

УДК 622.831.325.3

Л.В. Сергиенко¹, Е.В. Гладкая¹, А.И. Сергиенко², В.Г. Сынков¹

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДРАБАТЫВАЕМОГО
УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗОН ЛОКАЛЬНОГО
РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТОВ-СПУТНИКОВ

¹Институт физики горных процессов НАН Украины

²Красноармейский индустриальный институт Донецкого национального технического университета, г. Красноармейск, пл. Шибанкова, 2.

Выполнены численные исследования напряженно-деформированного состояния подрабатываемого углепородного массива. Установлены области разрушения пластов-спутников при наличии тектонического нарушения. Определены углы образования техногенной трещиноватости углепородного массива в зонах локального разрушения пластов-спутников и вмещающих пород основной кровли.

Ключевые слова: дегазация, углепородный массив, пласт-спутник, напряженно-деформированное состояние, области разрушения, геологическое нарушение, угол техногенной трещиноватости.

Выделение метана – один из главных факторов, осложняющих добычу угля и безопасность труда. С увеличением глубины разработки резко ухудшились горно-геологические и горнотехнические условия ведения очистных работ. Значительно возросло выделение метана в выработанное пространство, основными источниками которого являются песчаники и пласты-спутники. Особенно это характерно для шахт Красноармейского района, где выделение метана из пластов-спутников составляет до 60% газового баланса выемочного участка. В настоящее время для снижения газообильности выработанного пространства применяются различные способы дегазации подрабатываемого массива, однако из-за сложных горно-геологических условий и неоднородности физико-механических свойств угольных пластов и вмещающих пород эффективность дегазации невысокая.

Известно, что при первичной посадке основной кровли значительное увеличение концентрации метана на выемочном участке приводит к остановке добычного участка. Основным методом снижения метанообильности выработок является дегазация вышележащих пород и пластов-спутников, эффективность которой зависит от выбранных параметров [1]. Существующие схемы бурения дегазационных скважин, применяемые с целью повышения эффек-

тивности извлечения метана, как правило, не учитывают особенности изменения напряженно-деформированного состояния и наличия зон локальной разгрузки в подработанном углепородном массиве при ведении очистных работ. Поэтому остается актуальной задачей установление закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния подрабатываемого массива с целью геомеханического обоснования условий формирования локальных областей разрушения в углепородном массиве для прогнозирования зон скопления свободного метана до первичной посадки основной кровли.

Исследования проводились в условиях 1-й северной лавы бл. № 3 «ШУ «Покровское». Разрабатываемый пласт d_4 залегает на глубине 560 м. По данным геологоразведочной скважины, в кровле пласта d_4 на расстоянии 20 и 32 м залегают пласты-спутники d_4^1 и d_4^2 , природная метаноносность которых составляет до 20 м³/т.

Для определения области локального разрушения пластов-спутников были выполнены исследования напряженно-деформированного состояния подрабатываемого углепородного массива, вмещающего пласты-спутники.

Методика моделирования напряженно-деформированного состояния углепородного массива при ведении очистных работ включает в себя: построение физической модели углепородного массива; математическое описание модели; численный метод исследования математической модели; анализ результатов расчета [2, 3].

Построение физической модели слоистого углепородного массива включает в себя идеализацию свойств каждого породного слоя и их взаимодействие. Поскольку разрушение пород кровли в очистном забое принято считать хрупким, так как пластические деформации не успевают развиваться, то каждый слой модели принимаем упругой, сплошной, однородной и изотропной средой со своими физико-механическими свойствами. При построении геометрической модели задавались горно-технологические условия действующей и примыкающей отработанной лав со всеми прилегающими выработками.

Процессы деформирования слоя описываются уравнениями механики сплошной среды. В качестве нагрузки используется сила тяжести всех надлежащих слоев. Согласно заданным размерам модели на её границах задаются граничные условия. Для моделирования процесса расслоения породных слоев на границах каждого из них задаются граничные условия контакта. Условие расслоения на точках контакта породных слоев задается в форме закона Кулона и с учетом контактного сцепления пород принимает вид [4]:

$$|\tau_{\Pi}^i| > C_{\kappa} + f_{\text{тр}} \sigma_{\Pi}^i, \quad (1)$$

где $f_{\text{тр}}$ – коэффициент сухого трения; σ_{Π}^i , τ_{Π}^i – соответственно нормальные и касательные напряжения на контакте породных слоев, Па; C_{κ} – сцепление на контактах породных слоев, Па.

С помощью численных методов механики деформируемого твердого тела определены напряжения и деформации горного массива, вмещающего пла-

сты-спутники (в пределах выемочного участка). Расчеты выполнены с использованием программного комплекса ANSYS [5].

Модель рассчитана при отсутствии и наличии тектонического нарушения, представленного в виде разрыва сплошности среды (рис. 1).

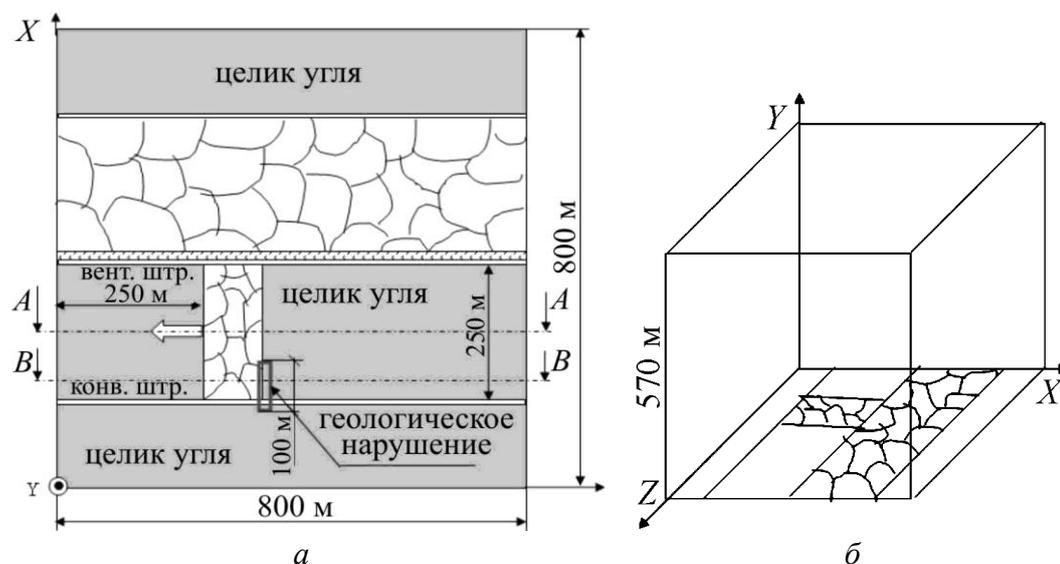


Рис. 1. Технологическая схема (а) и объемная модель (б) исследуемого участка

Предельно допустимое напряженное состояние пластов-спутников d_4^1 , d_4^2 и песчаника основной кровли (15 м) определены по критерию прочности Писаренко–Лебедева [6]:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \frac{[\sigma_p]}{[\sigma_c]} \cdot \sigma_i + \left[1 - \frac{[\sigma_p]}{[\sigma_c]} \right] \cdot \sigma_1 \cdot A^{1 - \frac{3\sigma_{\text{ср}}}{\sigma_i}} \leq [\sigma_p], \quad (2)$$

где $\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$ – интенсивность напряжения, Па; A – параметр структуры материала; $[\sigma_p]$, $[\sigma_c]$ – предельные напряжения соответственно при одноосном растяжении и сжатии, Па; $\sigma_{\text{ср}}$ – среднее напряжение, Па.

Критерий прочности Писаренко–Лебедева описывает предельное состояние неоднородных материалов, в том числе и различные горные породы, а также учитывает все три компоненты главных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 . Полученные значения эквивалентных напряжений сравниваются с предельными напряжениями при одноосном растяжении $[\sigma_p]$.

К расчету были приняты следующие варианты модели горного массива (рис. 2): а) модель A – без учета тектонического нарушения; б) модель B – с учетом тектонического нарушения с углом падения 45° в сторону выработанного пространства; в) модель B – с учетом тектонического нарушения с углом падения 45° на массив.

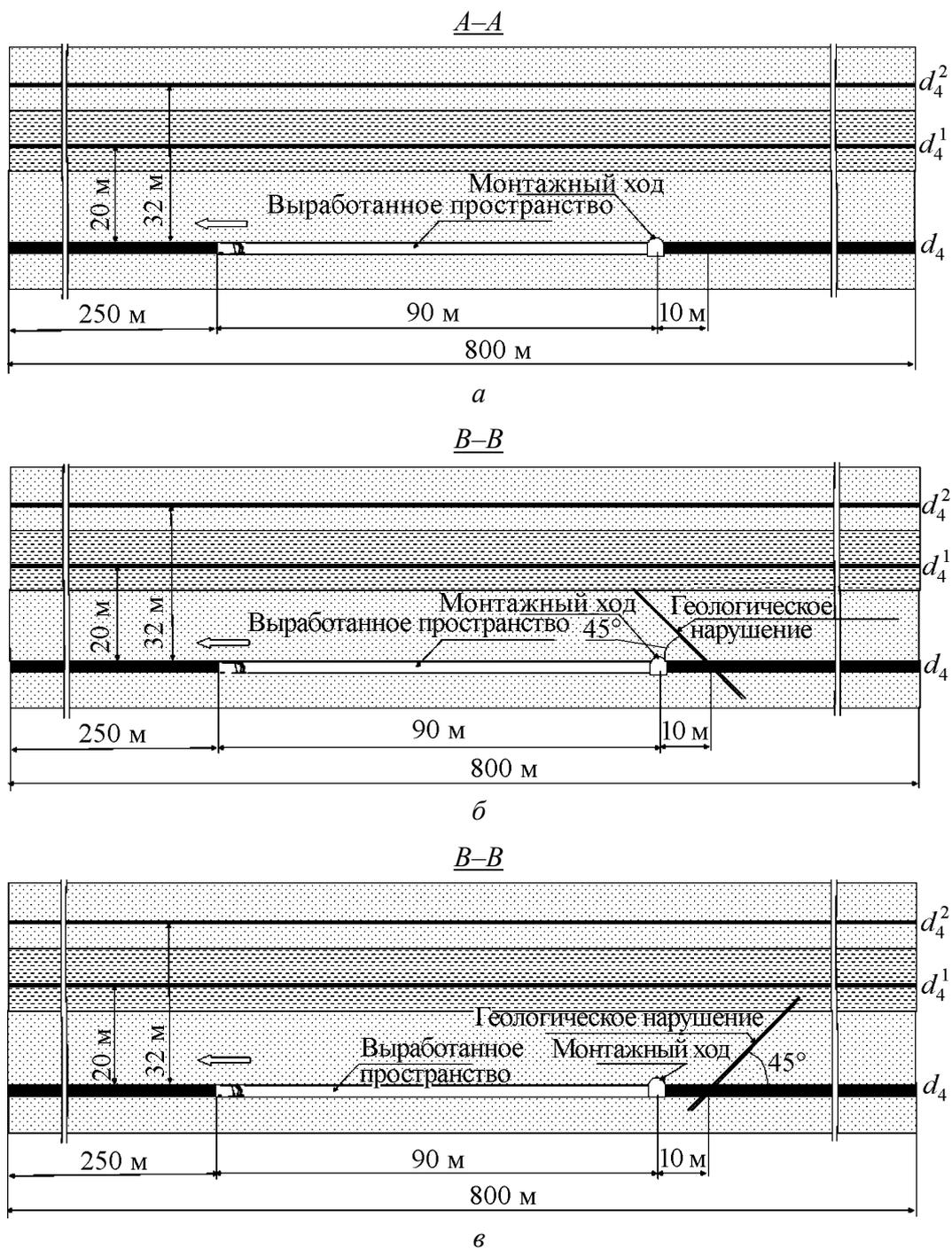


Рис. 2. Разрезы исследуемого участка для моделей А (а), Б (б), В (в)

Первичная посадка основной кровли на исследуемом участке 1-й северной лавы бл. № 3 пласта d_4 произошла при отходе лавы на 91 м от монтажного хода. Поэтому были выполнены расчеты и получены значения напряжений и деформаций в моделях А, Б и В при отходах очистного забоя от 10 до 90 м с интервалом 10 м.

На рис. 3,а показаны зависимости эквивалентных и предельно допустимых напряжений в пласте-спутнике d_4^1 и в песчанике основной кровли от расстояния от монтажного ходка при отходе очистного забоя на 90 м при отсутствии тектонического нарушения (модель А). Согласно выполненным расчетам в пласте-спутнике d_4^1 $\sigma_{\text{экв}} = 1,6$ МПа при предельно допустимых $[\sigma_p]_{\text{угля}} = 1,5$ МПа, в песчанике $\sigma_{\text{экв}} = 2,7$ МПа при $[\sigma_p]_{\text{песч}} = 6,6$ МПа, что в 2,5 раза меньше предельно допустимых значений.

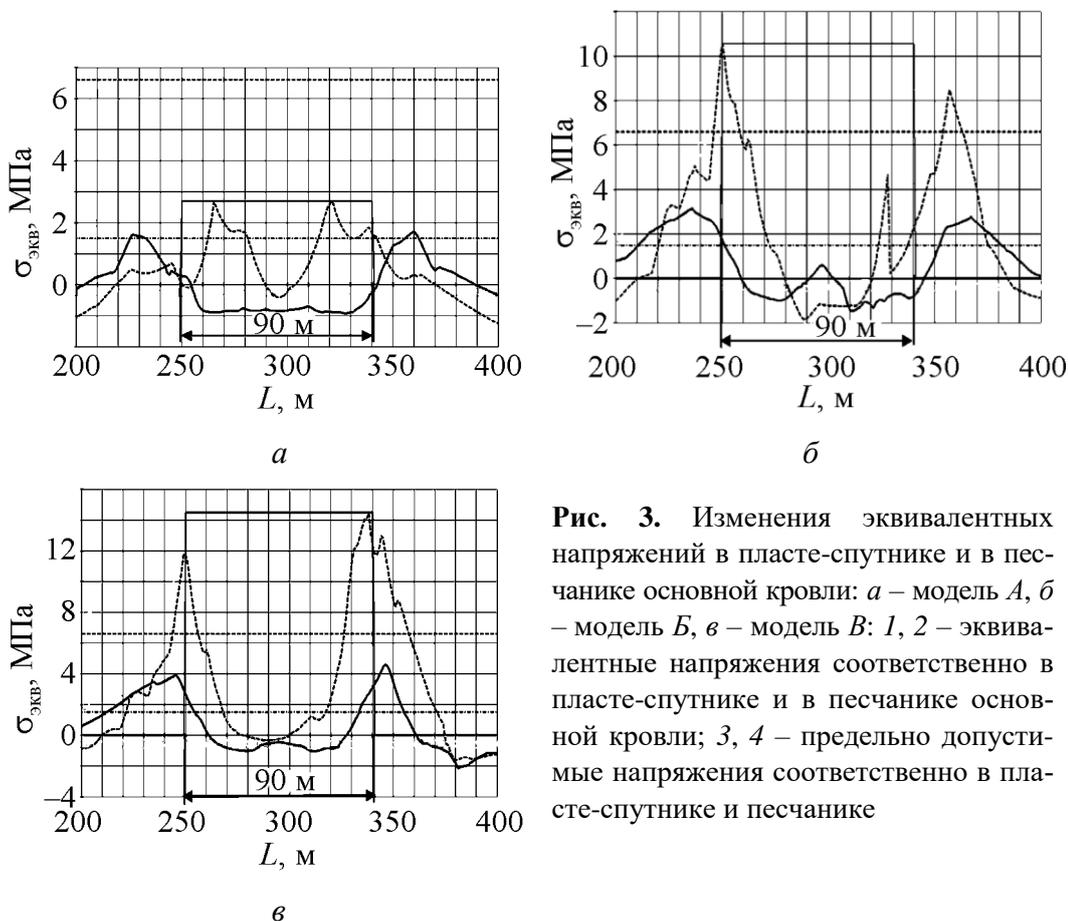


Рис. 3. Изменения эквивалентных напряжений в пласте-спутнике и в песчанике основной кровли: а – модель А, б – модель Б, в – модель В: 1, 2 – эквивалентные напряжения соответственно в пласте-спутнике и в песчанике основной кровли; 3, 4 – предельно допустимые напряжения соответственно в пласте-спутнике и песчанике

На рис. 3,б,в представлены зависимости от величины L эквивалентных и предельно допустимых напряжений в пласте-спутнике d_4^1 и в песчанике основной кровли с учетом геологического нарушения (соответственно модели Б, В).

Результаты исследований по модели Б показали, что для пласта-спутника d_4^1 и песчаника $\sigma_{\text{экв}} = 3$ и 10,5 МПа соответственно. При этом в пласте-спутнике d_4^1 эквивалентные напряжения превышают свои предельно допустимые значения в 2 раза, а в песчанике – в 1,6 раза. Для модели В в пласте-спутнике d_4^1 и в песчанике $\sigma_{\text{экв}} = 4,5$ и 14,5 МПа соответственно, что в 2,2–3 раза превышает предельно допустимые значения.

Определяем параметры вида напряженного и деформационного состояний исследуемого пласта-спутника d_4^1 по формуле Лоде–Надаи:

$$\mu_\sigma = 2 \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad \mu_\varepsilon = 2 \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} - 1, \quad (3)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные линейные деформации.

Результаты расчета параметров вида напряженного и деформационного состояний пласта-спутника d_4^1 для изотропной среды показали, что в нетронутом массиве наблюдается обобщенное сжатие, затем по мере увеличения отхода лавы от монтажного ходка происходит обобщенный сдвиг, который стремится к обобщенному растяжению. Если рассматривать анизотропную среду, т. е. несоответствие свойств параллельно и перпендикулярно напластованию, то здесь будет наблюдаться несоответствие параметров вида напряженного и деформационного состояний (рис. 4).

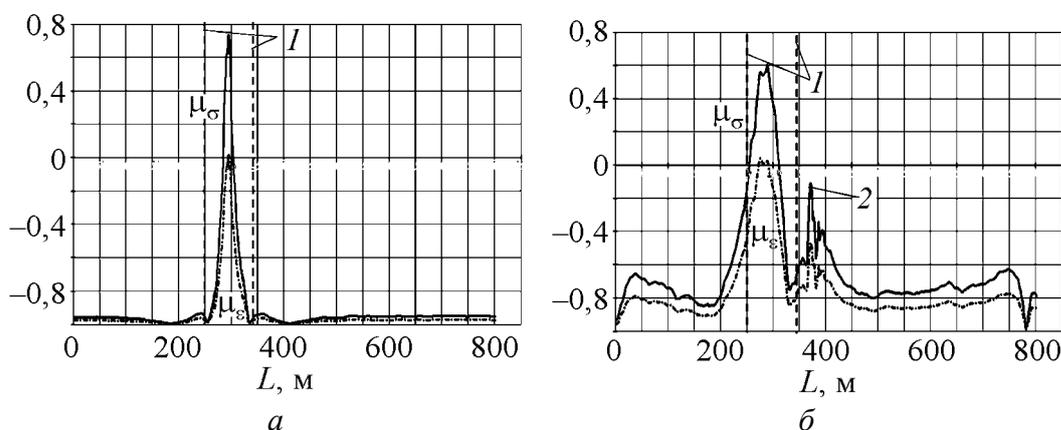


Рис. 4. Параметры вида напряженного и деформационного состояний пласта-спутника d_4^1 для анизотропного массива для моделей *A* (*а*) и *B* (*б*): *I* – область выработанного пространства, *2* – область влияния тектонического нарушения

Параметр вида напряженного состояния стремится к обобщенному растяжению, а параметр вида деформационного состояния – к обобщенному сдвигу.

Области разрушения пластов-спутников и пород кровли определены по формуле Писаренко–Лебедева с учетом их структурной неоднородности для трех вариантов моделей. На рис. 5 приведены распределения эквивалентных напряжений и области локального разрушения пласта-спутника d_4^1 и песчаника основной кровли при отходе очистного забоя на 90 м для трех вариантов моделей. Исследования показали, что в пласте-спутнике d_4^2 для всех моделей области локального разрушения не выявлены.

На рис. 6 показан вид сверху области локального разрушения пласта-спутника d_4^1 для моделей *B* (*а*) и *B* (*б*).

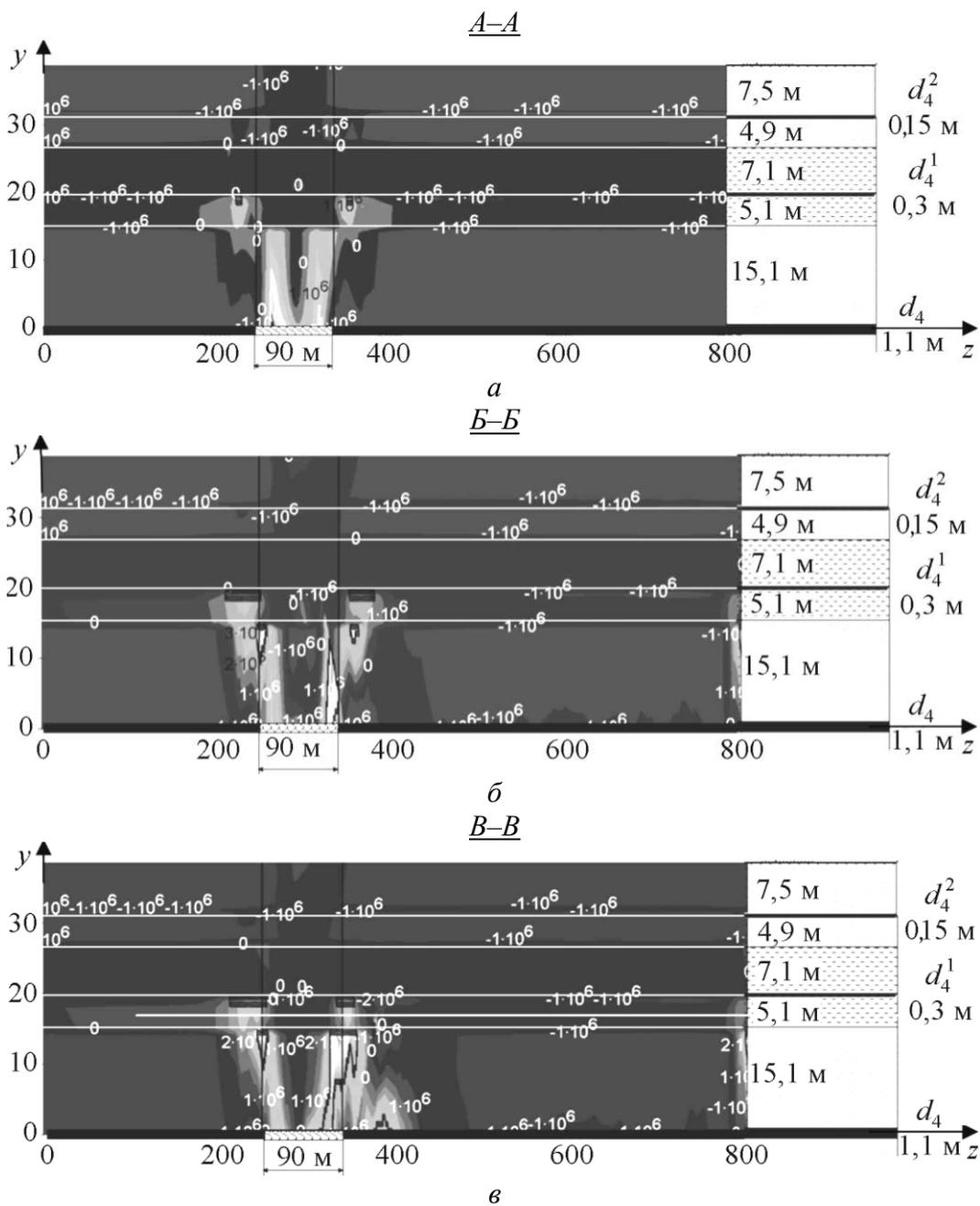


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений и области разрушения основной кровли для моделей *A* (*a*), *B* (*б*), *B* (*в*)

В результате исследований установлены размеры области локального разрушения подрабатываемого пласта-спутника d_4^1 и 15 м песчаника основной кровли. Ширина области локального разрушения составляет: для модели *A* – песчаник основной кровли не разрушается, ширина разрушения пласта-спутника d_4^1 – 6 м; для моделей *B* и *B* ширина разрушения песчаника основной кровли – 12 м, пласта-спутника d_4^1 – 40 м. Длина области локального разрушения пласта-спутника d_4^1 равна длине очистного забоя.

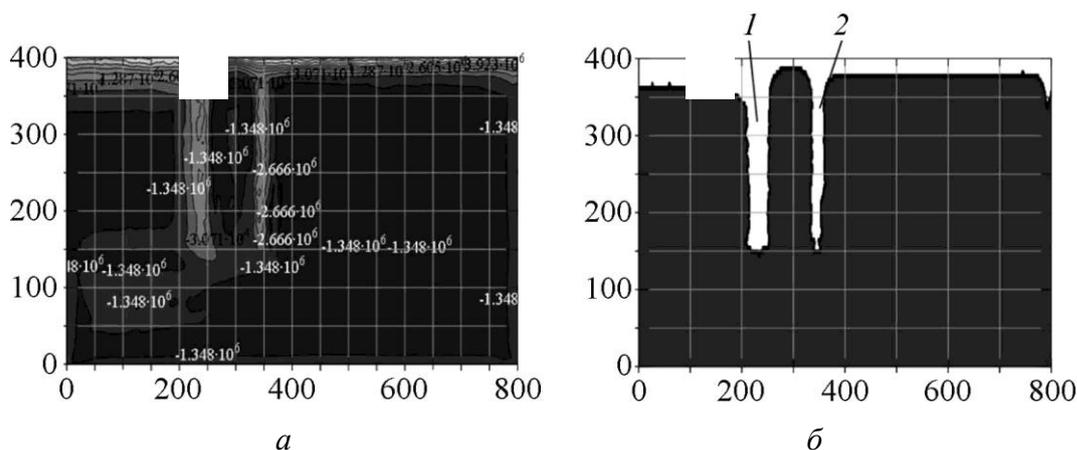


Рис. 6. Изолинии эквивалентных напряжений (а) и области разрушения (б) пласта-спутника d_4^1 для моделей Б (а) и В (б) (вид сверху): 1 – область разрушения впереди очистного забоя; 2 – область разрушения в зоне влияния тектонического нарушения

Таким образом, в результате моделирования установлено, что при отсутствии тектонического нарушения просматривается наличие небольших областей разрушения пласта-спутника d_4^1 , а области разрушения песчаника основной кровли отсутствуют, поэтому залегающие над основной кровлей пласты-спутники разрушаются с образованием локальных мест скопления метана. При наличии геологического нарушения разрушение основной кровли и пласта-спутника d_4^1 наблюдается с двух сторон выработанного пространства. При этом со стороны тектонического нарушения в зависимости от его положения и угла наклона области разрушения могут изменять свои размеры.

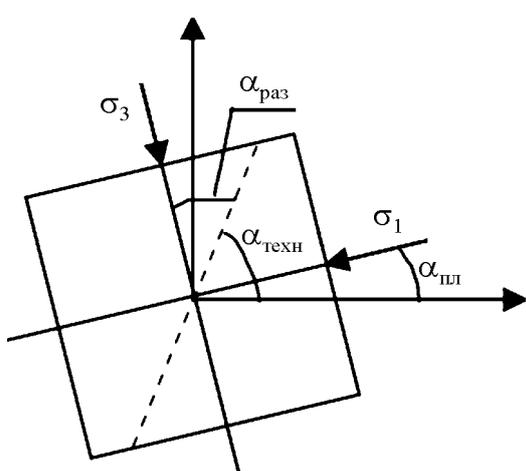


Рис. 7. Схема к определению угла техногенной трещиноватости

$$\alpha_{\text{техн}} = 90 - \alpha_{\text{раз}} + \alpha_{\text{пл}},$$

где $\alpha_{\text{техн}}$ – угол техногенной трещиноватости, град; $\alpha_{\text{раз}}$ – угол образования трещины, град [7]:

$$\alpha_{\text{раз}} = \frac{1}{2} \text{arcctg}(\rho), \tag{4}$$

ρ – угол внутреннего трения, град; $\alpha_{\text{пл}}$ – угол поворота площадки главного максимального напряжения, град. Углы поворота площадок главных напряжений определяются по методике, представленной в [6].

По значениям осевых и главных напряжений, полученных с помощью численного моделирования объемного напряженно-деформированного состояния углепородного массива, были определены углы поворота площадок главных напряжений для исследуемого пласта-спутника d_4^1 и песчаника основной кровли. Таким образом, значения угла техногенной трещиноватости составили: для модели *A* – $\alpha_{\text{техн}} = 68,9^\circ$ (пласт-спутник d_4^1); модели *B* – $\alpha_{\text{техн}} = 76,2^\circ$ (пласт-спутник d_4^1), $\alpha_{\text{техн}} = 78,2^\circ$ (песчаник); модели *B* – $\alpha_{\text{техн}} = 80,2^\circ$ (пласт-спутник d_4^1), $\alpha_{\text{техн}} = 75,1^\circ$ (песчаник).

Результаты шахтных наблюдений по 1-й северной лаве бл. № 3 за газовыделением из подземных дегазационных скважин, пробуренных в подрабатываемый массив, показали, что дебит метана из куста скважин (2 скважины), попадающих в область локального разрушения пласта-спутника до первичной посадки основной кровли, составил: на пикете 93 – 2 м³/мин, пикете 91 – 2,35 м³/мин, пикете 89 – 2,26 м³/мин, что в 2–2,4 раза больше, чем из других скважин. Так, например, перед первичной посадкой основной кровли дебит метана из дегазационных скважин, пробуренных на пикетах 95, 97, 99 составил от 0,98–1,12 м³/мин.

Выводы

Результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния подрабатываемого массива показали, что впереди очистного забоя перед обрушением основной кровли в пласте-спутнике d_4^1 образуется область локального разрушения. Эта область формируется в пласте-спутнике d_4^1 перед первичной посадкой основной кровли на расстоянии 70–90 м от монтажного ходка.

Сравнение трех вариантов физической модели слоистого углепородного массива показало, что угол наклона геологического нарушения и его расположение в очистном забое влияют на размеры области локального разрушения пласта-спутника.

По полученным данным установлено, что породы кровли могут разрушаться под различным углом техногенной трещиноватости, величина которого зависит от формирования угла поворота площадки главного максимального напряжения и угла образования трещины.

Натурные наблюдения за газовыделением из подземных дегазационных скважин, пробуренных в подрабатываемый массив, показали, что дебит метана из скважин, попадающих в область локального разрушения пласта-спутника до первичной посадки основной кровли, в 2–2,4 раза выше, чем те, которые не попадают в эту зону.

1. *Иотенко Б.Н.* Прогноз метановыделения на выемочном участке при первичной посадке непосредственной и основной кровли / Б.Н. Иотенко // Збірник наукових праць 1(23) «Способи та засоби створення безпечних та здорових умов праці у вугільних шахтах». – МакНІИ, 2009. – С. 22–37.
2. *Лобков Н.И.* Физико-механическая модель слоистой структуры горного массива / Н.И. Лобков, А.И. Сергиенко, Л.В. Сергиенко, П.И. Поляков // Проблеми гірничої технології. – Красноармійськ: КП ДонНТУ, 2010. – С. 26–34.
3. *Антипов И.В.* Прогнозирование зон повышенного газовыделения из пластов-спутников / И.В. Антипов, Е.В. Гладкая, Л.В. Сергиенко, Д.М. Житленок // Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання: матеріали II Міжнар. конф. сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2011. – С. 53–59.
4. *Подгорный А.Н.* Задачи контактного взаимодействия элементов конструкции / А.Н. Подгорный, П.П. Гонтаровский, Б.Н. Киркач, Ю.И. Матюхин, Г.Л. Хавин. – К.: Наук. думка, 1989. – 232 с.
5. *Чигарев А.В.* ANSYS для инженеров: Справочное пособие / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение, 2004. – 511 с.
6. *Писаренко Г.С.* Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – К.: Наук. думка, 1988. – 736 с.
7. *Алексеев А.Д.* Предельное состояние горных пород / А.Д. Алексеев, Н.В. Недодаев. – К.: Наук. думка, 1982. – 200 с.

Л.В. Сергієнко, О.В. Гладка, О.І. Сергієнко, В.Г. Синков

МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ НАПРУЖНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВУГЛЕПОРОДНОГО МАСИВУ, ЩО ПІДРОБЛЮЄТЬСЯ З МЕТОЮ ОЦІНКИ ЗОН ЛОКАЛЬНОГО РУЙНУВАННЯ ПЛАСТІВ-СУПУТНИКІВ

Виконано чисельні дослідження напружено-деформованого стану вуглепородного масиву, що підроблюється. Встановлено області руйнування пластів-супутників за наявності тектонічного порушення. Визначено кути утворення техногенної тріщинуватості вуглепородного масиву в зонах локального руйнування пластів-супутників і порід, що вміщуються в основній покрівлі.

Ключові слова: дегазація, вуглепородний масив, пласт-супутник, напружено-деформований стан, області руйнування, геологічне порушення, кут техногенної тріщинуватості

L.V. Sergienko, E.V. Gladkaya, A.I. Sergienko, V.G. Synkov

METHODICAL BASES OF THE TENSELY-DEFORMED STATE OF THE EARNED ADDITIONALLY ARRAY WITH THE PURPOSE OF ESTIMATION OF ZONES OF LOCAL DESTRUCTION OF COAL SEAMS

Numerical studies tensely-strained state earned additionally coal and a rock mass are executed. Fields of breaking down of guiding beds in the presence of a tectonic disturbance are erected. Angles of formation technogenic fracturings coal and the rock massive in

zones of peephole breaking down of guiding beds and main roof adjacent strata are instituted.

Keywords: degassing, coal and a rock mass, a guiding bed, tensely-strained state, breaking down fields, geologic disturbance, an angle technogenic fracturings.