

УДК 622.241.54

ВЛИЯНИЕ ОПОРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД, СОДЕРЖАЩЕГО ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ВЫРЕЗЫ

Н. В. Черданцев, В. Т. Преслер, В. Ю. Изаксон

Институт угля и углехимии СО РАН, 650610 Кемерово
E-mail: v.izaxon@kemsc.ru

С использованием метода граничных элементов решена трехмерная задача о распределении напряжений в массиве горных пород в окрестности двух цилиндрических вырезов, расположенных в зоне повышенного горного давления. На основе специально введенных показателей проведена количественная оценка техногенной нарушенности массива с регулярной прочностной анизотропией.

Ключевые слова: объемное напряженное состояние, прочностная анизотропия, поверхности ослабления, зоны нарушения сплошности, техногенная нарушенность массива горных пород, повышенное горное давление.

Учет влияния повышенного горного давления на напряженно-деформированное состояние сооружаемой выработки является важной практической и научной задачей. Повышенное горное давление, как правило, обусловлено так называемым опорным давлением, возникающим в результате образования в массиве выработанного пространства, например при отработке угольного пласта или других полезных ископаемых. Опорное давление существенно увеличивает области разрушения пород в окрестности выработки, что приводит к дополнительным нагрузкам на крепь и повышенному выделению метана, в случае если выработка проходит по газоносным пластам.

Известно, что выделение метана начинается при разрушении пласта, когда в нем образуются дополнительные свободные поверхности: трещины, кливаж и т. д. При наличии опорного давления, действующего перед очистным забоем, пробуренные в угольном пласте дегазационные скважины нарушают его сплошность. В результате часть метана из пласта, не дошедшего до очистного забоя, поступает в скважины и отводится на поверхность. Это позволяет существенно уменьшить поступление метана в очистной забой и снизить вероятность внезапных выбросов угля и газа.

Для эффективного применения системы пластовых дегазационных скважин необходимо установить их рациональные параметры (диаметры, расстояния между скважинами, углы наклона скважин), обеспечивающие наибольшее нарушение сплошности углепородного массива в их окрестности в области действия опорного давления.

При постановке задачи необходимо учитывать, что массив осадочных горных пород как сплошная среда имеет регулярные системы поверхностей ослабления, характеристики прочности которых существенно ниже прочностных характеристик породы, расположенной между ними и называемой основной [1]. Поэтому разрушения в массиве в первую очередь происходят по поверхностям ослабления при напряжениях, значительно меньших предела упругости основной породы. Следовательно, для оценки прочности массива, содержащего поверхности ослабления, достаточно определить поле напряжений в упругом массиве. Для прогноза степени нарушенности анизотропного (по прочности) массива

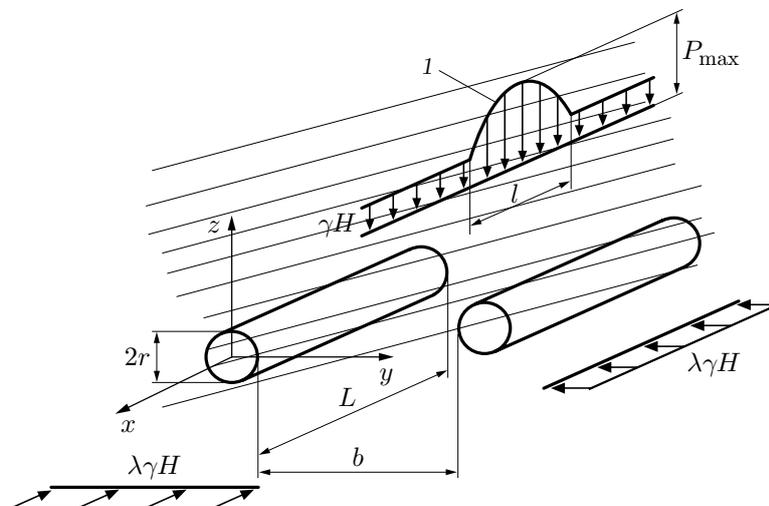


Рис. 1. Расчетная схема задачи:

1 — распределение опорного давления; наклонные линии — поверхности ослабления

в окрестности подземных сооружений, которыми являются полости искусственного или естественного происхождения различного назначения, используется следующая расчетная схема [2]. Бесконечный упругий массив горных пород со свободными границами, содержащий систему вырезов (либо один вырез), пронизан поверхностями ослабления и нагружен вблизи них гравитационными напряжениями. На некотором участке этого массива действуют дополнительные напряжения, вызываемые опорным давлением и моделируемые квадратичной зависимостью (рис. 1).

При формулировании условий прочности по регулярным поверхностям ослабления необходимо, чтобы поле напряжений было непрерывным. Наиболее эффективным и, возможно, единственным методом, определяющим это поле с учетом дополнительных напряжений, действующих только непосредственно в окрестности системы вырезов, является метод граничных элементов (МГЭ) [2, 3]. Нормальные и касательные напряжения по поверхностям ослабления, ориентация которых в пространстве задается углом α между нормалью ν к поверхности и вертикальной осью поперечного сечения z и углом β между проекцией нормали на горизонтальную плоскость xy и осью выработки x , связаны с компонентами тензорного поля напряжений известными зависимостями [2]. Проверка условия разрушения материала массива проводится по поверхностям ослабления согласно критерию прочности Мора — Кузнецова, в котором основными параметрами прочности являются угол внутреннего трения φ и коэффициент K сцепления пород по этим поверхностям. Совокупность точек, в которых в соответствии с условием Мора — Кузнецова произошло разрушение, образует области нарушенности массива — зоны нарушения сплошности (ЗНС) [1].

Расчет с использованием МГЭ объемного напряженного состояния в окрестности сопрягающихся выработок квадратного поперечного сечения и построение ЗНС, но без оценки нарушенности массива горных пород, содержащего вырезы, выполнен в работе [4]. Количественные оценки нарушенности породного массива, содержащего вырезы, необходимы для выбора рациональной формы поперечного сечения выреза, а также для установления степени нарушенности угольного пласта в окрестности щелевых вырезов при частичной или полной его дегазации. Количественные оценки нарушенности массива, находящегося в условиях плоского деформированного состояния в окрестности протяженных щелевых вырезов с прямоугольными и крестообразными поперечными сечениями, а также вырезов

с поперечными сечениями типовых и нетиповых форм, получены в [5, 6]. Предложенная модель расчета геомеханического состояния массива в окрестности объемных сооружений реализована в среде специализированного пакета прикладных программ MATHCAD.

Степень нарушенности массива определяется коэффициентом нарушенности k_n и интенсивностью нарушения I :

$$k_n = \frac{S_n(x)}{S}, \quad I = \frac{1}{l} \int_0^l k_n(x) dx$$

(S — площадь поперечного сечения вырезов; $S_n(x)$ — площадь зоны нарушения сплошности; x — абсцисса, отсчитываемая вдоль осей вырезов).

Численный эксперимент проведен для системы, включающей два одинаковых цилиндрических выреза, моделирующих фрагмент системы пластовых дегазационных скважин. Расположение вырезов задается углом θ , который образован осью, соединяющей их центры, и линией горизонта. Эюра опорного давления задается параболической зависимостью (кривая I на рис. 1). Как показывают результаты эксперимента, максимальное нарушение массива с ориентацией поверхностей ослабления, заданной углами $\alpha = 25^\circ$ и $\beta = 90^\circ$, достигается при $\theta = 50^\circ$. При этом в качестве начальных данных для расчета приняты следующие значения параметров (см. рис. 1): $K = 0,2\gamma H$; $L = 12$, $r = 1$, $b = 4$, $1 \leq f = P_{\max}/(\gamma H) \leq 7$, $1 \leq l \leq 6$, $\varphi = 20^\circ$, $\lambda = 1$ (γ — объемный вес пород; H — глубина ведения горных работ; λ — коэффициент бокового давления; L — длина цилиндрического выреза; r — радиус поперечного сечения выреза; b — расстояние между контурами цилиндрических вырезов; P_{\max} — максимальное значение опорного давления; линейные размеры отнесены к радиусу цилиндров $r = 1$).

На рис. 2, *a, б* показаны ЗНС в окрестности сечений двух вырезов вне зоны действия опорного давления и в области действия опорного давления соответственно при $l = 4$, $f = 5$. Видно, что во втором сечении, где действует максимальное опорное давление (см. рис. 2, *б*), ЗНС значительно больше, чем в первом сечении (см. рис. 2, *a*). На рис. 2, *в* ЗНС построены в сечении с максимальным значением опорного давления $P_{\max} = 7\gamma H$ при $l = 6$, $f = 7$. Видно, что при увеличении опорного давления ЗНС объединяются в единую зону, называемую областью неустойчивости.

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента нарушенности k_n от координаты x в области действия опорного давления при $l = 6$ и различных значениях f . На рис. 3 видно, что при увеличении f в диапазоне $2 \leq f \leq 5$ зависимость $k_n(x)$ является практически линейной, при $f = 6, 7$ линейный характер зависимости $k_n(x)$ нарушается. Это

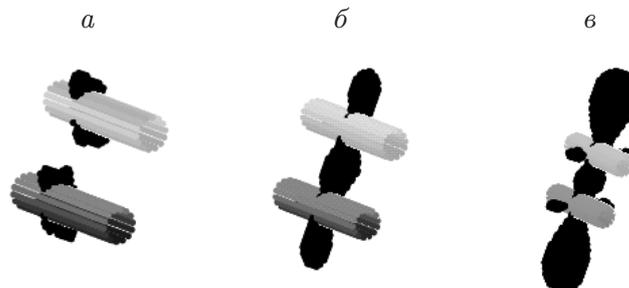


Рис. 2. Зоны нарушенности массива вблизи цилиндрических вырезов вне зоны действия опорного давления (*a*) и в области действия максимального опорного давления (*б, в*):

a, б — $l = 4$, $f = 5$; *в* — $l = 6$, $f = 7$

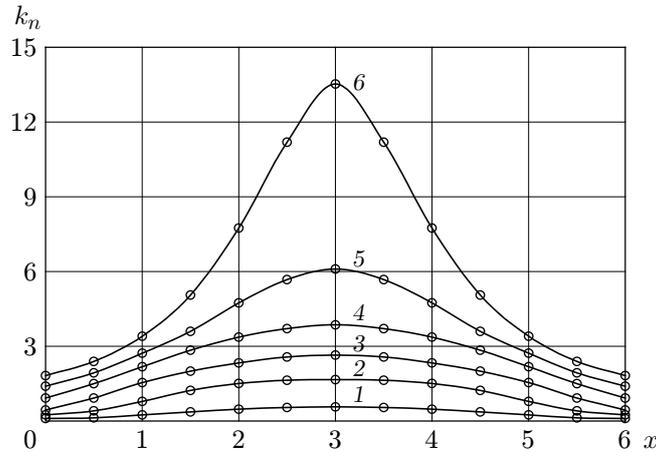


Рис. 3. Зависимость коэффициента нарушенности k_n от координаты x в области действия опорного давления при $l = 6$ и различных значениях f :
 1 — $f = 2$; 2 — $f = 3$; 3 — $f = 4$; 4 — $f = 5$; 5 — $f = 6$; 6 — $f = 7$

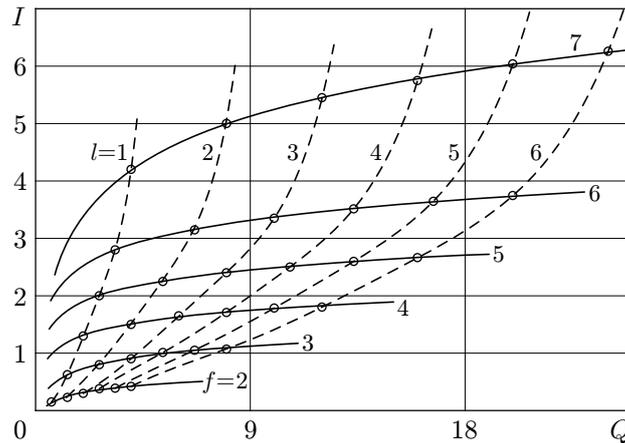


Рис. 4. Зависимости интенсивности нарушения I от площади эпюры опорного давления Q при фиксированных значениях f и различных значениях l (сплошные линии), а также при фиксированных значениях l и различных значениях f (штриховые линии)

обусловлено тем, что при $P_{\max} = 7\gamma H$ и $b = 4$ имеют место следующие явления. Во-первых, на всем протяжении опорной зоны и за ее пределами происходит смыкание и даже перекрытие ЗНС двух вырезов. Во-вторых, в области действия максимального опорного давления протяженность ЗНС значительно увеличивается, достигая величины, равной двум диаметрам вырезов, на расстоянии, равном $b/2$. В-третьих, существенно увеличиваются области нарушенности с противоположных сторон вырезов, площадь каждой из которых в несколько раз превышает площадь зоны смыкания, что подтверждает рис. 2, в. Заметим, что поведение кривых на рис. 3 аналогично поведению кривых гауссова типа и описывается выражением $k_n = (f - c) \exp(-d(x - l/2)^{1,5}) + c$, где коэффициенты d , c определяются для каждой кривой семейства.

На рис. 4 представлены зависимости интенсивности нарушения I от площади под эпюрой повышенного давления $Q = 2l(f - 1)/3$. Рис. 4 позволяет определить характер влияния параметров опорного давления (максимального значения и длины опорной зо-

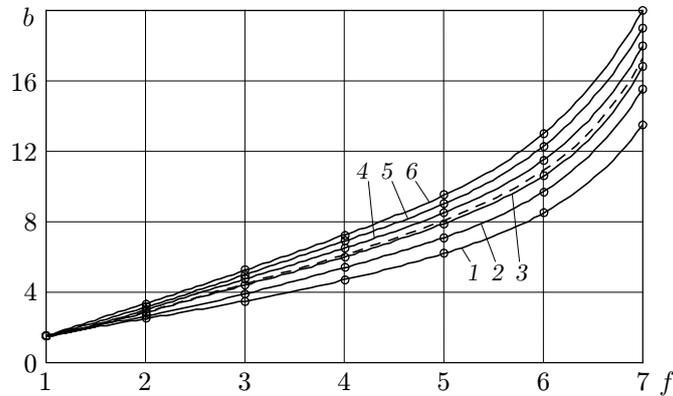


Рис. 5. Зависимость расстояния b между вырезами, при которых происходит смыкание ЗНС, от максимального значения опорного давления f при различных значениях l :

1 — $l = 1$; 2 — $l = 2$; 3 — $l = 3$; 4 — $l = 4$; 5 — $l = 5$; 6 — $l = 6$; штриховая линия — средние значения

ны) на интенсивность нарушения. Видно, что с увеличением длины опорной зоны l при фиксированном значении f скорость возрастания кривых уменьшается, а при увеличении максимума опорного давления f и фиксированных значениях l скорость возрастания кривых увеличивается. Это свидетельствует о более существенном влиянии на интенсивность нарушения максимального значения опорного давления по сравнению с влиянием длины опорной зоны. При этом для любой пары кривых на рис. 4 существуют области $0 \leq Q \leq Q_0$ (Q_0 — абсцисса точки пересечения кривых), в которых длина опорной зоны оказывает более значительное влияние, чем максимальное значение опорного давления. Например, для пары кривых $f = 3$ и $l = 3$ до точки $Q = 4$ большее влияние оказывает длина эпюры, чем ее максимум.

Рациональным расстоянием между скважинами будем считать такое расстояние, при котором ЗНС в окрестности этих скважин в сечении, где действует давление P_{\max} , соприкасаются. Это обусловлено тем, что при движении очистного забоя полуволна опорного давления синхронно перемещается в глубину пласта, что обеспечивает смыкание ЗНС пары вырезов и постепенное перемещение этой сомкнувшейся зоны вдоль линии выемочного столба со скоростью движения забоя. На рис. 5 представлена определенная с использованием данного подхода зависимость расстояния b между вырезами от максимумов эпюры f при различных значениях длины опорной зоны l .

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Введение показателя плоскостной нарушенности массива — коэффициента нарушенности — позволяет проанализировать распределение этой нарушенности вдоль оси вырезов.

Установлено, что при увеличении максимального значения опорного давления зона нарушенности концентрируется в его окрестности, достигая размера $0,4l$, и в этой области происходит процесс ускоренного накопления нарушенности.

Установлен критерий рационального размещения скважин, в соответствии с которым для рассмотренной среды определены рациональные расстояния между скважинами в зависимости от максимума и длины эпюры опорного давления.

Предложенная методика может быть применена к средам с другими параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ержанов Ж. С.** Комбайновые выработки шахт Кузбасса. Опыт поддержания и расчет устойчивости / Ж. С. Ержанов, В. Ю. Изаксон, В. М. Станкус. Кемерово: Кемер. кн. изд-во, 1976.
2. **Черданцев Н. В.** Некоторые трехмерные и плоские задачи геомеханики / Н. В. Черданцев, В. Ю. Изаксон. Кемерово: Кузбас. гос. техн. ун-т, 2004.
3. **Партон В. З.** Методы математической теории упругости / В. З. Партон, П. И. Перлин. М.: Наука, 1981.
4. **Черданцев Н. В., Черданцев С. В.** Зоны нарушения сплошности в области сопряжения двух горных выработок // ПМТФ. 2004. Т. 45, № 4. С. 137–139.
5. **Черданцев Н. В., Преслер В. Т., Изаксон В. Ю.** Оценка нарушенности породного массива в окрестности щелевых вырезов // ПМТФ. 2008. Т. 49, № 1. С. 129–133.
6. **Черданцев Н. В., Преслер В. Т., Изаксон В. Ю.** Классификация вырезов по степени их влияния на окружающий массив // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. 2006. № 5. С. 3–7.
7. **Полевщиков Г. Я.** Динамические газопроявления при проведении подготовительных и вскрывающих выработок в угольных шахтах. Кемерово: Ред.-изд. фирма “Весть”, 2003.

*Поступила в редакцию 1/IV 2008 г.,
в окончательном варианте — 11/XII 2008 г.*
