

УДК 622.831.312 : 622.862.3:

Яланский А.А., д-р. техн. наук, ст. науч. сотр.
Слащев А.И., канд. техн. наук, мл. науч. сотр.
Селезнев А.М., магистр
(ИГТМ НАН Украины)

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ БОРЬБЫ С ПУЧЕНИЕМ
ПОЧВЫ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ***

Яланський А.О., д-р. техн. наук, ст. наук. співроб.
Слащов А.І., канд. техн. наук, мол. наук. співроб.
Селезньов А.М., магістр
(ІГТМ НАН України)

**ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ БОРОТЬБИ ЗІ ЗДИМАННЯМ
ПІДОШВИ В ГІРНИЧИХ ВИРОБКАХ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ
ЕЛЕМЕНТІВ**

Yalanskiy A.A., D.Sc. (Tech.), Senior Researcher
Slashchev A.I., Ph.D. (Tech.), Junior Researcher
Seleznev A.M., M.S. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

**STUDY OF METHODS FOR CONTROLLING THE FLOOR
SWELLING IN THE MINE WORKINGS WITH THE HELP OF
FINITE-ELEMENT METHODS**

Аннотация. В статье представлены результаты исследований по разработке новых способов борьбы с пучением пород почвы в горных выработках. Показано, что существующие способы борьбы с этим явлением для различных горно-геологических условий реализованы только частично, их эффективность низкая. Для установления доминантных факторов, которые влияют на снижение пучения почвы выработок, проведено моделирование методом конечных элементов разработанных способов борьбы с пучением и выполнен их сопоставительный анализ. С использованием современного программного обеспечения проведена оценка сценариев развития геомеханических процессов с учётом особенностей деформирования геологической среды и способов поддержания горных выработок. Установленные параметры напряжённо-деформированного состояния пород позволили обосновать преимущества новых способов борьбы с пучением с применением технологий крепления на основе сталеполимерных анкеров.

Ключевые слова: пучение почвы, моделирование напряжённо-деформированного состояния, породный массив, анкерное крепление, метод конечных элементов.

Известно, что пучение почвы горных выработок – это выдавливание пород, обусловленное действием горного давления. Оно характеризуется увеличением объёма пород, их набуханием, растёт с увеличением влажности и содержания в них тонких фракций глинистых частиц, а также с увеличением притоков воды техногенного или естественного характера. При выдавливании пород пучение тем больше, чем слабее породы почв по сравнению с породами в боках и кровле выработки. При незначительной разнице свойств пород происходит их деформи-

* © Яланский А.А., Слащев А.И., Селезнев А.М., 2017

рование по всему периметру выработки. Величина смещений пород в любом случае зависит от соотношения прочности пород к возникающим напряжениям. При залегании в почве водонепроницаемых глинистых пород пучение в виде набухания встречается реже, чем в виде выдавливания. Набухание горных пород приводит к повышению их пластических свойств.

Как показывают исследования, пучат все разновидности глинистых пород, причём наиболее склонен к пучению аргиллит, менее – песчаник. Отмечается усиление пучения с увеличением мощности слабых пород. Например, при повышении мощности аргиллита до 5 м пучение возрастает от 0,2 м до 2 м в год, дальнейшее увеличение мощности практически не влияет на пучение. Одним из основных факторов, определяющих интенсивность пучения пород, является проведение очистных работ, которое влияет на напряжённо-деформированное состояние породного массива, окружающего выработки. Способ проходки выработок существенного влияния на устойчивость почвы не оказывает. При буровзрывном способе проведения происходит более интенсивная разгрузка породного массива и уже на расстоянии (60-70) м от забоя породный массив приходит в состояние устойчивого равновесия. При комбайновой проходке разгрузка массива проходит более медленно и уравнивается на расстоянии (90-100) м. При этом пучение практически отсутствует. Использование замкнутых крепей замедляет темпы проходки выработки, но не всегда обеспечивает устойчивость почвы и вызывает необходимость привлечения дополнительных (25-30 %) материальных и трудовых ресурсов, как на крепление, так и на ремонт [1].

Основные методы исследования пучения: аналитические, натурные наблюдения и моделирование. Аналитические методы базируются на гипотезе выдавливания пород из-под штампов с использованием теории пластичности и ползучести. В выработках, находящихся под влиянием очистных работ, где пучение достигает трёх метров и более, применяют вероятностно-статистические методы прогноза пучения на основе экспериментально-аналитических исследований. Уменьшение вредного влияния пучения осуществляют путём снижения напряжений в массиве пород или его упрочнения. Упрочнение пород почвы затрудняет последующий её подрыв, поэтому его применение ограничено.

Поскольку для большинства горно-геологических условий пучение определяется в основном напряжённо-деформированным состоянием массива пород, то остановимся на расчётах и моделировании пучения методом конечных элементов. Для исследования процессов разрушения породного массива вокруг горных объектов и моделирования возможных предельных геотехнических ситуаций использована упругопластическая модель среды с разупрочнением за пределом прочности. Основные положения численной реализации модели заключаются в следующем. В основе алгоритма решения упругопластической задачи объединены две теории – теория упругости и теория предельного состояния [2-5]. Условия совместности деформаций для сплошной среды:

$$\varepsilon_x = \frac{du_x}{dx}, \quad \varepsilon_y = \frac{du_y}{dy}, \quad \gamma_{xy} = \frac{du_x}{dy} + \frac{du_y}{dx}, \quad (1)$$

где ε_x , ε_y , – полные относительные деформации по осям x , y ; u_x , u_y – осевые перемещения; γ_{xy} – деформации сдвига.

Связь между напряжениями и деформациями в упругой среде, представляется в виде:

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \mu^2} \left(\frac{du_x}{dx} + \mu \frac{du_y}{dy} \right); \quad \sigma_y = \frac{E}{1 - \mu^2} \left(\frac{du_y}{dy} + \mu \frac{du_x}{dx} \right), \quad (2)$$

где E – модуль упругости, Па; μ – коэффициент Пуассона.

Условия совместности деформаций и напряжений имеют вид:

$$\frac{d^2(\sigma_x - \mu\sigma_y)}{dx^2} + \frac{d^2(\sigma_y - \mu\sigma_x)}{dy^2} = 2(1 + \mu) \frac{d^2\tau_{xy}}{dxdy}, \quad (3)$$

где τ_{xy} – касательная компонента тензора напряжений;

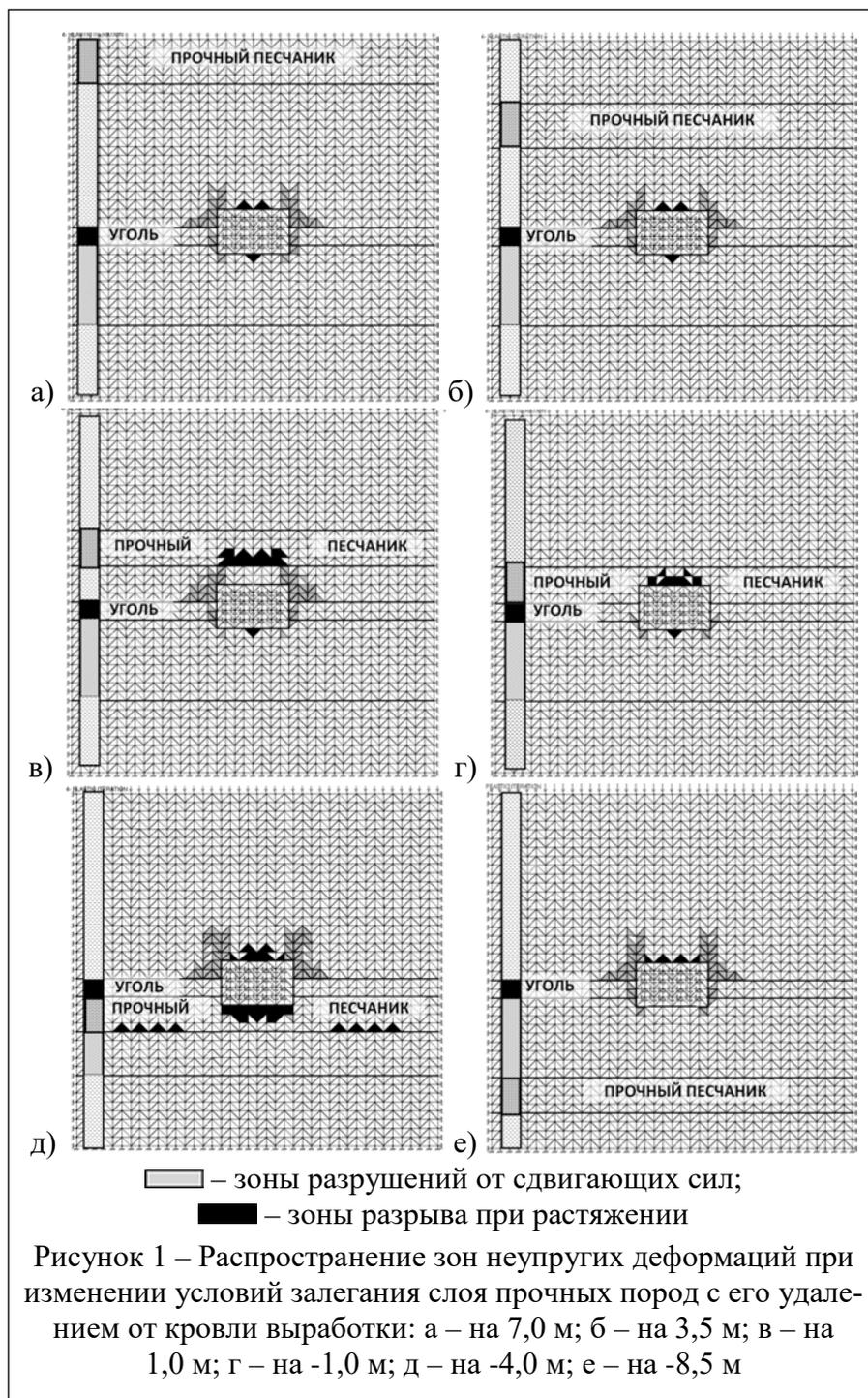
Если напряжения в элементе расчётной схемы не превышают предельного уровня, связь напряжений и деформаций рассчитывается как линейная. Решение достигается итерационным процессом повторения упругих решений с сохранением исходной матрицы жёсткости системы. Предельные напряжения в области сжатия определяются по критерию Кулона-Мора. Используется значение остаточной прочности $\sigma_1^{ост} = \sigma_1/3$. Предел прочности породы на растяжение принят $C/5$ и в программном комплексе рассчитывается автоматически.

Расчёты проведены на вычислительном комплексе «GEO-RS» (разработка ИГТМ НАН Украины [4-7]. Новая архитектура информационной системы, реализованная в новой версии «GEO-RS» v 8.2 позволила существенно повысить скорость и точность обработки исходных данных и расчёта параметров геомеханических процессов [7, 8]. Для описания физико-механических свойств пород использованы усреднённые показатели модуля упругости E , коэффициента Пуассона ν , объёмного веса γ , сцепления C и угла внутреннего трения φ для всех элементов каждого типа пород [9]. Устойчивые упругопластические решения с учётом остаточной прочности для осадочных горных пород обычно достигаются за 50-100 циклов вычислений. Число циклов итерации указывается в выводимой информации. Если итерационный процесс не сошёлся за 100 циклов, то надежды на сходимость в дальнейшем нет, и программа прекращает работу.

Исследования проведены на основе автоматизированных расчётных схем слоистой структуры, которые разбиты на 2500 или 6400 треугольных элементов, рис. 1. Сначала рассмотрены варианты, когда прочные слои песчаника различной мощности находятся в глинистых породах на разных расстояниях от почвы угольного пласта или его кровли. Рассмотрена устойчивость горных выработок в слабых и обводнённых породах (свойства задаются при моделировании). Наличие в массиве прочного газоносного слоя песчаника во многих случаях представляет опасность не только как источник динамических подвижек пород при его хрупком разрушении, но и как источник выделения газа метана в выработку.

На схемах, показанных на рис. 1, а, б, крепкий песчаник сдерживает и распределяет давление вышележащих пород (расстояние определялось от кровли выработки до почвы слоя песчаника). Так как слой песчаника на этих схемах не

разрушен, его роль можно приравнять к функции балки с заземлёнными концами. Поэтому кровля выработки испытывает нагрузку, в основном, от веса раздробленных кусков более слабого алевролита. То есть, песчаник, расположенный над выработкой, рис. 1, а, б, выполняет функцию защитного пласта, снижая величины опорного давления, зоны сдвиговых и разрывных деформаций в кровле и боках выработки. На схеме, показанной на рис. 1, в, слой песчаника расположен в зоне влияния выработки. Он практически полностью воспринимает на себя нагрузку вышележащих пород в кровле выработки, поэтому её кровля не разрушена и находится в защищённой зоне. Схема, показанная на рис. 1, г, отличается наименьшими деформациями сдвига и наибольшими разрывными деформациями кровли выработки. Это происходит вследствие того, что выработка проведена в более прочном, но менее пластичном слое, состоящем из песчаника и угля. При всех других вариантах заложения выработки нижний слой алевролита, расположенный вблизи выработки над пластом угля, разрушается на ширину до трёх метров вследствие его раздавливания о более прочный уголь. Прочный песчаник, расположенный в глубине почвы выработки, в отличие от слабого арсилита также является защитным слоем для выработки, предотвращающим пучение почвы, рис. 1, д, е.



Способы борьбы с пучением пород почвы в горных выработках, с точки зрения основных причин его возникновения, можно разделить на способы:

Способы борьбы с пучением пород почвы в горных выработках, с точки зрения основных причин его возникновения, можно разделить на способы:

борьбы с вынужденным увлажнением пород; повышения прочности слабых пород почвы; снижения нагрузки на почву выработки от горного давления, а также создания локальных пустот в почве для обеспечения дополнительной разгрузки массива от напряжений. Отдельно выделяются способы борьбы с внезапными динамическими поднятиями прочных пород почвы, которые связаны с повышенной газоносностью подстилающего породного массива и принадлежат к газодинамическим явлениям. Разработаны два способа, в основе которых лежит нарезание щелей в почве выработки (пат. № 94762 и № 96742).

Способ борьбы с пучением почвы горных выработок (пат. № 94762) предполагает нарезание в почве щелей, отличающийся тем, что щели нарезают между боковыми стенками выработки под углом к боковым стенкам участками, которые повторяются в продольном направлении выработки. Другой способ отличается тем, что один из концов каждого следующего участка щели размещают напротив середины предыдущего участка в перпендикулярном направлении выработки.

Способ борьбы с пучением почвы горных выработок (пат. № 96742) предполагает нарезание в почве продольных щелей и формирование в щелях продольных монолитных заполнений, отличающийся тем, что между продольными щелями нарезают поперечные щели, в которых формируют поперечные монолитные заполнения с присоединением продольных монолитных заполнений.

Проведенные расчёты показали, что нарезание щелей в почве уже изначально только увеличивает размеры незакреплённого пространства, что резко ухудшает начальные горно-геологические условия. Заполнение щелей упругим податливым материалом частично улучшает обстановку, но требует весьма тщательного подбора его свойств. В то же время, установка хотя бы одного ряда сталеполлимерных анкеров в бока выработки возле её кровли или почвы снижает смещения почвы выработок, поскольку это простое стандартное мероприятие позволяет перенести зону опорного давления в сторону от выработки в глубину массива, рис. 2.

Поэтому разработан способ борьбы с пучением почвы горных выработок (пат. № 96311), который предусматривает установку анкерного крепления. Способ отличается тем, что используется анкерное стяжное крепление, которое устанавливается в боках выработки с размещением концов анкеров возле почвы и

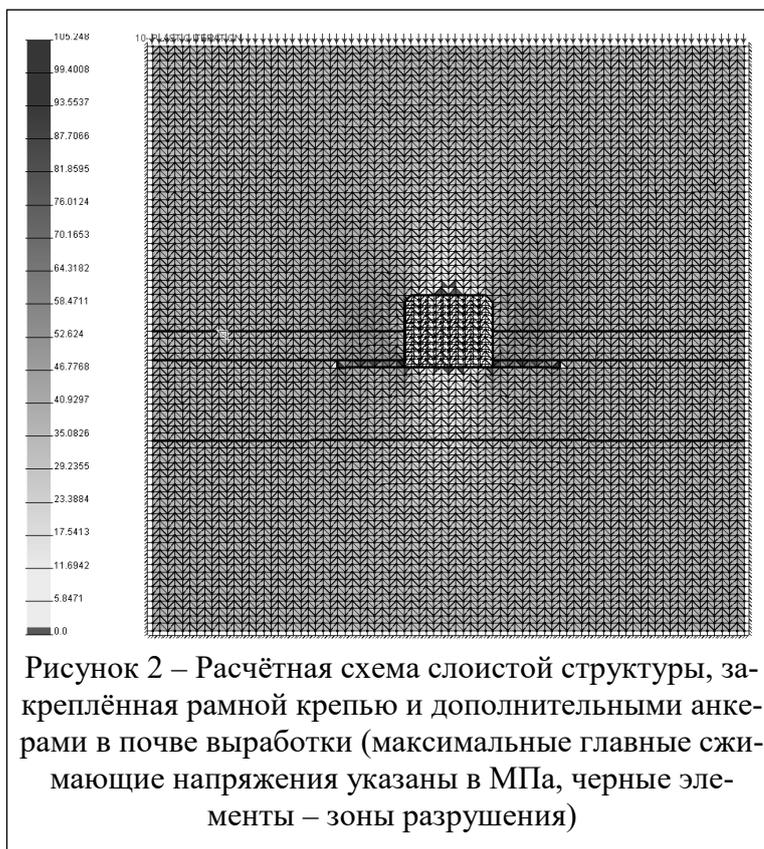


Рисунок 2 – Расчётная схема слоистой структуры, закреплённая рамной крепью и дополнительными анкерами в почве выработки (максимальные главные сжимающие напряжения указаны в МПа, черные элементы – зоны разрушения)

кровли. Необходимо также учитывать, что на участках, имеющих понижение, на почве пласта возможно постоянное скопление большого количества воды. В этой связи, не следует применять металлические анкеры с замками распорного типа. Опыт показывает, что вода, попадая в шпур, пробуренные для установки анкеров, размягчает породу на контакте с замками крепи, в результате чего анкеры теряют несущую способность. В таких условиях целесообразно применять сталеполлимерные анкеры, поскольку в этом случае доступ воды в шпур будет практически невозможен. Следует помнить, что эффективность применения таких анкеров непосредственно в почве выражается в уменьшении интенсивности пучения всего на 10 %, а наличие сталеполлимерных анкеров вызывает дополнительные трудности по проведению работ при подрыве почвы. Щелевая разгрузка почвы посредством нарезания одной или нескольких параллельных щелей также позволяет снизить абсолютную величину пучения почвы лишь на 10-15 %. Это не окупает затраты, вложенные в создание щелей. Щели, пройденные в углах почвы выработки или на расстоянии ближе 0,5 м от стоек выработки, являются причиной опускания стоек рамной поддерживающей крепи в почву выработки, то есть приводят к потере её сечения. Удаление почвенных щелей на расстояние большее 0,5 м от боков выработки приводит к образованию блоков большой длины, имеющих не менее трёх поверхностей обнажения, что способствует интенсификации процессов разрушения пород, их размоканию и набуханию.

Более эффективным приёмом для борьбы с пучением почвы оказалась нарезка щелей в боках выработки. Разработан «Способ борьбы с пучением почвы горных выработок» (пат. № 97445), который предполагает нарезание в массиве продольных щелей и формирование в щели монолитного заполнения, отличающийся тем, что продольную щель нарезают хотя бы в одном из боков выработки, а монолитное заполнение формируют в щели с образованием открытой полости между монолитным заполнением и низом щели. Способ также отличается тем, что продольную щель нарезают наклонно от бока выработки вглубь массива и что открытую полость выполняют с расширением щели. Однако данный способ технологически весьма сложен в исполнении.

Менее трудоёмким в исполнении является «Способ борьбы с пучением почвы горных выработок» (пат. № 98480), который предполагает нарезание в массиве продольной щели и формирование в щели монолитного заполнения, отличающийся тем, что нарезают две параллельные щели, хотя бы на одном из боков выработки, монолитное заполнение формируют в щели, которая в будущем будет верхней, а после этого нарезают нижнюю щель на глубину меньшую, чем глубина верхней щели и на расстоянии от монолитного заполнения, которое меньше высоты нижней щели.

Опыт проведения, поддержания и эксплуатации подготовительных горных выработок показывает, что технологическая операция установки анкеров менее трудоёмкая, чем проведение и формирование монолитного заполнения в щели. Поэтому разработаны три способа борьбы с пучением на основе анкерного крепления и нарезания продольных щелей в боках выработок. Способ борьбы с пучением почвы горных выработок (пат. № 98407) предусматривает установку анкеров, отличается тем, что анкера устанавливают хотя бы в одном боку выработки

в ряд вдоль длины выработки, а под анкерами нарезают продольную щель на глубину меньшую, чем длины анкеров, рис. 3.

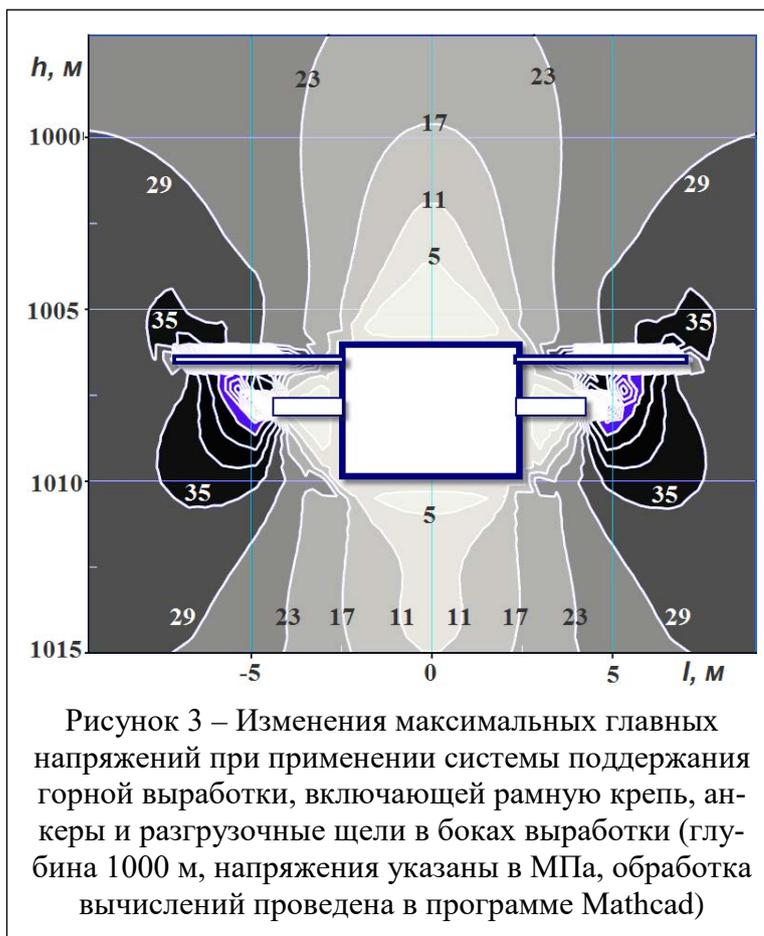
«Способ борьбы с пучением почвы горных выработок» (пат. № 99606) предполагает нарезание продольной щели хотя бы в одном боку выработки и установку анкеров. Способ отличается тем, что анкера устанавливают на днище щели с промежутком между ними и низом щели, а между анкерами и верхом щели формируют монолитное заполнение, например, в виде плит.

«Способ борьбы с пучением почвы горных выработок» (пат. № 100829) предполагает хотя бы на одном боку

выработки нарезание продольной щели, размещение в ней плит, установку анкеров. Способ отличается тем, что анкера устанавливают после размещения плит в щели выше плит с заведением внутренних концов анкеров в зону массива, которая не разрушена, а после этого нижние концы анкеров соединяют стяжками с внешними концами плит и подтягивают последние стяжками вверх. Как с технологической точки зрения, так и результаты математического моделирования показывают, что наиболее эффективным является «Способ борьбы с пучением почвы горных выработок» (пат. № 98407).

Опыт применения скважинной и щелевой разгрузки показывает, что можно ожидать уменьшения пучения на (20-40) %. Однако работы по их образованию являются трудоёмкими, поэтому данные способы следует применять лишь при наличии в боках выработки слабых пластов угля или пород. Резание породной толщи боков выработки щелями способствует снижению действующих напряжений, что уменьшает интенсивность пучения, но при этом наблюдается значительная потеря сечения выработки.

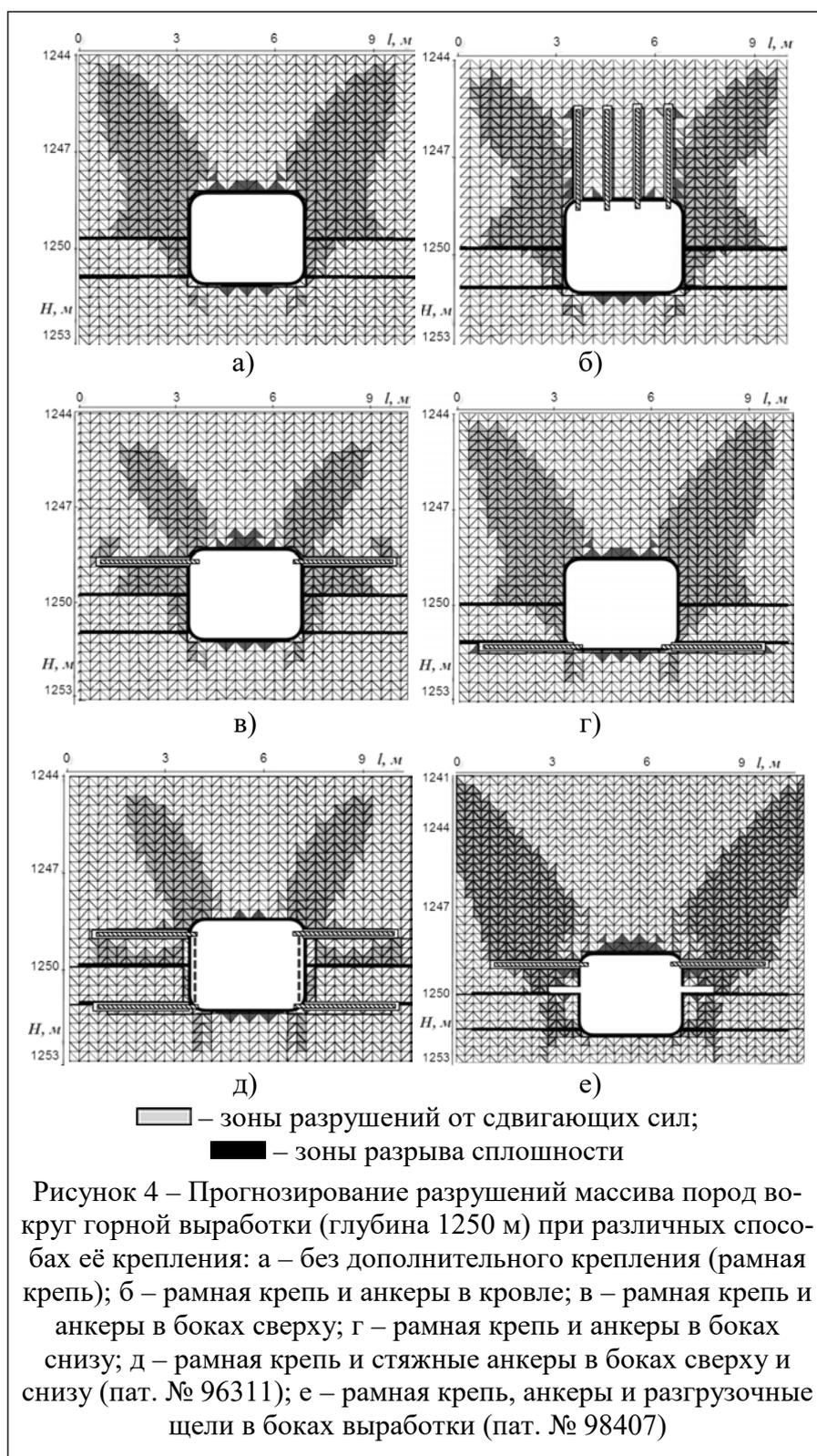
В качестве примера рассмотрим сценарий изменения напряжённо-деформированного состояния пород и влияния его на устойчивость горной выработки в целом для условий применения анкерного крепления и нарезки разгрузочных щелей в боках выработки, проведенной на глубине 1250 м, рис. 4 (локальные вырезки из моделей). Первоначально для сравнения влияния разных способов крепления на устойчивость породного массива был проведен расчёт напряжённо-деформированного состояния пород вокруг выработки без дополнительного крепления, рис. 4, а, после чего выполнена серия расчётов при размещении анкеров в



кровле, боках и возле почвы выработки. Поскольку разрушения пород в верхней части выработки большие, то анкеры, расположенные по бокам, но вверху выработки, оказали на состояние вмещающих пород существенное влияние (рис. 4, в). Вместе с тем, анкеры, расположенные по бокам выработки, но возле почвы, в зоне наименьших деформаций, картину разрушений практически не изменяют (рис. 4, а и г).

Расположение анкеров по бокам выработки возле кровли (в зоне больших деформаций) приводит к уменьшению неупругих сдвиговых деформаций над анкерами на 20-30 % и смещений кровли на 10 %. Зона разрывных нарушений по объёму не изменяется, но углубляется и концентрируется в центре кровли, при этом состояние почвы выработки не улучшается. Анкеры, установленные по нижним бокам выработки (в зоне наименьших деформаций) менее эффективны, но их применение снижает разрушения от сдвигающих сил, то есть снижает пучение за счёт выдавливания почвы.

Однако, несмотря на кажущуюся бесполезность применения в данных условиях анкеров в нижней части боков выработки, при одновременном добавлении анкерной крепи в верхних частях боков выработки напряжённо-деформированное состояние её кровли и боков кардинально улучшается, рис. 4, д. Этот



Однако, несмотря на кажущуюся бесполезность применения в данных условиях анкеров в нижней части боков выработки, при одновременном добавлении анкерной крепи в верхних частях боков выработки напряжённо-деформированное состояние её кровли и боков кардинально улучшается, рис. 4, д. Этот

способ оказывается эффективным в плане повышения устойчивости кровли путём крепления боков выработок. Кроме того, происходит дополнительное уменьшение смещений кровли (относительно крепления без стяжки, рис. 4, в, г) ещё на (5-15) %, неупругих сдвиговых деформаций – на 10 %. Зона разрывных нарушений в кровле сокращается в три раза, а состояние почвы выработки не изменяется. Для улучшения состояния почвы выработки, оставив анкера возле кровли с целью её укрепления, дополнительно в боках над угольным пластом были смоделированы разгрузочные щели, рис. 4,е.

Разгрузочные щели способствуют смещению максимумов напряжений вглубь массива в нижней части выработки. При этом в 2,5 раза увеличилась нагрузка на анкера в верхней части выработки, что кардинально улучшает состояние почвы, но ухудшает состояние кровли. Исчезла зона разрывных нарушений в почве, смещение почвы стало близким к нулевым. Однако зона разрывных нарушений в кровле выросла до 70 %, зона неупругих сдвиговых деформаций увеличилась до 40 %. В результате состояние почвы прогнозируется хорошее, но, вместе с тем, возникает необходимость в дополнительном креплении кровли.

Таким образом, известные способы борьбы с пучением пород применимы в узких пределах горно-геологических условий и, если и решают задачу разгрузки массива в почве выработки, то одновременно активизируют разрушение пород непосредственной кровли. Чаще всего они технически сложны, энерго- и материалоёмки и, в конечном итоге, не оправдывают вложенных в них средств. Это приводит к тому, что в практике разработки угольных месторождений основным способом борьбы с пучением пород остаётся их подрывка, то есть, ликвидируются только последствия явления, а не его причины. Более перспективны способы борьбы с пучением на основе сталеполлимерной анкерной крепи высокой несущей способности. Это связано с тем, что технологически проще и экономически дешевле добавить в уже существующий паспорт крепления один или несколько рядов сталеполлимерной анкерной крепи в бока выработки, чтобы перенести нагрузку на значительное расстояние от её контура. На распределение напряжений вокруг горной выработки существенное влияние имеет наличие прочных слоёв песчаника в её кровле и почве, конкретные параметры их залегания, с учётом которых необходимо определять способы поддержания выработок в рабочем состоянии. Паспорт крепления выработок необходимо рассчитывать только для конкретных горно-геологических условий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаенко, Н.Н. Борьба с пучением пород почвы горных выработок шахт Карагандинского бассейна / Н.Н. Николаенко, М.А. Байкеджин, Р.И. Загурская // Изд-во вузов. – Горн. ж., 1988, №4, с. 18-21.
2. Галагер, Р. Метод конечных элементов. Основы: пер. с англ. / Р. Галагер. – М.: Мир, 1984. – 428 с., ил.
3. Zienkiewicz, O.C. (1971) *The Finite Element Method in Engineering Science*, McGraw-Hill, New York.
4. Моделирование и контроль динамических процессов в задачах оценки состояния геотехнических систем : монография / Н.А. Иконникова, В.И. Корсун, А.И. Слащев и др. ; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Днепропетровск: НГУ, 2015. – 279 с.
5. Булат, А.Ф. Разработка компьютерных систем математического моделирования геомеханических процессов / А.Ф. Булат, И.Н. Слащев // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов /

ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 99. – С. 16-27.

6. Математическое моделирование в задачах оценки эффективности и безопасности горных работ: монография / М.Ю. Иконников, Ю.Р. Иконников, Е.А. Слащева и др. ; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Днепропетровск: НГУ, 2015. – 215 с.

7. Слащев, А.И. Повышение вычислительной эффективности алгоритма визуализации результатов решения сложных геомеханических задач / А.И. Слащев // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 90. – С. 142-149.

8. Шевченко, В.Г. Обоснование параметров и разработка информационной системы безопасности ведения подземных горных работ с учетом геомеханических факторов / В.Г. Шевченко, А.И. Слащев / Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2016. – Вып. 128. – С. 70-78. (на англ.)

9. Обоснование исходных параметров для моделирования геомеханических процессов в задачах оценки безопасности поддержания горных выработок / А.А. Яланський, И.А. Сапунова, А.И. Слащев, Л.А. Новиков, // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 119. – С. 282-295.

REFERENCES

1. Nikolayenko, N.N. (1988), “Controlling the floor swelling in the mine workings of the mines of the Karaganda basin”, *Mining Journal*, vol. 4, pp. 18-21.

2. Gallager, R. (1984), *Metod konechnykh elementov. Osnovy* [Finite Element Analysis. Fundamentals], Translated by Kartvelishvili, V.M., in Banichuk, N.V. (ed.), Nauka, Moscow, RU.

3. Zienkiewicz, O.C. (1971) *The Finite Element Method in Engineering Science*, McGraw-Hill, New York.

4. Ikonnikova, N.A., Korsun, V.A., Slashchev, A.I., Yalanskiy, Aleks.A. and Yalanskiy, A.A. (2015), *Modelirovaniye i kontrol dinamicheskikh protsessov v zadachakh otsenki sostoyaniya geotekhnicheskikh sistem* [Mathematical modeling in solving problems of evaluating the efficacy and safety of mining operations], Natsionalnyy gornyy universitet, Dnipropetrovsk, UA

5. Bulat, A.F. and Slashev, I.N. (2012), “Development of computer systems mathematical modeling geomechanical processes”, *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 99, pp. 16-27, UA.

6. Ikonnikov, M.YU., Ikonnikov, YU.R., Slashcheva, Ye.A., Slashchev I.N. and Yalanskiy A.A. (2015), *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh otsenki effektivnosti i bezopasnosti gornykh rabot* [Mathematical modeling in solving problems of evaluating the efficacy and safety of mining operations], Natsionalnyy gornyy universitet, Dnipropetrovsk, UA.

7. Slashchev, A.I. (2010), “Increasing computational efficiency of the visualization algorithm for the solution of difficult geomechanical tasks”, *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 90, pp. 142-149, UA.

8. Shevchenko, V.G. and Slashchev, A.I. (2016), “Validation of parameters and design of information system on the underground mining job safety with taking into account geomechanical factors”, *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 128, pp. 70-78, UA.

9. Yalanskiy, A.A., Sapunova, I.O., Slashchev, A.I. and Novikov, L.A. (2014), “Justification of the initial parameters for geomechanical processes modeling in problems of safety assessment of mine workings maintenance”, *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 119, pp. 282-295, UA.

Об авторах

Яланский Анатолий Александрович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник в отделе Механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, anat.yalanskiy@gmail.com

Слащев Антон Игоревич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, AISlashchov@nas.gov.ua

Селезнев Анатолий Михайлович, магистр, ведущий специалист в отделе механики горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, office.igtm@nas.gov.ua

About the authors

Yalanskiy Anatoliy Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Senior Researcher, Principal Researcher in Rock Mechanics Department, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, anat.yalanskiy@gmail.com

Slashchev Anton Igorevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Junior Researcher, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics, National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, AISlashchov@nas.gov.ua

Seleznev Anatoliy Mikhaylovich, Master of Science, Principal Specialist in Rock Mechanics Department, M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics. National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnepropetrovsk, Ukraine, office.igtm@nas.gov.ua

Анотація У статті представлені результати досліджень з розробки нових способів боротьби зі здиманням порід підшоши в гірничих виробках. Показано, що існуючі способи боротьби з цим явищем для різних гірничо-геологічних умов реалізовані тільки частково, їх ефективність низька. Для встановлення домінуючих чинників, які впливають на зниження здимання підшоши виробок, проведено моделювання методом скінченних елементів розроблених способів боротьби зі здиманням і виконано їх порівняльний аналіз. З використанням сучасного програмного забезпечення проведена оцінка сценаріїв розвитку геомеханічних процесів з урахуванням особливостей деформування геологічного середовища та способів підтримання гірничих виробок. Встановлені параметри напружено-деформованого стану порід дозволили обґрунтувати переваги нових способів боротьби зі здиманням із застосуванням технологій кріплення на основі сталеполімерних анкерів.

Ключові слова: здимання підшоши виробок, моделювання напружено-деформованого стану, породний масив, анкерне кріплення, метод скінченних елементів.

Abstract. The article presents the results of research on the development of new methods for controlling the floor swelling in the mine workings. It is shown, that the existing methods for controlling the floor swelling depending on various geological conditions are only partially realized, and their efficiency is low. For the purpose of establishing the dominant factors, which would decrease the floor swelling, the newly developed methods were simulated with the help of method of finite elements, and the results were compared. Special software was developed, which estimated different scenarios of geomechanical processes dynamics with taking into account the particularities of geological environment deformations and different ways of supporting the mine workings. The established parameters of the rocks allowed validating advantages of the new methods for controlling the floor swelling with the help of support setting technologies which use the steel-polymer anchors.

Keywords: floor swelling, simulation of stress-strain state, rocks, roof bolting, finite elements method

Стаття поступила в редакцію 15.06.2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук, проф. С.П. Минеевым