

10. Sdvyzhkova O. Shashenko D. Parameters of safety pillars between the tunnels under the Kerch Strat // Technischer Universitat Bergakademie Freiberg, Germany. Scientific Reports on resource Issues 2010. Volume 2. Mechanical characteristics of Rock. – P. 151-156.

11. Шашенко Д.А. Геомеханическое обоснование длительной устойчивости предохранительных целиков между транспортными тоннелями: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.09 / Шашенко Дмитрий Александрович.– Днепропетровск, 2010.– 144 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

С.Н. Ганеев, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Украина

Представлена методика и некоторые результаты численного моделирования процесса выдавливания пород из почвы выработки. Пучение рассматривается как возмущенный процесс при потере упругопластической устойчивости породного массива в ее окрестности. Показано развитие возмущенного процесса в массиве различной степени неоднородности.

Введение. Одним из наиболее частых и повсеместно распространенных видов проявлений горного давления в протяженных выработках угольных шахт Украины является пучение пород почвы, затраты на ликвидацию последствий которого значительны и приводят к повышению себестоимости угля.

Сложность природы явления, разнообразие горно-геологических факторов, в которых эксплуатируются выработки, привело к возникновению массы гипотез, объясняющих механизм пучения. Анализ результатов натурных измерений, выполненных различными исследователями, приводит к выводу, что в основе явления вспучивания, наблюдаемого в несхожих условиях, лежат некие общие закономерности. Это позволяет рассматривать пучение как явление потери упругопластической устойчивости геомеханической системы «выработка-породный массив» [1].

Состояние вопроса. Исследование явления упругопластической устойчивости аналитическими методами является достаточно сложной задачей, имеющей свое решение для сравнительно простых случаев. При этом такие решения сводятся к определению момента вспучивания и не рассматривают дальнейшее развитие процесса.

Снять многие математические ограничения в задачах геомеханики позволяют численные методы, такие, как метод конечных элементов (МКЭ). При этом корректность результатов расчетов может быть обеспечена применением математических моделей, отражающих закономерности реального исследуемого процесса.

Целью настоящей статьи является описание модели и методики моделирования процесса выдавливания пород почвы в горных выработках, а также освещение некоторых результатов моделирования для случаев с одиночной выработкой, расположенной в породном массиве с различной степенью неоднородности.

Изложение основного материала. В соответствии с принятой гипотезой природы пучения почвы, потеря устойчивости приконтурного массива протекает как совокупность двух процессов [2]:

а) невозмущенного процесса (до потери устойчивости) – деформирования приконтурного массива, протекающего по схеме запредельного деформирования породного образца при его испытании на прессах «жесткого» типа;

б) возмущенного процесса (после потери устойчивости) – развитие собственно выдавливания пород из почвы выработки.

В этой связи исследование явления вспучивания пород почвы в горных выработках осуществляется также в два этапа.

На первом этапе выполняется решение задачи об упругопластическом распределении напряжений в окрестности одиночной выработки и определяются размеры зоны неупругих деформаций. Расчет ведется методом конечных элементов по алгоритму, учитывающему эффекты разрыхления и разупрочнения в окрестности выработки [3]. Полученные на этом этапе результаты проверяются на выполнение критерия, характеризующего возможность вспучивания почвы одиночной выработки, находящейся вне зоны влияния очистных работ в упругопластически деформирующемся массиве. В расчетах используется критерий, полученный А.Н. Шашенко [4] на основе применения подхода Ишлинского-Лейбензона [5, 6], имеющий вид

$$\bar{\varepsilon}_V r_L^{*2} \ln^2 r_L^* + 2 < 0. \quad (1)$$

Здесь $\bar{\varepsilon}_V$ – среднее относительное объемное разрыхление пород (определяется из опытов на сжатие породных образцов в процессе контролируемого разрушения); r_L^* – критический радиус зоны неупругих деформаций, приведенный к радиусу выработки, соответствующий глубине заложения, с которой произойдет вспучивание почвы в выработке. На первом этапе решения устанавливается некоторая критическая глубина, применительно к которой компоненты напряжений принимают предельные для этих условий значения. При этом основное напряженно-деформированное состояние вмещающего породного массива соответствует этой критической глубине и геометрии исследуемой области.

Выполнение критерия (1) свидетельствует о наступлении вспучивания почвы в выработке, т.е. о начале возмущенного процесса и численной процедуры второго этапа. На этом этапе явление выдавливания моделируется тем, что на контуре почвы задаются новые граничные условия в перемещениях и форма почвы выработки представляется косинусоидой вида $y = 1 + d \cos x$, где d – константа. Максимальное значение этого дополнительного перемещения, которое соответствует величине реальных смещений почвы в условиях, являющихся прототипом для моделирования, задается в параметрах функции, описывающей искаженный контур почвы выработки. Поскольку эти смещения в бифуркационной модели пучения соответствуют этапу возмущенного процесса деформаций, развивающемуся после прохождения историей процесса критической точки бифуркации, такие смещения в модели будем называть «закритическими перемещениями» $\Delta u_{з.п.}$.

На графиках рис. 1, которые представляют собой линеаризованный типичный график развития смещений почвы (график функции $u = f(T)$) выделяется три характерных временных интервала:

а) T_1 – период реализации упругопластических перемещений (невозмущенный процесс деформирования массива с точки зрения потери устойчивости почвы). Этот уровень перемещений достигается на этапе моделирования невозмущенного процесса, т.е. до тех пор, пока не будет выполнено условие (1). После выполнения условия величина смещений на контуре почвы модели запоминается и является для данной задачи «текущим порогом пучения» $u'_{п.пуч.}$;

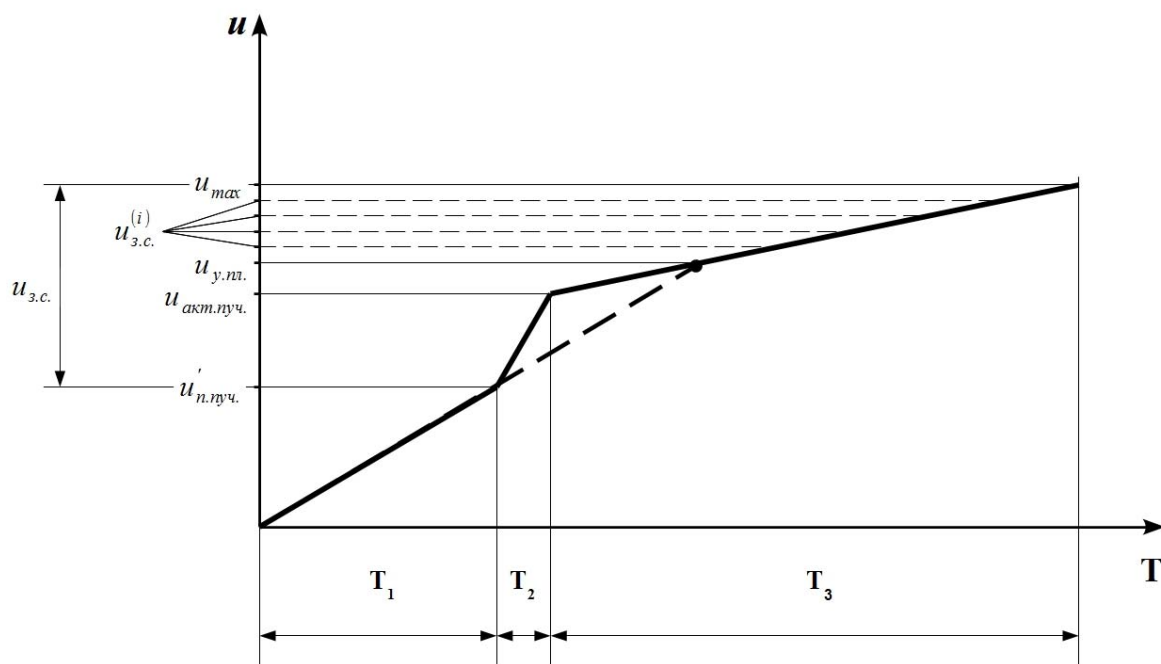
б) T_2 – период активного развития процесса вспучивания пород почвы. С точки зрения бифуркационной модели пучения этот период соответствует переходу от невозмущенного процесса к возмущенному и следующему за этим переходом процессу формирования новой формы контура;

в) T_3 – период пассивного развития процесса пучения, который отличается малыми интенсивностями прироста величин смещений почвы и продолжается вплоть до достижения максимальных смещений, заданных в задаче.

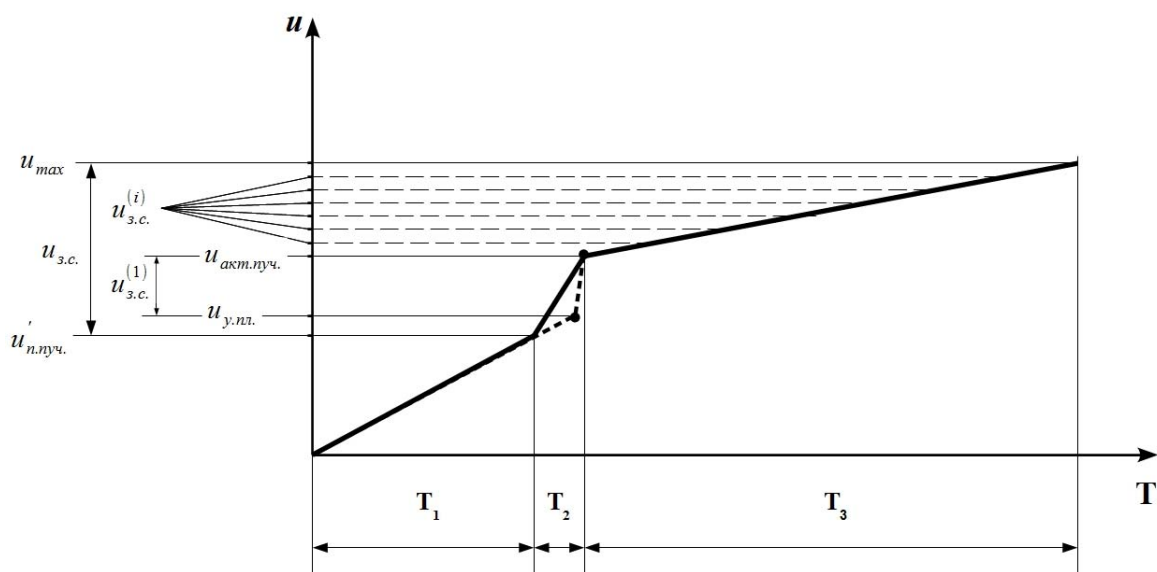
Интервалы T_2 и T_3 относятся к возмущенному процессу деформирования массива, т.е. собственно пучению.

В ходе моделирования пучение рассматривается как дополнительное по отношению к упругопластическим деформациям состояние геомеханической системы «выработка-породный массив», возникающее в ней при выполнении условия (1). Такой подход позволяет выполнять моделирование пучения после окончания основного (упругопластического) решения задачи об НДС геомеханической системы, накладывая результаты этого расчета на картину НДС, полученную в ходе упругопластического решения.

Имитационное моделирование пучения выполняется пошагово, что позволяет задавать закритические перемещения малыми долями, равными количеству шагов решения, получая картину изменения напряженно-деформированного состояния моделируемой геомеханической системы по мере развития процесса пучения в модели.



а)



б)

Рис. 1. К процедуре имитационного моделирования процесса пучения

Процедура предусматривает приложение величин дополнительных перемещений в зависимости от развития процесса изменения напряженно-деформированного состояния в массиве в окрестности моделируемой выработки:

А) если смещения в почве выработки на начало имитационного моделирования соответствуют интервалу T_3 (рис. 1, а), то процедура моделирования реализуется как пошаговый расчет, при котором закритические перемещения прикладываются к почве равномерно, увеличиваясь от шага к шагу на одинаковую величину, равную

$$u_{з.п.}^{(i)} = \frac{u_{\max} - u_{у.пл.}}{n_{з.п.}}, \text{ где } u_{\max} - \text{максимальная величина закритических перемещений}$$

(максимальная величина пучения); $u_{у.пл.}$ – смещения контура почвы, полученные после упругопластического решения; $n_{з.п.}$ – количество шагов в процедуре имитационного моделирования пучения.

Б) если смещения соответствуют интервалу T_2 (рис. 1, б), то на первом шаге имитационного моделирования к почве выработки прикладывается величина дополнительных перемещений, которая определяется выражением $u_{з.п.}^{(1)} = u_{акт.пуч.} - u_{у.пл.}$, где $u_{акт.пуч.}$ – величина смещений, которая имеет место на момент окончания активного процесса вспучивания (принимается из натурных измерений). За оставшееся число шагов имитационного моделирования на каждом шаге к почве выработки прикладываются

$$\text{закритические перемещения, равные по величине } u_{з.п.}^{(i)} = \frac{u_{\max} - u_{акт.пуч.}}{n_{з.п.} - 1}.$$

Выбор вариантов проведения имитационного моделирования (вариант А или Б) производится путем сравнения величины $u_{акт.пуч.}$, т.е. смещений, достигнутых на момент окончания активного процесса вспучивания, и величины смещений контура почвы $u_{у.пл.}$, полученной в результате упругопластического решения. Если $u_{у.пл.} \geq u_{акт.пуч.}$, то выбирают вариант А, иначе, т.е. если $u_{у.пл.} < u_{акт.пуч.}$ – вариант Б. Величина $u_{акт.пуч.}$ зависит от условий, у которых происходит эксплуатация выработки и развивается пучение. Пошаговая процедура имитационного моделирования по сути воссоздает развитие процесса пучения во времени, поскольку каждому значению $u_{з.п.}^{(i)}$ соответствуют своя картина напряженно-деформированного состояния рассматриваемой геомеханической системы, закритические перемещения $u_{з.п.}^{(i)}$ вызывают дополнительное возмущение НДС, которое накладывается на основное, полученное после упругопластического решения. Таким образом, пучение, имеющее непрерывный временной характер, рассматривается здесь как дискретный квазистатический процесс.

На рис. 2-4 представлены результаты численной (МКЭ) реализации такого подхода для гидростатически сжатого массива, ослабленного одиночной выработкой, соответственно для случаев однородного массива, массива с угольным пластом и слоистого массива, содержащего в кровле мощный слой крепкого песчаника. Различная окраска конечных элементов соответствует различной степени разупрочнения.

Анализ результатов показывает, что с увеличением степени неоднородности массива в окрестности выработки от однородного до слоистого с различными геометрическими и прочностными параметрами слоев, форма зоны разрыхления, возникающей около выработки, изменяется от практически симметрично охватывающей выработку до несимметричной, вытянутой вдоль наименее крепкого слоя.

Кроме того, анализ результатов экспериментов, в которых исследовалось влияние параметров крепкого слоя в кровле на развитие явления вспучивания (при вариации мощности этого слоя и его расстояния до выработки) позволил установить следующее.

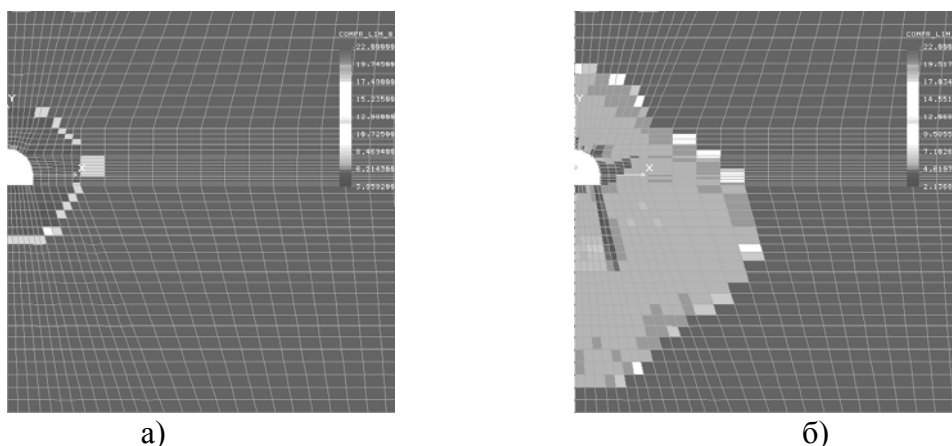


Рис. 2. Конфигурации зон неупругих деформаций в однородном массиве на этапе упругопластического решения (а) на этапе вспучивания (б)

На этапе невозмущенного процесса, т.е. до наступления потери устойчивости, предельные размеры зоны разрыхления, достигнутые к моменту потери устойчивости, нелинейно зависят как от расстояния до крепкого слоя, так и от его мощности. При этом определено, что при расстояниях до крепкого слоя в кровле и почве, равных 21,0 м, и мощности крепкого слоя в кровле, равной 18,0 м, влияние этого слоя на процесс потери устойчивости перестает сказываться.

На этапе возмущенного процесса, т.е. после потери устойчивости, при величине закритического поднятия почвы, равной 0,3 м, наступает стабилизация размеров зоны неупругих деформаций и дальнейшее возрастание закритического поднятия не отражается на размерах зоны. Причем, это обстоятельство не зависит от геомеханической ситуации, в которой расположена выработка.

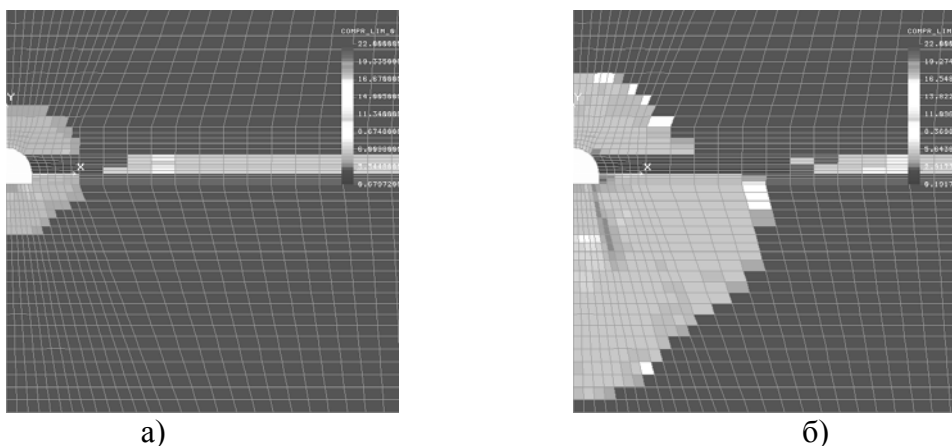


Рис. 3. Конфигурации зон неупругих деформаций в массиве, включающем пласт угля, на этапе упругопластического решения (а) на этапе вспучивания (б)

Анализ рис. 2-4 выявляет значительное влияние свойств пород и структуры массива, окружающего выработку, на формирование зоны неупругих деформаций, а следовательно, и на устойчивость выработки, особенно в условиях выдавливания почвы (рис. 2,б и 3,б) – наблюдается уменьшение размеров зоны разрыхления в почве для случая слоистого массива. Этот факт необходимо учитывать при использовании описанной математической модели, например, введением в критерий (1) некоторого коэффициента, учитывающего различия в жесткостях однородной и слоистой толщи пород [2].

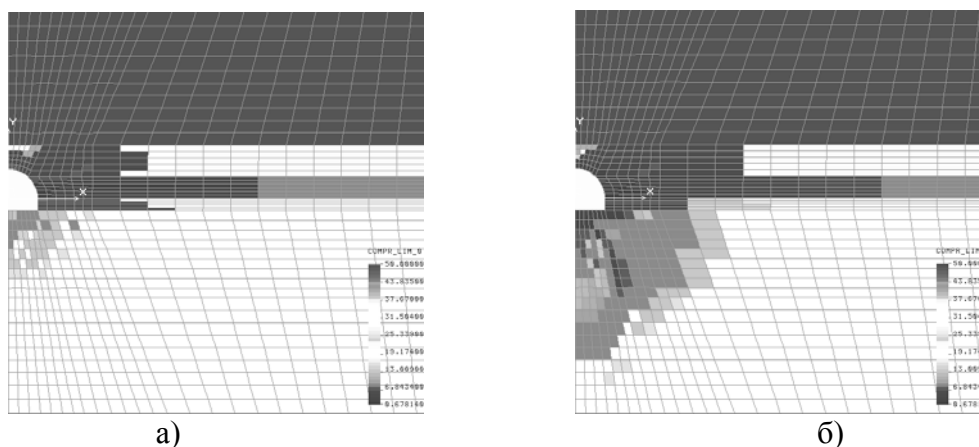


Рис. 4. Конфигурации зон неупругих деформаций в слоистом массиве на этапе упругопластического решения (а) на этапе вспучивания (б)

Выводы. Таким образом, рассмотрен подход к исследованию явления пучения пород почвы с позиций потери ее упругопластической устойчивости, охватывающий состояние массива как до момента потери, так и после него. Механическая модель, положенная в основу алгоритма исследования состояния массива после потери устойчивости, рассматривает пучение, имеющее непрерывный временной характер как дискретный квазистатический процесс. Результаты численного решения задач о потере упругопластической устойчивости почвы выработки, в надлежащей толще которой расположен мощный слой крепкой породы, указывают на необходимость учета прочностных, пространственных и геометрических параметров слоев, слагающих массив, при определении возможности вспучивания.

Такой подход может быть полезен при решении численных задач, например, связанных с оценкой несущей способности крепи, поскольку размер ЗНД и величина смещений на контуре выработки, которые формируют нагрузку на крепь, являются величинами, которые хорошо коррелируют друг с другом [3, 7].

Иными словами, применение такого алгоритма целесообразно, когда пучение пород почвы не является предметом изучения в решаемой задаче, а представляет собой один из действующих факторов. Тогда, зная средние величины пучения для условий, сходных с заданными в решаемой задаче, можно учесть влияние пучения на результат. Для задачи прогнозирования величины пучения, т.е. когда именно пучение является искомым фактором, такой подход, очевидно, неприменим.

Список литературы

1. Шашенко А.Н. Некоторые задачи статистической геомеханики: монография / А.Н. Шашенко, С.Б. Тулуб, Е.А. Сдвижкова. – К.: Універ. вид-во «Пульсарі», 2002.– 304 с.
2. Гапеев С.Н. Закономерности потери упругопластической устойчивости сложноструктурного массива в окрестности одиночной выработки: Дис. ... канд. техн. наук: 05.15.09 / Гапеев Сергей Николаевич.– Днепропетровск, 2005.– 188 с.
3. Шашенко А.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород: монография// А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.Н. Гапеев.– Днепропетровск: НГУ, 2008. – 224 с.
4. Шашенко А.Н. Устойчивость подземных выработок в неоднородном породном массиве: Дисс....докт. техн. наук: 05.15.04 / Шашенко Александр Николаевич.– Днепропетровск, 1988. – 507 с.
5. Ишлинский А.Ю. Рассмотрение вопросов об устойчивости равновесия упругих тел с точки зрения математической теории упругости / А.Ю. Ишлинский // Украинский математический журнал.– 1954.– т.6.– №2.– С.140-146.
6. Лейбензон Л.С. О применении гармонических функций к вопросу об устойчивости сферической и цилиндрической оболочек / Л.С. Лейбензон // Собр. тр.– М., 1951, т.1.– С.50-85.
7. Шашенко А.Н. Управление устойчивостью протяженных выработок глубоких шахт: монография / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин, А.В. Мартовицкий.– Днепропетровск: ООО «ЛизуновПресс», 2012.– 384 с.