

УДК 622. 268.2

А.Н. ШАШЕНКО, д-р техн. наук, проф., К.В. КРАВЧЕНКО, канд. техн. наук, доц.,
А.З. ПРОКУДИН, аспирант, ГВУЗ «Национальный горный университет»,
А.В. СМЕРНОВ, канд. полит. наук, ООО «ДТЭК Энерго», г. Павлоград

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫРАБОТКИ С КОМБИНИРОВАННОЙ КРЕПЬЮ АСН-А

Анализ существующего состояния горных выработок показал, что для обеспечения их длительной устойчивости наиболее эффективными мероприятиями являются полное или частичное заполнение закрепного пространства, глубинное или приконтурное упрочнение массива вяжущими веществами. При сооружении комбинированной крепи АСН-А (арка+сетка+набрызгбетон+анкер) такие мероприятия производятся за счет проникновения сквозь металлическую сетку в образовавшиеся трещины породного массива набрызгбетонного раствора. Основываясь на известную модель развития деформаций в окрестности выработок шахт Западного Донбасса, разработана методика численного моделирования одиночной горной выработки с применением крепления АСН+А, для рассматриваемых горно-геологических условий. Полученные результаты моделирования позволили обосновать оптимальные технологические и конструктивные параметры применяемой крепи. Установлены закономерности влияния последовательности формирования элементов крепления на величину поднятия пород почвы и состояние выработки.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Развитие угольной промышленности предусматривает снижение себестоимости добытого угля как за счет повышения объемов его добычи, так и за счет совершенствования и более эффективного выполнения операций всего производственного цикла. Одним из приоритетных направлений является оптимизация крепи протяженных выработок с длительным сроком эксплуатации. Так, не смотря на то, что все выработки сооружаются с применением крепей высокой несущей способности и соответствующей плотности, 40% их протяженности ремонтируются до сдачи в эксплуатацию, а 52% действующих выработок деформированы [1]. Эти данные свидетельствуют об актуальности исследований направленных на повышение устойчивости выработок за счет применения крепей и мероприятий исключающих или минимизирующих выполнение ремонтных работ.

Анализ исследований и публикаций. Применяемые в настоящее время крепи (за исключением некоторых конструкций) не в состоянии существенным образом повлиять на напряженно-деформированное состояние массива и выполняют лишь пассивную роль, являясь опорно-ограждающими конструкциями. В работе [2], основываясь на результатах геомеханических исследований и технико-экономического анализа, утверждается, что только увеличение плотности крепи не является эффективным способом уменьшения смещений пород и повышения устойчивости подготовительных выработок. Результаты экспериментов, приведенные в [3], показали, что шестикратное увеличение сопротивления крепи вызвало уменьшение конвергенции только на 36%. Увеличение несущей способности крепи позволяет лишь замедлить сдвигение внутрь выработки потерявших связь с горным массивом отдельных его частей и блоков, однако этого недостаточно.

Опыт сооружения и эксплуатации шахт в сложных горно-геологических условиях свидетельствует о том, что для обеспечения эксплуатационного состояния выработок необходимо наряду с установкой крепи применять специальные меры по управлению процессом разрушения окружающих пород.

Изменяя напряженное состояние и свойства вмещающих выработку пород, можно управлять характером и величиной проявлений горного давления. В настоящее время эффективно применяется целый ряд новых видов крепей, имеющих меньшую стоимость, металлоемкость, высокую степень механизации процесса крепления и использующих несущую способность приконтурного массива пород [4,5]. К числу таких крепей в первую очередь следует отнести анкерную, набрызгбетонную, анкер-набрызгбетонную с регулируемой несущей способностью, набрызгбетонную в сочетании с анкерами и металлической сеткой и др.

Эффективным для повышения несущей способности крепи и, соответственно, увеличения устойчивости и долговечности выработок, являются мероприятия, направленные на создание взаимодействующей системы "крепь-массив": полное (тампоаж) или частичное (рукавами Буллфлекса) заполнение закрепного пространства твердеющими составами, глубинное или при-

контурное упрочнение массива вяжущими веществами. При этом, в результате более равномерного распределения нагрузки, устранения вредного влияния сосредоточенных нагрузок и перекоса более рационально используется материал металлической крепи, снижается величина изгибающих моментов, более эффективно работают узлы податливости, появляется дополнительный несущий слой из затвердевшего (уплотненного) материала, крепь работает не на поддержание потерявших устойчивость пород, а в режиме взаимовлияния с окружающим массивом. Несущая способность крепи в этом случае увеличивается в несколько раз.

Основываясь на опыт применения тампонажа закрепного пространства (ТЗП) на шахтах Украины, можно сказать что, он является наиболее радикальным и доступным, а на некоторых шахтах производственных объединений "Павлоградуголь" и "Донецкуголь"- единственным приемлемым средством сохранения выработок в сложных горно-геологических условиях [6-9].

Постановка задачи. В результате анализа многочисленных измерений, выполненных на шахтах Западного Донбасса, М.А. Выгодиным [10] был раскрыт механизм деформирования массива пород в окрестности протяженных выработок, расположенных вне зоны влияния очистных работ, который заключается в образовании трех зон разрушенных пород, разделенных зияющими трещинами (рис. 1).

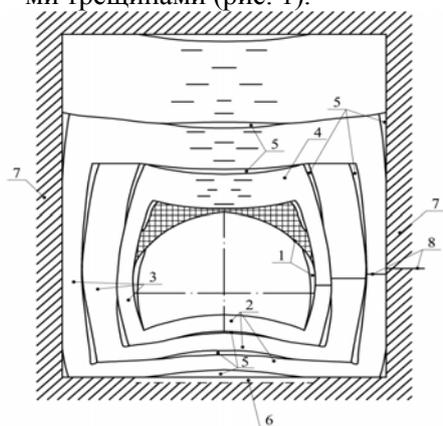


Рис. 1. Схема образования зон разрушения приконтурного массива: 1 - металлическая крепь; 2,3,4 - породы почвы, боков и кровли; 5 - пустоты и трещины; 6 - вода; 7 - ненарушенный массив пород; 8 - маркирующий пласт

Толщина слоев, начиная от внешнего по отношению к выработке контура, составляет, в среднем, 25, 50 и 75 см соответственно. При этом смещения первого слоя достигают до 0,5 м, второго - до 0,2 м, третьего - до 0,05 м. Ширина трещин между слоями соответственно равна 0,1 м, 0,05 м, и 0,01 м в кровле выработки и, примерно, вдвое меньше в почве.

Со стороны почвы развивается пучение пород. При этом активная зона имеет глубину около полупролета выработки. В кровле и боках постепенно формируется зона разрушенных пород, создающих нагрузку на крепь.

В условиях шахт Западного Донбасса этот процесс реализуется на расстоянии 30-50 м от забоя выработки и может быть описан функцией влияния забоя выработки $k(L)$ (рис. 2). Ее значения изменяются от некоторой минимальной величины непосредственно у плоскости забоя $k(L)_{\min} \approx 0,1-0,2$ до $k(L)=1$ на расстоянии 30-50 м. Эта функция как-бы снижает гравитационные силы γH в пределах влияния забоя, по мере уменьшения которых происходит изменение геомеханического состояния массива с образованием трех характерных зон.

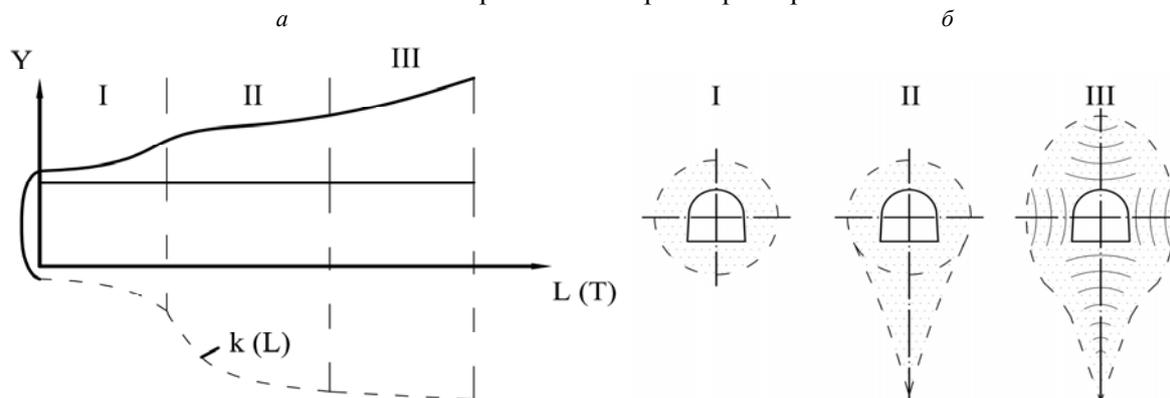


Рис. 2. Развитие геомеханических процессов по мере перемещения забоя выработки: продольный а и поперечный б разрезы

В пределах зоны I образуется замкнутая зона неупругих деформаций (ЗНД). В пределах зоны II реализуется вспучивание пород почвы. В пределах зоны III продолжается деструкция вмещающих пород, сопровождающаяся развитием трещин в боках и кровле выработки, что

приводит к росту свода естественного равновесия, в пределах которого формируется нагрузка на крепь.

Для этих условий одной из эффективных мер повышения устойчивости выработок с пучащей почвой являются вовремя выполненные работы по упрочнению приконтурного массива. Для этого используется металлическая сетчатая затяжка и два слоя набрызгбетона. Первый высокопластичный слой, проникающий сквозь металлическую сетку в образовавшиеся трещины породного массива, наносится с небольшим отставанием от забоя и выполняет по сути работы по тампонажу. Вторым слоем – несущий, жесткий, наносят с большим отставанием и большей толщиной. Непосредственно в забое в сводчатой части выработки устанавливаются анкера для снижения вертикальных перемещений. Такая крепь получила название АСН+А (арка+сетка+набрызгбетон+анкера).

Целью исследований, результаты которых приведены в статье, является поставка и решение численной задачи об оценке НДС по мере развития деформационных процессов по мере перемещения забоя в соответствии с предложенной выше деформационной моделью массива в окрестности одиночной выработки применительно к технологии и конструкции комбинированной крепи АСН+А.

Изложение материала и результаты. В качестве вычислительного инструмента использован программный продукт Phase 2 канадской компании Rockscience [11].

Методика численного моделирования предусматривает пять этапов при условии, что итог промежуточных вычислений на каждом этапе должен быть адекватен натурным измерениям и соответствовать предложенной выше деформационной модели, приведенной на рис. 2.

Первоначально, для заданных горно-геологических условий определяются размеры ЗНД для поперечного сечения выработки (рис. 3). В результате решения мы также располагаем величинами смещений на контуре выработки. К внутреннему контуру продольного сечения прикладывается такая нагрузка $k\gamma H$, чтобы размеры ЗНД и перемещения контура на расстоянии $10h$ от забоя выработки были бы равны соответствующим величинам, полученным из решения предыдущего действия (рис. 4). Функция влияния забоя $k(L)$ будет иметь вид

$$k = U_0 / U_0^{\max} \quad (1)$$

где U_0 - начальные смещения, U_0^{\max} - смещения контура выработки на расстоянии $10h$ от забоя.

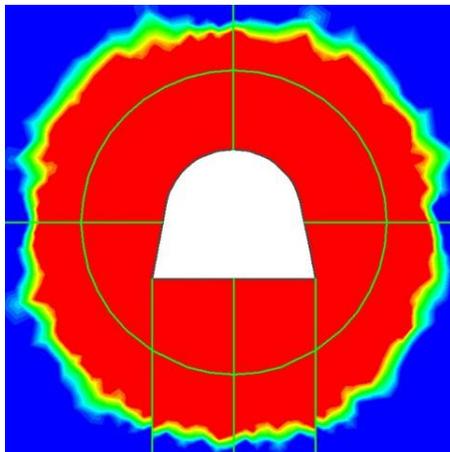


Рис. 3. Плоская упруго-пластическая задача для сечения №1 (первый этап решения)

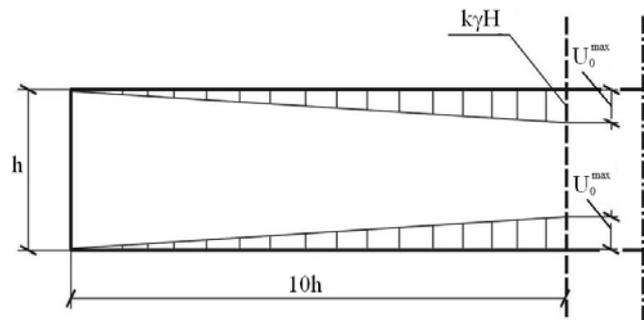


Рис. 4. Расчетная схема к решению второго этапа задачи

Опираясь на модель деформирования породного массива (см. рис. 2) строится зависимость $k(L)$ от расположения систем кольцевых трещин (рис. 5), из которой для каждого этапа моделирования выбирается соответствующая величина k .

Для решения I-го этапа задаются условия, при которых внешняя нагрузка должна равняться $k_1\gamma H$, размер ЗНД (R_{L1}) – 1,2 полупролета выработки (R_0), а смещения контура (U_0) – 0,10-0,15 м. При этом толщина слоя разрушенных пород должна быть равна выражению (м)

$$\Delta R_{L1} = R_{L1} - R_0 \quad (2)$$

На II-м этапе учитываются условия внешнего нагружения, когда $k=k_2$, а значение $\Delta R_{L2} = -R_{L2} - R_{L1}$, должно быть равно 0,5-0,6 м. Смещения контура в этом случае не должны превышать

0,15-0,20 м. К почве выработки прикладывается дополнительная распределенная нагрузка $q_1 = \Delta\gamma R_{L1}$. В свою очередь полупролет выработки будет равен $R_0 + R_{L1}$.

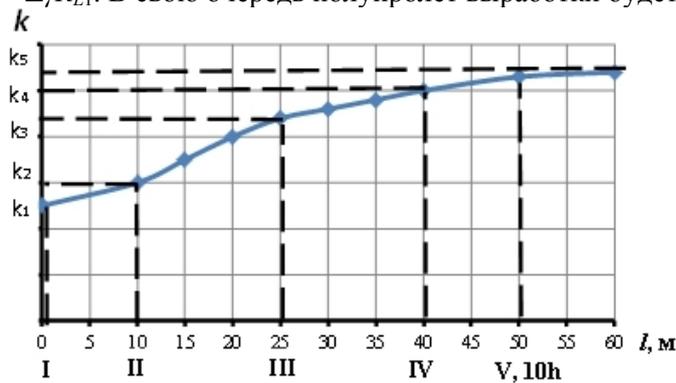
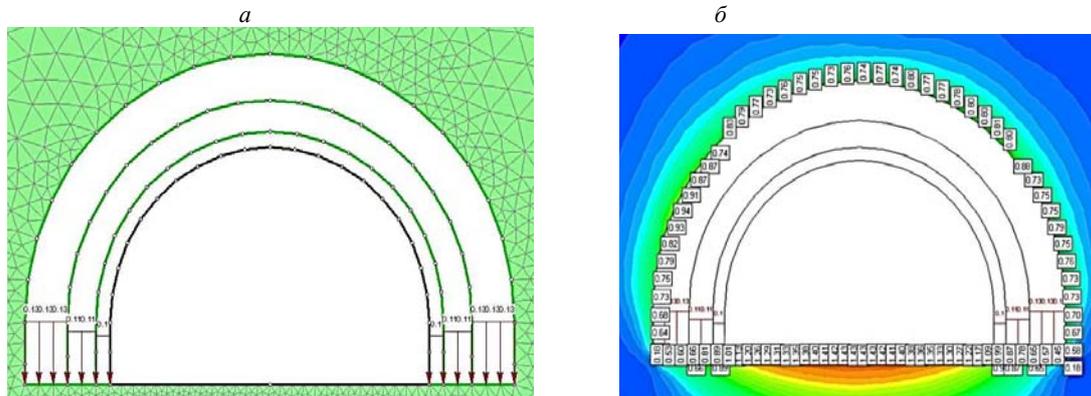


Рис. 5. Расположение системы кольцевых трещин вокруг выработки по мере удаления от забоя

Для III-го этапа внешняя нагрузка равняется $k_3\gamma H$, $R_{L3}=0,75-1,0$ м, $U_0=0,20-0,25$ м. К почве прикладывается распределенная нагрузка q_1 и $q_2=\gamma\Delta R_{L2}$. Полупролет выработки равняется сумме $R_0+R_{L1}+R_{L2}$. Для IV-го внешняя нагрузка равняется $k_4\gamma H$, $\Delta R_{L4}=4-5$ м, смещения контура 0,3-0,5 м, равномерно распределенная нагрузка прикладываемая к почве выработки q_1, q_2 и $q_3=\gamma\Delta R_{L3}$, полупролет выработки равен сумме $R_0+R_{L1}+R_{L2}+R_{L3}$. Расчетная схема и перемещения на контуре выработки для этой стадии приведены на рис. 6.

Рис. 6. Расчетная схема *a* и перемещения на контуре *b* выработки для IV стадии моделирования



Пятый этап моделирования, где установлена набрызг-бетонная крепь и анкера, учитывает условия когда $k=1$, и $R_0=R_0$ (рис. 7.). Это объясняется тем, что зияющие трещины заполняются набрызгбетонным раствором, при этом приконтурный массив упрочняется и работает как единая оболочка. Прочность не разбитого трещинами приконтурного породного массива увеличена на 60% [12]. Количество анкеров изменялось от трёх до девяти.

На рис. 8 приведены зависимости, показывающие как влияет число анкеров – N и расстояние от забоя выработки – l на величину перемещений пород почвы – U_n . Из них следует, что при 5 установленных в кровлю анкерах работы по нанесению набрызгбетонного покрытия можно выполнять на расстоянии 60 м от забоя выработки, по сравнению с 30 м при отсутствии анкеров. Это не только снижает скорость пучения пород почвы и его величину до 0,3-0,4 м, но и позволяет существенно разнести работы по проходке в забое выработки и набрызгбетонированию.

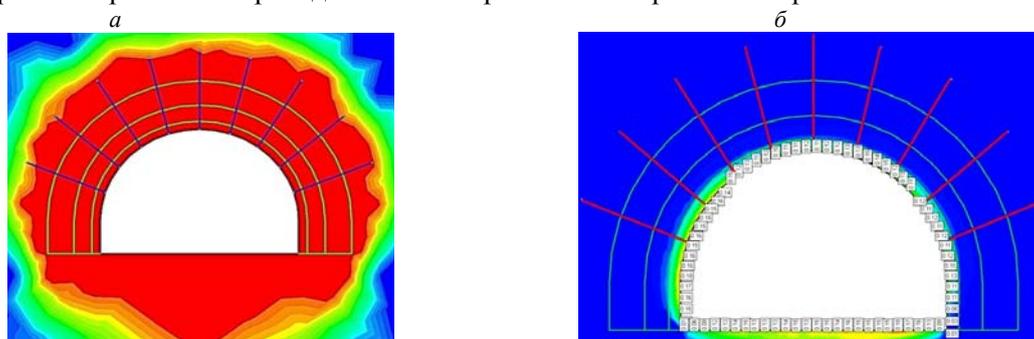


Рис. 7. Зона неупругих деформаций *a* и перемещения на контуре выработки *б* при установке анкеров и нанесении набрызгбетонного покрытия

Уточненный по результатам последних исследований график зависимости показателя устойчивости выработки [13] от относительной величины поднятия пород почвы приведен на рис. 9.

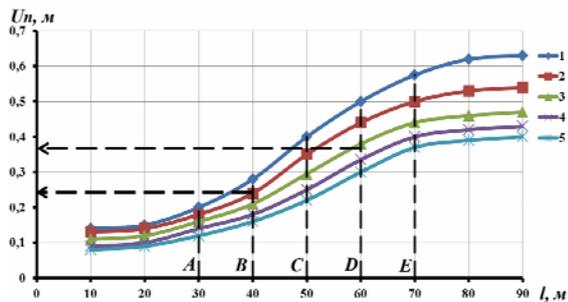
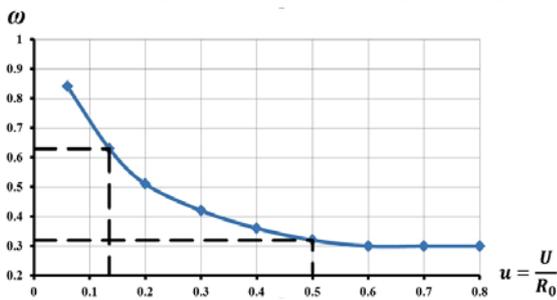


Рис. 8. Зависимость смещений пород почвы от расстояния между местом выполнения набрызгбетонных работ и забоем выработки: 1 – без анкеров; 2,3,4,5 – соответственно 3,5,7 и 9 анкеров

Из него следует, что в результате установки 5 анкеров в кровлю и своевременного выполнения работ по упрочнению приконтурного массива величина смещений пород почвы уменьшились на 0,70 м, а устойчивость выработки ω повысилась на 0,31. Выполненные впоследствии натурные измерения подтвердили адекватность рассмотренных выше геомеханических моделей.

Рис. 9. Зависимость показателя устойчивости выработки ω от максимальной величины смещений контура



ва до проведения набрызгбетонных работ.

Экспериментальные работы, выполненные во 2-м западном магистральном штреке шахты имени Героев Космоса показали, что поэтапное изменение элементов поддерживающей крепи в сторону уменьшения веса спецпрофиля от СВП-27 до СВП-22, увеличения расстояния между рамами от 0,3 до 1,0 м, замены железобетонной затяжки на сетчатую, а тампонажа закрепного пространства на набрызгбетонное покрытие в сочетании с пятью сталеполимерными анкерами, установленными в забое выработки, позволяет практически вдвое уменьшить металлоёмкость крепи и повысить устойчивость выработки в целом.

Список литературы

1. **Мартовичий А.В.** Геомеханические процессы при отработке угольных пластов струговыми комплексами в условиях шахт Западного Донбасса. Дис...докт. техн. наук: 05.15.09. – Днепропетровск, 2012. – 215 с.
2. **Шевченко В.В., Туников Б.Т., Селезень А.Л.** Влияние плотности крепи на смещения пород в подготовительных выработках // Уголь Украины. – 1998. – №10. – С. 13-15.
3. **Усаченко Б.М.** Комбинированные охранные системы нарастающего сопротивления – безальтернативная технология поддержания выемочных штреков / **Б.М. Усаченко, В.Н. Трипольский, А.А. Яйцов, Е.Н. Халименди-ков** // Геотехническая механика. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 91. – С. 15-26.
4. **Касьян Н.Н.** Шахтные исследования особенностей деформирования и разрушения пород, вмещающих выработку с рамно-анкерной крепью / **Н.Н. Касьян, А.О. Новиков, И.Н. Шестопалов, В.И. Каменец** // Вестник Криворожского Национального университета, 2012. №95(1). – С.31-35.
5. **Назимко В.В.** Совершенствование комбинированной рамно-анкерной крепи подготовительных выработок / **В.В. Назимко, М.А. Ильяшов, А.А. Яйцов, А.И. Демченко, Е.Н. Халименди-ков** // Вестник Криворожского Национального университета, 2006. №91.
6. **Косков И.Г.** Новые материалы и конструкции крепи горных выработок, - М.: Недра, - 1987. - 198 с.
7. **Волов В.Т., Мельников Н.И.** Перспективы применения фосфогипсовых вяжущих для поддержания горных выработок // Уголь. - 1984. - № 11. - с. 24-26.
8. **Зейферт В.П., Гэфенидер Э.А., Мальзам Е.Е.** Тампонаж закрепного пространства при проведении горных выработок // Уголь. -1983. - 14 12. - с. 14-17.
9. **Комиссаренко Т.А.** Анализ способов заполнения закрепного пространства горных выработок / **Т.А. Комиссаренко, А.А. Комиссаренко** // Вестник Криворожского Национального университета, 2006. №91.
10. **Выгодин М.А.** Обоснование параметров армопородных грузонесущих конструкций на базе рамно-анкерных крепей и технология их сооружения в выработках шахт Западного Донбасса. Дис...канд. техн. наук: 05.15.04. – Днепропетровск, 1990. – 215 с.
11. Phase2. Finite Element Analysis for Excavations and Slopes. version 8.0 // Режим доступа: <https://www.roscience.com/products/3/Phase2>.
12. **Роенко А.Н.** Устойчивость подготовительных выработок угольных шахт в условиях больших глубин разработки. Дис...докт. техн. наук: 05.15.04. – Днепропетровск, 1995. – 426 с.
13. **Шашенко А.Н., Солодянкин А.В., Мартовичий А.В.** Управление устойчивостью протяженных выработок глубоких шахт. – Днепропетровск: «ЛизуновПрес», 2012. – 384 с.