

PACS: 62.20. F, 91.10. Kg

Ю.А. Петренко¹, Я.В. Шажко¹, Г.И. Соловьев², А.Л. Касьяненко²

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ ВЫРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ШАХТ ПРИ НАЛИЧИИ В ЕЕ ТЕКСТУРЕ ПРОЧНОГО СЛОЯ

¹Институт физики горных процессов, Донецк

²Донецкий национальный технический университет

Статья поступила в редакцию 20 февраля 2020 года

В лабораторных условиях на эквивалентных материалах выполнено моделирование особенностей процесса деформирования пород почвы выработки при наличии в ее текстуре прочного слоя. Оценены физико-механические свойства почвенного слоя. Установлено, что деформирование пород почвы с прочным слоем осуществляется в два этапа: на 1-м происходит складкообразование слоев только над прочным слоем, на 2-м – изгиб и разлом прочного слоя и увеличение смещений пород почвы. При наличии в почве выработки шириной B слоя прочных пород толщиной $0.1B$ наибольший положительный эффект от него достигается, если располагать выработку относительно вмещающих пород таким образом, чтобы прочный слой залегал как можно дальше от контура почвы, но не более $0.5B$. При толщине слоя $0.3B$ необходимо, чтобы прочный слой залегал как можно ближе к контуру почвы выработки.

Ключевые слова: горная выработка, породы почвы, прочный слой, эквивалентные материалы, критерий подобия, упорно-лежневая крепь усиления

Анализ отечественных и зарубежных исследований [1–5] по обеспечению устойчивости выемочных выработок свидетельствует, что недостаточное внимание уделялось вопросу степени влияния текстуры пород на процесс деформирования почвы. При наличии в текстуре почвы прочного слоя пород их разрушение происходит в результате формирования породной складки с образованием крупных породных блоков [3,4]. В таких условиях производить механизированную поддирку затруднительно, а зачастую и невозможно. При этом прочность пород должна составлять не более 60 МПа. В случае превышения этого предела для поддирки почвы необходимо применять бурозрывные работы, что повышает энергозатраты на разрушение пород и снижает темпы работ более чем в 5 раз [5]. Кроме того, не рассматривался вопрос использования несущей способности прочного слоя в почве выработки для повышения ее устойчивости.

Цель данного исследования – установить особенности процесса деформирования пород почвы выработки при наличии в ее текстуре прочного слоя и обосновать способ обеспечения устойчивости почвы.

Испытания проводили на моделях из эквивалентных материалов с использованием плоского стенда с внутренними рабочими размерами $76 \times 58 \times 16$ см, обеспечивающими соблюдение граничных условий при выбранном масштабе моделирования 1:50.

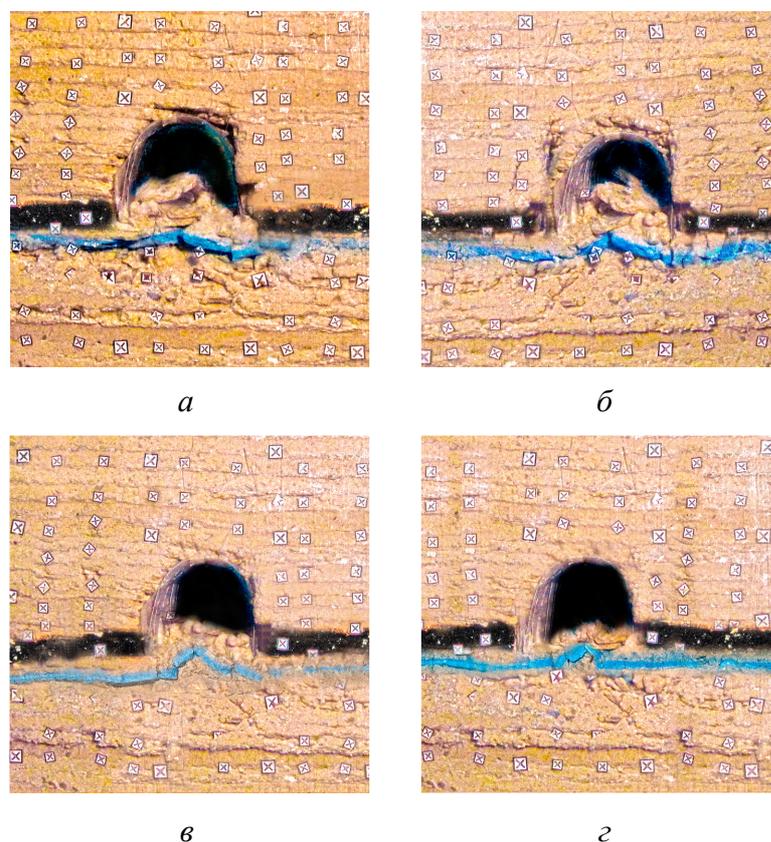


Рис. 1. Состояние почвы выработки на момент окончания моделирования с различными параметрами прочного слоя: *а* – $\sigma_c = 80$ МПа, $m_{str} = 0.1B$, $h_{str} = 0.1B$; *б* – $\sigma_c = 80$ МПа, $m_{str} = 0.3B$, $h_{str} = 0.3B$; *в* – $\sigma_c = 120$ МПа, $m_{str} = 0.1B$, $h_{str} = 0.3B$; *г* – $\sigma_c = 120$ МПа, $m_{str} = 0.3B$, $h_{str} = 0.1B$

Процессы деформирования моделируемого породного массива изучали в пластовой выработке шириной B , содержащей прочный слой в почве, с проведением мероприятий по обеспечению устойчивости почвы выработки и без них. Всего было отработано 15 моделей (их состояние на момент окончания испытаний представлено на рис. 1). В первой моделировали почву пласта выработки без прочного слоя, остальные 12 моделей отработывали для аналогичных условий, но с наличием прочного слоя различных толщины m_{str} , прочности σ_c и глубины залегания от контура почвы выработки h_{str} . Затем отработывали еще 2 модели с проведением мероприятий по обеспечению устойчивости почвы выработки. За прочный принимали слой пород, прочность которого на 50% и более превышает прочность слоев остальных вмещающих пород.

С помощью пневматических баллонов в модели создавали двухосное напряженное состояние при вертикальной и горизонтальной нагрузках, при-

рост которых синхронно изменяли. Соотношение между этими нагрузками составляло 0.5.

По мере нагружения модели проводили измерения величин смещения контура почвы выработки методом фотофиксации. Для обработки результатов измерений использовали графический редактор Photoshop.

Влияние прочного слоя и его параметров на смещения контура почвы выработки оценивали с помощью безразмерного коэффициента

$$k_U = \frac{U_0 - U_{str}}{U_0}, \quad (1)$$

где U_0 , U_{str} – смещения пород почвы соответственно в отсутствие и при наличии прочного слоя, м.

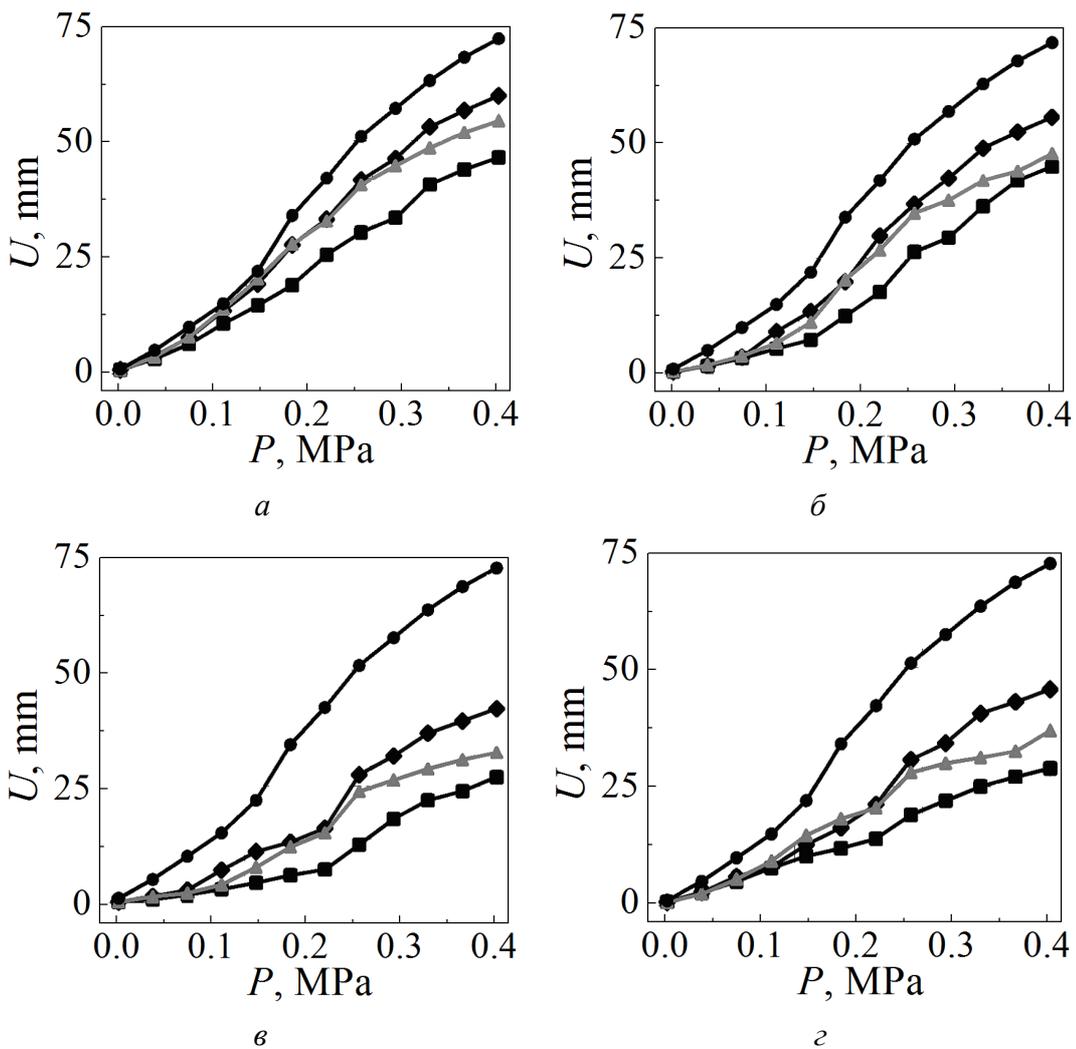


Рис. 2. Графики зависимостей смещений контура почвы выработки U от величины пригруза P в моделях без прочного слоя (\bullet) и со слоем породы прочностью $\sigma_c = 60$ (\blacklozenge), 80 (\blacktriangle) и 120 (\blacksquare) МПа при различных параметрах прочного слоя: $a - m_{str} = 0.1B, h_{str} = 0.1B$; $б - m_{str} = 0.1B, h_{str} = 0.3B$; $в - m_{str} = 0.3B, h_{str} = 0.1B$; $г - m_{str} = 0.3B, h_{str} = 0.3B$

Чем выше значение этого коэффициента, тем больше положительное влияние прочного слоя на устойчивость пород почвы.

Результаты исследований обрабатывали в виде графиков смещений поднятия контура почвы в зависимости от величины вертикального пригруза (рис. 2). На рис. 3 представлены зависимости коэффициента влияния прочного слоя на смещения контура почвы k_U (1) от величины пригруза P для следующих параметров моделей с прочным слоем: $\sigma_c = 60, 80$ и 120 МПа при различных сочетаниях толщины прочного слоя m_{str} и глубины его залегания от контура почвы выработки h_{str} .

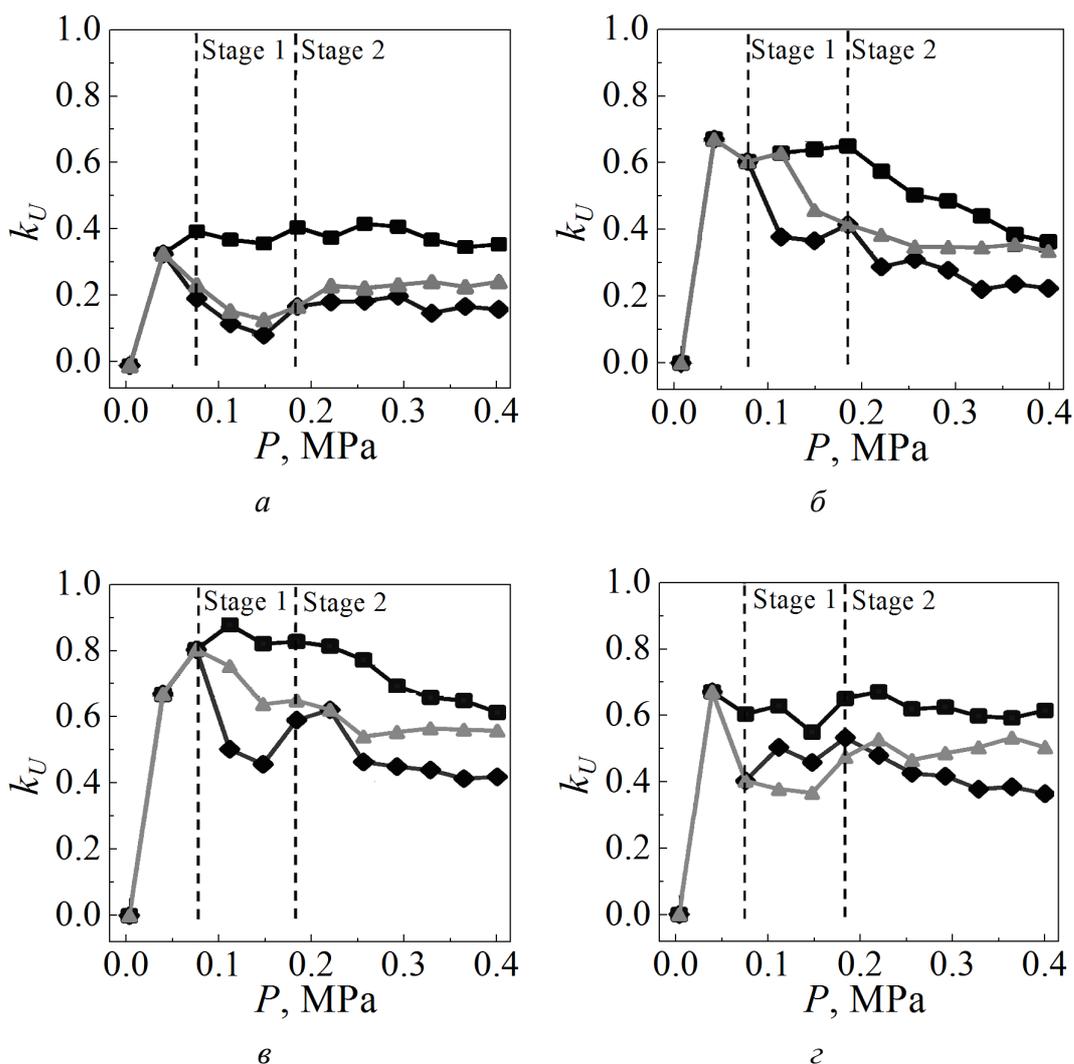


Рис. 3. Графики зависимостей коэффициента влияния прочного слоя на смещения контура почвы выработки k_U от величины пригруза P в моделях со слоем прочностью 60 (◆), 80 (▲) и 120 (■) МПа при различных параметрах прочного слоя: $a - m_{str} = 0.1B, h_{str} = 0.1B$; $б - m_{str} = 0.1B, h_{str} = 0.3B$; $в - m_{str} = 0.3B, h_{str} = 0.1B$; $г - m_{str} = 0.3B, h_{str} = 0.3B$

Анализ представленных графиков позволяет выделить два характерных этапа деформирования пород почвы. На первом при увеличении пригруза начинала формироваться складка. При этом в моделях с прочным слоем складкообразование слоев происходило только над прочным слоем. На втором этапе при дальнейшем увеличении пригруза наблюдались изгиб и разлом слоев (в том числе и прочного), а также рост смещений пород почвы. При этом смещения контура почвы выработки с прочным слоем были в среднем в 1.5 раза меньше, чем в выработке без прочного слоя.

Деформационный процесс почвы с прочным слоем проявлялся в виде прогиба и разлома слоев (см. рис. 1). Причем после разлома прочного слоя деформационный процесс имел более возрастающий характер, вовлекающий в процесс смещений нижележащие слои. На момент окончания 1-го этапа наибольший эффект положительного влияния прочного слоя был отмечен в моделях со следующими его параметрами: $m_{str} = 0.1B$, $h_{str} = 0.3B$ и $m_{str} = 0.3B$, $h_{str} = 0.1B$ при прочности слоя $\sigma_c = 80$ и 120 МПа. При этом на момент окончания отработки смещения контура почвы выработки со слоем прочностью $\sigma_c = 60$, 80 и 120 МПа были соответственно в 1.25, 1.34 и 1.55 раза ниже, чем смещения контура почвы без прочного слоя.

Из рис. 3 видно, что интенсивность смещений контура почвы одиночной выработки в модели изменялась скачкообразно по мере роста величины пригруза. При этом следует отметить, что до окончания 1-го этапа прочный слой выполнял функцию элемента обратного свода крепи.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в почве выработки шириной B при наличии слоя прочных пород толщиной $m_{str} = 0.3B$ наибольший положительный эффект достигается, если располагать выработку относительно вмещающих пород таким образом, чтобы прочный слой залегал как можно ближе к контуру почвы выработки. В случае невозможности подобного расположения с целью уменьшения смещений пород почвы необходимо дополнительное внешнее воздействие непосредственно на прочный слой для предотвращения его разлома до наступления 2-го этапа деформирования.

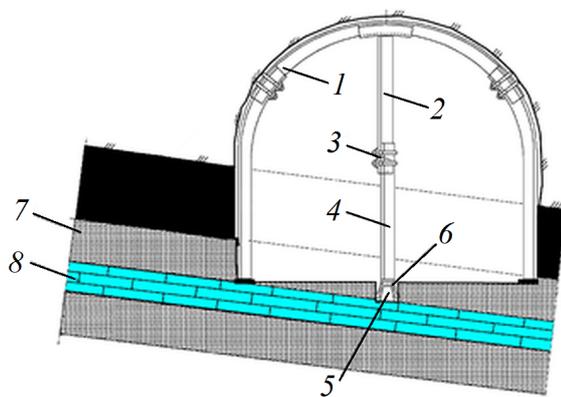


Рис. 4. Схема предлагаемого способа: 1 – рама основной крепи, 2 – верхняя часть стойки крепи усиления, 3 – замок крепи усиления, 4 – нижняя часть стойки крепи усиления, 5 – продольная канавка, 6 – продольный лежень в канавке, 7 – почвы выработки, 8 – прочный слой пород почвы

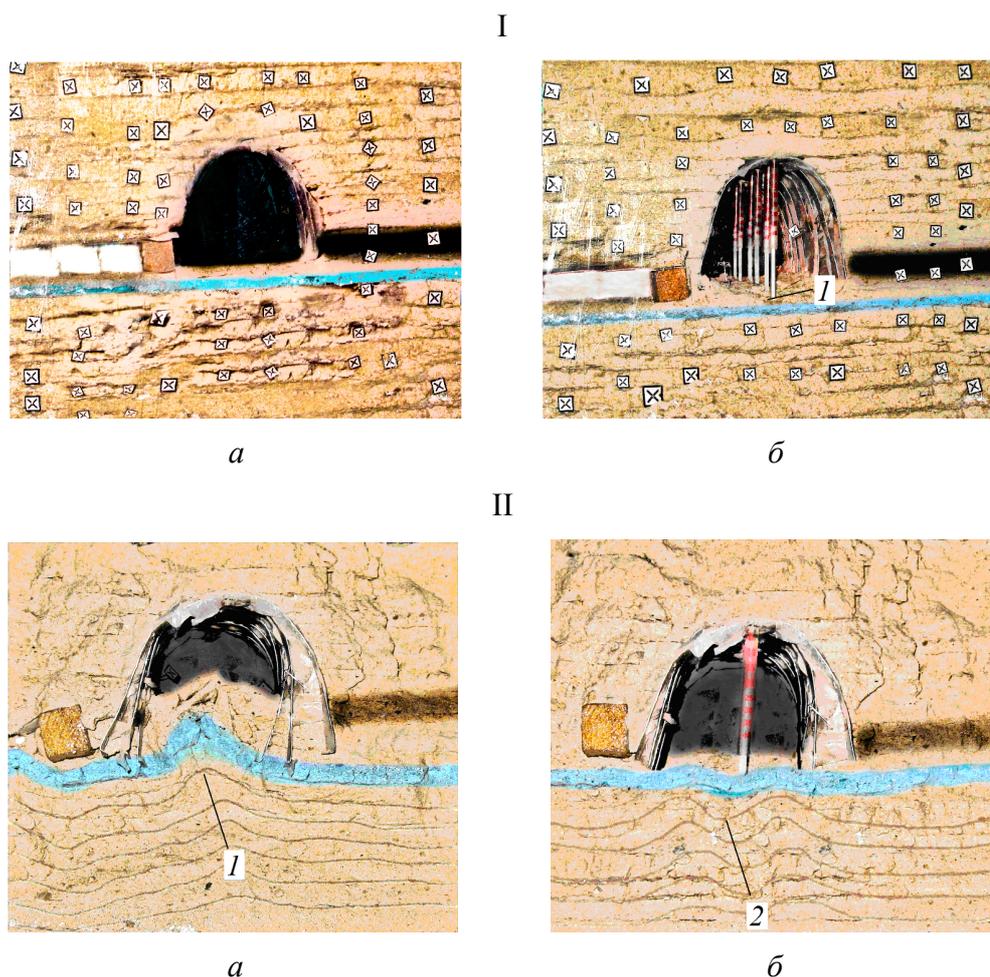


Рис. 5. Общее состояние выработок в виде срезов моделей в начале (I) и в конце (II) моделирования без применения мероприятий по обеспечению устойчивости почвы выработки (а) и с их применением (б): I: 1 – упорно-лежневая крепь усиления, контактирующая с прочным слоем почвы; II – показано складкообразование пород почвы: 1 – нижележащих слоев, 2 – от внешнего воздействия

Наиболее перспективным направлением обеспечения устойчивости почвы горных выработок являются механические силовые воздействия на прочный слой, позволяющие максимально использовать его несущую способность [6–8].

С учетом вышесказанного был предложен способ [9,10], заключающийся в создании системы «прочный слой–крепь усиления–рама основной крепи» с помощью упорно-лежневой крепи усиления (рис. 4). Сущность данного способа заключается в следующем: под верхняк основной крепи 1 вдоль выработки последовательно устанавливают крепь усиления, которая состоит из верхней 2 и нижней 4 частей стойки, выполненных из отрезков металлического профиля, соединенных между собой замком 3. В почве выработки 7 сооружают канавку 5, в которую укладывают лежень 6. Глубина канавки определяется глубиной залегания прочного слоя 8. На уложенный лежень устанавливают крепь усиления таким образом, чтобы нижняя часть стойки

крепи усиления 4 посредством жестко закрепленного на ней отрезка металлического профиля входила в зацепление с лежнем, а верхняя часть стойки 2 посредством жестко соединенного с ней отрезка металлического профиля входила в зацепление с верхняком основной крепи.

Для исследования эффективности предложенного способа были отработаны модели со следующими параметрами прочного слоя: толщина $m_{str} = 0.1B$ и $0.3B$; глубина залегания $h_{str} = 0.1B$ и $0.3B$; прочность $\sigma_c = 60, 80$ и 120 МПа.

На рис. 5, I показано состояние выработок на момент начала моделирования без применения мероприятий по обеспечению устойчивости почвы выработки и с их применением.

Результаты исследований обрабатывали в виде графиков зависимостей смещений поднятия контура почвы от величины вертикального пригруза (рис. 6).

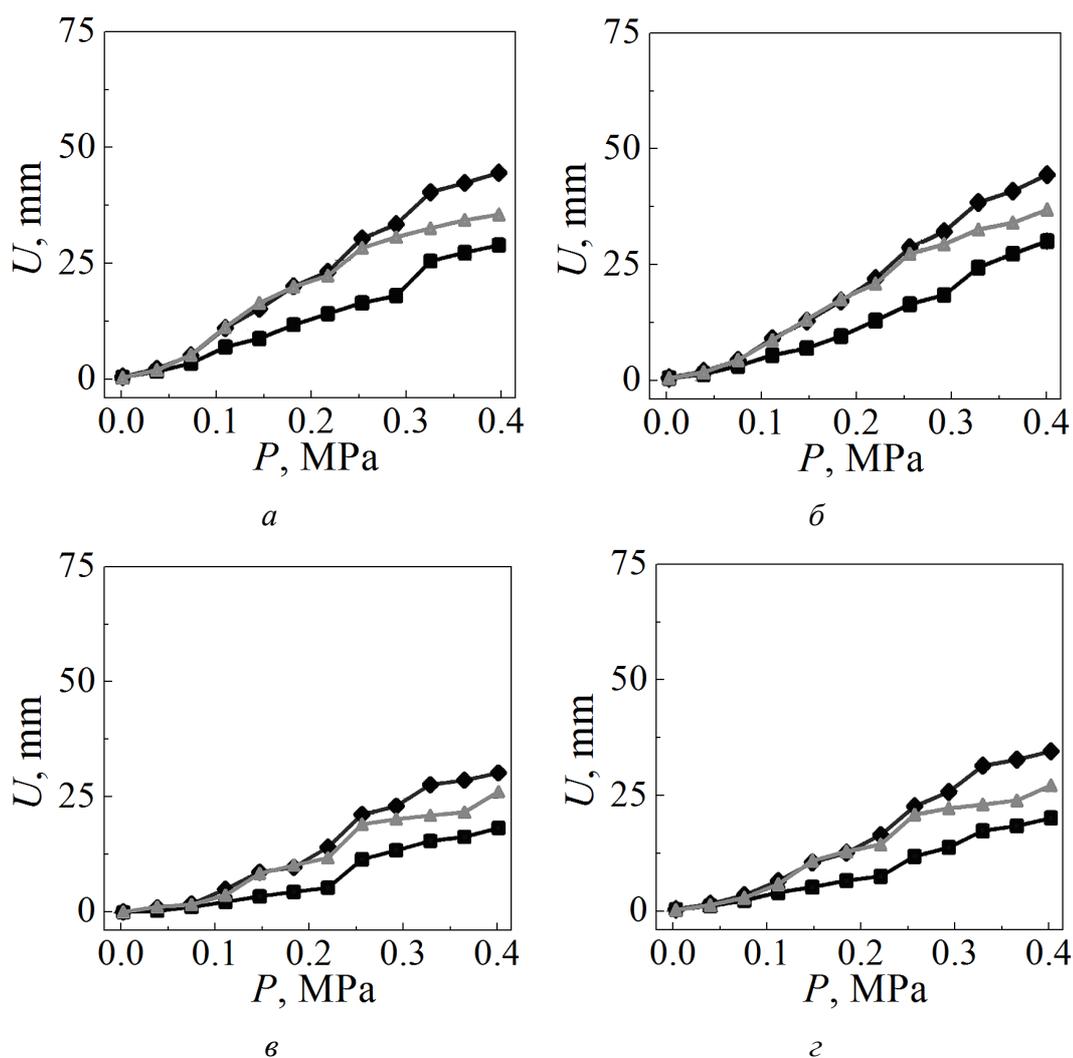


Рис. 6. Графики зависимостей смещений контура почвы U от величины пригруза P в моделях без прочного слоя (●) и со слоем породы прочностью: 60 (◆), 80 (▲) и 120 (■) МПа при различных параметрах прочного слоя: *a* – $m_{str} = 0.1B$, $h_{str} = 0.1B$; *б* – $m_{str} = 0.1B$, $h_{str} = 0.3B$; *в* – $m_{str} = 0.3B$, $h_{str} = 0.1B$; *г* – $m_{str} = 0.3B$, $h_{str} = 0.3B$

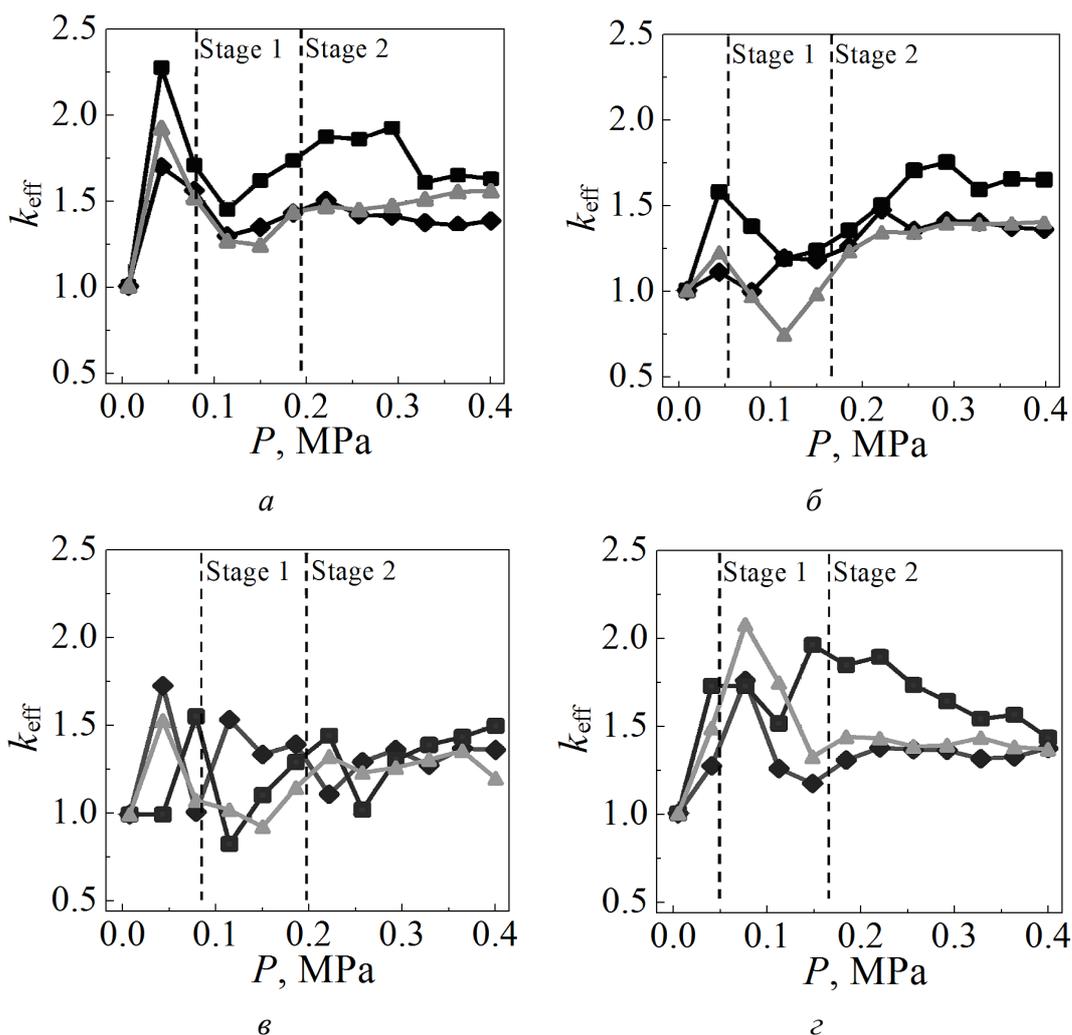


Рис. 7. Графики зависимостей коэффициента эффективности k_{eff} от величины при-
 груза P в моделях с прочным слоем ($\sigma_c = 60$ (\blacklozenge), 80 (\blacktriangle) и 120 (\blacksquare) МПа) со следую-
 щими параметрами: *a* – $m_{\text{str}} = 0.1B$, $h_{\text{str}} = 0.1B$; *б* – $m_{\text{str}} = 0.1B$, $h_{\text{str}} = 0.3B$; *в* – $m_{\text{str}} = 0.3B$,
 $h_{\text{str}} = 0.1B$; *з* – $m_{\text{str}} = 0.3B$, $h_{\text{str}} = 0.3B$

Сравнивая результаты исследования, приведенные на рис. 2 и 6, можно сделать вывод, что при использовании предлагаемого способа величина смещений поднятия контура почвы выработки снизилась в 1.5–2 раза. При этом путем разборки модели по срезам почвы было установлено, что без предложенных мероприятий при деформировании пород почвы происходит разлом прочного слоя за счет складкообразования нижележащих слоев 1 (см. рис. 5, II, а). После разлома прочного слоя охранное сооружение начинает воздействовать на породы почвы как штамп, провоцируя дальнейший рост их смещений. Создание системы «прочный слой–крепь усиления–рама основной крепи» стабилизировало и уменьшило процесс складкообразования 2 (рис. 5, II, б), вызванный нижележащими породами, что позволило сохранить целостность прочного слоя и обеспечило устойчивость пород почвы.

Эффективность предлагаемого способа оценивали с помощью коэффициента k_{eff} , определяемого по формуле

$$k_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{str}}^1}{U_{\text{str}}^2}, \quad (2)$$

где U_{str}^1 , U_{str}^2 – смещения пород почвы соответственно с применением мероприятий по обеспечению устойчивости почвы выработки и без их применения.

На рис. 7 представлены графики зависимостей коэффициента эффективности предлагаемого способа k_{eff} (2) от величины пригруза P с различными параметрами прочного слоя.

Приведенные результаты показывают, что на 1-м этапе деформирования величина смещений контура почвы при моделируемой прочности слоя $\sigma_c = 60$ МПа уменьшилась в 1.17–1.77 раза, при $\sigma_c = 80$ МПа – в 1.15–2.10 раза, при $\sigma_c = 120$ МПа – в 1.11–1.98 раза по сравнению с моделями без использования предложенного способа. На 2-м этапе деформирования величина смещений контура почвы при моделируемой прочности слоя $\sigma_c = 60$ МПа уменьшилась в 1.11–1.50 раза, при $\sigma_c = 80$ МПа – в 1.21–1.56 раза, при $\sigma_c = 120$ МПа – в 1.32–1.93 раза по сравнению с моделями без использования предложенного способа.

Из рис. 7 видно, что при $k_{\text{eff}} > 1$ предлагаемый способ эффективен. При этом для условий $m_{\text{str}} = 0.1B$, $h_{\text{str}} = 0.1B$ и $m_{\text{str}} = 0.3B$, $h_{\text{str}} = 0.3B$ эффект наблюдается на всех этапах деформирования пород почвы при всех величинах прочности. Для условий $m_{\text{str}} = 0.1B$, $h_{\text{str}} = 0.3B$ и $m_{\text{str}} = 0.3B$, $h_{\text{str}} = 0.1B$ при прочности слоя 60 МПа положительный эффект от способа наблюдается только на 2-м этапе деформирования. При $k_{\text{eff}} < 1$ отсутствие эффекта от применения данного способа объясняется нарушением сплошности прилегающих к контуру выработки пород почвы в процессе установки лежня и крепи усиления, что вызывает и увеличение смещений на 1-м этапе деформирования.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы.

1. Наличие прочного слоя в почве выработки и его параметры (толщина, прочность, глубина залегания от контура почвы) оказывают влияние на ее устойчивость. При этом наибольшее влияние оказывают толщина и прочность.

2. Деформирование пород почвы с прочным слоем осуществляется в два этапа: на 1-м происходит складкообразование слоев только над прочным слоем, на 2-м – изгиб и разлом прочного слоя и увеличение смещений пород почвы.

3. При наличии в почве выработки шириной B слоя прочных пород толщиной $0.1B$ наибольший положительный эффект от него достигается, если располагать выработку относительно вмещающих пород таким образом, чтобы прочный слой залегал как можно дальше от контура почвы, но не более $0.5B$.

4. При наличии в почве выработки слоя прочных пород толщиной $0.3B$ наибольший положительный эффект достигается, если располагать выработку относительно вмещающих пород так, чтобы прочный слой залегал как можно ближе к контуру почвы выработки.

5. С целью уменьшения смещений пород почвы необходимо осуществлять дополнительное внешнее воздействие на прочный слой для предотвращения его разлома до наступления 2-го этапа деформирования.

6. В качестве дополнительного мероприятия по обеспечению устойчивости почвы выработки было предложено создавать систему «прочный слой–крепь усиления–рама основной крепи» путем установки крепи усиления, контактирующей с прочным слоем через продольный лежень.

7. Применение разработанного способа оказывает наибольший эффект на 1-м этапе деформирования пород почвы, при этом смещения контура почвы уменьшаются в 1.5–2 раза по сравнению с моделями без проведения дополнительных мероприятий.

8. Оптимальными для применения разработанного способа являются следующие условия прочного слоя: толщина $m_{str} = 0.1B$, глубина залегания от контура почвы $h_{str} = 0.1B$, прочность слоя $\sigma_c = 60$ МПа и более.

1. *H.G. Brady*, Rock Mechanics: For underground mining, Springer Netherlands (2007).
2. *В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович и др.*, Экспериментальные исследования пучения пород почвы подготовительных выработок на пологих пластах Донбасса, ООО «Лізунов Пресс», Днепропетровск (2014).
3. *В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.Г. Черватюк*, Геомеханика нагружения крепи очистных и подготовительных выработок в слоистом массиве слабых пород, ООО «Лізунов Пресс», Днепропетровск (2012).
4. *В.Г. Снигур*, Уголь Украины № 7, 3 (2014).
5. *Г.В. Бабиюк*, Управление надежностью горных выработок, Світ книги, Донецк (2012).
6. *А.Л. Касьяненко*, Дис. ... канд. техн. наук, ДонНТУ, Донецк (2017).
7. *Н.Н. Касьян, Ю.А. Петренко, А.Л. Касьяненко*, Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», Алчевск № 14, 5 (2019).
8. *Г.И. Соловьев, А.Л. Касьяненко, Г.П. Стариков, Ю.А. Петренко*, Научный вестник НИИГД «Респиратор» № 4, 105 (2019).
9. Пат. 99028 Україна, МПК⁸ E21D 11/14. Спосіб підтримання гірничих виробок, Г.І. Соловйов, А.Л. Касьяненко, № а201015254; заявл. 25.06.2012; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.
10. Пат. 103110 Україна, МПК⁸ E21D 11/00, E21D 20/00, E21C 41/18. Спосіб охорони виїмкових виробок у шаруватих породах підосви, схильних до здимання, Г.І. Соловйов, А.Л. Касьяненко, Е.В. Поляков, № а2012 03091; заявл. 16.03.2012; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17.

Yu.A. Petrenko, Ya.V. Shazhko, G.I. Solovyov, A.L. Kasyanenko

FEATURES OF DEFORMATION OF SOIL ROCKS OF DEEP MINE WORKINGS IN THE PRESENCE OF A STRONG LAYER IN THE TEXTURE

In the laboratory conditions, the simulation of the deformation process of soil rocks in the presence of a strong layer in the texture was performed on equivalent materials. The physical and mechanical properties of the soil layer were evaluated. It is established that

the deformation of soil rocks with a strong layer occurs in two stages. At the 1st stage, folding of layers occurs only above the strong layer. The 2nd stage is characterized by a bend and fracture of the strong layer and an increase in displacements of soil rocks. If the soil excavation zone is of width B and the existing layer of durable rocks is of thickness $0.1B$, the greatest positive effect is achieved in the case when the excavation zone is positioned within the host rocks, so that the solid layer is located as far as possible from the contour of the soil, but no more than $0.5B$. When the layer thickness is $0.3B$, the solid layer should be located as close as possible to the contour of the soil excavation.

Keywords: mining, soil rocks, solid layer, equivalent materials, similarity criterion, hard-core reinforcement support

Fig. 1. State of the soil in the excavation zone at the end of modeling period at varied parameters of the solid layer: $a - \sigma_c = 80$ MPa, $m_{str} = 0.1B$, $h_{str} = 0.1B$; $\bar{\sigma} - \sigma_c = 80$ MPa, $m_{str} = 0.3B$, $h_{str} = 0.3B$; $\bar{\sigma} - \sigma_c = 120$ MPa, $m_{str} = 0.1B$, $h_{str} = 0.3B$; $\bar{\sigma} - \sigma_c = 120$ MPa, $m_{str} = 0.3B$, $h_{str} = 0.1B$

Fig. 2. Dependence of the soil contour shift U vs loading P in the models without a solid layer (\bullet) and with a rock layer of strength $\sigma_c = 60$ (\blacklozenge), 80 (\blacktriangle) and 120 (\blacksquare) MPa at varied parameters of a solid layer: $a - m_{str} = 0.1B$, $h_{str} = 0.1B$; $\bar{\sigma} - m_{str} = 0.1B$, $h_{str} = 0.3B$; $\bar{\sigma} - m_{str} = 0.3B$, $h_{str} = 0.1B$; $\bar{\sigma} - m_{str} = 0.3B$, $h_{str} = 0.3B$

Fig. 3. Dependence of the coefficient of the solid layer effect on the shift of the soil contour k_U on the loading P in the models with a layer of strength of 60 (\blacklozenge), 80 (\blacktriangle) and 120 (\blacksquare) MPa at varied parameters of the solid layer: $a - m_{str} = 0.1B$, $h_{str} = 0.1B$; $\bar{\sigma} - m_{str} = 0.1B$, $h_{str} = 0.3B$; $\bar{\sigma} - m_{str} = 0.3B$, $h_{str} = 0.1B$; $\bar{\sigma} - m_{str} = 0.3B$, $h_{str} = 0.3B$

Fig. 4. Scheme of the proposed method: 1 – frame of the basic support, 2 – upper part of the prop, 3 – lock of the prop, 4 – bottom of the prop, 5 – longitudinal groove, 6 – longitudinal timber in the groove, 7 – soil of the excavation zone, 8 – solid layer of the soil rock

Fig. 5. General state of the excavation zone in the form of model sections at the beginning (I) and at the end of modeling (II) without measures providing the soil stability in the excavation zone (a) and with them ($\bar{\sigma}$): I: 1 – control timber support contacting with the solid layers; II – folding of the soil rocks: 1 – bottom layers, 2 – external impact

Fig. 6. Dependences of the soil shift U on the loading P in the models without a solid layer (\bullet) and with a layer of strength: 60 (\blacklozenge), 80 (\blacktriangle) and 120 (\blacksquare) MPa at varied parameters of the solid layer: $a - m_{str} = 0.1B$, $h_{str} = 0.1B$; $\bar{\sigma} - m_{str} = 0.1B$, $h_{str} = 0.3B$; $\bar{\sigma} - m_{str} = 0.3B$, $h_{str} = 0.1B$; $\bar{\sigma} - m_{str} = 0.3B$, $h_{str} = 0.3B$

Fig. 7. Dependences of the efficiency coefficient k_{eff} on the loading P in the models with a solid layer ($\sigma_c = 60$ (\blacklozenge), 80 (\blacktriangle) and 120 (\blacksquare) MPa) at the varied parameters: $a - m_{str} = 0.1B$, $h_{str} = 0.1B$; $\bar{\sigma} - m_{str} = 0.1B$, $h_{str} = 0.3B$; $\bar{\sigma} - m_{str} = 0.3B$, $h_{str} = 0.1B$; $\bar{\sigma} - m_{str} = 0.3B$, $h_{str} = 0.3B$