

цией академика И.В. Горынина и д.т.н. А.С. Орыщенко. – СПб: НПО «Профессионал», 2012. – 916 с.

8. Правила расчетов приводных двигателей. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

9. Rentyuk Vladimir «Control stepper motors in both directions» EDN March 18, 2010.

10. Кенио Такаши. Двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ., М.: Энергоатомиздат, 1987 – 199 с.

11. Белов М.П., Новіков В.А., Розсудів Л. Н. Электропривод типових виробничих механізмів і технологічних комплексів. - 3-е изд., Испр .. - М.: Видавничий центр "Академія", 2007.

Рукопис подано до редакції 02.04.201

УДК (004.94:622.83):622.268.1

Б. Н. АНДРЕЕВ, д-р техн. наук, проф., С. С. СЕРГЕЕВ, ассистент  
Криворожский национальный университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА НА УЧАСТКЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК

**Целью работы** является исследование особенностей формирования напряжённо-деформированного состояния массива за плоскостью забоя при сооружении параллельных горных выработок.

**Методы исследования.** Поставленная в работе цель достигнута путем оценки результатов лабораторных исследований, компьютерного моделирования и иных апробированных методов решения геомеханических задач.

**Научная новизна** исследования заключается в установлении зависимостей размеров зоны неравнокомпонентных напряжения за плоскостью забоя от расстояния между параллельными выработками, направленных на совершенствование технологии геостроительства.

**Практическая значимость.** Полученные зависимости напряженно – деформированного состояния приконтурной области массивов параллельно строящихся выработок, позволяют определить способ проведения сооружения и рациональный тип крепления, для обеспечения должного закрепного пространства и долгосрочного использования подземных объектов.

**Результаты.** Рассмотрены особенности сооружения горных выработок на шахтах Криворожского бассейна. Определена оптимальная программа, на основе методов конечных элементов позволяющая рассчитать перемещения, деформации, напряжения, внутренние усилия, возникающие в теле под действием статической нагрузки. В ходе исследований доказано, что в процессе выемки породы при проведении выработок происходит перераспределение статических напряжений и в призабойной области массива возникает непосредственно примыкающая к плоскости забоя зона неравнокомпонентного напряженного состояния (зона пластических деформаций растяжения), которая переходит в зону сжатия (естественное напряжённое состояние массива). Проанализированы характерные особенности геомеханического состояния массива пород за плоскостью забоя горизонтальных горных выработок. Приведены результаты компьютерного моделирования распределения напряжений естественного поля для условий шахт Криворожского бассейна. Установлены составляющие элементы зоны неравнокомпонентного напряжённого состояния в приконтурной области массива. Определены фактические размеры зоны пластических деформаций растяжения и сжатия за плоскостью забоя параллельных выработок. Получены закономерности перераспределения полей напряжений впереди забоев в зависимости от расстояния между параллельными выработками. Уточнены фактические размеры целика между однотипными подземными объектами исключаящие взаимное влияние на контур сооружений.

**Ключевые слова:** горизонтальная горная выработка; геостроительство; компьютерное моделирование.

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-103-89-94

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Среди основных направлений расширения минерально-сырьевой базы Криворожского железорудного бассейна большое значение имеет разработка богатых руд на глубоких горизонтах.

Увеличение глубины ведения горных работ сопровождается ухудшением геологических и горнотехнических условий [1, 2]. Это обуславливает необходимость решения задач по получению достоверных сведений о геомеханическом состоянии породного массива, позволяющих одновременно составить представление о характере и интенсивности возможных деформаций горных выработок, а также разработать и внедрить наиболее эффективные для больших глубин технологические решения при строительстве капитальных и подготовительных выработок [3].

**Анализ исследований и публикаций.** На шахтах и рудниках многих стран мира применяются современные горнопроходческие комплексы ведущих производителей. Основным направлением совершенствования современного горного оборудования, в частности разработок шведской компании «Atlas Copco» и финской «Sandvik Tamrock», является применение на буровых установках и погрузочных машинах компьютеров со специальным программным обеспечением.

© Андреев Б. Н., Сергеев С. С., 2018

печением, которое имеет широкие возможности [4,5]. Высокий уровень автоматизации, компьютеризации и программирования требует внедрения новых подходов к разработке технологических решений проходки горных выработок, обеспечивающих максимальное использование возможностей современной проходческой техники [6,7]. В ряде стран, где ведется интенсивная подземная добыча полезных ископаемых, проводятся работы по развитию технологий строительства подземных сооружений, прорабатываются новые методы и методологии подготовки месторождений к разработке полезных ископаемых подземным способом с использованием новейшего проходческого оборудования [7].

**Изложение материала и результаты.** Многие геомеханические задачи, с которыми приходится в настоящее время сталкиваться исследователям и инженерам, не поддаются аналитическому решению либо требуют значительных затрат времени на экспериментальную реализацию. Прогресс в разработке численных методов и компьютерного моделирования позволил существенно расширить круг задач, доступных анализу [8]. В последние годы значительное развитие технологий программирования обусловило широкое применение компьютерной техники для анализа и моделирования напряженно-деформированных состояний массива горных пород.

В программных комплексах для получения оценки разрушения пород используются теории прочности: наибольших нормальных напряжений, максимальных относительных удлинений, наибольших касательных напряжений, полной потенциальной энергии, О. Мора, энергетической теории формоизменения, П. П. Баландина, И. Н. Миролюбова, предельных сопротивлений сдвигу и отрыву, Я. Б. Фридмана и др. При анализе каждой теории за эквивалентное напряжение применялся предел прочности породы растяжению и сжатию [9].

В ходе исследований рассматривался и анализировался ряд программ на основе методов конечных элементов (МКЭ), включающих в себя статический структурный анализ (Static Structural), позволяющий рассчитать перемещения, деформации, напряжения, внутренние усилия, возникающие в теле под действием статической нагрузки [10]. Всё это необходимо для определения параметров “зоны разгрузки” и построения модели по всем критериям и нормам. Было решено использовать программный комплекс 3D моделирования Ansys.

Однако исследования, проводимые с помощью компьютерного моделирования, могут иметь погрешность и в связи с этим было произведено сравнение полученных результатов с лабораторными экспериментами. За основу были взяты исследования проф. Ключкова В. Ф. занимавшегося вопросами изучения напряженно – деформированного состояния приконтурной области массива для условий Кривбасса, выполненные методом фотоупругости с “замораживанием” полей напряжений моделей, в поле центробежных сил [10]. Для проверки адекватности модели был повторно произведен ряд экспериментов, только построенных при помощи компьютерного моделирования.

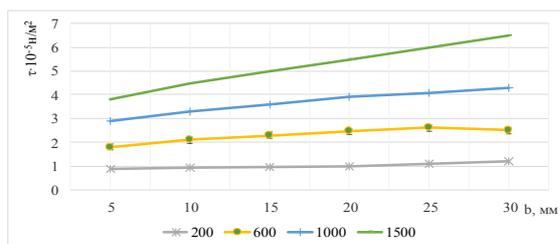


График №1

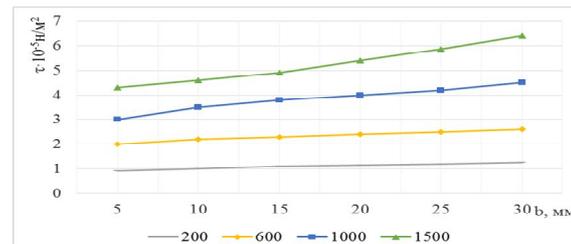


График №2

Зависимость максимальных касательных напряжений в углах моделей от их ширины полученные методом фотоупругости граф. №1 и компьютерном моделировании граф. №2

При сравнении значений, полученных обоими методами (график №1, 2), наблюдается незначительная разбежность результатов погрешность, которая составляет 7-11 % (табл. 1). Закономерность увеличения погрешности четко прослеживается при увеличении моделируемой глубины для 1000-1500мм и составляет порядка 12-15%. Подводя итог выше сказанного можно утверждать, что модель является адекватной и допустимая погрешность тому подтверждение.

Расхождение между результатами, полученными методом фотоупругости и компьютерным моделированием рассчитывалась по формуле относительной погрешности [11]

$$\Delta = \frac{l_k - l_\phi}{l_k} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Принимая во внимание практически полное отсутствие в Криворожском бассейне тектонических напряжений, для участков приконтурных массивов горизонтальных выработок, главного двухпутевого квершлага с сечением  $S_{св} = 18,5 \text{ м}^2$  и двух однопутевых квершлагов с сечением  $S_{св} = 12,65 \text{ м}^2$ , горизонта 1340 м, ш. «Октябрьская», ПАО «КЖРК», было проведено компьютерное моделирование характера перераспределения напряжений естественного поля, обусловленных силами гравитации.

Таблица 1

Расстояние до области повышенных напряжений в моделях

Модель		Соотношение между сторонами модели	Полученное методом фотоупругости, $l_{ф}$ м	Полученное методом при компьютерном моделировании, $l_{к}$ м	Погрешность, %
T1	M1	1:1	1,06	1,189	11
	M2	1:2	1,515	1,698	11
T2	M3	1:3	1,842	2,093	12
	M4	1:4	2,082	2,32	11
Средневзвешенная погрешность					11,25

В ходе исследований определено, что при проведении выработок вследствие выемки породы в призабойной области массива происходит перераспределение статических напряжений с образованием зон деформаций растяжения и сжатия (рис. 1).

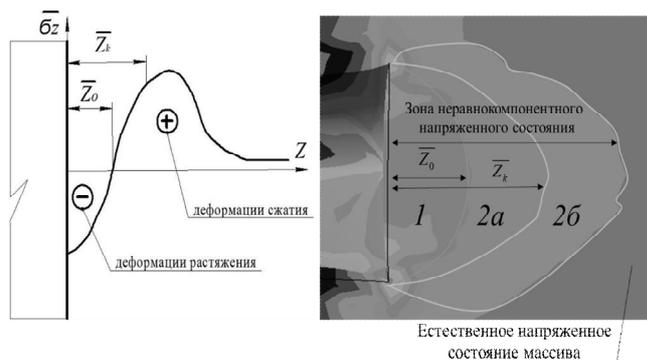


Рис. 1. Зона неравнокомпонентного напряженного состояния в призабойной области массива двухпутевого квершлага

Непосредственно к плоскости забоя выработки примыкает зона деформаций растяжения 1, за которой следует зона деформаций сжатия – 2, которые также можно разделить на две подзоны:

- а) максимальные деформации сжатия, находящиеся на расстоянии равном  $0,9-0,95$  условного радиуса выработки;
- б) конечные деформации сжатия, соответствующее крайней точке рассматриваемой зоны находящаяся на расстоянии от плоскости забоя выработки, зависящие от физико-механических свойств массива.

Затем зона сжимающих деформаций плавно теряет интенсивность по мере удаления от выработки и стремится к уровню естественного напряженного состояния массива.

Также на основании полученных данных определено, что средневзвешенный экстремум деформаций сжатия наблюдается на расстоянии  $2,1$  м от плоскости забоя, а полученный расчетный экстремум деформаций сжатия по методике Миндели, Вайштейна, Демчука [12], (2), равен  $2,3$  м. Погрешность, составляет порядка  $7\%$ , незначительная разбежность объясняется тем, что формула не учитывает многих геомеханических факторов и основана на учете площади сечения и предела прочности на одноосное сжатие.

Расчетный экстремум деформаций сжатия по методике Э. О. Миндели, Л. А. Вайштейна, П. А. Демчука определяется из выражения [12]:  $0,9 \dots 0,95R_y$ , где  $R_y - R_{np}$  – приведенный или условный радиус выработки

$$R_y = R_y = \sqrt{\frac{S_{свч}}{\pi}}, \quad (2)$$

где  $S_{свч}$  – площадь сечения выработки в черне.

В условиях пересечения слабых пород, а именно тальковых сланцев и исходя из плана горизонта (рис.2), моделировалась ситуация с двумя параллельными однопутевыми квершлагами с площадью поперечного сечения  $S_{св} = 12,65 \text{ м}^2$  проходимыми по продам крепостью  $f = 3-4$  и  $10-12$ .

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в зависимости от расстояния между параллельными выработками поля напряжений перераспределяются, оказывая основное влияние на протяженность зон деформаций сжатия и разгрузки в призабойной области массива.

Минимальные влияния на зону разгрузки начинаются при размере целика  $6R_y$  или 12 м – в породах с крепостью  $f = 10-12$  по шкале проф. М.М. Протодяконова. Также определено, что на расстоянии от  $1R_y$  до  $5R_y$  происходит взаимовлияние параллельных забоев на размер зоны разгрузки и сжатия. Экстремум деформаций сжатия размещен между выработками. Это связано с тем, что образующиеся напряжения в приконтурном массиве забоев суммируются, влияя при этом на протяженность зон сжатия и разгрузки. Однако размер зоны деформации растяжения практически не изменяется при изменении размеров целика, это связано с тем, что в основном на эту область влияют лишь геометрические параметры выработки и глубина заложения. При размере целика от  $6R_y$  до  $9R_y$  экстремум деформаций сжатия перераспределяется, разделяется и постепенно перемещается в сторону каждого из забоев.

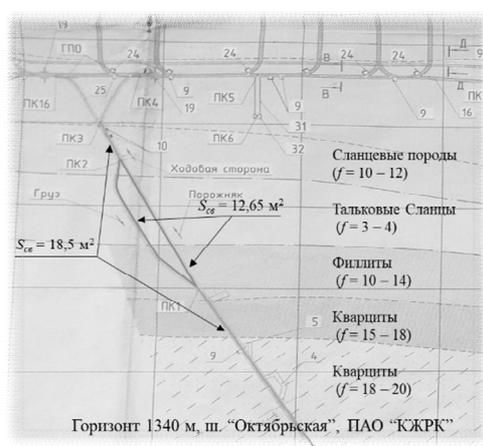


Рис. 2. План горизонта 1340 м, ш. «Октябрьская», ПАО «КЖРК»

Также, исходя из полученных и проанализированных результатов определено, что взаимное влияние выработок на контур друг друга начинается сказываться, когда расстояние между ними меньше  $7R_y$  или 14 м при крепости породы по шкале проф. М. М. Протодяконова  $f = 10-12$ . В связи с этим минимально допустимый размер целика равен 14 м или  $7R_y$ , а рекомендуемый для строительства  $9R_y$  или 18 м, в этом случае практически полностью прекращается взаимовлияние выработок друг на друга.

Анализируя полученные результаты определено, что при коэффициенте крепости породы  $f=3-4$  общее влияние выработок наблюдается, все еще при расстоянии между ними равное  $7R_y$  и эта тенденция продолжается до размеров целика в  $9R_y$ . Также, определено, что взаимное влияние забоев распространяется на размер зоны разгрузки, и на длину зоны деформаций сжатия при  $7R_y - 9R_y$ . Экстремум деформаций сжатия смещен четко по середине между выработками как это наблюдалось при крепости породы  $f = 10-12$ . Только при размере целика в  $11R_y$  прекращается влияние выработок на рассматриваемые зоны за плоскостью забоя.

Также исходя из полученных и проанализированных данных можно утверждать, что при крепости породы  $f = 3-4$  минимально допустимое расстояние между параллельными выработками должно быть равным  $9R_y$  или 18 м, а не как принято в проектом плане 12 м, то есть 6 приведенных радиусов выработки. Рекомендуемый размер целика  $11R_y$ , практически полностью прекращает взаимное влияние выработок на контур друг друга.

Расчетный размер целика принятый в плане строительства определен по методике проф. Савина Г. Н. [13], которая гласит, что область влияния одиночной выработки круговой формы сечения в условиях гидростатического поля напряжений простирается в массив на расстояние около  $1,5D$  (где,  $D$  – приведенный диаметр выработки). Поэтому взаимное влияние выработок теоретически начнет сказываться, когда расстояния между их контурами будет меньше  $3D$  или  $6R_y$ .

Данная методика предлагается к применению на практике. Однако в массивах с негидростатическим распределением напряжений или при ярко выраженной анизотропии упругих свойств пород парные сближенные выработки целесообразно располагать таким образом, чтобы линия их центров совпадала с направлением наибольшего главного напряжения или с направлением в массиве, по которому модуль упругости имеет максимальное значение (например, для слоистого массива – перпендикулярно к слоистости) [13].

В связи с выше перечисленным велика вероятность погрешности используемой методики на практике. Так как она очень обобщена и ее применения иррационально для больших глубин.

Исследования, проводимые обще принятой методикой, охватывали геомеханические вопросы касаемые заложения выработок до 1 км [13, 14].

При сравнении результатов, полученных с помощью компьютерного моделирования и определенных по методике проф. Савина Г. Н. установлена погрешность для минимально допустимого размера целика, которая составляет для пород с крепостью  $f = 10-12 - 14\%$  и для  $f=3-4 - 33\%$ .

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Полученные результаты анализа призабойной области массива горизонтальной горной выработки позволяют сделать вывод о том, что при проведении главного квершлага с площадью поперечного сечения  $S_{св} = 18,5 \text{ м}^2$  зона разгрузки достигает длины порядка 4 м. Что позволяет бурить комплект шпуров на полную длину напряженно – деформированного состояния и тем самым максимально использовать потенциал современного импортного оборудования.

Увеличив размер целика между двумя однопутевыми выработками представляется возможность сокращение затрат путем выбора более рационального типа крепи и безопасного использования сооружения на протяжении всего период отработки горизонта.

Также, определено, что при проходке двух однопутевых квершлагов зона разгрузки на разных участках достигает отметки в среднем порядка 3,5 м. Однако в связи с сложной геологией и малой крепостью пород данный показатель не представляет ценности при проходке выработок с использованием шпуров с длиной свыше 2 м. Несмотря на это, данная информация позволяет определить необходимый размер целика между строящимися параллельными выработками и выбрать рациональный тип крепи для обеспечения должного закрепного пространства и долгосрочного использования подземного сооружения.

#### *Список литературы*

1. Борисов А. А. Механика горных пород и массивов / А. А. Борисов. – М.: Недра, 1980. – 360 с.
2. Глушко В. Т. Проявление горного давления в глубоких шахтах/ Т. В. Глушко. - К.: "Науковедумка", 1971. – 196 с.
3. Баклашов И. В. Механика горных пород / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия. – М.: Недра, 1975. – 271 с.
4. Лукьянова А. Н. Моделирование контактной задачи с помощью программы ANSYS/ А. Н. Лукьянова. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 52 с.
5. Клочков В. Ф. Физико-технические основы взрывного разрушения напряженных пород при проведении подземных выработок: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.15.11 / В. Ф. Клочков; Ленинградский горный институт. Л., 1984. – 36 с.
6. Лабінський К. М. Руйнування гірських порід вибуховими речовинами, шпурів заряди яких детонують у неідеальному режимі, при проведенні виробок: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.15.04 / К. М. Лабінський; Донецький національний технічний університет. Д., 2014. – 36 с.
7. Rustan A., (ed.) Cunningham C. Mining and Rock Construction Technology Desk Reference: Rock Mechanics, Drilling & Blasting / A. Rustan CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK, 2011. XI, 454 p.
8. Заславский Б. Б. Краткий курс сопротивления материалов. / Б. Б. Заславский. – Москва: Машиностроение, 1986. – 328 с.
9. Малахов Г. М. Управление горным давлением при разработке рудных месторождений Криворожского бассейна / Г. М. Малахов, М. В. Гуминский. – Киев: Наук. Думка, 1990. – 204 с.
10. Глушков В. Т. Инженерно-геологические особенности железорудных месторождений / В. Т. Глушков, В. Г. Борисенко. – Москва: Недра, 1978. – 253 с.
11. Гребенкин С. С. Управление состоянием массива горных пород: учеб. пособ. для студ./ С. С. Гребенкин, В. Л. Самойлов, «ВИК» – Донецк: «ВИК», 2010.– 191 с.
12. Миндели Э. О. Взрывные работы на глубоких горизонтах шахт / Э. О. Миндели, Л. А. Вайштейн, П. А. Демчук. – Донецк: Донбасс, 1971. – 96 с.
13. Савин Г. Н. Распределение напряжений около отверстий / Г. Н. Савин. Киев: Наукова думка, 1968.– 88 с.
14. Андреев Б. М. Ensuring competitive capacity on the international security market of objects by implementing technological innovations / Б. М. Андреев, Д. В. Бровко, В. В. Хворост. // Mechanisms of interaction between competitiveness and innovation in modern international economic relations. Collective monograph edited by M. Bezpartochnyi. ISMA University Riga (Latvia). – 2017. – С. 202–210.

Рукопись поступила в редакцию 05.04.2018