

АНАЛИЗ ДОСТОВЕРНОСТИ ПОЛУЧАЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ ПРОГНОЗЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНТУРА ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

Проведен многопараметрический анализ адекватности методики вычислительного эксперимента разработанного для оптимизации параметров охраны подготовительных выработок на шахтах Западного Донбасса. Выполнено сравнение существующих и общепринятых методик прогнозирования перемещения контура выработки с результатами, получаемыми на основе расчетов учитывающих запредельное состояние пород.

Проведено багатопараметричний аналіз адекватності методики обчислювального експерименту розробленого для оптимізації параметрів охорони підготовчих виробок на шахтах Західного Донбасу. Виконано порівняння існуючих і загальноприйнятих методик прогнозування переміщення контура виробки з результатами, одержуваними на основі розрахунків враховують поза межне стан порід.

A multivariate analysis of the adequacy of the methods of computer simulation designed to optimize the protection of development workings in the mines of the Western Donbass. A comparison of existing and generally accepted methods of forecasting travel path generation with the results obtained on the basis of calculations taking into account the transcendental state of the rock.

Основные результаты исследований проведенных в работе [1] показали, что повышение точности геомеханических расчетов, выполняемых сеточными численными методами, может достигаться за счет учета нелинейных характеристик материалов вычислительной модели. В этой связи, становится необходимым провести комплексное сравнение получаемых результатов с аналитико-эмпирическими методиками, построенными на базе обширных шахтных исследований проявлений горного давления, и аналитическими методами, учитывающими характеристики запредельного состояния вмещающего массива, которые в шахтном эксперименте выявить и разделить чрезвычайно затруднительно.

Цель и задачи исследований. Определение адекватности показателей устойчивости подготовительных выработок на шахтах Западного Донбасса при проведении вычислительных экспериментов учитывающих предельное и запредельное состояние пород горного массива формирующих контур выработки.

Изложение основного материала исследований. К настоящему времени разработан и повсеместно используется ряд руководящих нормативных документов [2, 3], где в качестве базового прогнозируемого параметра проявлений горного давления использованы перемещения породного контура выработки, технология замера которых в шахтных условиях отработана и не вызывает затруднений. С другой стороны, особенности влияния характеристик запредельного состояния массива на развитие перемещений контура выработки (которые в нормативных документах выражены в интегральной форме) оцениваются по известным и апробированным аналитическим методам [4].

Предварительно отметим, что установленные закономерности позволяют определить эпоху полных перемещений в любой точке контура выработки, в то время как «базовые» (с точки зрения сравнительного анализа) методики способны прогнозировать лишь кусочно-линейную эпоху перемещений, равномерную

в пределах кровли, боков и почвы выработки. Поэтому сравнительный анализ проведен для максимумов вертикальных перемещений в замке свода $U_{св}^y$ и в районе центральной оси по почве $U_{поч}$, а также для горизонтальных перемещений боков выработки U_{np}^x в зоне прохода людей на высоте 1,8 м от настила. Сравнение перемещений замка свода выработки вне зоны влияния очистных работ, рассчитанных по методике [5], с установленными закономерностями дало такие результаты (рис. 1).

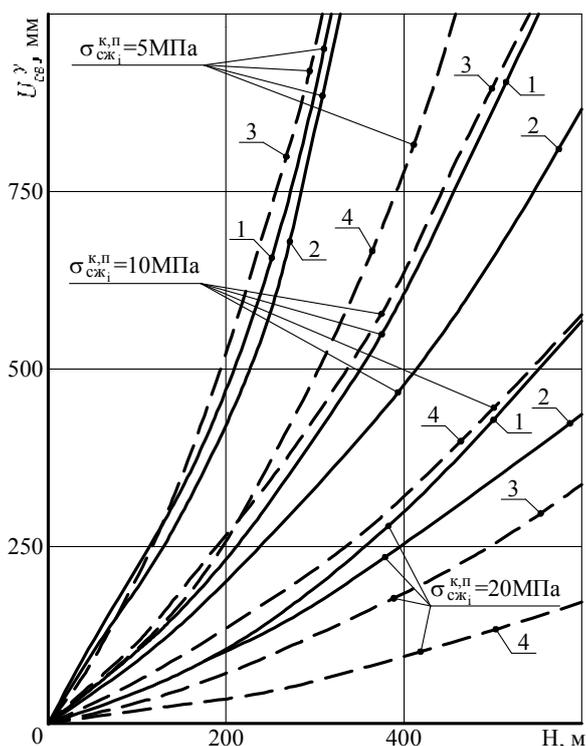


Рис. 1. Перемещения в замке свода выработки (срок службы более 15 лет) по нормативным документам (сплошная) и установленным закономерностям (пунктир): 1 – [3]; 2 – [5]; 3 – $E_i^{K,II} = 0,3 \cdot 10^4$ МПа; 4 – $E_i^{K,II} = 1 \cdot 10^4$ МПа

Качественно закономерности развития смещений подобны друг другу. В количественном плане при $\sigma_{сж_i}^{K,II} = 5$ МПа и 10 МПа расчеты смещений в замке свода $U_{поч}^y$ по нормативным методикам ложатся в область $U_{поч}^y$ для интервала изменения $E_i^{K,II} = (0,3...1) \cdot 10^4$ МПа по установленным закономерностям. При $\sigma_{сж_i}^{K,II} = 20$ МПа смещения $U_{поч}^y$ занижены по сравнению с [3]. Здесь следует отметить, что в нормативных методиках не учитываются деформационные характеристики близлежащих породных слоев в отличие от установленных закономерностей [1]. Поэтому при определенных сочетаниях деформационных характеристик породных слоев будет иметь место вполне удовлетворительное соответствие результатов расчетов $U_{поч}^y$, как это выявилось, например, при

$E_i^{K,II} = 0,3 \cdot 10^4$ МПа для $\sigma_{сж_i}^{K,II} = 5$ МПа и 10 МПа (отклонения с методикой [3]

не превышают 11,3%). С другой стороны, вследствие действия увлажнения и реологических процессов деформационные характеристики породы снижаются, что вызывает увеличение перемещений $U_{поч}^y$, и при $\sigma_{сж_i}^{K,II} = 20$ МПа вполне

возможно снижение отклонений в расчетах по анализируемой методике. Также следует принимать во внимание влияние параметров $\frac{M_i^{K,II}}{E_i^{K,II}}$ и $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,II})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,II}}$ пре-

дельного состояния породных слоев, которые в действующих нормативных документах не учитываются: исследования [4] доказывают тенденцию увеличения

перемещений породного контура с ростом $\frac{M_i^{K,II}}{E_i^{K,II}}$ и снижением $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,II})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,II}}$. По-

этому установленные закономерности, учитывающие гораздо большее количество механических характеристик слоистого массива, обладает более общим (с точки зрения геомеханических процессов) подходом к оценке устойчивости пластовой выработки.

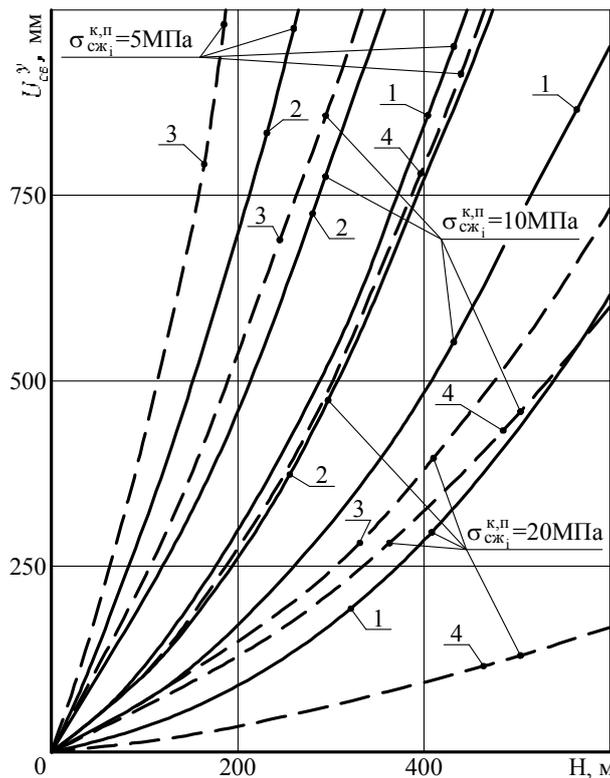


Рис. 2. Перемещения в замке свода выработки по инструкции и установленным закономерностям

Инструкция [2] разработана специально для условий шахт Западного Донбасса и отличается от предыдущих нормативных документов тем, что даже

вне зоны влияния очистных работ предполагает постоянный и равномерный во времени (за исключением начального периода в 20...40 суток после проведения выработки) рост перемещений породного контура. Действительно, в Западном Донбассе развитие перемещений протекает более длительный период, однако все же наблюдается эффект затухания скорости перемещения по мере эксплуатации подготовительных выработок, как это учтено в [3]. Тем не менее, на рис. 2 построены графики роста перемещений породного контура с увеличением H для периода эксплуатации выработки $t = 1$ год и 5 лет (сплошные линии, график 1 и 2, соответственно) и проведено их сравнение с аналогичными зависимостями по установленным закономерностям, для которого построены гра-

фики при $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}} = 0,05$ и $0,20$ (пунктир, графики 3 и 4, соответственно). Это

сделано с учетом предположения, что во времени остаточная прочность пород (под действием ослабляющих факторов) снижается более интенсивно, чем прочность ненарушенных пород (специальных измерений на этот счет авторы не обнаружили в современных источниках).

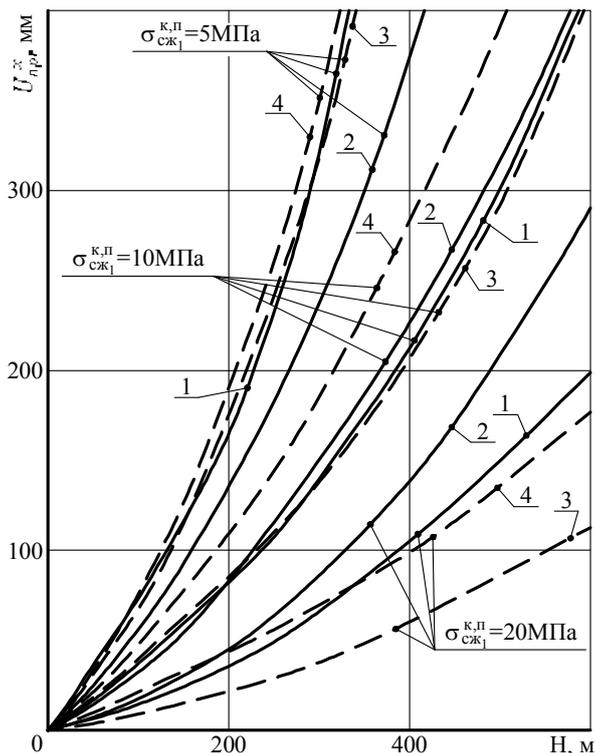


Рис. 3. Боковые перемещения в зоне прохода людей по нормативным документам (сплошная) и установленным закономерностям (пунктир) при:
 1 – [3], $t \geq 15$ лет; 2 – [5], $t = 2$ года; 3 – $\sigma_{сж_i}^{K,П} = 5$ МПа, $E_i^{K,П} = 0,3 \cdot 10^4$ МПа;
 4 – $\sigma_{сж_2}^K = 20$ МПа, $E_2^K = 1 \cdot 10^4$ МПа

Таким образом, отношение $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}}$ по мере эксплуатации выработки

будет снижаться и образуется некоторая область, в которую попадает семейство зависимостей $U_{св}^y(H)$; для того, чтобы дать точное числовое различие в вычислениях $U_{св}^y$, необходим учет всей гаммы механических характеристик углевмещающего массива в нормативных методиках, что, к сожалению, пока не осуществлено. Из всего семейства $U_{св}^y(H)$ выпадает только вариант $\sigma_{сж_i}^{K,П} = 20$

МПа, $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}} = 0,2$, хотя существует тенденция [4] снижения $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}}$ по мере увеличения прочностных характеристик породы.

Теперь перейдем к сравнению величины горизонтальных перемещений U_{np}^x в боках выработки на высоте зоны прохода людей. В нормативном документе [3] отношение перемещений в боках и кровле (почве) регулируется постоянным коэффициентом, равным 0,35 для выработок, пройденных по простиранию на пологих угольных пластах. Причем, считается, что величина горизонтальных перемещений постоянна по высоте выработки, хотя расчеты показывают переменное перемещение боков выработки по ее высоте. Поэтому координаты боков выработки зафиксированы некоторым средним значением (район прохода людей) ее высоты и для них проведено сравнение с установленными закономерностями (рис. 3).

Закономерности $U_{np}^x(H)$ имеют одинаковую качественную картину, а в количественном плане необходимо отметить следующее: для однородного по механическим характеристикам близлежащего породного массива рассчитанное усредненное отношение

$\frac{U_{np}^x}{U_{св}^y} = 0,30...0,36$ близко к рекомендуемому (0,35)

по нормативной методике [3]; поэтому отклонения функций $U_{np}^x(H)$ относительно невелики; – когда в кровле выработки залегает более крепкий и жесткий второй породный слой ($\sigma_{сж_2}^K = 20$ МПа, $E_2^K = 1 \cdot 10^4$ МПа), то усредненное от-

ношение $\frac{U_{np}^x}{U_{св}^y}$ увеличивается до 0,56...0,59. Это объясняется механизмом развития боковых перемещений, когда более крепкий и жесткий второй породный слой кровли действует как штамп, выдавливая в полость выработки более слабые и менее жесткие первые породные слои кровли и почвы.

Что касается числовых значений отклонений, то при $\sigma_{сж_i}^{K,П} = 5$ МПа и 10 МПа они составляют с [3] не более 5,8%, при $\sigma_{сж_i}^{K,П} = 20$ МПа и

$E_2^K = 0,3 \cdot 10^4$ МПа отклонения U_{np}^x увеличиваются до 45...56%, при $E_2^K = 1 \cdot 10^4$ МПа разница в боковых смещениях уменьшается до 6,3...8,8%. Методика [2] по сравнению с [3] дает заниженные боковые смещения при $\sigma_{сж_i}^{К,П} = 5$ МПа, примерно, равную величину U_{np}^x при $\sigma_{сж_i}^{К,П} = 10$ МПа и завышенное U_{np}^x при $\sigma_{сж_i}^{К,П} = 20$ МПа.

Анализируя развитие перемещений в почве выработки по нормативным документам и установленным закономерностям необходимо отметить следующее: в методике [3] величина перемещений в кровле и почве принимается одинаковой; в методике [2] величина перемещения в почве оказывается несколько выше, чем в кровле. Однако с увеличением срока эксплуатации выработки t эта разница нивелируется; так, при $t = 1$ год смещение в почве превышает смещение в кровле в 1,52...1,74 раза, при $t = 10$ лет – в 1,10...1,27 раза; следует более внимательно подходить к результатам экспериментальных замеров смещений в кровле и почве: в большинстве публикаций либо не указывается методика измерения, либо она описывается таким образом, что разделить смещения в кровле и почве невозможно и, по сути, приводится величина сближения кровли и почвы – ведь известно, что для осуществления такого разделения необходимо вести маркшейдерскую съемку от более – менее неподвижной отметки в районе околоствольного двора. Кроме того, в слабых породах почвы наблюдается эффект вдавливания стоек рамной крепи, даже при наличии подпятников. Поэтому, следует также разделять величину вдавливания $U_{вд}^y$ стоек в почву (под действием преимущественно вертикальных сил горного давления в кровле) и величину непосредственно пучения самой почвы. По нашим расчетам и шахтным наблюдениям $U_{вд}^y = 0,1...0,5$ м; это значение (когда измеряется сближение кровли и почвы) следует приплюсовывать к перемещениям кровли $U_{св}^y$ и отнимать от перемещений почвы.

Указанные причины способствовали появлению различий в конечных результатах прогноза пучения почвы выработки при малом сроке ($t = 1$ год) ее эксплуатации (рис. 4, семейство кривых 1 и 2). Представление методики [2] о незатухающем во времени развитии перемещений породного контура (в том числе и почвы при $t > 1$ года еще более усиливают расхождения с результатами расчета перемещений почвы по методике [3]. В этой связи численные значения закономерностей развития пучения, рассчитанные по установленным закономерностям, занимают промежуточное положение между методиками [2] и [3]. Обращает внимание тот факт, что при более крепком и жестком первом породном слое кровли рост пучения почвы выработки происходит более интенсивно до 2,06 раз. Такое влияние $\sigma_{сж_1}^K$ и E_1^K объясняется самой природой пучения, когда относительно целостный первый слой кровли совместно с угольным пластом выдавливают (в зоне опорного давления) в полость выработки разупрочненный первый породный слой почвы.

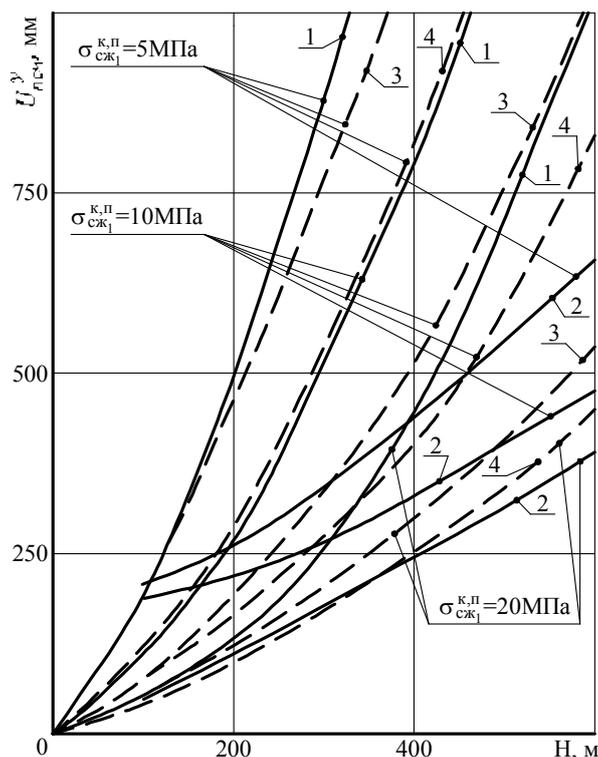


Рис. 4. Перемещения почвы выработки (в районе ее центральной оси) по нормативным документам (сплошная) и установленным закономерностям

(пунктир): 1 – [3], $t = 1$ год; 2 – [5], $t = 1$ год; 3 – $\sigma_{сж1}^K = 20$ МПа,

$$E_1^K = 1 \cdot 10^4 \text{ МПа}; 4 - \sigma_{сж1}^K = 5 \text{ МПа}, E_1^K = 0,3 \cdot 10^4 \text{ МПа}$$

Таким образом, на основе сравнительного анализа результатов прогноза перемещений породного контура выработки по нормативным документам и по установленным в работах [1] закономерностям можно сделать следующие выводы: результаты расчетов перемещений контура выработки, особенно ее почвы, имеют существенное различие между собой по нормативным методикам [2] и [3]; в разрабатываемом алгоритме и нормативных документах [2, 3] имеют место схожие закономерности связи перемещения породного контура с глубиной разработки и сопротивлением сжатию вмещающего породного массива; как правило, расчеты по установленным закономерностям дают более широкий интервал перемещений, в который попадают величины перемещений, вычисленные по нормативным документам; это обусловлено учетом слоистости вмещающего выработку массива со всей гаммой влияния механических характеристик породных слоев в допредельной, предельной и запредельной стадиях их деформирования; разработанный алгоритм позволяет прогнозировать эпюру перемещений на всех участках контура выработки, что даст возможность оценивать ее эксплуатационную пригодность в соответствии с требованиями правил безопасности и технологическими требованиями функционирования выработки.

Выводы. В итоге, можно утверждать, что установленные закономерности прогноза перемещений контура пластовой выработки не противоречат нормативным документам [2, 3], а дают более полную картину развития перемещений

в зависимости от основных механических характеристик каждого из близлежащих породных слоев.

В плане более полного учета механических характеристик пород представляет интерес сравнения результатов расчета с методом проф. В.В. Виноградова [4]. Здесь можно провести в основном качественное сравнение закономерностей связи перемещений контура выработки с механическими характеристиками окружающего массива, поскольку исходные положения оцениваемых методологий имеют существенные отличия в части учета: слоистости с нарушенными контактами в окрестности выработки; реальной формы выработки взамен ее кругового очертания; реального паспорта крепления выработки с соответствующими особенностями взаимодействия крепи и приконтурного породного массива взамен приложения равномерно распределенной реакции крепи. Тем не менее, закономерности влияния механических характеристик близлежащего породного массива и тенденции развития перемещений с увеличением параметра $\frac{\gamma H}{\sigma_{сж}}$ во многом схожи. Так, величина остаточной прочности породы

оказывает значительное влияние на величину перемещений (рис. 5). На этом рисунке приведены перемещения в замке свода выработки, поскольку метод [4] предполагает равномерное распределение перемещений по контуру выработки.

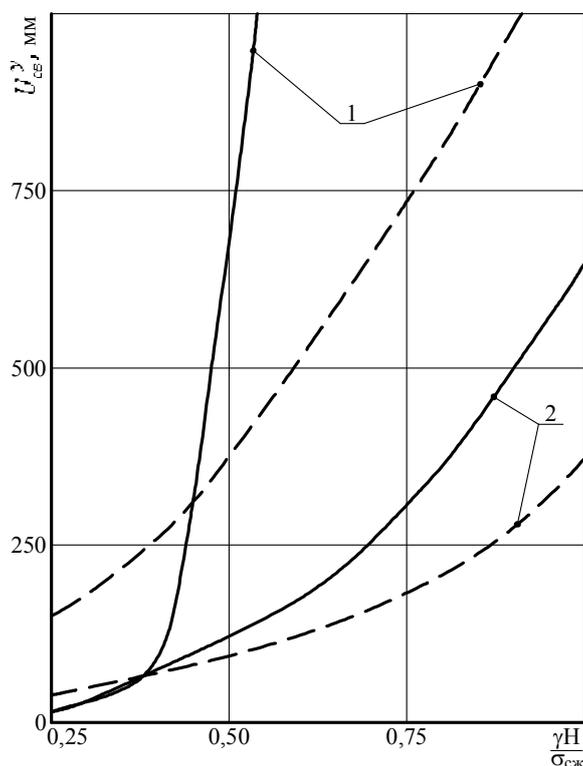


Рис. 5. Перемещения в замке свода выработки по методу [4] (сплошная) и установленным закономерностям (пунктир): 1 – $\frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}} = 0,05$; 2 – $\frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}} = 0,20$

По мере снижения отношения $\frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}}$ происходит резкое увеличение перемещений породного контура. Причем, по методу [4] при $\frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}} = 0,05$ возникает «катастрофическое» развитие перемещений в довольно узком диапазоне $\frac{\gamma H}{\sigma_{сж}} = 0,40 \dots 0,55$, что не наблюдается на практике. В установленных закономерностях такого скачка $U_{св}^y$ не происходит, а имеет место плавный рост перемещений по некоторой степенной зависимости от $\frac{\gamma H}{\sigma_{сж}}$.

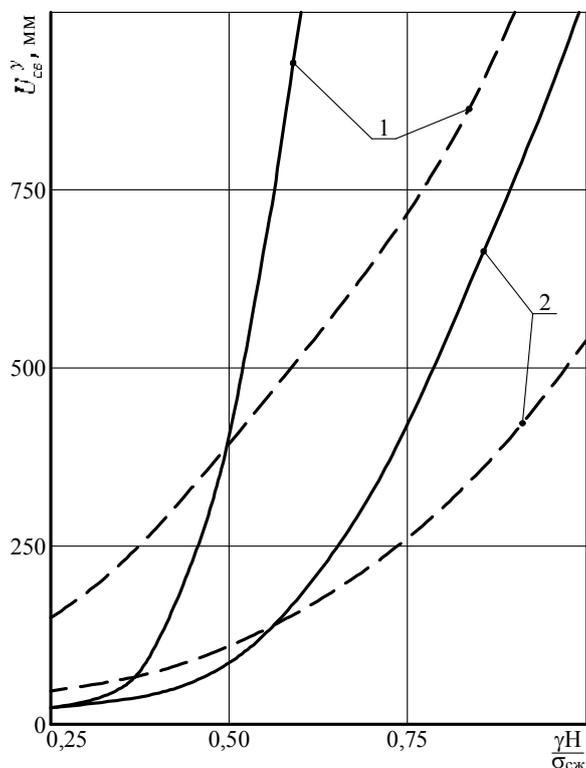


Рис. 6. Перемещения в замке свода выработки по методу [4] (сплошная) и установленным закономерностям (пунктир): 1 – $\frac{M}{E} = 5$; 2 – $\frac{M}{E} = 0,5$

Другим существенно влияющим параметром согласно [5] является отношение $\frac{M}{E}$ модуля спада к модулю деформации породы, по которому оценивают степень хрупкости породы при ее разрушении. Общеизвестно, что склонность породы к хрупкому разрушению $\left(\frac{M}{E} \rightarrow \infty\right)$ провоцирует развитие об-

ширных зон предельного состояния и, как следствие, значительных перемещений породного контура выработки. Только в установленных закономерностях функции $U_{св}^y \left(\frac{\gamma H}{\sigma_{сж}} \right)$ возрастают более плавно (рис. 6), без проявления скачка перемещений, как это наблюдается в методе [4].

В целом, результаты сравнительного анализа показывают, что разработанный алгоритм прогноза перемещений контура выработки не противоречит известным геомеханическим закономерностям проявлений горного давления, установленным как экспериментальным [2, 3], так и аналитическим [4] путем. Следовательно, исходные предпосылки алгоритма выбраны достаточно обоснованно, а их преимущество в сравнении с известными методиками прогноза заключается в учете: реальной структуры углевмещающей породной толщи угольных пластов; нарушения сплошности массива по плоскостям напластования; реального паспорта крепления пластовой выработки; полных диаграмм деформирования каждого из элементов системы «слоистый массив-крепь выработки».

Выводы. Таким образом, перспектива развития численных методов учета реальных структур объектов и полных диаграмм нагружения материалов не вызывает сомнений при условии постоянного накопления экспериментальных данных о поведении углевмещающей слоистой толщи пород не только в допредельной, но и запредельной стадиях состояния, что будет способствовать повышению точности прогноза проявлений горного давления.

Список литературы

1. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния мелко-слоистого породного массива вокруг пластовой выработки. Книга 2. Предельное и запредельное состояние системы «порода-крепь» / В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Фомичев. – Днепропетровск: Системные технологии, 2007. – 198 с.
2. Руководство по поддержанию горных выработок на шахтах Западного Донбасса. – Спб.: ВНИМИ, 1992. – 51 с.
3. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи. – М.: Стройиздат, 1983. – 273 с.
4. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
5. Руководящий нормативный документ Министерства угольной промышленности КД 12.01.01.201-98. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах. Методические указания. – Киев: УкрНИМИ, 1998. – 149 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бондаренком В.І.
Надійшла до редакції 10.05.2012*