

УДК 622.281.74

А.Н. ШАШЕНКО, д-р техн. наук, проф.,
С.Н. ГАПЕЕВ, канд. техн. наук., доц.,
А.В. СОЛОДЯНКИН, канд. техн. наук, доц., Национальный горный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВСПУЧИВАНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ В ПРОТЯЖЕННЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Приведены результаты лабораторного и численного моделирования геомеханических процессов в условиях, приводящих к вспучиванию пород почвы выработок. Качественные и количественные результаты моделирования сопоставлены с данными шахтных исследований и аналитическими критериями, полученными при решении задачи о потере упругопластической устойчивости массива в окрестности одиночной выработки.

Введение. Состояние протяженных выработок шахт Украины, анализ затрат на их поддержание и ремонт, показывают, что наиболее трудоемкими процессами при их строительстве и эксплуатации являются мероприятия по борьбе с пучением пород почвы.

Явление пучения пород почвы выработок остается до сегодняшнего дня одним из наименее изученных, несмотря на значительное количество выполненных исследований. В настоящее время известен целый ряд гипотез, по разному объясняющих причину и механизм пучения пород почвы. Связывают это явление с набуханием пород под влиянием влаги, выпиранием пород под действием опорного давления в боках выработки, увеличением объема вследствие разрыхления пород в зоне неупругих деформаций (ЗНД) и т.д.

На основе предложенных гипотез разработаны физические и математические модели поведения породного массива, ослабленного выработкой. Полученные аналитические зависимости, используются для прогноза процесса выдавливания пород почвы, оценки его параметров. В техническом же плане добиться ощутимых положительных результатов до сих пор не удалось. Одной из причин такой ситуации является то, что предложенные модели явления не полностью отвечают реальному процессу. Особенно очевидным это стало с переходом горных работ на большие глубины.

В связи с этим важной технической задачей является разработка эффективных способов борьбы с пучением, что связано с исследованием закономерностей этого явления на основе адекватных реальному процессу теоретических моделей.

Постановка задачи исследований. Многочисленные шахтные исследования показывают, что развитие геомеханических процессов в окрестности проводимой выработки по мере удаления забоя происходит одинаково. Отчетливо выделяются три этапа с различной интенсивностью развития напряженно-деформированного состояния.

Первому этапу соответствует наибольший уровень потенциальной энергии системы «массив-выработка-крепь» и, соответственно, наименьшие перемещения контура (деформирование системы). На втором этапе энергетический уровень резко снижается – значительная часть потенциальной энергии расходуется на разрыв структурных связей, разупрочнение и разрыхление приконтурного массива. При этом образуется область неупругих деформаций таких размеров, которые обеспечивают статическое равновесие системы «массив-выработка-крепь».

В силу влияния ряда факторов (недостаточная несущая способность крепи, снижение прочности приконтурных пород из-за процессов выветривания и др.) может возникнуть незатухающий процесс развития деформаций в ЗНД. Если крепь или принятые меры охраны выработки не позволяют стабилизировать развитие деформаций, то при достижении некоторых критических ее размеров происходит относительно быстрый переход системы из второго энергетического состояния в третье, характеризующееся наличием аномально больших перемещений на контуре выработки - вспучиванием пород почвы (этап 3).

В [1] поставлена и решена задача о потере упругопластической устойчивости приконтурного массива, приводящей к вспучиванию пород почвы (рис. 1). В результате получен критерий вспучивания в виде:

$$\bar{\varepsilon}_v r_L^{*2} \ln^2 r_L^* + 2 = 0, \quad (1)$$

где $\bar{\varepsilon}_v$ – среднее значение относительного увеличения объема пород в пределах ЗНД, r_L^* – относительный критический радиус ЗНД.

Выражение (1) определяет возможность перехода породного массива вокруг выработки из одного устойчивого равновесного состояния в другое, сопровождающееся вспучиванием пород почвы. Физическая суть его состоит в следующем. В процессе неупругого расширения пород в замкнутом объеме с жесткими внешними размерами ($r = r_L$) происходит перемещение внутреннего контура ($r = l$). До тех пор, пока эти перемещения не достигнут некоторой критической величины, внутренний контур сохраняет первоначальную форму. При достижении же критических значений перемещений происходит резкое искажение формы внутренней границы, сопровождающееся уменьшением уровня потенциальной энергии в приконтурной зоне и большими перемещениями на контуре выработки. В случае если выражение (1) меньше нуля, то в выработке произойдет вспучивание почвы. Связь между величинами, входящими в (1), аппроксимируется выражением:

$$r_L^* = 1 + \bar{\varepsilon}_v^{-0.4} \quad (2).$$

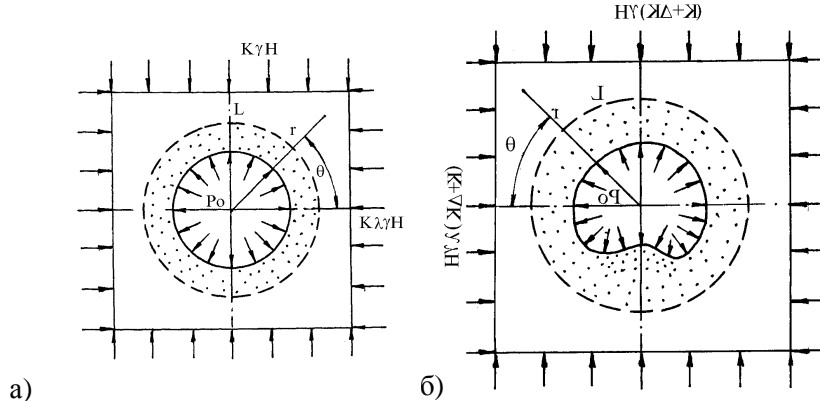


Рис. 1. Расчетная схема к решению задачи о потере упругопластического равновесия приконтурного массива: а – исходное состояние системы; б – возмущенное состояние

Являясь хорошо обоснованным с точки зрения физики протекания процесса, предложенный критерий не совсем удобен, поскольку определить величину r_L^* с достаточной точностью в шахтных условиях практически невозможно. Более удобным показателем для оценки состояния выработки и окружающих ее пород является смещение контура, которое легко определить в

натурных условиях. Переформулировать суть явления можно так: увеличение объема породного массива $\bar{\varepsilon}_v$ вокруг выработки ограниченного критическим радиусом ЗНД r_L^* , приводит к критическим смещениям контура выработки u^* , после чего происходит резкое искажение формы внутренней границы и возникают большие перемещения на контуре выработки – начало неуправляемого процесса пучения почвы.

В [2] на основе базового решения (2), предложен критерий:

$$u_y^* = 0,006 \left(14,7 + \sqrt{1 - 67,2 \varepsilon_v} \right) \left[\exp\left(-\frac{1}{NB}\right) - 1 \right],$$

а для условий негидростатического распределения внешних нагрузок:

$$u_y^* = 0,006 \left(14,7 + \sqrt{1 + 672 \varepsilon_v} \right) \left[\exp\left(-\frac{(1+\lambda)}{2NB}\right) \left(1 - \frac{(1-\lambda)}{NB} \right) - 1 \right] \varepsilon_v, \quad (3)$$

где $u_y^* = U/R_0$ - величина критических смещений почвы выработки, при которой начинается неуправляемый процесс пучения; U - абсолютная величина смещений контура выработки,

$B = \frac{r_L^2 - k_{ocm}}{1 - r_L^2}$, $N = \theta \sqrt{\psi + \frac{2(1-\psi)}{\theta}}$, $\theta = \frac{R_c}{\gamma H}$ - показатель условий разработки; $k_{ocm} = R_{ocm}/R_c$ - коэф-

фициент остаточной прочности; R_0 - радиус выработки, R_{ocm} - остаточная прочность пород на контуре, $\psi = R_p/R_c$ - коэффициент хрупкости пород; R_p, R_c - пределы прочности образцов горных пород на одноосное растяжение и сжатие (для пластичной среды $0 \leq \psi \leq 1$).

Эффективность тех или иных мер борьбы с пучением пород зависит во многом от того, насколько принятые модели соответствуют реальной природе процесса. Важные результаты можно получить с помощью различных методов моделирования геомеханических процессов.

В основе большинства представлений о механизме пучения лежит предпосылка о незначительной глубине зоны сдвижения пород в основании выработки. Исходя из этого, целый ряд способов борьбы с пучением оказался неэффективным. Между тем, ряд результатов исследований свидетельствует об иных параметрах. Так, радиометрическое зондирование толщи пород в

почве выработок [3], показало, что при пучении в конечной стадии захватываются слои на глубину более 4 м. Лабораторные исследования [3] свидетельствуют, что в процесс пучения включаются слои пород, глубина расположения которых в 2-3 раза превышает радиус зоны нарушенных пород в кровле выработок.

Отмеченные особенности деформирования моделей хорошо согласуются с физической моделью пучения, предложенной А.Н. Шашенко [1].

Лабораторные исследования закономерностей деформирования породного массива в окрестности выработки

Изучение характера деформирования породного массива вокруг выработки выполнялись на специальном плоском стенде кафедры строительства и геомеханики НГУ (рис. 2).



Рис. 2. Стенд для плоского моделирования

Исследования выполнены для выработок с арочной формой сечения, расположенной в однородном массиве, представленном углевмещающими породами типа аргиллита и алевролита, что характерно условиям поддержания выработок шахт ГП «Добропольеуголь».

Режим отработки моделей был следующим. Камеру плоской модели закатывали разогретым эквивалентным материалом. После его остывания, переднюю стенку, представляющую прозрачное оргстекло, снимали, наносили мерную

сетку и производили «проходку» выработки. В выработке устанавливали анкерную крепь. Затем камеру закрывали оргстеклом и с помощью рычажных домкратов загружали моделируемый массив. Нагрузку, являющуюся показателем уровня напряжений в моделируемом материале, задавали с интервалом в 1 кг. Возникающие при этом деформации мерной сетки регистрировали на каждом этапе нагружения с помощью фотоаппарата, установленного в фиксированном положении. Качественную картину поведения массива строили на основании изучения изменения определенных квадратов мерной сетки на фотоснимках.

Моделирование позволило установить, что механизм протекания геомеханических процессов соответствует рассмотренной выше физической модели потери упругопластической устойчивости, что наглядно характеризуют зависимости, показанные на рис. 3. Особенность этих графиков заключается в наличии двух зон: зона А – начало процесса разупрочнения приконтурного массива и формирования ЗНД вокруг выработки; зона Б – потеря упругопластической устойчивости массива – вспучивание пород почвы. Вторая стадия характеризуется тем, что небольшой величине приращения внешней нагрузки соответствуют значительные перемещения почвы выработки u .

Такой характер изменения интенсивности поднятия почвы качественно согласуется с полу-

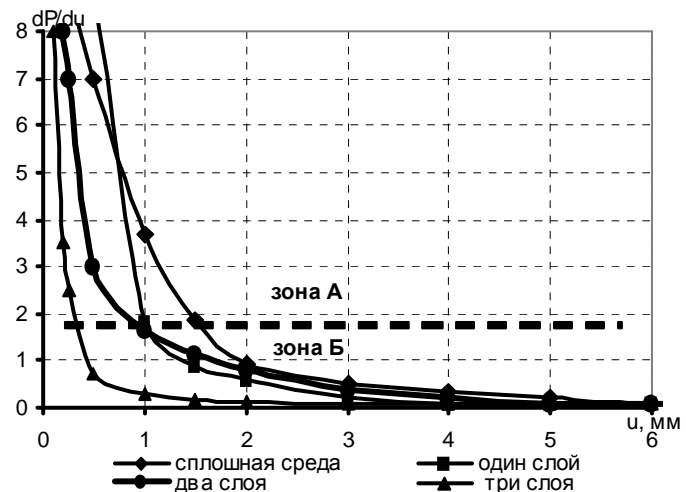


Рис. 3. Зависимость интенсивности поднятия почвы от величины приращения внешней нагрузки

ченной при проведении этих же исследований векторной картиной смещений угловых точек

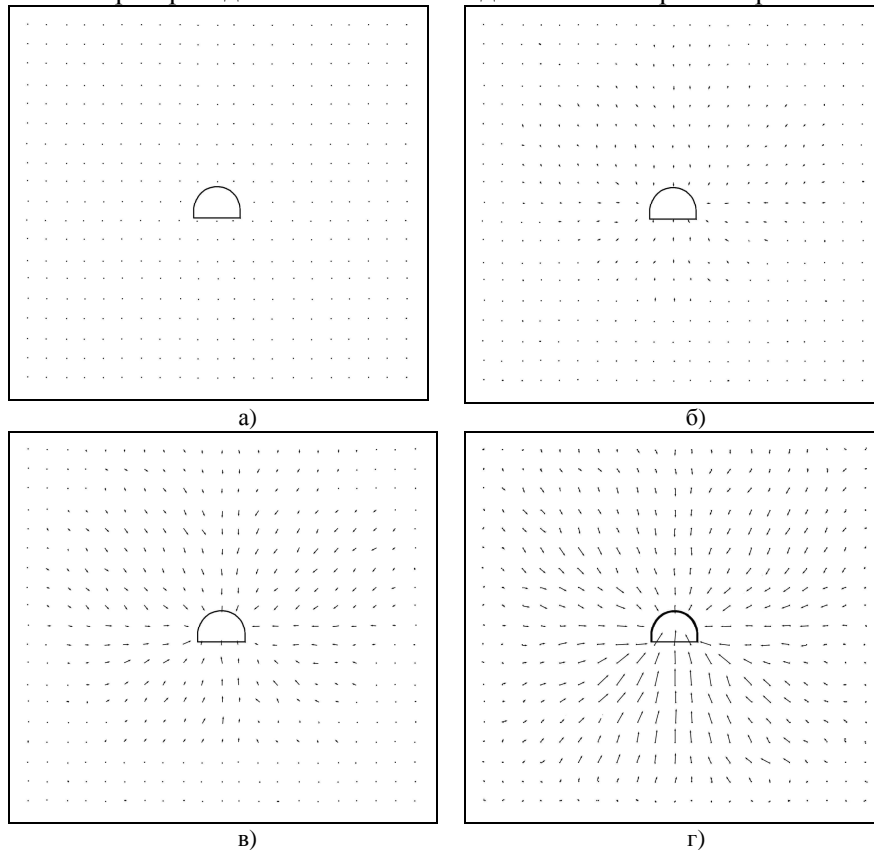


Рис. 4. Векторы перемещений точек мерной сетки однородной модели при нагрузках: а) 0,00 кН, б) 2,61 кН (зона А), в) 4,56 кН г) 7,04 кН (зона Б)

Численное моделирование закономерностей деформирования породного массива в окрестности выработки

Численное моделирование выполнено с использованием метода конечных элементов (МКЭ), обладающего рядом достоинств при решении нелинейных задач, хорошую разработанность его математического аппарата, широкое распространение при решении задач геомеханики. Результаты, полученные при использовании МКЭ, обладают хорошей представительностью и в большинстве случаев достаточной точностью.

В основу решения задачи о потере устойчивости пород почвы в протяженных выработках положен упрощенный подход Ишлинского-Лейбензона [4, 5] к исследованию состояния механической системы при потере устойчивости равновесия. Суть его заключается в том, что параметр нагружения вводится только в граничные условия, которые учитывают изменение формы границы при вспучивании. Это существенно упрощает решение.

Для исследования развития невозмущенного процесса (упругопластическое решение) по МКЭ использован феноменологический подход, в основе которого лежит трактовка ниспадающего участка полной диаграммы деформирования как геометрического места точек предельных упругих состояний материала при достигнутых деформациях. В ходе решения дополнительные (неупругие) деформации суммируются, и шаровая составляющая тензора деформаций меняется так, что на последнем шаге решения получают перемещения на контуре моделируемой выработки, хорошо отражающие картину перемещений на контуре реальной выработки.

Для исследования процесса потери устойчивости почвы выработки впервые разработана математическая модель, позволяющая исследовать закритическое состояние приконтурного породного массива в окрестности одиночной выработки в процессе поднятия пород почвы. При этом модель позволяет имитировать развитие процесса во времени и рассматривает пучение, имеющее непрерывный временной характер, как дискретный квазистатический процесс.

Полученные в ходе решения упругопластической задачи размеры ЗНД оценивались на предмет возможности возникновения вспучивания почвы. В качестве критерия использован критерий (1). В случае если выражение (1) меньше нуля (что означает потерю устойчивости почвы и начало пуче-

мерной сетки моделей (рис. 4), указывающей на то, что при развитии процесса пучения основные изменения и деформации происходят именно в почве выработки и затрагивают более глубокие слои, в сравнении с кровлей выработки.

Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что физическое моделирование качественно хорошо отражает реальные процессы, протекающие в окрестности выработки, что позволит в первом приближении обоснованно подойти к выбору параметров способа повышения устойчивости выработок в пучащих породах.

ния), в конечно-элементных узлах на контуре выработки в почве задавались новые граничные условия в виде дополнительных перемещений. Величина этих перемещений принималась равной $u_y^* = U/R_0 = 0,1$ (3). Для моделируемых условий величина перемещений составляла 0,3 м. Конфигурация нового контура почвы задавалась в виде косинусоиды с максимумом по центру выработки.

Во всех расчетах рассматривалась половина выработки в силу симметрии расчетной схемы относительно вертикальной оси. Глубина заложения выработки - 600 м, условия на контактах слоев не учитывались. Рассматривался случай плоского деформирования при гидростатическом нагружении.

Расчеты начинались с решения задачи для однородного массива и проводились в такой последовательности, чтобы неоднородность структуры массива от задачи к задаче увеличивалась. Обобщенная расчетная схема представлена на рис. 5, где под $m_{песч}$, $h_{песч}$ и $a_{песч}$ понимаются значения исследуемых параметров, соответственно мощность слоя крепкой породы (песчаника), расстояние до него от почвы угольного пласта по кровле и почве. Анализу подвергались размеры ЗНД вокруг выработки при данной величине перемещений в почве (рис. 6).

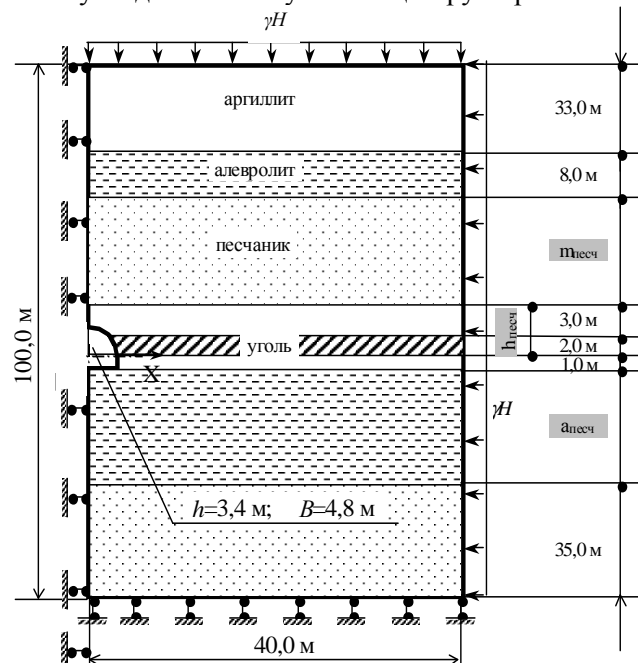


Рис. 5. Обобщенная расчетная схема

В результате исследований было установлено, что размеры ЗНД в почве выработки при величине вспучивания 0,3 м в 2-3 раза превышают начальные.

Натурные наблюдения за состоянием выработок по пласту l_8 на шахте «Белозерская» ГП «Добропольеуголь» в условиях, для которых выполнено моделирование, показали характерные деформации крепи, как результат поднятия почвы при сравнительно небольших деформациях крепи в кровле.

Сравнение для одной и той же моделируемой геомеханической ситуации размеров и конфигураций зоны разрыхления на первом этапе решения (на момент вспучивания) и на втором этапе (при достигнутой величине заданного закритического поднятия) показывает, что с ростом величины закритических перемещений основной прирост размеров зоны разрыхления наблюдается в почве и, в некоторой степени, боках со стороны почвы. При этом разупрочнение материала в пределах зоны разрыхления становится более равномерным.

Такая картина изменения параметров ЗНД качественно согласуется с полученной при проведении лабораторного моделирования векторной картиной смещений угловых точек мерной сетки моделей (см. рис. 3), также указывающей на то, что при развитии возмущенного процесса основные изменения и деформации происходят именно в почве выработки.

Анализ изменения размеров ЗНД от величины смещений контура выработки в почве показал, что при достижении закритическим поднятием значения 0,3 м, размеры зоны разрыхления стабилизируются при некотором значении r_L и не меняются при дальнейшем возрастании закритических перемещений.

Это указывает на то, что при развитии процесса деформирования приконтурного массива дальнейшее возрастание смещений контура почвы реальной выработки до величин, превышающих эту граничную величину закритического поднятия, происходит не за счет увеличения размеров области разрушающегося приконтурного массива, а за счет перестройки структуры массива, расположенного внутри зоны разрыхления, сформировавшейся на момент достижения граничной величины Δu_{pcd} . Учет этого обстоятельства позволяет разрабатывать или наиболее эффективно применять различные мероприятия по противодействию пучению, направленные, например, на упрочнение разрушающегося приконтурного массива в почве выработки.

Следует подчеркнуть, что наиболее весомым критерием адекватности аналитических и физических моделей реальности является практика.

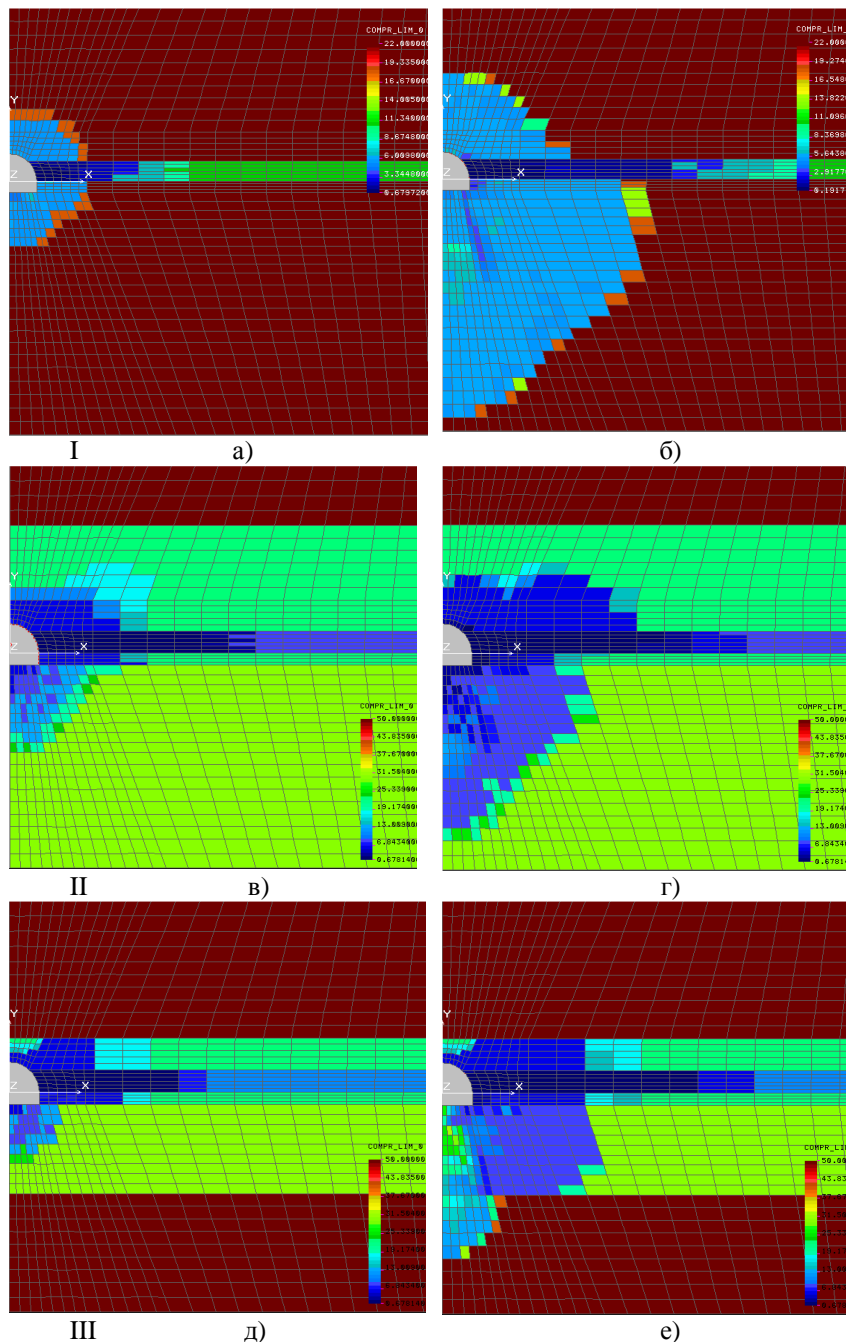


Рис. 6. Конфигурация ЗНД до (а, в, д) и после (б, г, е) вспучивания: I – однородный массив с угольным пластом; II – слоистый массив при расстоянии до песчаника в кровле $h_{песч} = 10,0$ м; III – слоистый массив при расстоянии до песчаника в почве $a_{песч} = 7,0$ м

Список литературы

1. **Шашенко А.Н.** Устойчивость подземных выработок в неоднородном породном массиве. – Дисс. ... д-ра техн. наук: 05.15.04, 05.15.11. – Днепропетровск, 1988. – 507 с.
2. **Шашенко А.Н., Солодянкин А.В.** Критерии оценки устойчивости пород почвы горных выработок // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2007. – № 1. – С. 44-49.
3. **Максимов А.П.** Выдавливание горных пород и устойчивость подземных выработок. - М.: Госгортехиздат, 1963. - 144 с.
4. **Ишлинский А.Ю.** Рассмотрение вопросов об устойчивости равновесия упругих тел с точки зрения математической теории упругости // Украинский математический журнал. – 1954. – т.6.– №2. – С.140-146.
5. **Лейбензон Л.С.** О применении гармонических функций к вопросу об устойчивости сферической и цилиндрической оболочек // Собр. тр.– М., 1951, т.1.– С.50-85.

Сравнение величин перемещений почвы в бремсберге № 2 пл. l_8 ш. «Белозерская» на момент потери ее устойчивости, полученных при физическом и численном моделировании (трещина на лабораторных моделях, выполнение критерия (1) при численных расчетах), с величиной перемещений почвы, которая имела место при натуральных измерениях на момент резкого роста интенсивности смещений (8-е сутки наблюдений), показывает довольно хорошее их соответствие (рис. 4.б): разброс лабораторных и натуральных результатов составляет для отдельных моделей от 16,9 до 28,2%, численных и натуральных – 10,2%. Это указывает на корректность результатов физического и численного моделирования.

Вывод. Результаты выполненных исследований с применением лабораторного и численного моделирования показывают, что бифуркационная модель пучения пород почвы адекватно отражает реальную картину развития геомеханических процессов вокруг протяженной выработки и может служить основой для разработки эффективных способов борьбы с пучением.