

А.В. Смирнов**ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА В ОКРЕСТНОСТИ СИСТЕМЫ «ЛАВА-ПАРНЫЕ ШТРЕКИ»**

Приведены результаты теоретических и натуральных исследований формирования напряженно-деформированного состояния геомеханической системы «горный массив – лава – парные штреки». Даны рекомендации по использованию анкерной сталеполимерной крепи при креплении выработок в сложных условиях системы «лава – парные штреки».

Ключевые слова: математическое моделирование, напряженное состояние, система разработки, лава, парные штреки.

Постановка задачи исследований

На шахтах Западного Донбасса, входящих в состав ПАО «ДТЭК Павлоградуголь», отработка маломощных угольных пластов (0,8–1,4 м) осуществляется с использованием высокоэффективного добычного оборудования, в том числе струговых установок скользящего типа. Их применение позволило повысить нагрузку на забой до 3,5 тыс. т угля в сутки. Одним из направлений дальнейшего повышения темпов продвижения очистного забоя является сокращение времени на выполнение концевых операций в забоях высоконагруженных лав.

Следует отметить, что в условиях слабых вмещающих пород Западного Донбасса возникают проблемы с повторной эксплуатацией участковых выработок, то есть использования конвейерного (сборного) штрека предыдущей лавы в качестве вентиляционного (бортового) штрека последующей лавы. Иногда поддержание выработки в эксплуатационном состоянии в зоне влияния второй лавы является настолько затратным, что вместо повторного использования сборного штрека выгоднее провести рядом с ним дополнительную выработку (новый бортовой штрек) с оставлением целика 3–4 м.

Штреки могут быть проведены одновременно (парные выработки), либо дополнительная выработка проводится вприсечку к ранее существующему сборному штреку после прохода первой лавы и уплотнения обрушившихся пород. Предполагается, что «присечная» выработка проводится в зоне разгрузки породного массива вблизи ранее проведенной выработки (сборного штрека) и обладает большей эксплуатационной устойчивостью. Это подтверждается опытом проведения и эксплуатации парных выработок в различных горно-геологических условиях, в частности, на шахте «Степная» ПСП «ШУ Першотравенское» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» при отработке угольных пластов струговыми лавами.

Традиционно для крепления подготовительных выработок на шахтах Западного Донбасса используют рамную металлическую крепь КШПУ в сочетании со сталеполимерными анкерами. При сопряжении подготовительной выработки с лавой одной из наиболее затратных операций является снятие ножки рамной крепи и последующее ее восстановление после прохода лавы. Уменьшение трудозатрат, а также снижение металлоемкости, может быть достигнуто путем закрепления

пород только анкерами разных уровней, в том числе канатными. Однако в условиях слабых вмещающих пород, характерных для Западного Донбасса, такое техническое решение требует геомеханического обоснования с учетом особенностей горного давления на различных стадиях очистных работ, в зону влияния которых попадают сечения парных подготовительных выработок.

Целью данной работы является определение характеристик напряженно-деформированного состояния (НДС) породного массива на различных этапах проведения парных подготовительных выработок и формирования очистного пространства лав, а также оценка возможности компенсации горного давления только за счет применения двухуровневой анкерной крепи.

Оценка геомеханических процессов выполнялась для условий 165-й и 167-й струговых лавпласта С6 шахты «Степная» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь». После завершения отработки 165-й лавы (обратным ходом) сборный штрек (167-й) повторно не использовался. Вприсечку к нему с целиком 4 м с горизонта 490 м проведен 167-й бортовой штрек для следующей 167-й лавы. В качестве эксперимента предусмотрено чередование участков с традиционным рамно-анкерным креплением и участков длиной 10–20 м, закрепленных только сталеполимер-

ными анкерами длиной 2,4 м и канатными анкерами длиной 8 м.

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности подготовительных выработок, сопрягающихся с очистным пространством лавы. Цель моделирования – воссоздание картины формирования поля напряжений, деформаций и перемещений пород при проведении 167-го бортового штрека струговой лавы с горизонта 490 м вприсечку к 167-му сборному штреку при попадании указанных выработок в зону влияния 167-й лавы (рис. 1), а также определение нагрузки со стороны массива, которую воспринимает анкерная крепь бортового штрека.

Расчеты выполняются методом конечных элементов в упругопластической двумерной постановке с использованием лицензионной программы PHASE2 компании «RockScience». Последовательно, в одном программном модуле путем изменения граничных условий моделируются ситуации: 1-я стадия – 167-й сборный штрек проведен вне зоны влияния очистных работ; 2-я стадия – сопряжение 167-го сборного штрека с лавой; 3-я стадия – проведение 167-го бортового штрека вприсечку к 167-му сборному с оставлением целика 4 м; 4-я стадия – сопряжение 167-го бортовой штрека с лавой (рис. 2).

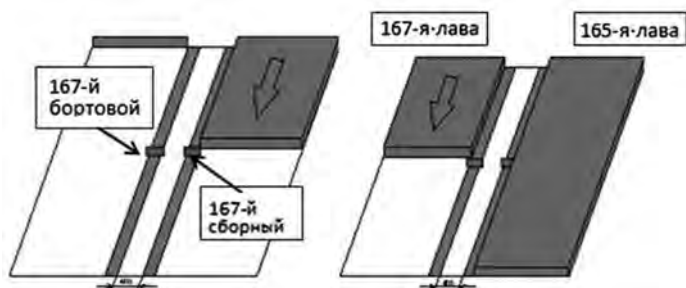


Рис. 1. Взаимное расположение штреков, пройденных вприсечку, и очистных забоев 165-й и 167-й струговых лав

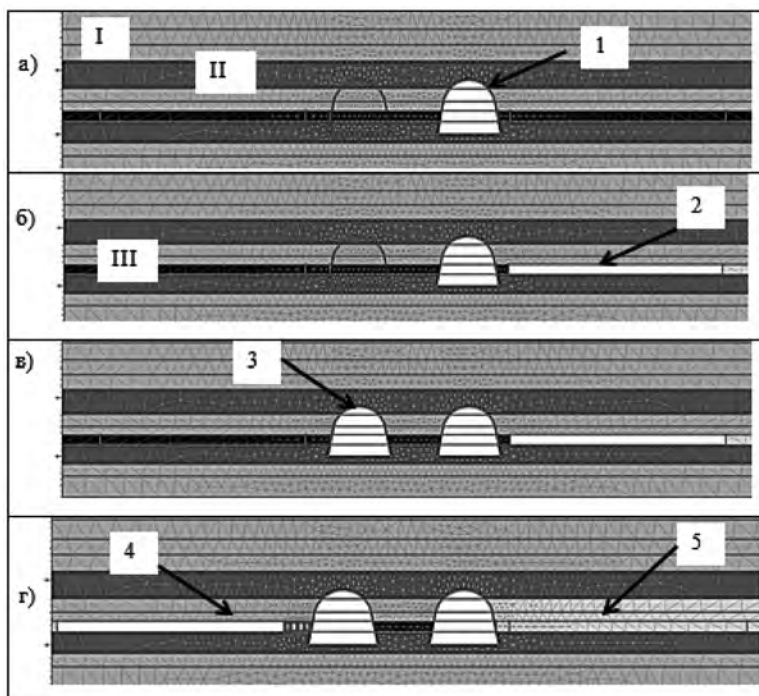


Рис. 2. Расчетные схемы для определения НДС массива на разных стадиях очистных работ: 1 – сборный штрек вне зоны очистных работ; 2 – очистное пространство лавы; 3 – бортовой штрек, проведенный вприсечку к сборному; 4 – очистное пространство следующей лавы; 5 – обрушившиеся и уплотнившиеся породы предыдущей лавы; I – алевролит; II – аргиллит; III – угольный пласт

При этом на каждой последующей стадии моделирования учитывались деформации массива, реализованные на предыдущей стадии.

Начальное поле напряжений полагается гидростатическим с компонентами. $\sigma_y = \sigma_x = \gamma H = 12$ МПа. Здесь $H = 490$ м – глубина разработки, $\gamma = 24,7$ кН/м³ – объемный вес пород. Анализируется НДС в плоском сечении выработок, перпендикулярном их продольной оси. Для учета объемности задачи начальное поле напряжений увеличивается путем введения опорное давление в условиях Западного Донбасса [1]. При поддержании штрека за лавой величина этого коэффициента составляет 1,4. Тогда начальные напряжения принимаются равными $\sigma_y = \sigma_x = \gamma H = 16,5$ МПа.

На каждой стадии расчетов анализируются все компоненты напряжений, деформации и перемещения в окрестности парных штреков и очистных выработок. Однако основными величинами, представляющими практический интерес, являются размеры тех областей, где породы перешли в неупругую стадию деформирования. По современным представлениям в пределах этих зон имеет место трещинообразование, расслоение пород, образование блоков, утрата связи с основным массивом [2]. Указанные области определены в данной работе на основе эмпирического критерия прочности Хока-Брауна, предполагающего разрушение пород от совокупности действия нормальных и касательных напряжений с учетом природной нарушенности и неоднородности пород.

В общем виде критерий Хока-Брауна выражается формулой:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a, \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 – максимальные и минимальные напряжения в массиве, m_b – константа Хока-Брауна для породного массива, s и a – постоянные величи-

ны, учитывающие генезис и состояние (качество) породного массива, σ_{ci} – предел прочности на одноосное сжатие массива пород в нетронутом состоянии. Константы подбираются для каждой литологической разности из базы данных DATABASE лаборатории «RockScience», предоставляющей лицензионное программное обеспече-

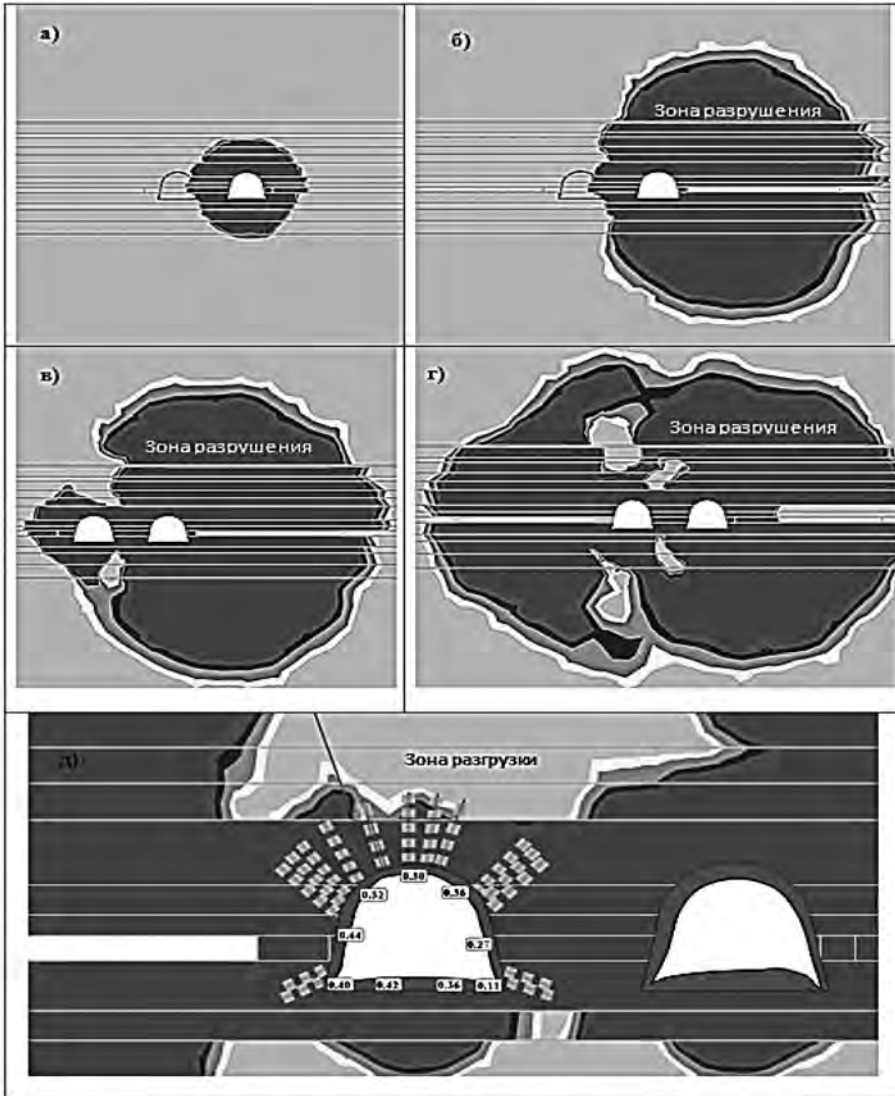


Рис. 3. Области разрушения на различных стадиях моделирования: а), б), в), г) – соответственно 1-я, 2-я, 3-я и 4-я стадии моделирования без учета анкерной крепи; д) – зона разрушения с учетом установки двухуровневой анкерной крепи

Физико-механические свойства пород

Порода	Модуль Юнга, МПа	Коэфф. Пуассона	Прочность породного образца на сжатие, МПа	Константа s	Константа a	Константа m_b
Аргиллит	3193	0,3	32	0,000912	0,513932	1,05399
Алевролит	2981	0,3	43	0,002218	0,508086	1,40256
Уголь	4000	0,3	37,5	0,01	0,5	2,66
Обрушенные и уплотнившиеся породы	290	0,3	3,7	$5,07353e^{005}$	0,579839	0,416451

ние. Физико-механические свойства пород и соответствующие константы Хока-Брауна приведены в таблице.

Последовательное моделирование полостей в породном массиве позволило проследить формирование зон неупругих деформаций (зон разрушения) на разных стадиях численного моделирования без учета влияния анкерной крепи. На рис. 3 зоны разрушения выделены темным цветом. Вне зоны влияния очистных работ высота зоны неупругих деформаций по нормали к напластованию составляет 4,0 м.

При сопряжении сборного штрека с лавой (стадия 2) зона неупругих деформаций распространяется на значительную область породного массива, однако при проведении «присечного» бортового штрека (стадия 3) над ним сохраняется зона разгрузки вплоть до прохода второй лавы (стадия 4). Область разрушенных пород в непосредственной близости от контура штрека не превышает величины 4,0 м по нормали к напластованию, то есть практически не превышает высоты зоны разрушения над выработкой, расположенной вне зоны влияния лавы. Именно этот факт позволяет с использованием сталеполимерных и канатных анкеров (двухуровневой анкерной системы) создать армированную конструкцию, несущая способность которой достаточна для сохранения устойчивости присечной выработки после прохода второй лавы.

Использование данных моделирования для инженерного расчета

Непосредственно над выработкой площадь S области разрушенных пород составляет 32,9 м². Нагрузка на крепь определена как вес пород в этой зоне с учетом коэффициента динамичности $k_d = 2,0$ [3] и составляет:

$$Q = \gamma \cdot S \cdot k_d = \\ = 2,47 \cdot 32,9 \cdot 2 = 1625,3 \text{ кН/м}$$

Полученный поэтапным моделированием размер зоны разрушений, а, следовательно, и нагрузка на крепь, были приняты как базовый (проектный) вариант для расчета параметров анкерной крепи. Нагрузка, равная 1620–1630 кН/м, при поддержании штрека за лавой компенсируется согласно разработанному паспорту (рис. 4) установкой 17-ти сталеполимерных анкеров длиной 2,4 м (прочность на разрыв 137 кН) и одного канатного анкера длиной 8 м (прочность на разрыв 171 кН).

В соответствии с нормативным документом [4] горно-геологические и горнотехнические условия проведения 167-го бортового штрека вприсечку к 167-му сборному штреку шахты «Степной» классифицируются как «тяжелые». В связи с этим паспорт крепления выработки предполагает установку силовых и подпорных элементов перекрытия, которые сформированы системой анкеров, часть которых установлена с наклоном на забой

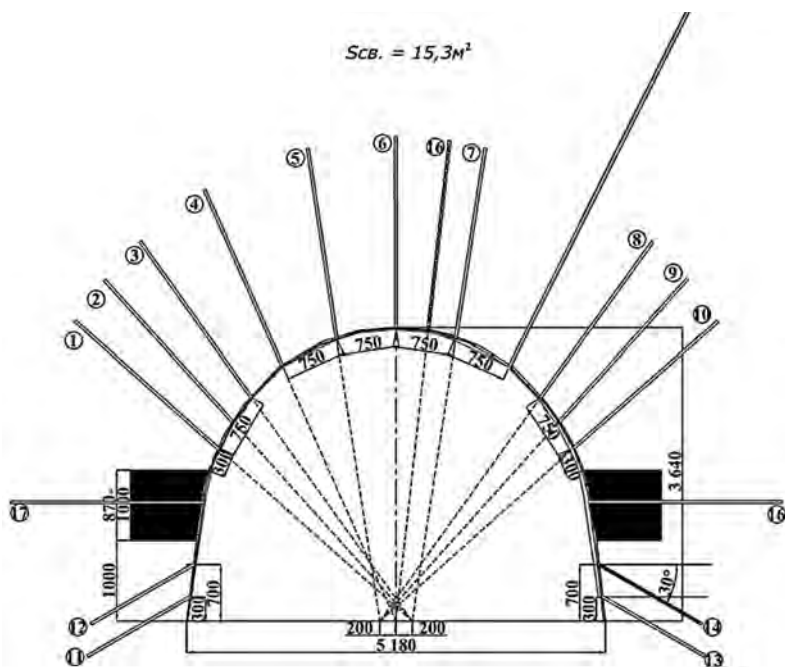


Рис. 4. Паспорт крепления выработки: 5, 6, 7 – силовая часть перекрытия выработки; 3, 4, 8, 16 – подпорная часть перекрытия выработки; 1, 2, 9, 10, 16, 17 – опоры перекрытия выработки; 11–14 – основание конструкции; 15 – канатные анкера

под углом $70\text{--}75^\circ$ к ее оси, а часть с наклоном назад (на устье выработки). Такое расположение анкеров блокирует развитие трещин во всех трех возможных направлениях.

Следует отметить, что зона разрушений, а, следовательно, и нагрузка на крепь, при глубине расположения выработки 470–490 м имеют указанные выше значения только в том случае, если ширина закрепленной бровки составляет не менее 2,0 м. При этом выработанное пространство не менее чем на 40% должно быть заполнено деревянными элементами (органный крепь, костры, поперечно уложенные брусья). При указанной ширине и жесткости бровки установка паспортного количества анкеров стабилизирует развитие зоны разрушений на уровне 1,5–1,8 м по нормали к напластованию (рис. 4, д). Канатный анкер полностью контактирует с поро-

дами, не охваченными разрушением. Вертикальная конвергенция составляет 0,74 м, горизонтальная – 0,71 м.

Наблюдения за состоянием участков выработок, закрепленных только анкерами

Замерные пункты организованы на пикетах 167-го бортового штрека по мере его проведения с горизонта 490 м от монтажной камеры струговой лавы до демонтажной камеры горизонта 350 м.

Выполнялись периодические измерения высоты и ширины выработки в контрольных сечениях, фиксировались приращения горизонтальных и вертикальных перемещений контура выработки по мере приближения фронта очистных работ.

В частности, на участке выработки ПК 179–176 м, находящемся на расстоянии 550 м от монтажной камеры,

интенсивное приращение как вертикальных, так и горизонтальных смещений отмечено при подходе лавы на расстояние 25 м. К этому моменту высота штрека уменьшилась на 0,4 м, а ширина – на 0,7 м. При сопряжении штрека с забоем 167-й лавы его высота уменьшилась на 0,75 м, а ширина – на 0,9 м по сравнению с размерами в проходке.

Большие деформации бортов штрека в момент сопряжения с лавой зафиксированы на всех участках выработки, поддерживаемых только анкерной крепью. Частично это объясняется тем, что предусмотренные паспортом боковые анкера зачастую не устанавливаются и, таким образом, бока штрека остаются практически не закрепленными. Кроме того, проблемным вопросом является и выкладывание бровки достаточной ширины, поскольку крайние секции струга смешаются в сторону выработки на очень близкое расстояние. В этом случае ширина бровки может оказаться даже менее 1,0 м, что значительно ухудшает состояние выработки.

Указанные выше величины смещений характерны для участков анкерного крепления, глубина расположения которых не превышает 400 м. Наибольшая потеря сечения имела место на нижних пикетах, что обусловлено сочетанием нескольких неблагоприятных факторов: наибольшая для данных условий глубина расположения участка (480–490 м), малая ширина бровки, а также недостаточно отработанная технология установки анкеров, особенно в почву выработки. Тем не менее организация экспериментальных участков, поддерживаемых только анкерной крепью, имела большое научное и практическое значение. Она позволила определить условия применимости данного вида крепи в рассмотренных горно-геологических условиях, а именно: крепление выра-

боток только анкерами целесообразно выполнять на глубинах, не превышающих 400 м. При этом даже для выработок, погашаемых после прохода лавы, необходимо крепить бровку на расстояние, не меньшее 2,0 м, либо разрабатывать дополнительные меры по охране борта выработки со стороны лавы.

Выводы

1. Численное моделирование развития зон неупругих деформаций вокруг парных выработок в зоне влияния отработки двух струговых лав показало, что при проведении бортового штрека последующей лавы вприсечку к сборному штреку предыдущей лавы над ним сохраняется зона разгрузки вплоть до прохода второй лавы. Это дает возможность применить для поддержания выработки менее металлоемкий тип крепи.

2. Установка согласно разработанному паспорту 17-ти сталеполимерных анкеров длиной 2,4 м (прочность на разрыв 137 кН) и одного канатного анкера длиной 8 м (прочность на разрыв 171 кН) стабилизирует развитие зоны разрушений на уровне 1,5–1,8 м по нормали к напластованию. Вертикальная конвергенция составляет 0,74 м, горизонтальная – 0,71 м.

3. Натурные наблюдения за состоянием участков выработки, закрепленных только анкерами, позволили определить условия применимости данного вида крепи. В условиях слабых вмещающих пород, характерных для Западного Донбасса, в том числе и для шахты «Степная», крепление выработок только анкерами целесообразно выполнять на глубинах, не превышающих 400 м. При этом должного внимания требует выкладывание бровки достаточной ширины (не менее 2,0 м) либо разработка дополнительных мер охраны борта выработки со стороны лавы.

1. Пивняк Г.Г., Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Смирнов А.В., Мартовицкий А.В., Еремен Н.С. Геомеханика струговой лавы. – Днепропетровск: ЛизуновПресс, 2013. – 318 с.
2. Шашенко А.Н., Сдвижкова Е.А., Гапеев С.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2008. – 224 с.
3. Типовые материалы для проектирования «Сопряжения очистных забоев с подготовительными выработками, закрепленных рамной, анкерной и рамно-анкерными креплениями. Типовые схемы поддержания» ТМП 10.1.00185790.002:2010, Донецк, 2010.
4. Инструкция по проектированию комбинированного рамно-анкерного крепления выработок на угольных шахтах Украины СОУ 10.1.05411357.010:2014. **ГНАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Смирнов Андрей Викторович – горный инженер, кандидат политических наук, e-mail: shashenkoa@nmu.org.ua, Национальный горный университет, 49005, Днепропетровск, Украина, Компания ДТЭК ЭНЕРГО, Украина.

UDC 622.833:622.26

FEATURES OF ROCK MASS STRESS-STRAIN STATE NEAR SYSTEM «FACE – DOUBLE DRIFT»

Smirnov A.V., Mining Engineer, Candidate of Political Sciences, e-mail: shashenkoa@nmu.org.ua, National Mining University, 49005, Dnepropetrovsk, Ukraine, DTEK Energy, Ukraine.

The results of theoretical and field researches of stress-strain state forming in geomechanical system «rock mass – face – double drift» is presented. Recommendations for supporting underground openings with steel-polymer anchor lining in the complex conditions of «face – double drift» system are given.

Key words: mathematical modeling, stress-strain state, exploration system design, face, double drift.

REFERENCES

1. Pivnyak G.G., Shashenko A.N., Sdvizhkova E.A., Smirnov A.V., Martovitskii A.V., Eremen N.S. *Geomechanika strugovoi lavy* (Geomechanics of plough longwall), Dnepropetrovsk, LizunovPress, 2013, 318 p.
2. Shashenko A.N., Sdvizhkova E.A., Gapeev S.N. *Deformiruemost' i prochnost' massivov gornykh porod* (Deformation ability and strength of rock masses), Dnepropetrovsk, NGU, 2008, 224 p.
3. *Tipovye materialy dlya proektirovaniya «Sopryazheniya ochistnykh zaboev s podgotovitel'nymi vyrobotkami, zakreplennykh ramnoi, ankernoi i ramno-ankernymi krepuyami. Tipovye skhemy podderzhaniya» TMP 10.1.00185790.002:2010* (Design standards “Conjunction of production and development headings supported by frame, rock bolting and frame-and-rockbolt systems. Standard support schemes.” DS 10.1.00185790.002:2010), Donetsk, 2010.
4. *Instruktsiya po proektirovaniyu kombinirovannogo ramno-ankernogo krepneniya vyrabotok na ugol'nykh shakhtakh Ukrainy SOU 10.1.05411357.010:2014* (Guidelines on design of combination frame-and-rockbolt support for coal mines in Ukraine. Ukrainian Internal Standard 10.1.05411357.010:2014).

