

УДК 622.281

Докт. техн. наук БАБИЮК Г. В., канд. техн. наук КУРМАН С. А. (Донбасский государственный технический университет)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД ВОКРУГ ВЫРАБОТКИ В НЕОДНОРОДНОМ МАССИВЕ

Характерным свойством горных пород является их неоднородность, которая обусловлена различиями вещественного состава и строения. Поэтому породный массив может рассматриваться однородным только с определенной степенью идеализации, если она не ведет к существенному искажению геомеханических процессов.

При изучении зоны разрушения пород в окрестности выработки, ввиду относительности, неоднородности кристаллов, минерального состава, формы и размера зерен породы, распределения микротрещин и цементирующего вещества обычно не учитываются, то есть в пределах одного слоя порода может быть принята квазиоднородной. Наличие же неоднородности текстуры и состава породы, размером от 0,1 м до 10 м (*II*-го порядка по [1]), отличающейся от размера выработки менее чем на порядок, требует ее учета, если средние значения механических характеристик отдельных слоев выходят за пределы статистического разброса показателей. Наиболее существенно проявление неоднородности в выработках, пройденных по пласту угля, свойства которого резко отличаются от свойств вмещающих пород.

Для исследования закономерностей образования зоны неупругих деформаций (ЗНД) в пластовых выработках выполнено моделирование методом конечных элементов (МКЭ) напряженно-деформированного состояния слоистого неоднородного массива, ослабленного выработкой квадратной формы поперечного сечения. Выбор такой формы основывался на шахтных наблюдениях, в результате которых установлено, что в неоднородных и слоистых породах фактическое поперечное сечение выработки, пройденной по пласту угля, всегда прямоугольное или трапецевидное, даже если по проекту предусматривалось арочное сечение.

В ходе эксперимента имитировалась наклонная выработка, проходима по падению угольного пласта с нижней, верхней и смешанной подрывкой пород. Мощность угольного пласта m изменялась по отношению к высоте h выработки и составляла $m/h \in 0,2; 0,5; 1,0$. Вмещающий пласт массив представлен двумя характерными типами осадочных пород (табл. 1), по своим свойствам соответствующим сланцам (*I* тип) и песчаникам (*II* тип). При этом для каждой из схем подрывок воспроизводилось три ситуации: 1 – в почве залегает порода *I* типа, а в кровле *II* типа; 2 – в почве и кровле расположена порода *I* типа; 3 – в почве залегает порода *II* типа, а в кровле *I* типа.

Табл. 1. Показатели моделируемых пород

Наименование породы	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град
Песчаник	$40 \cdot 10^3$	0,31	23	35
Сланец	$21 \cdot 10^3$	0,35	11	25
Уголь	$4,6 \cdot 10^3$	0,3	3	30

Напряженное состояние массива варьировалось за счет глубины расположения выработки $H \in 500$ м; 750 м; 1000 м; 1250 м и коэффициента бокового распора, который для каждой из глубин принимал три значения $\lambda \in 0,2; 0,6; 1,0$. Задача решалась в постановке плоской деформации без учета действия крепи и в 2-х вариантах: для идеальной упругопластической модели с модулем спада $M=0$ и разупрочняющейся модели с пластическими деформациями, равными удвоенным упругим ($\varepsilon_p = 2\varepsilon_y$), и остаточной прочностью, равной 10 % от коэффициента сцепления пород ($\sigma_0 = 0,1 \cdot c$).

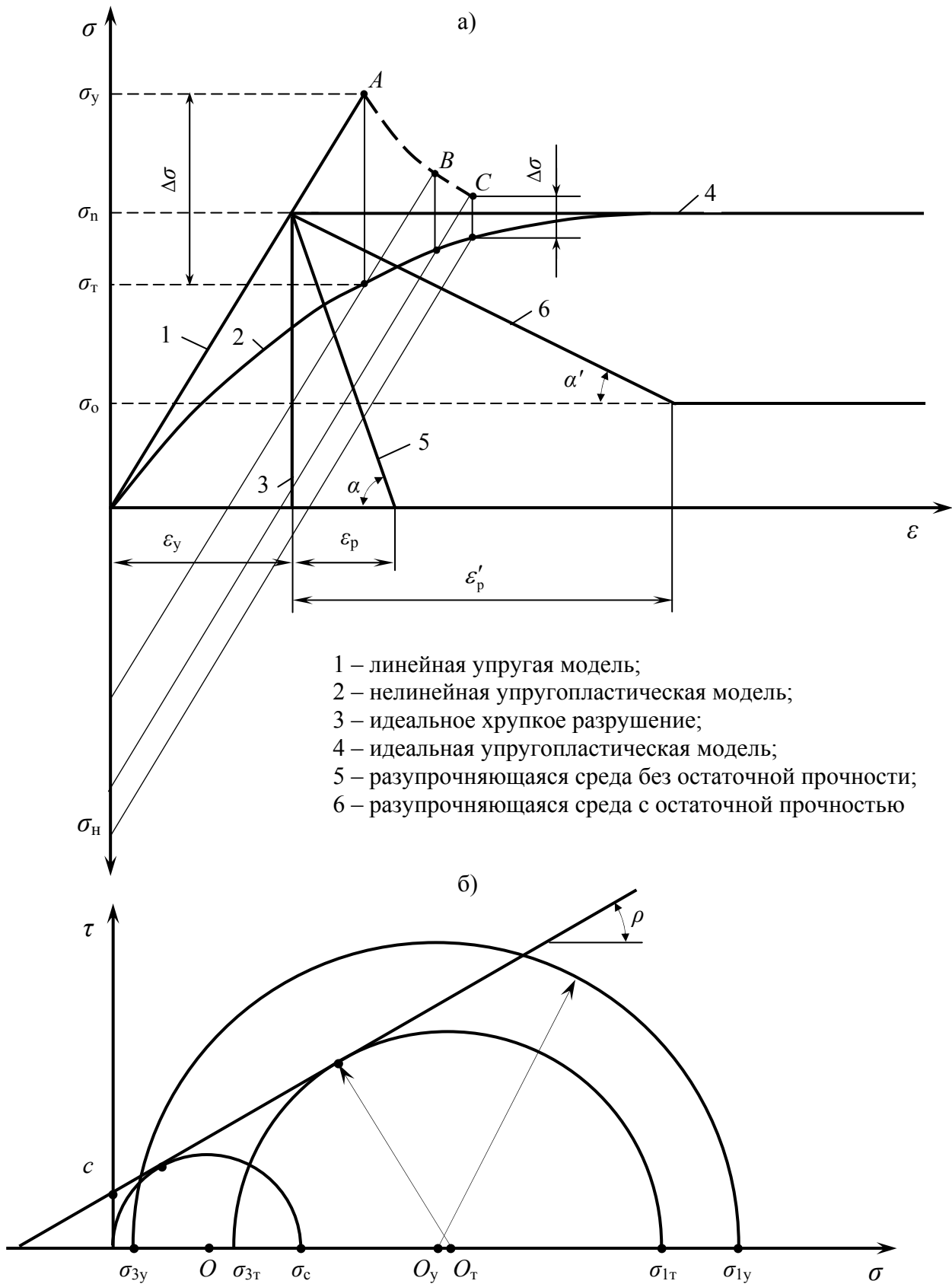


Рис. 1. Диаграммы физического состояния реализованных моделей массива горных пород (а) и положение круга Мора для теоретических напряжений σ_T разупрочняющейся среды (б)

В качестве исходного алгоритма использовалась программа «Геомеханика» [2], которая была модифицирована с целью снятия ограничений к общему числу и типу элементов, реализации многостадийного образования зоны разрушения и учета специфических свойств массива пород, а также организации удобного для анализа графического вывода результатов расчета. Модифицированная программа позволяет реализовать следующие геомеханические модели (рис. 1): линейное (1) и нелинейное (2) упругое поведение при напряжениях ниже предела прочности; идеальное хрупкое разрушение (3); идеальную упругопластическую среду с нулевой дилатансией (4); разупрочняющуюся среду без (5) и с остаточной прочностью (6).

Для решения задачи за пределом прочности применялся универсальный метод «начальных напряжений», разработанный О. Зенкевичем [3] и использованный в программе «Геомеханика» [2]. Суть реализованных нелинейных решений демонстрируется на рис. 1. Вначале элементы наделяются как бы упругими свойствами и при постоянной матрице жесткости рассчитываются напряжения и деформации (точка A на рис. 1, а). В этом случае круг Мора, построенный по главным упругим напряжениям σ_{1y} и σ_{3y} в точке A (рис. 1, б), выходит за предельный график огибающей кругов Мора, определяемый критерием Кулона. Чтобы напряженное состояние элемента отвечало нелинейной диаграмме, круг Мора должен касаться огибающей, поэтому соответствующая ему разность главных теоретических напряжений $(\sigma_{1T} - \sigma_{3T})$ будет меньше разности $(\sigma_{1y} - \sigma_{3y})$. Следует отметить, что положение «теоретического» круга Мора определяется принятой моделью физического состояния массива. При равнообъемном течении (4), реализуемом при $M = 0$, центры кругов O_y и O_T совпадают, если среда разрыхляется (5, 6), то точка O_T лежит правее O_y . Разница между упругими и теоретическими напряжениями рассматривается как прирост начальных напряжений $\{\sigma_n\} = \{\sigma_y\} - \{\sigma_T\}$, которые пересчитываются в узловые силы. Далее расчет повторяется с прежней матрицей жесткости и новым набором узловых сил. Из полученных вновь напряжений вычитаются накопленные начальные напряжения и система оказывается в точке B (рис.1), расположенной ближе к нелинейной диаграмме и характеризующейся новыми деформациями. Итерации повторяются до тех пор, пока рассчитанные напряжения за вычетом начальных $\{\sigma_n\}$ не станут достаточно близки к теоретическим, т.е. проверка точности решения производится путем сравнения компонент напряжений по $\Delta\sigma_n$. Расчет теоретических напряжений производится в деформационной постановке.

Размеры расчетной модели назначены из условия, чтобы максимальные главные напряжения σ_1 , сформировавшиеся в результате образования выработки и зоны неупругих деформаций, на границе модели с допустимой погрешностью соответствовали напряжениям в исходном массиве. Ввиду наличия вертикальной оси симметрии расчетный фрагмент представлял собой половину исследуемой области, что давало возможность увеличить степень дискретизации сетки конечных элементов. Размер исследуемой области по горизонтали был равен $6a$, а по вертикали – $12a$, где a – половина стороны квадрата. По оси симметрии соблюдение граничных условий обеспечивалось нулевыми горизонтальными перемещениями. Узловые силы, моделирующие исходное поле напряжений, прикладывались к внешней границе расчетной области в безразмерном виде согласно задаваемой глубины расположения выработки H и коэффициента бокового распора λ . Конечно-элементная сетка для всех опытов имела 1060 элементов и 596 узлов. Структура сетки позволяла менять положения пласта угля по отношению к сечению выработки, причем, чтобы смоделировать выдавливание мягкого слоя, в пределах пласта предусматривалось не менее двух рядов элементов.

На первом этапе массив представляли однородным и изотропным. Тестовый расчет упругих напряжений был сопоставлен с решением точной аналитической задачи [4],

сравнение показало удовлетворительную точность численных вычислений. Кроме того, по отношению к однородной модели оценивалось влияние неоднородности массива на деформационные процессы. Так, в однородных породах при коэффициенте бокового распора $\lambda = 0$ ЗНД образовывается в кровле и почве квадратной выработки от растягивающих напряжений. С ростом коэффициента λ область разрушения от растяжения уменьшается и уже при $\lambda = 0,5$ вообще исчезает. В стенках выработки, начиная с $\lambda = 0,2$, вблизи углов появляется зона разрушения от сжатия, перемещающаяся постепенно в глубь массива. При $\lambda \geq 0,6$ в однородных породах формируется зона разрушения от сжатия, как в боках так и в кровле выработки, которая с увеличением коэффициента λ распространяется по всему контуру и при $\lambda = 1$ принимает симметричный вид относительно угла, т.е. имеет одинаковые размеры в кровле и боках выработки.

На втором этапе угольному пласту и вмещающим его породам присваивали деформационные и прочностные характеристики соответствующих типов (*I, II*) с учетом глубины разработки и исследовали закономерности образования зоны разрушения в неоднородном массиве. При этом поверхности ослабления между слоями не учитывались, то есть массив моделировался без скачкообразного изменения свойств при переходе от одной литологической разности к другой, а угольный пласт и вмещающий массив описывались деформационной моделью одного вида. Это позволило исследовать влияние геометрической (за счет изменения мощности и положения пласта) и физической (за счет чередования типов пород) асимметрии расчетной схемы на закономерности образования зоны разрушения.

По результатам вычислительного эксперимента для всех 648 вариантов расчета строились картины ЗНД с пометкой элементов, разрушенных от сжатия и растяжения (путем отрыва растягивающими деформациями). Кроме того, для всех конечных элементов давалась полная характеристика его напряженно-деформированного состояния. Результаты расчета представлялись в виде графиков распределения главных (σ_1 и σ_3) и координатных (σ_x и σ_y) напряжений и относительных перемещений u/a на развертке контура выработки, а также в шести характерных радиальных направлениях.

Для анализа форм ЗНД вокруг выработки, расположенной в неоднородном массиве, рассмотрим схемы разрушения при нижней подрывке пород, которая представляет наибольший интерес с точки зрения практики. Анализ картин начнем с разупрочняющейся модели при значении параметров: коэффициента бокового распора $\lambda = 1$, отношения $m/h = 1$, глубины $H = 1000$ м (рис.2,а). В этом случае на контуре выработки главные максимальные напряжения σ_1 распределяются наиболее равномерно, а расчетная схема при равенстве прочности породы в кровле и почве ($\sigma_c^n = \sigma_c^k$) является симметричной относительно горизонтальной оси. В однородном и изотропном массиве при таком поле напряжений зоны разрушения симметричны и зарождаются вблизи углов, где концентрируются максимальные напряжения. В породах с малой прочностью зона охватывает весь контур выработки и по форме приближается к кругу.

Наличие угольного пласта, относительная прочность которого в 4 раза ($C_{yn} = 0,12$; $C_{cn} = 0,44$) ниже аналогичного показателя для сланца, а модуль упругости ($E_{yn} = 184$) ниже модулей сланца ($E_{cn} = 840$) и песчаника ($E_n = 1600$) соответственно в 4,5 и 8,7 раза, привело к образованию сдвиговой зоны разрушения в боках выработки на глубину, равную половине ее ширины a . Залегание более устойчивой породы ($c_n = 0,9$) или в почве, или кровле пласта практически не сказывается на площади ($S_{pv} = 0,88$) и форме зоны разрушения, хотя напряжения σ_1 в песчанике несколько выше, чем в сланце.

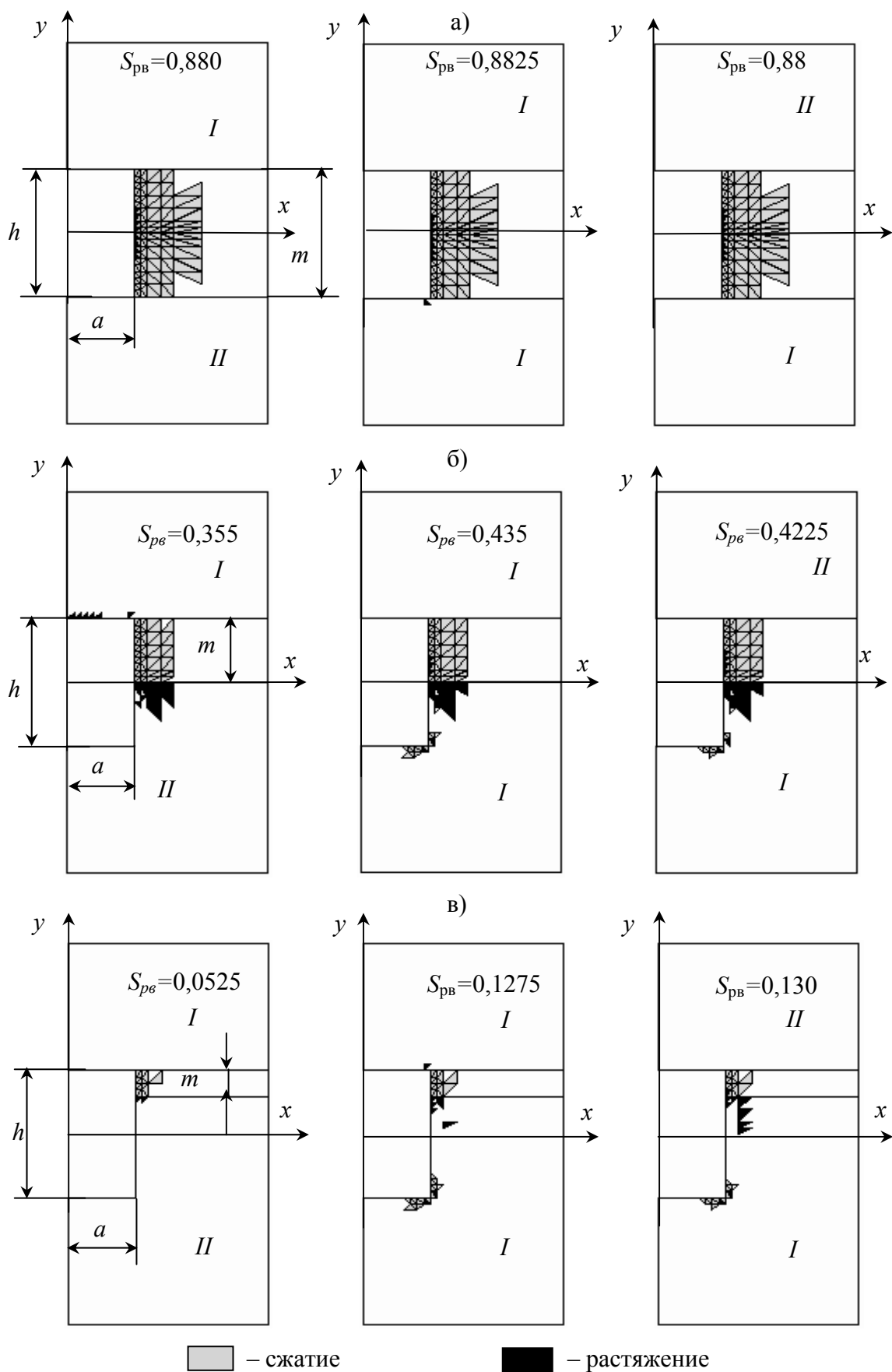


Рис. 2. Виды зоны разрушения в неоднородных породах на глубине $H=1000$ м и при коэффициенте $\lambda=1,0$ для соотношений: $m/h = 1$ (а), $m/h = 0,5$ (б), $m/h = 0,2$ (в)

С уменьшением мощности пласта ($m/n = 0,5$) до половины высоты выработки (рис.2,б) симметрия исчезает. Зона разрушения, по-прежнему, формируется преимущественно в угольном пласте, однако глубина ее уменьшилась и составила $0,6a$. Выдавливание угля сопровождается разрушением в виде отрыва в породах почвы, причем это явление наблюдается как в песчанике, так и в сланце. Рост напряжений в нижней части выработки вызвал образование в сланце вблизи угла выработки зон разрушения от сжатия, а площадь ЗНД при залегании в почве породы I-го типа несколько возросла.

При дальнейшем уменьшении ($m/n = 0,2$) мощности пласта (рис.2,в) и постоянстве остальных параметров форма проявления горного давления не изменяется. Зона разрушения угля в выработку вызывает трещины отрыва в почве пласта. Повышенная концентрация напряжений вблизи угла в почве выработки также ведет к образованию локальных зон разрушения лишь в менее прочных породах (I-го типа). В целом с уменьшением мощности пласта интенсивность проявления горного давления снижается, причем уменьшение m в 5 раз вызывает при залегании прочных пород или в почве, или кровле выработки снижение площади зоны разрушения $S_{pв}$ соответственно 16 и 7 раз. Следовательно, при нижней подрывке залегание прочных пород в почве пласта более благоприятно с позиций устойчивости выработки.

Уменьшение коэффициента бокового распора λ вызывает рост вертикальных напряжений σ_y в боках и снижение горизонтальных напряжений σ_x в кровле и почве выработки. Поэтому вплоть до появления растягивающих напряжений в кровле и почве выработки, отмеченная выше форма проявления горного давления сохраняется, однако при $\lambda = 0,6$ (рис.3) зона разрушения в пласте угля распространяется на большую глубину (при $m/h = 1$ на $1,5a$; при $m/h = 0,5$ на a ; при $m/h = 0,2$ на $0,4a$), а кровле и почве появляются отдельные элементы, разрушенные отрывом от растягивающих деформаций. В целом для всех отношений m/h и ситуаций залегания пород вокруг выработки квадратной формы при $\lambda = 0,6$, по сравнению гидростатическим случаем ($\lambda = 1$), наблюдается незначительный рост площади ЗНД.

Резкое ухудшение состояния пластовых выработок с позиций их устойчивости начинается с началом преимущественного разрушения пород от растяжения. Так, дальнейшее снижение коэффициента λ приводит к качественному изменению поля напряжений. В кровле и почве появляются растягивающие напряжения σ_x которые вызывают разрушение от растяжения над выработкой, а в стенках увеличиваются сжимающие напряжения σ_y , которые обуславливают дальнейшее распространение разрушения в пласте угля в глубь массива. Данная форма проявления горного давления демонстрируется на рис. 4 при значении $\lambda = 0,2$. В однородной и изотропной породе при таком напряженном состоянии ЗНД формируется, прежде всего, от растяжения в кровле и почве выработки, что приводит к снижению разрушений в боках от сжатия и образованию устойчивого контура, вытянутого вертикально. В пластовой же выработке, ввиду незначительной прочности угля, рост зоны разрушения от сжатия в пласте равносителен увеличению ширины выработки, поэтому растягивающие напряжения в кровле и почве возрастают, а разрушение от растяжения не прекращается. Более того, выдавливание угля вызывает появление зоны разрушения от растягивающих деформаций над и под пластами, которая имеет наибольший размер при $m/h = 1$. Наблюдавшаяся на других рисунках симметрия нарушается и в результате развития деформационных процессов в кровле зона разрушения распространяется значительно глубже, даже при залегании песчаника (II). В отличие от деформирования однородной среды, повышенные вертикальные напряжения σ_y при этом перераспределяются на значительно

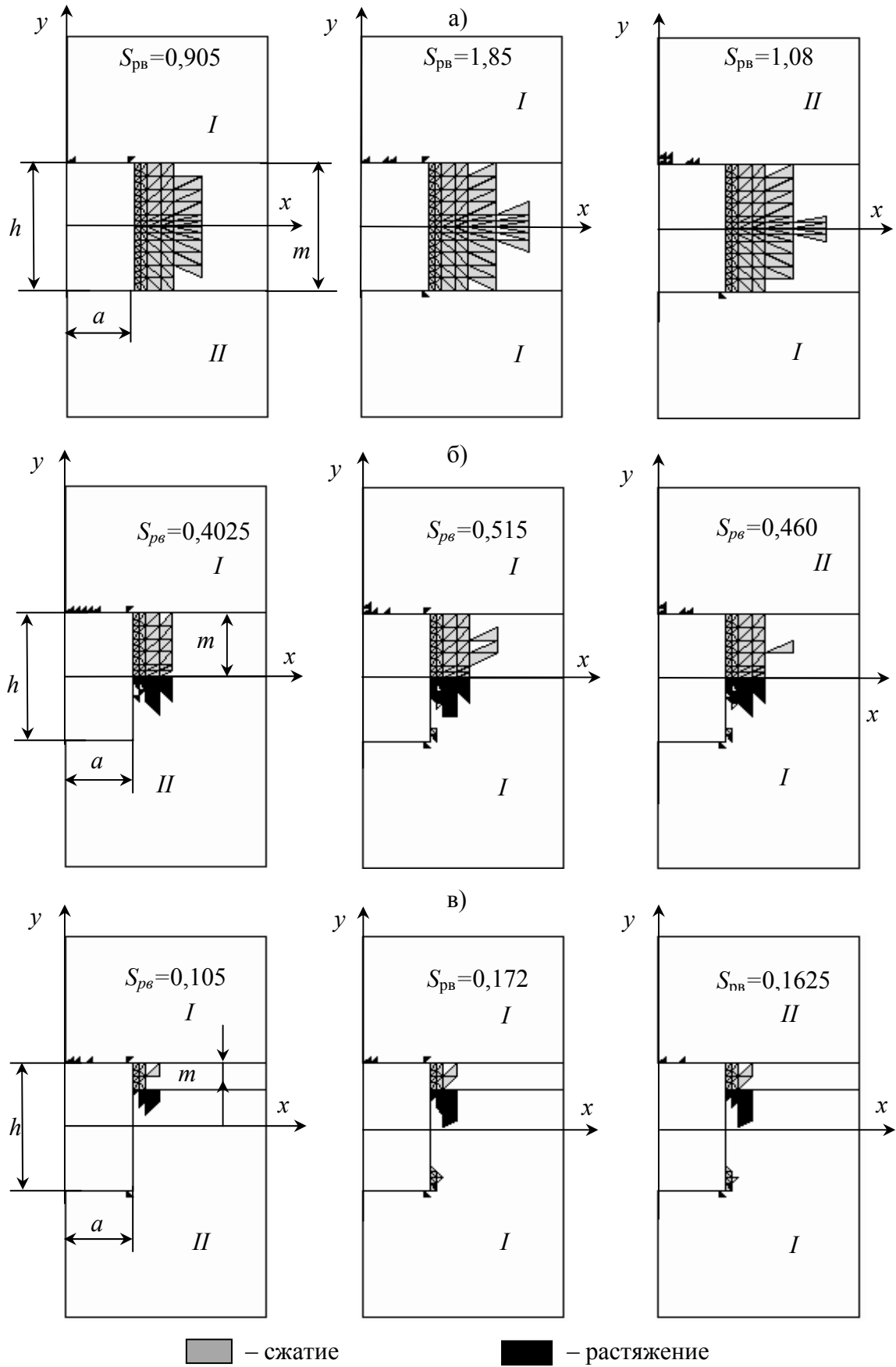


Рис. 3. Виды зоны разрушения в неоднородных породах на глубине $H = 1000$ м и при коэффициенте $\lambda = 0,6$ для соотношений: $m/h = 1$ (а), $m/h = 0,5$ (б), $m/h = 0,2$ (в)

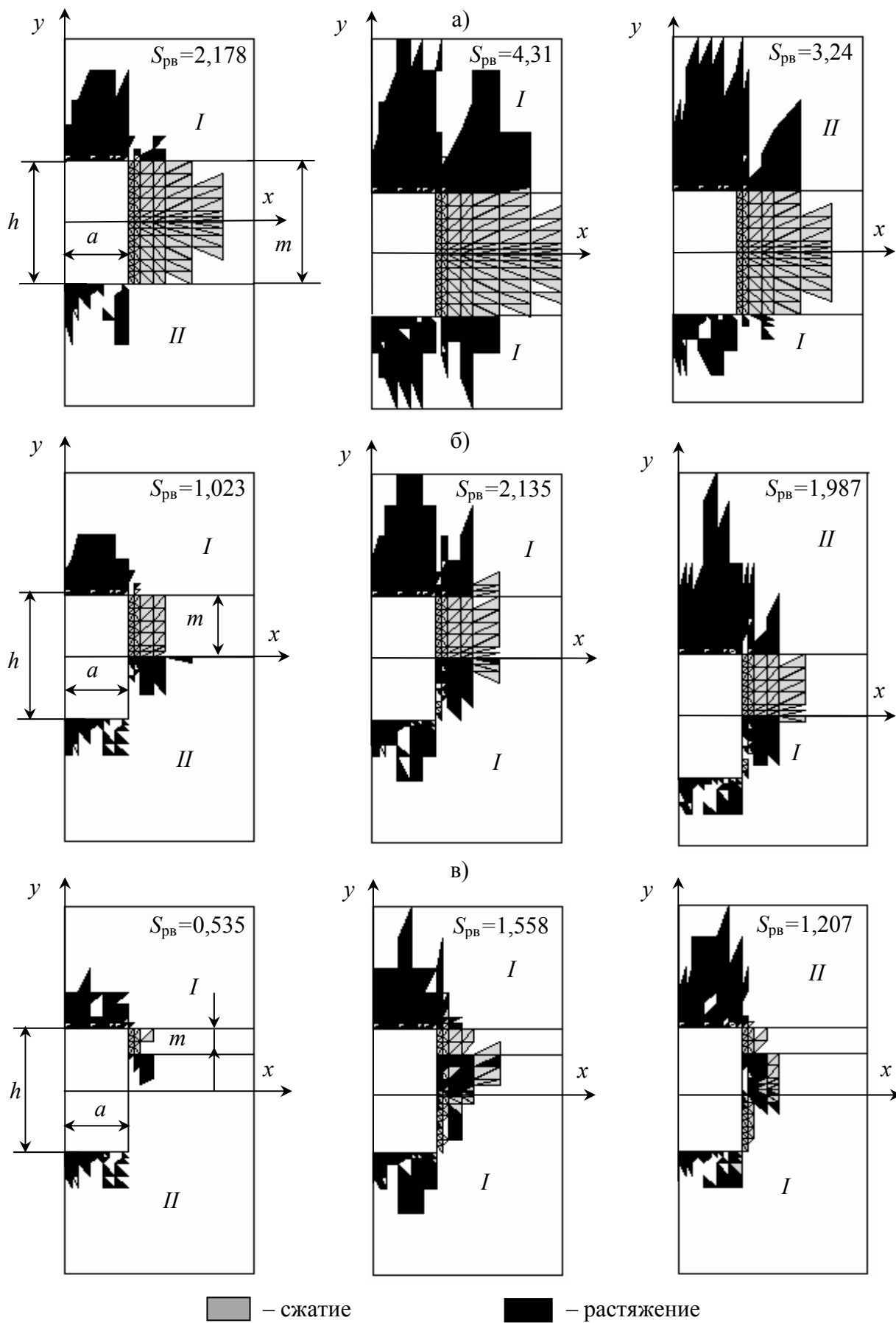


Рис. 4. Виды зоны разрушения в неоднородных породах на глубине $H = 1000$ м и при коэффициенте $\lambda = 0,2$ для соотношений: $m/h = 1$ (а), $m/h = 0,5$ (б), $m/h = 0,2$ (в)

большее расстояние от контура выработки, а зона разгрузки над кровлей и раздавленным пластом существенно увеличивается. Область разрушения от растяжения, объединяясь с зонами разрушения от сжимающих напряжений в угольном пласте и вблизи угла выработки, в конце концов, начинает охватывать весь контур выработки даже при минимальной мощности пласта. При этом отмеченная выше закономерность, касающаяся снижения проявлений горного давления при расположении в почве пласта более прочной породы, сохраняется. При малых значениях λ более отчетливо проявляется роль фактора прочности, так как максимальные размеры зона разрушения имеет, если в кровле и почве залегает порода I типа.

При изменении положения пласта относительно сечения выработки отмеченные выше закономерности деформирования пород сохраняются, а верхняя подрывка, по сути, является зеркальным отражением нижней, с той лишь разницей, что зоны разрушения будут формироваться над пластом и вблизи верхнего угла, то есть в кровле выработки. Наибольшая площадь зоны разрушения зафиксирована при расположении пласта по горизонтальной оси (смешанная подрывка). В этом случае разрушение пород отрывом происходит как в почве, так и в кровле пласта. С изменением глубины разработки H вид разрушения не меняется, а лишь изменяется площадь зоны разрушения. Для каждой схемы расположения пород и пласта моделированием подобрана глубина (прочность пород), при которой разрушения не наблюдается. Варьирование модуля спада M показало, что при разупрочнении пород площадь зоны разрушения несколько больше, чем для идеальной упругопластической среды, причем это отличие тем больше, чем больше зона разрушения от сжатия.

Таким образом, при проведении выработок по угольным пластам, обладающим меньшей прочностью, чем вмещающие породы, проявления горного давления отличаются как по форме, так и по интенсивности. Если в однородных породах зона разрушения зарождается в местах наибольшей концентрации напряжений, то при наличии в сечении выработки более мягкой прослойки, зона разрушения может зарождаться также на наименее прочном участке контура. Наибольшая площадь зоны разрушения вокруг выработки в неоднородном массиве образуется тогда, когда в месте концентрации максимальных напряжений залегают породы с минимальной прочностью. Другой характерной особенностью деформирования неоднородных массивов является проявление разрушения пород от растягивающих деформаций даже при $\lambda > 0,5$, что обусловлено различными деформационными свойствами смежных слоев пород.

Разработанные методы компьютерного моделирования позволяют получать оценки состояния выработки как с учетом комплекса наиболее значимых факторов, так и путем глубокого анализа влияния каждого из них. Это дает возможность прогнозировать проявления горного давления при проектировании выработки и более обосновано назначать мероприятия по обеспечению ее устойчивости.

Литература

1. Рац М. В. Структурные модели в инженерной геологии. – М.: Недра. – 216с.
2. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221с.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 539с.
4. Савин Г. Н. Распределение напряжений около отверстий. – К.: Наук. думка, 1968. – 887с.

© Бабиюк Г. В., Курман С. А., 2007.