

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.241.54:539.3

Н.В. Черданцев

УСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕЛИКОВ В ОКРЕСТНОСТИ СИСТЕМЫ ВЫРАБОТОК, СООРУЖАЕМЫХ В АНИЗОТРОПНОМ ПО ПРОЧНОСТИ МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Основной проблемой широкого применения комбинированной (открыто-подземной) геотехнологии, эффективность и перспективы использования которой приведены в [1], является недостаточное обоснование устойчивости углепородного массива, расположенного между выработками, и называемого междукамерным целиком. В процессе отработки пласта неустойчивые породы в целике приводят к завалам выработок, вызывая сбои угледобычи, снижая производительность труда. Проблеме геомеханического состояния массива с поверхностями ослабления (направлениями в массиве с пониженными по сравнению с другими направлениями его характеристиками прочности), вмещающем систему протяжённых выработок круглого (квадратного) сечения посвящён ряд статей, например, [2, 3]. Ниже приводится краткое изложение приведённой в этих статьях физико-математической модели [4] и результаты исследования устойчивости целиков, полученные в рамках этой модели.

Углепородной массив как массив осадочных горных пород обладает характерным для него свойством прочностной анизотропии, – наличием так называемых поверхностей ослабления, обусловленных слоистостью, кливажём и иными

трещинами. Горные породы по этим направлениям имеют более низкие характеристики прочности по сравнению с основной породой, расположенной между этими поверхностями. Массив горных пород под действием сформировавшегося в окрестности выработки (системы выработок) поля напряжений в различных условиях может разрушаться как по основной породе согласно критерию разрушения Кулона – Мора [5]

$$\sigma_1 \geq \beta \sigma_3 + \sigma_c, \quad (1)$$

так и по поверхностям ослабления при определённой их ориентации в соответствии с критерием Мора - Кузнецова

$$\sigma_v \geq R_p, \quad |\tau_v| \geq \sigma_v \operatorname{tg} \varphi + K. \quad (2)$$

В формулах (1), (2) σ_1, σ_3 – главные напряжения в исследуемой точке, σ_c – предел прочности основной породы на одноосное сжатие, он связан с коэффициентом крепости пород f по шкале проф. М.М. Протодьяконова зависимостью $\sigma_c = 10 \text{ MPa} f$, β – объёмный коэффициент сжатия

$$\beta = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad \tau_v \text{ и } \sigma_v \text{ – касательное и нормаль-}$$

ное напряжения на поверхности ослабления, φ и

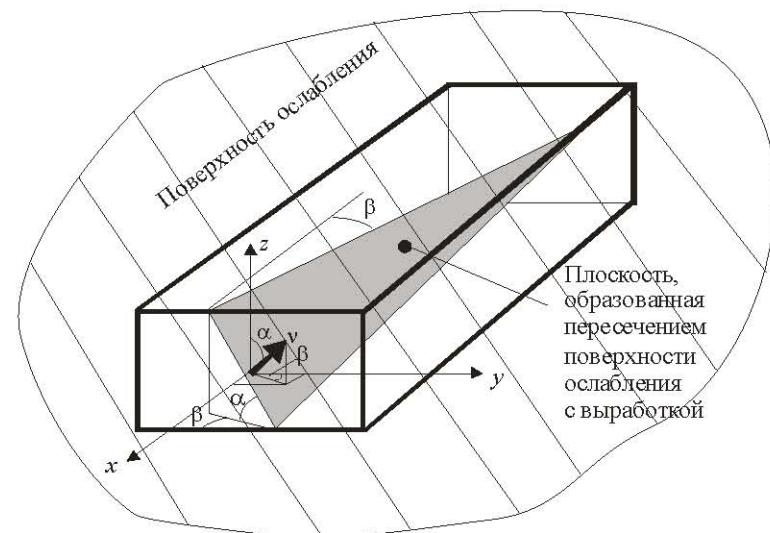


Рис. 1. Положение поверхности ослабления относительно выработки

K – угол внутреннего трения и коэффициент сцепления по поверхности ослабления, R_p - предел прочности на растяжение в направлении перпендикулярном направлениям поверхностей ослабления.

Значение угла внутреннего трения ϕ по основной породе и по поверхностям ослабления колеблется в пределе $20^\circ - 25^\circ$. Поверхности ослабления классифицированы проф. Г.Н. Кузнецовым по группам [6, 7]: 1) микрослоистость $K=(0,6-0,9) K_0$, 2) поверхности отдельностей $K=(0,3-0,6) K_0$, 3) контакт слоёв $K=(0-0,3)K_0$, где K_0 – коэффициент сцепления основной породы. Он связан с пределом прочности σ_c известной зависимостью [5]

$$K_0 = \sigma_c \frac{1 - \sin \varphi}{2 \cdot \cos \varphi}. \text{ Нормальные } \sigma_v \text{ и касательные } \tau_v$$

напряжения по поверхности ослабления выражаются через компоненты тензора поля напряжений, рассчитываемого методами механики деформируемого твёрдого тела, известными формулами теории напряжённого состояния [4, 6, 7]

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 + \\ &+ 2\tau_{xy} ml + 2\tau_{yz} mn + 2\tau_{xz} nl, \\ p_v^2 &= (\sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n)^2 + (\tau_{xy} l + \\ &+ \sigma_y m + \tau_{yz} n)^2 + (\tau_{xz} l + \tau_{yz} m + \sigma_z n)^2, \\ \tau_v &= \sqrt{p_v^2 - \sigma_v^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

в которых l, m, n – направляющие косинусы нормали к поверхности ослабления.

Ориентация поверхностей ослабления по отношению к выработке задаётся в пространстве углом падения α (угол между нормалью к поверхности и вертикальной осью поперечного сечения z) и простирации β (угол между проекцией нормали v на горизонтальную плоскость $x\bar{y}$ и горизонтальной осью поперечного сечения выработки y) (рис. 1). При $\beta=0^\circ$ выработка (штрекового типа) пройдена по простиранию поверхности ослабления, если $\beta=90^\circ$ (выработка типа квершлага), то она сооружается в крест простирания этих поверхностей. Направляющие косинусы выражаются через углы α и β очевидными выражениями

$$\begin{aligned} l &= \cos(n, x) = \sin \alpha \cos \beta, \\ m &= \cos(n, y) = \sin \alpha \sin \beta, \\ n &= \cos(n, z) = \cos \alpha. \end{aligned}$$

Совокупность точек некоторой окрестности выработки, в которых произошло разрушение массива согласно какому-либо из перечисленных выше критерии, называются зонами нарушения сплошности (ЗНС) [6, 7].

Породы, расположенные в ЗНС, склонны к вывалам, а потому неустойчивы. В геомеханике принято считать, что массив в окрестности систем

мы выработок (а, следовательно, и целик – промежуток между выработками) не устойчив, если ЗНС от каждой выработки смыкаются друг с другом в целике, образуя единую зону, которую и называют областью неустойчивости. Её трудно крепить. По-видимому, единственным способом повышения устойчивости этих пород, является их цементация. Анкерным креплением не усилить породы в области неустойчивости. Поэтому в неустойчивом целике они частично выдавливаются внутрь выработок, а его края получают значительные смещения. Раздавленный целик превращается в своеобразную выработку (квазивыработку), в окрестности которой образуются новые зоны нарушения сплошности ещё больших размеров. Поэтому с точки зрения оптимального размещения выработок, при котором размеры ЗНС минимальны, задача по установлению положения областей неустойчивости, их размеров и конфигурации является важной и актуальной.

Модель геомеханического состояния анизотропного по прочности массива горных пород включает расчётную схему массива, представленную бесконечной средой с полостью, пронизанной системой поверхностей ослабления и нагруженной около полости со стороны массива естественным полем напряжений, а изнутри неизвестной фиктивной нагрузкой. Для построения непрерывного поля напряжений, необходимого для оценки прочности массива по критерию разрушения Мора – Кузнецова [6, 7], используется метод граничных уравнений (МГЭ). Его сущность заключается в численном решении граничного интегрального уравнения второй внешней краевой задачи теории упругости относительно фиктивной нагрузки [8] путём разбиения поверхности полости конечным числом граничных элементов и заменой интеграла суммой. Полагая при этом, фиктивная нагрузка, напряжения, реакция крепи по каждому элементу постоянны. В результате этой процедуры получается система линейных алгебраических уравнений относительно проекций фиктивной нагрузки. После решения системы алгебраических уравнений напряжения в любой точке массива определяются суммированием напряжений от действия фиктивной нагрузки и естественного поля напряжений.

Разработанный на основе описанной выше модели алгоритм оценки геомеханического состояния около горных выработок, позволяет существенно уточнить параметры их паспортов крепления за счёт дифференцированного учёта размеров и конфигурации ЗНС в приконтурной части массива.

В представленной статье приведены результаты исследований устойчивости целиков в окрестности системы двух горизонтальных параллельных выработок квадратного сечения пролётом 4м, пройденных на глубине 400м. Массив, средняя плотность которого 25 kN/m^3 , нагружен только литологическими силами. Коэффициент бокового

давления $\lambda=1$. Коэффициент Пуассона горных пород принят 0,25 единицы. Угол внутреннего трения пород $\varphi=20^\circ$. Коэффициент крепости f основной породы изменялся от 0 до 12 единиц, тип поверхностей ослабления – контакт слоёв принят

равным $K=0,2K_0$.

На фрагментах рис. 2 представлены контуры выработок с ЗНС при различных размерах целиков и ориентации поверхностей ослабления. Хорошо видно, что при определённой ориентации

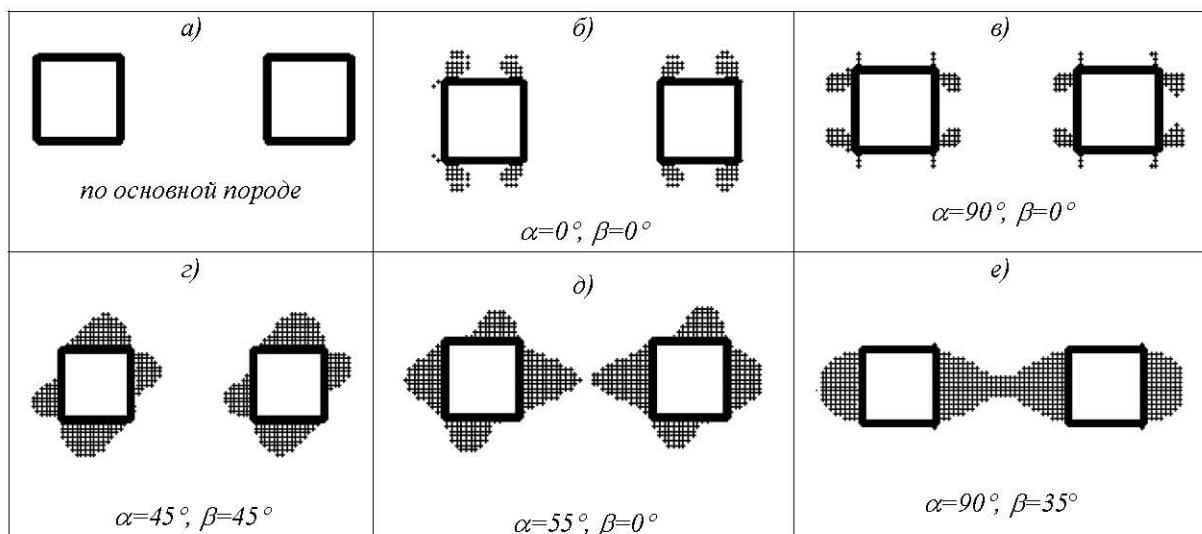


Рис. 2. Зоны нарушения сплошности массива с $f=2$ и поверхностями ослабления в окрестности системы выработок квадратного сечения. Размер целика 7м

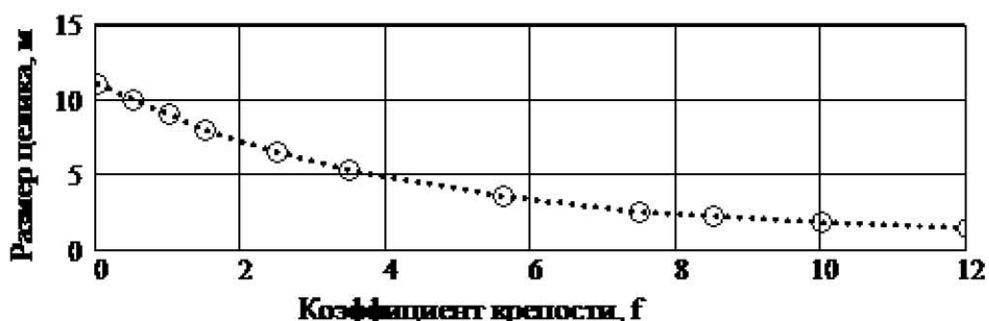


Рис. 3. График зависимости минимального размера устойчивого целика от коэффициента крепости вмещающих пород

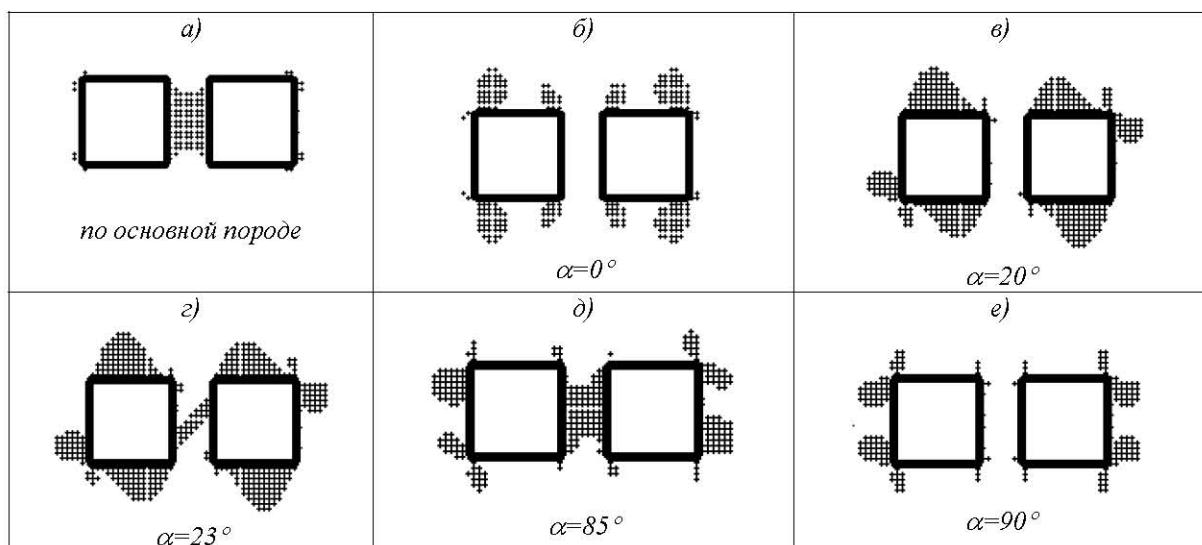


Рис. 4. Зоны нарушения сплошности массива с поверхностями ослабления в окрестности системы пластовых выработок (трасса выработок совпадает с направлением простирания: $\beta=0^\circ$). Размер целика 2м, $f=1,5$

поверхностей в целике происходит объединение ЗНС и потому в таком положении целик не устойчив (фрагмент *e*). На остальных фрагментах показаны устойчивые состояния целиков, поскольку смыкания ЗНС не происходит. По фрагментам видно, что при целике в 7 м и коэффициенте крепости пород в 2 единицы его потеря устойчивости происходит только путём разрушения массива по поверхности ослабления.

График зависимости устойчивых размеров целиков, показанный на рис. 3 построен интервалах всех возможных изменений α и β ($0^\circ - 90^\circ$) и достаточно широком диапазоне изменения коэффициента крепости f (0 - 12). Следует отметить,

что возникает за счёт его разрушения по поверхности ослабления (фрагменты *г*, *д*).

На рис. 5 (а) построены кривые зависимости размеров минимальных устойчивых целиков от углов падения поверхности ослабления для ряда коэффициентов крепости. Области со стороны вогнутости кривой и левее прямой, соединяющей её концы, являются областями неустойчивости. По диаграмме на рис. 5 (б), на которой показаны четыре значения целика, соответствующих четырём вертикальным пунктирным линиям, при заданных параметрах анизотропного по прочности массива легко установить размеры устойчивых целиков области достаточно нанести точку, коор-

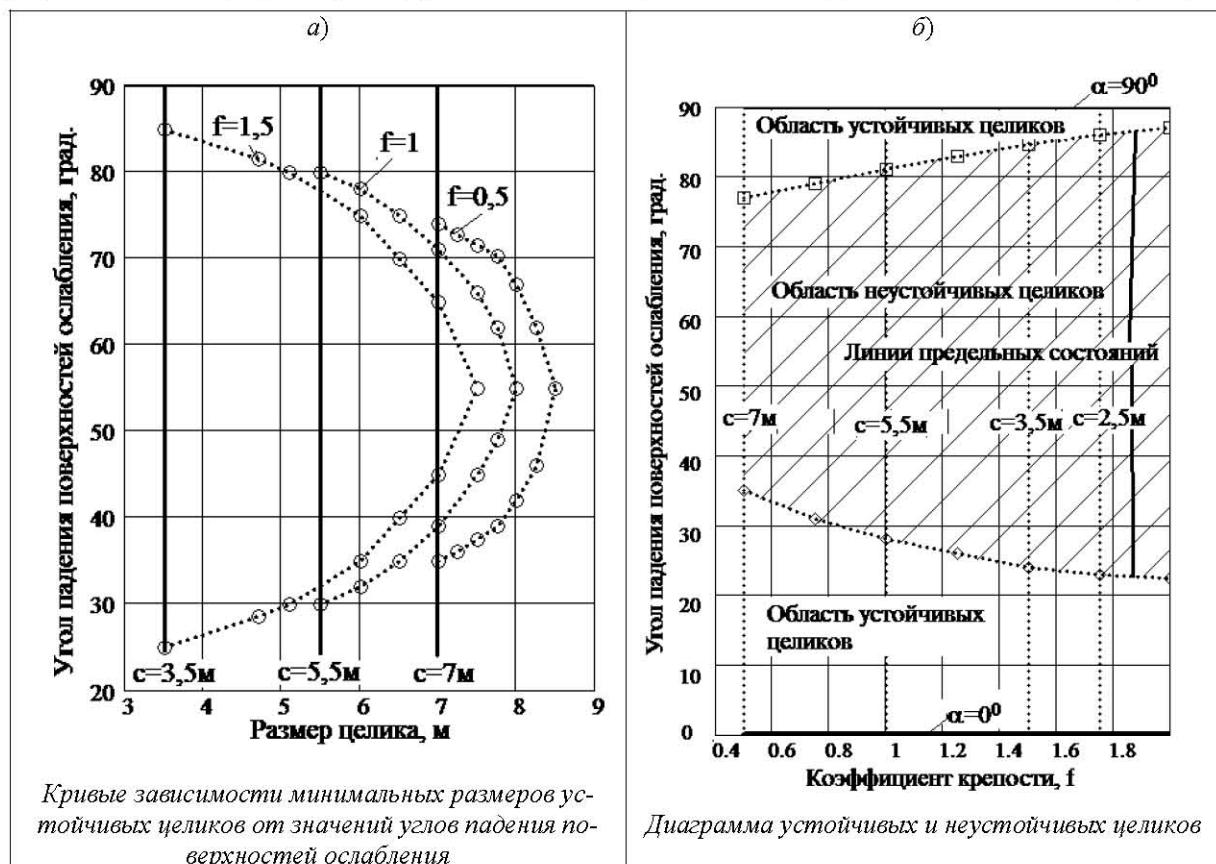


Рис. 5. Графики изменения размеров устойчивых целиков в зависимости от параметров среды

что при слабой породе ($f=0$) устойчивый целик составляет три пролёта выработки, а в достаточно прочном, но не монолитном массиве ($f=12$) устойчивый целик не стремится к нулю, а составляет полупролёт выработки.

Проведён анализ устойчивости целиков в выработках штрекового типа. На фрагментах рис. 4 зоны нарушения сплошности построены в окрестности выработок штрекового типа с небольшим размером целика при изменении угла падения поверхности ослабления от 0° до 90° . Хорошо видно, что при малых ($0^\circ \leq \alpha \leq 22^\circ$) и больших углах падения ($86^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$) потеря устойчивости целика происходит путём разрушения его по основной породе (фрагмент *a*). На интервале же изменения угла падения $23^\circ - 85^\circ$ потеря устойчивости цели-

динаты которой соответствуют параметрам массива коэффициенту крепости и углу падения поверхности ослабления, на диаграмму. Если точка окажется внутри заштрихованной области, то целик неустойчив, если точка расположится за пределами области, целик устойчив.

Анализ этих результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Применение модели обеспечивает достаточно полное исследование устойчивости целиков массива с регулярной прочностной анизотропией, вмещающего систему протяжённых горизонтальных параллельных горных выработок.

2. При размере целика большем пролёта выработок и коэффициенте крепости более 1,5 единиц его потеря устойчивости происходит только

путём разрушения массива по поверхностям ослабления при определённой их ориентации. Максимальные разрушения целика соответствуют углу падения 90° и углу простирания 35° .

3. При небольшом размере целика меньшем пролёта выработки и коэффициенте крепости не более 1,5 единиц его потеря устойчивости происходит не только путём разрушения массива по поверхности ослабления, но и за счёт разрушения по основной породе.

4. Размеры устойчивого целика в слабом массиве ($f=0$) очень значительны, но конечны. Даже в прочном массиве ($f=12$) при наличии поверхностей ослабления устойчивый целик не стремится к нулю.

5. Диаграммы устойчивых и неустойчивых целиков в штрековых выработках достаточно просто определяют размеры целиков при некоторых коэффициентах крепости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нецветаев А.Г., Репин Л.Н., Соколовский А.В., Кучеренко А.В. Обоснование геомеханических параметров выемки угля с применением комплексов глубокой разработки пластов (КГРП) // Уголь.–2005.–№ 5.–С. 66–68.
2. Черданцев Н.В., Федорин В.А. Геомеханическое состояние массива горных пород с поверхностями ослабления в окрестности комплекса протяжённых горизонтальных выработок // Вестник КузГТУ, 2006, № 1.–С. 17–19.
3. Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Федорин В.А., Ануфриев В.Е. Устойчивость целиков с учётом вывалаобразования в геотехнологии HIGHWALL // Вестник КузГТУ, 2010., № 6. –С. 6–9.
4. Черданцев Н.В., Изаксон В. Ю. Некоторые трёхмерные и плоские задачи геомеханики. - Кемерово: КузГТУ, 2004.-190 с.
5. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений.–М.: Недра, 1994.–382 с.
6. Ерсанов Ж.С., Изаксон В.Ю., Станкус В.М. Комбайновые выработки шахт Кузбасса. Опыт поддержания и расчет устойчивости – Кемерово: Кемеров. книжн. изд-во, 1976.–216 с.
7. Кузнецов Г.Н. Графические методы оценки предельных состояний трещиноватого массива вокруг горных выработок // Современные проблемы механики горных пород. – Л.: Наука, 1972. С. 30 – 44.
8. Лурье А. И. Теория упругости. - М.: Наука. - 1970. - 940 с.

Автор статьи:

Черданцев
Николай Васильевич,
докт. техн. наук, зав. лабораторией
геомеханики угольных месторожде-
ний Института угля СО РАН.
E-mail: cherdantsev_nv@icc.kemsc.ru