким образом, предлагаемая физическая модель включает в себя следующие характерные особенности деформирования приконтурного массива пород (рис. 4).

1. Разрыхление пород на контуре больше, чем среднее по глубине ЗНД  $\bar{\varepsilon}_v < \varepsilon_v^*$ .
2. Смещение приконтурного слоя пород происходит внутрь выработки и вниз к почве.
3. Почва выработки предрасположена к вспучиванию и дальнейшей деформации под действием боковых и вертикальных нагрузок снизу.

Механизм развития пучения пород почвы, в соответствии с моделью, представленной на рис. 3 состоит в следующем.

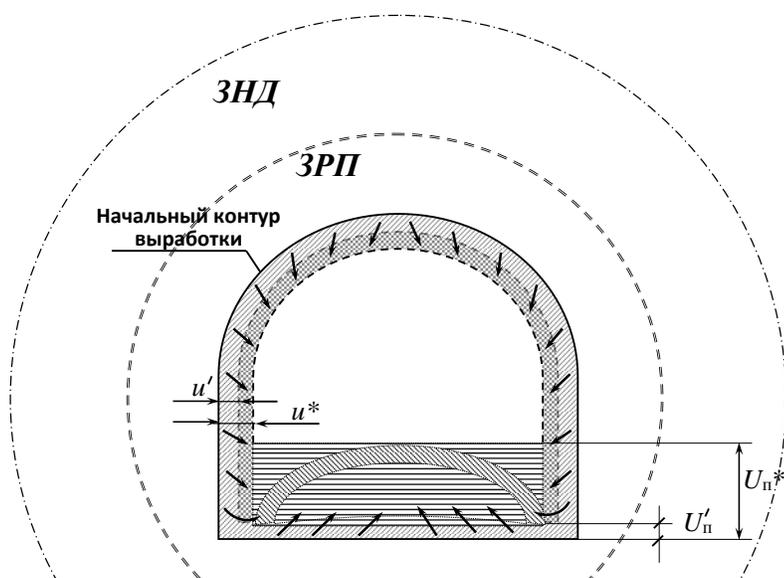


Рис. 3. Физическая модель развития пучения пород почвы

После выемки пород и установки в выработке крепи, происходят смещения контура  $u'$ , которые в слабых породах реализуются в пределах призабойного участка. При неплотной забутовке закрепного пространства величина смещений может достигнуть величины 0,2 м. При этом существенных деформаций крепи и снижения устойчивости выработки не происходит. Величину среднего значения относительного увеличения

объема пород в пределах этих смещений контура будем считать равной  $\bar{\varepsilon}_v = 0,1$ .

Если сопротивления крепи недостаточно для стабилизации смещений пород, то деформации будут развиваться и дальше. Допустим, что равномерные по периметру смещения контура выработки достигли величины  $u^* = 0,4$  м при увеличении максимального относительного объемного разрыхления  $\varepsilon_v^* = 0,2$ . Как было показано, смещения приконтурного слоя пород происходят в радиальном направлении и вниз, в сторону почвы выработки. За счет уменьшения периметра выработки при такой величине смещений и увеличении степени разрыхления

пород этого слоя, величина пучения пород почвы превысит критические значения. Так, для выработки арочной формы с площадью сечения  $S_{св} = 16 \text{ м}^2$  при смещениях контура по периметру  $U^* = 0,4 \text{ м}$ , величина пучения при повышении степени их разрыхления от  $\varepsilon^*_v = 0,1$  до  $\varepsilon^*_v = 0,2 \div 0,3$  составит:

- $U_{п}^* = 0,52 \text{ м}$  при  $\varepsilon^*_v = 0,2$ ;
- $U_{п}^* = 0,57 \text{ м}$  при  $\varepsilon^*_v = 0,25$ ;
- $U_{п}^* = 0,63 \text{ м}$  при  $\varepsilon^*_v = 0,3$ .

Таким образом, физическая модель показывает качественно и, в определенной степени, количественно картину развития пучения, из которой следует вывод о важности и высокой эффективности мероприятий по снижению степени разрыхления пород на контуре выработки.

Как указывалось, для повышения устойчивости протяженных выработок шахт Западного Донбасса, наиболее эффективным мероприятием считается тампонаж закрепного пространства. Активно внедряется и уже зарекомендовало себя положительно анкерное крепление, применяемое совместно с металлической рамной крепью.

Существенным недостатком тампонажных работ при их проведении непосредственно в забое выработки является их сложность. Для снижения сложности работ тампонаж выполняют за технологическим комплексом. Однако, учитывая большие размеры обнажений выработок на современном этапе, наличие слабых вмещающих пород, на момент проведения тампонажа в окружающей выработку массиве уже происходят значительные деформации, а смещения почвы уже заметны.

С этих позиций анкерная крепь является более эффективной, возведение которой в забое выработки, сразу после выемки пород не вызывает значительных технологических и организационных сложностей. При этом появляется возможность не только удерживать нарушенные приконтурные породы от обрушения в выработку, но и воздействовать на геомеханические процессы, вызванные проведением выработки и большими деформациями массива пород.

Упрочненную анкером область пород в связи с ее функциональной ролью, можно определить как опору, которая удерживает горные породы приконтурной зоны от смещения в выработку и предупреждает их разрушение [12]. Систему таких опор можно использовать для создания из приконтурных пород грузонесущего перекрытия, устанавливая анкера в кровле выработки с необходимой плотностью.

Рассмотрим эффект от воздействия одиночного анкера, установленного в выработке, на приконтурный массив и возможность снижения пучения пород почвы применительно к предложенной физической модели (см. рис. 3).

Как показывают результаты шахтных исследований [13], установка

анкерной крепи максимально снижает объемное расширение пород по всей зоне укрепленной области пород приконтурного массива ( $\bar{\varepsilon}_v = 0,03 \div 0,05$ ).

В соответствии со схемой приведенной на рис. 4, установка одиночного анкера в приконтурный породный массив позволяет зафиксировать элемент породного контура в положении 1, снизить его разрыхление от величины  $\varepsilon^*_v$  до  $\bar{\varepsilon}_v$  и за счет этого уменьшить вклад смещающегося и разрыхляющегося приконтурного слоя в пучение пород почвы.

Ширина зоны влияния анкера, как свидетельствуют исследования [14, 15], составляет в среднем  $b_a = 1$  м. Таким образом, установка одного анкера позволит снизить смещения почвы на  $\Delta U_{\text{п}} = 4,2$  см при величине максимального относительного объемного разрыхления на контуре выработки  $\varepsilon^*_v = 0,2$ . При  $\varepsilon^*_v = 0,25$  или  $\varepsilon^*_v = 0,3$ , снижение величины пучения от одного анкера составит соответственно  $\Delta U_{\text{п}} = 4,4$  и  $\Delta U_{\text{п}} = 4,6$  см. Для рассматриваемой выработки, периметр сводчатой части которой составляет  $P_{\text{в}} = 9,4$  м, при установке анкеров в количестве  $N_a = 10$  шт, можно обеспечить уменьшение величины пучения почвы на  $\Delta U_{\text{п}} = 42 \dots 46$  см за счет снижения разрыхления приконтурного слоя пород и уменьшения их перемещения в полость выработки, что позволит решить проблему устойчивости выработки в целом.

Рассмотренная модель дает общее представление о механизме развития пучения пород почвы в слабых вмещающих породах и работы анкерной крепи для снижения величины или полного предупреждения пучения.

Следует при этом отметить, что использование комплекта сталеполимерных анкеров, даже установленных непосредственно в забое, не дает гарантии по предупреждению деформаций и снижению пучения почвы во время эксплуатации выработки. Результаты обследования выработок, закрепленных анкерной крепью в условиях Западного Донбасса, свидетельствуют о снижении эффективности укрепления пород анкерами, «обыгрыванию» их породами, выдергиванию из шпуров и т.п.

Для шахт Западного Донбасса причиной этого являются физико-механические свойства и структурные особенности вмещающих пород. Известно, что даже после установки высококонесущей поддерживающей или укрепляющей

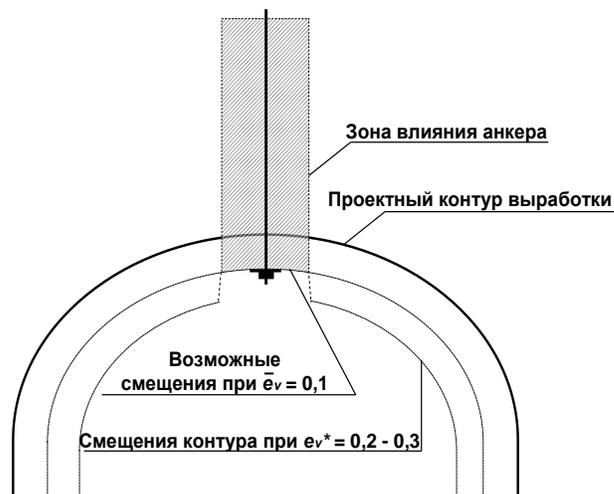


Рис. 4. Механизм воздействия одиночного анкера на снижение смещений контура выработки

анкерной крепи и стабилизации геомеханических процессов в забое выработки, небольшие смещения контура, как отмечается в [16], могут продолжаться еще длительное время. Эти деформации объясняются некоторым снижением прочности приконтурных пород в результате разрушения внешними агентами (влажность, колебания температур) и разбуханием глинистых частиц. Кроме того, прочность пород несколько снижается при воздействии на нее длительных нагрузок.

В [17] показано, что вероятностный показатель устойчивости выработок для шахт Западного Донбасса в условиях слабометаморфизированных и склонных к пучению пород уменьшается во времени и линейно зависит от степени их влажности.

Кроме этого, известны случаи, когда зона разрушения приконтурного массива пород со временем распространяется выше области укрепленного анкерами слоя, после чего происходит его обрушение в выработку [18]. Поэтому эффективным мероприятием, в рассматриваемых условиях, является изоляция боковых пород, препятствующая нарушению их естественной влажности и ограничивающая контакт с рудничной атмосферой. В особенности это необходимо выполнять для основных углевмещающих пород – аргиллитов и алевролитов. В этом плане слой упрочненного тампонажного раствора следует считать не только как несущий элемент комбинированной крепи, но и как изолирующий слой, сохраняющий прочность приконтурного массива пород и повышающий эффективность работы анкерной крепи.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Пластичность горных пород. – М.: Недра, 1979. – 301 с.
2. Черняк И.Л., Ильющенко В.Г., Звягильский Е.Л. Влияние сопротивления крепи на устойчивость выработок // Уголь Украины. – 1990. - № 8. – С. 27-28.
3. Черняк И.Л., Бурчаков Ю.И. Управление горным давлением в подготовительных выработках глубоких шахт. – М.: Недра, 1984. – 304 с.
4. Солодянкин А.В. Исследование влияния несущей способности крепи на параметры деформирования массива пород вокруг протяженных горных выработок // Геотехническая механика. – 2008. - № 77. – С. 185-192.
5. Солодянкин А.В. Исследование влияния отпора крепи на устойчивость протяженных горных выработок // Известия Тульского государственного университета. Вып. 3. – Тула: Гриф и К, 2008. – С. 161-164.
6. Шашенко А.Н. Устойчивость подземных выработок в неоднородном породном массиве: Дис. ... докт. техн. наук: 05.15.04. – Днепропетровск, 1988.– 507 с.
7. Кириченко В.Я., Шмиголь А.В., Рева В.Н. О механизме пучения почвы

выработок, сооружаемых в слабых породах // Шахтное строительство. – 1988. – № 11. – С. 3-5.

8. Паламарчук Т.А., Кириченко В.Я., Усаченко Б.М. Элементы механосинергетики породного массива. – Днепропетровск: ЧП «Лири ЛТД», 2006. – 308 с.

9. Тупиков Б.Т., Компанец В.Ф. Устойчивость пластовых выработок в массиве на больших глубинах // Уголь Украины. – 1998. - № 6. – С. 15-17.

10. Выгодин М.А. Обоснование параметров армопородных грузонесущих конструкций на базе рамно-анкерных крепей и технология их сооружения в выработках шахт Западного Донбасса. Дисс... к.т.н. – Днепропетровск, 1990. – 139 с.

11. Роечко А.Н. Устойчивость подготовительных выработок угольных шахт в условиях больших глубин: Дис. ... д. т. Н. 05.15.04. – Днепропетровск, 1995. – 426 с.

12. Булат А.Ф., Виноградов В.В. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт. – Дніпропетровськ, ІГТМ НАН України. – 2002. – 372 с.

13. Дрибан В.А., Новиков А.О., Шестопалов И.Н. Об управлении устойчивостью массива рамно-анкерными системами // Физико-технические проблемы горного производства. – 2013. – Вып. 16. – 88-104.

14. Терещук Р.Н. Определение зоны влияния одиночного анкера на однородный приконтурный массив // Проблеми гірського тиску. – № 19. – С. 183-195.

15. Круковский А.П. Влияние прочности закрепления анкеров на формирование несущего перекрытия в кровле горной выработки // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. – 2004. - № 51. - С. 239-250.

16. Шашенко О.М., Солодякин О.В., Мартовицкий А.В. Управління стійкістю протяжних виробок глибоких шахт. – Дніпропетровськ: ЛізуновПрес, 2012. – 384.

17. Парчевский Л.Я., Шашенко А.Н., Татаринев А.А. Устойчивость выработок в условиях пучащих пород в статистических оценках // Геотехническая механика. – Д.: ИГТМ НАН Украины, 1997. – Вып. 3. – С. 24-32.

18. Халимендик Ю.М., Барышников А.С. Использование канатных анкеров при креплении выработок в слоистых породах // Розробка родовищ. – 2014. – С. 105-114.