

Оценка напряженного состояния в горном массиве и причины проявления геодинамических явлений на шахте им.

А.Г. Стаханова

Лобков Н.И., к.т.н.

Рязанцев Н.А., к.т.н.

Рязанцева Н.А., инж.

Бачурин Л.Л., инж.

В 2003 году при отработке 2-й лавы центрального бремсберга пласта l_1 шахты им. А.Г. Стаханова произошло несколько аномальных геодинамических явлений (АГДЯ), механизм и причины которых комиссией по расследованию до конца не выяснены. Все явления сопровождалось направленным энерго- и массопереносом из глубины массива в призабойное пространство без повышенного газовыделения. Характерным признаком явилось наличие «испарины» (капелек воды в кровле), повышенная влажность выброшенного штыва и наличие мелкодисперсной пыли бурого цвета в призабойном пространстве и по плоскостям скольжения. Отмечается также наличие трубообразных и грушеобразных полостей в угольном пласте.

Вполне очевидно, что основным фактором, вызвавшим указанные явления, следует считать горное давление. Учитывая, что глубина ведения работ не превышает 900 м, вызывает определенный научный и практический интерес оценка напряженного состояния в горном массиве на участке возникновения АГДЯ и попытка объяснения их возникновения.

Горно-геологическая характеристика участка.

2-я лава центрального бремсберга пласта l_1 расположена в блоке №2-3 шахты им. А.Г. Стаханова. Пласт l_1 имеет двухпачечное строение, верхняя и нижняя пачка разделены прослоем глинистого сланца 0,03-0,06 м. Мощность верхней пачки угля 0,87-0,9 м, нижней 0,2-0,24 м. Угол падения пласта 9° . Марка угля «Г». Выход летучих колеблется от 30 до 37,5%, толщина пластического слоя – от 11 до 18 мм. Средняя по пласту величина комплексного показателя выбросоопасности M , при выходе летучих 35,8% и толщине пластического слоя 13 мм, составляет 27,28. Природная газоносность пласта 5-10 м³/т с.б.м. Согласно заключению МакНИИ от 28.10.91 г. №11/10418 пласт l_1 с изогазы 8 м³/т с.б.м и с глубины 400 м должен отрабатываться, как угрожаемый с ведением прогноза выбросоопасности. Учитывая, что в блоке №2-3 до изогипсы 850 м природная газоносность не превышает 8 м³/т с.б.м., а также, что прогнозные показатели локального и текущего прогноза не достигают критических значений, решением Центральной комиссии по борьбе с газодинамическими явлениями на шахтах угольной промышленности Украины от 2.06.93 г. пласт l_1 до изогипсы 850 м, а по простиранию между Центральным сбросом и конвейерным ходком пласта l_1 невыбросоопасен, а горные работы производятся без применения прогноза выбросоопасности.

Непосредственно в кровле пласта l_1 залегает глинистый сланец мощностью от 0 до 3 м, темно-серый, слоистый, с послойными плоскостями скольжения. Ко-

коэффициент крепости $f=3-4$, неустойчивый B_2 , склонный к обрушению до контакта с вышележащим песчаником. Нижний слой сланца мощностью 0,2 м перемятый, весьма неустойчивый B_1 , «ложная кровля». Контакт глинистого сланца с вышележащим песчаником чёткий, по волнистой поверхности, сцепление слабое.

Основная кровля пласта – песчаник $l_1 \int L_1$ мощностью от 25 до 38,7 м, светло-серый, мелкозернистый, кварцполевошпатовый, слюдистый, коэффициент крепости $f=7-9$, устойчивый B_5 , категория по обрушаемости A_3 , выбросоопасный; толща песчаника имеет серийное строение с образованием слоёв различного генетического состава. Мощность слоёв 7-10 м, разделены они между собой пропластками угля l_2, l'_2 , а также прослоями глинистого и песчаного сланцев. Выше пласта l_3 (междупластье $l_1 \int l_3$ 38-40 м) залегает ещё один слой песчаника $l_4 \int l_5$ мощностью 12-24 м.

Непосредственная почва пласта – сланец глинистый комковатой текстуры «кучерявчик», склонный к пучению, мощностью от 0 до 1 м, коэффициент крепости $f=3$, весьма неустойчивый $П_1$. Контакт сланца с угольным пластом четкий, с нижележащим песчаником – постепенный.

Песчаник основной почвы $L_1 \int l_1$ мощностью 27-32,6 м, выбросоопасный, коэффициент крепости 7-9.

В пределах блока №2-3 наблюдается выклинивание непосредственной кровли и почвы и приближение песчаников к пласту.

Почти по всей площади шахтного поля пласт l_1 надработан пластом l_3 , лишь над панелью центрального бремсберга пласта l_1 из-за малой мощности и размыва пласт l_3 не отработан.

На вышерасположенном пласте l_7 (расстояние от l_1 до l_7 153 м) шахтой им. Г.М. Димитрова в районе центрального бремсберга оставлен целик шириной 200-215 м. От его краевых частей на пласте l_1 создаются зоны ПГД, отнесенные по степени влияния на пласт l_1 к III категории.

В связи с выше изложенным пласт l_1 в пределах панели центрального бремсберга разрабатывается как одиночный, влиянием горных работ пластов l_3 и l_7 на ведение горных работ по пласту l_1 пренебрегается.

Горнотехническая характеристика участка.

В 1992-1994 гг. в пределах центрального бремсберга пласта l_1 отработана по столбовой системе разработки 1-я лава длиной 150 м. При отработке этой лавы косвенным методом (по ухудшению состояния кровли и спаду суточной нагрузки на очистной забой) установлены три характерных шага обрушения кровли: 18, 35 и 52 м, следующих друг за другом. Лава отработывалась обратным ходом от границ панели к бремсбергу. Суточная нагрузка на лаву колебалась от 150 до 1620 т/сут. Лава пересекла ряд зон приближения песчаников, однако никаких внезапных осадков песчаника кровли или других динамических явлений при подготовке и отработке лавы не наблюдалось.

В феврале 1998 года, по сплошной системе разработки с опережающим конвейерным штреком и проведением вентиляционного штрека вслед за лавой впрысчку к 1-му конвейерному штреку, начата отработка 2-й лавы. Ширина целика между 1-м конвейерным и 2-м вентиляционным штреком колебалась от 0 до 5 м.

Длина лавы – 300 м. Лава оборудована механизированной крепью высокого сопротивления 1МТ с комбайном 1К101У и конвейером СПЦ-261. Выемка ниш осуществлялась отбойными молотками, проведение штреков – с помощью БВР. Геологическая мощность пласта 1,11-1,2 м, вынимаемая – 1,3 м. Глубина расположения вентиляционного штрека – 870 м, конвейерного – 913 м.

При проведении конвейерного штрека в начале отработки лавы, при приближении песчаника кровли к пласту произошел ряд выбросов песчаника интенсивностью от 50 до 150 м³. В очистном забое никаких динамических явлений не наблюдалось. В песчанике кровли время от времени прогнозом обнаруживались опасные зоны, однако, при проведении вентиляционного штрека и снятии секции крепи с жесткой базы при недостаточной мощности с помощью БВР, динамики не наблюдалось.

К июню 2001 года лава отошла от бремсберга на расстояние 610 м и была остановлена на ремонт комплекса из-за физического износа секций крепи по причине неоднократной посадки на «жесткую базу» и ведения БВР над и под секциями.

В декабре 2002 года работа лавы была возобновлена и на 28.02.03 г. она отошла от места остановки на 52 м (шаг посадки основной кровли).

В верхней части 2-й лавы центрального бремсберга пласта l_1 от влияния выработанного пространства 1-й лавы возникает стационарная зона опорного давления шириной 50 м. Кроме того, впереди очистного забоя 2-й лавы возникает собственная зона временного опорного давления, ширина которой зависит от длины и мощности зависающей консоли кровли.

От краевых частей целика, оставленного шахтой им. Г.М. Димитрова на пласте l_7 , во 2-й лаве создаются зоны ПГД III категории. Первую зону 2-я лава перешла в сентябре 2000 года без каких-либо проявлений горного давления. На исследуемый момент лава находилась примерно посредине целика, до второго створа оставалось 100-110 м.

Способ управления кровлей во 2-й лаве – полное обрушение. Вентиляционный штрек охраняется двусторонней бутовой полосой. Ширина надштрековой полосы 3-4 м, косовичника – 1 м, подштрековой полосы – 15 м. Ниже бутовой полосы в выработанном пространстве лавы наблюдается зависание консолей песчаника по падению до 30 м и по простиранию до 35-50 м.

Согласно зарисовкам по 1-му конвейерному штреку, в интервале 624-721 м от центрального бремсберга глинистый сланец выклинивается и непосредственно в кровле залегает песчаник. 28 февраля 2003 года мощность глинистого сланца между угольным пластом и песчаником кровли в верхней части лавы уменьшилась до 0-0,05 м и, при входе лавы в зону приближения песчаника, в 13 часов 18 минут при вырубывании комбайна в верхней нише (не доезжая 1,5 м до верхней приводной головки конвейера СПЦ-261) произошло аномальное геодинамическое явление с тяжелыми последствиями. Аналогичные явления повторились 20 марта после сотрясательного взрывания в верхней нише в 17 часов 30 минут, 8 апреля в 18 часов 27 минут, спустя сутки после взрывных работ в верхней нише, при её зачистке. После этого лава была укорочена на 30 м, в верхней части лавы на участке 25 м проводилась гидрообработка угольного пласта водными растворами ПАВ в

режиме гидрорыхления, выемка ниши осуществлялась в режиме сотрясательного взрывания. Однако, несмотря на предпринятые меры, после подвигания лавы на 100 м 29 сентября при остановленных механизмах и 15 октября в обработанной растворами ПАВ зоне при бурении шпуров воздушным сверлом снова произошли динамические явления.

Оценка напряженного состояния в горном массиве при отработке 2-й лавы центрального бремсберга пласта l_1 .

На больших глубинах величина опорного давления в зоне максимума может превышать значение первоначального давления в 2...20 раз [1, 2].

Максимум опорного давления впереди очистного забоя перемещается вместе с подвиганием лавы и постепенно снижается до первоначальной величины на расстоянии от 30 до 300 м от забоя и боковых границ выработанного пространства. Опорное давление имеет динамический характер, проявляется в виде затухающей волны Вебера, причем максимальным является не обязательно первый пик. При наличии в надугольной толще породы-моста, залегающей вблизи пласта, чаще всего максимальным является второй пик, удаленный вглубь массив и связанный с породой-мостом.

Особенно большого значения опорное давление достигает в выступающих угловых частях угольного массива, где опорное давление впереди лавы накладывается на опорное давление в краевой части массива и превышает их сумму. В результате этого, при сплошной системе разработки, когда выше находится отработанный столб, распределение опорного давления по длине лавы в установившемся режиме (после первичной посадки) характеризуется максимумом у вентиляционного штрека. По данным [1], этот максимум на глубине 800 м достигает 200 МПа. Во 2-й лаве центрального бремсберга пласта l_1 (глубина вентиляционного штрека 870 м), как показывают исследования, эта величина еще больше (рис. 1).



Рис. 1. Распределение горного давления по длине забоя при сплошной системе разработки во 2-й лаве центрального бремсберга пласта l_1

Максимум опорного давления находится на характерном расстоянии «Х» от краевой части и груди забоя. По данным [3] он удален в массив на шаг обрушения

основной кровли.

Жданкин Н.А. [4] считает, что впереди очистного забоя в зоне опорного давления угольный пласт в вертикальном направлении сжат, при этом максимум вертикальных деформаций сжатия сосредоточен в центре пласта (при больших зависаниях кровли) и смещен к кровле и почве пласта (при малых зависаниях). При обрушении кровли верхняя часть пласта разгружается, а нижняя нагружается.

Горизонтальные деформации растяжения, вызывающие отжим угля, после обрушения кровли стабилизируются на глубине порядка $0,7 m_{пл}$ (где $m_{пл}$ - мощность пласта), а с увеличением зависающей консоли кровли глубина зоны отжима растет.

Шаг обрушения основной кровли в установившемся режиме можно определить по формуле:

$$L_{носл}^o = 10,5 \sqrt{v_{сут}} (1 + \sin \alpha) e^{-0,7 \frac{h_p}{f_{кр}^o}},$$

где $v_{сут}$ – суточная скорость подвигания забоя, м/сут;

α – угол падения пласта, град.;

h_p – размер зоны активного расслоения пород, м;

$f_{кр}^o$ – коэффициент крепости пород основной кровли;

$$h_p = 3,6 \cdot 10^4 Z_{он} \left(\frac{m_n \cdot n \cdot a}{f_y (1 + \eta) (1 + \sin \alpha) v_{сут} \psi} \right)^{0,5},$$

m_n – мощность пород непосредственной кровли, м;

n – количество расслоений в 1 м кровли;

a – коэффициент, учитывающий вдавливание крепи в почву и деформацию верхняков;

f_y – коэффициент крепости угля;

η – отношение начального распора крепи к её рабочему сопротивлению;

ψ – количество стоек крепи на 1 м² обнаженной кровли;

$Z_{он}$ – ширина зоны опорного давления, м.

Оценка шага обрушения основной кровли для 2-й лавы центрального бремсберга пласта l_1 по этой методике дает значения $L_{носл}^o = 10,5 - 13$ м, что хорошо согласуется с фактическими данными. Лишь в верхней части лавы у бутовой полосы зависания превышают эту величину.

По данным [3], расстояние до пика опорного давления должно быть примерно таким же.

Оценка величины напряжений в зоне опорного давления впереди очистного забоя 2-й лавы центрального бремсберга пласта l_1 производилась несколькими независимыми методами.

По данным [5] с учетом поправки на породы-мосты

$$\sigma_{max} = \sigma_{max}^{сж} + l_{он}^{max},$$

$$\text{где } \sigma_{сж}^{max} = \rho g l_{пр}^2 \frac{(h_j + h_i)}{2h_j^2},$$

ρ – плотность вышележащих пород, ;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

l_{np} – предельный пролет породы-моста, м;

h_j – мощность породы-моста, м;

h_i – расстояние между породами-мостами (мощность пород, создающих нагрузку на консоль песчаника).

$$P_{on}^{max} = \rho g H + \sum \frac{\rho g h_j l_{np} a}{2S},$$

H – глубина разработки, м.

Согласно этой методике в средней части лавы максимальное опорное давление составляет 137 МПа, коэффициент концентрации напряжений – 6,2; в верхней части лавы соответственно 217 МПа и 10,3.

Расчеты УкрНИМИ согласно [6, 7] позволяют получить величину действующих напряжений в пласте и расстояние до максимума опорного давления.

Напряжения в пласте

$$\sigma_{max} = -\sigma_{k1} - \frac{KX_1}{0,5m},$$

где σ_{k1} – напряжения, действующие на краю пласта, $\sigma_{k1} = \sigma_{сж} = 15$ МПа;

K – прочность угля с учетом контактных условий, $K = 1,3\sigma_{сж} = 19,5$ МПа;

X_1 – расстояние до максимума опорного давления

$$X_1 = 0,96 \left(0,5m \frac{K_1}{K} \right)^{\frac{2}{3}} f(p);$$

m – вынимаемая мощность пласта, $m = 1,3$ м;

K_1 – коэффициент интенсивности напряжений, $K_1 = -\gamma H \sqrt{\pi \cdot 0,5a_1}$;

γ – объемный вес вышележащих пород, ;

H – глубина разработки, $H=900$ м;

a_1 – ширина выработанного пространства 1-й лавы, $a_1 = 150$ м;

$f(p)$ – табулированная функция, $f(p) = 0,903$.

Расчеты показывают, что на расстоянии более 50 м от верхнего кутка лавы и в её средней части напряжения в пике опорного давления составляют 150 МПа, коэффициент концентрации напряжений 6,7. Расстояние до пика опорного давления – 4,5 м.

В 15 м ниже кутка лавы расчет параметров опорного давления производится как около очистной выработки сложной формы в плане. В этом случае

$$K_1 \approx \left(\frac{K^*}{0,96} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{KX_c}{\gamma H_c h} \right)^{-\frac{1}{4}} \cdot \left(\frac{F_p h}{K} \right)^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{K}{h};$$

где K^* – коэффициент, характеризующий геометрические особенности соотношения горных работ;

$2X_c = L_3$ – расстояние, на котором исходные напряжения в выработанном пространстве восстанавливаются в результате опускания пород кровли;

F_p – напряжения, действующие на единицу длины выработки,

$$F_p = 1,5\gamma HL_3, \quad h = 0,5m.$$

Расчеты показывают, что напряжения в пике опорного давления в 15 м ниже кутка лавы составляют 243 МПа, коэффициент концентрации 10,8. Расстояние до пика опорного давления 7,6 м.

По данным анализа акустических сигналов, зарегистрированных при бурении шпуров для определения выхода штыва в забое 2-й лавы, сотрудники МакНИИ оценили напряженное состояние пласта следующим образом.

В 13,7 м от кутка верхней ниши зона отжима 2,5 м, зона разгрузки 3,25 м; максимум опорного давления на расстоянии $X = 3,5$ м, коэффициент пригрузки – 13,8. Если отождествить коэффициент пригрузки с коэффициентом концентрации напряжений, $\sigma_{\max} \approx 300$ МПа.

Ещё один способ оценки напряженного состояния основан на явлении образования капелек воды («испарины») на кровле и увеличении влажности угля в процессе происшедших динамических явлений.

Вода в горном массиве находится в свободном, физически и химически связанном состоянии. При определенных термодинамических параметрах химически связанная вода может переходить в свободную и физически связанную. На существование структурно-фазовых переходов с образованием свободной воды из химически связанной при воздействии высоких давлений указывалось неоднократно. Так, шахтные наблюдения показывают, что влажность угля, отобранного из очага выброса, превышает влажность угля из ненарушенной зоны в 1,5-2,4 раза. При повторной обработке давлением такой уголь уже не выделяет воду, а поглощает. При подходе к очагу выброса концентрация жидких флюидов возрастает с резко выраженным максимумом. Протяженность зоны чувствительности 5-14 м.

При выбросах песчаников влажность также возрастает, отмечается капез воды.

Однако наиболее ярким доказательством диссоциации химически связанной (кристаллогидратной) воды при механическом воздействии являются данные ДонФТИ НАНУ [8].

Испытания углей различных марок под давлением до 682 МПа показали, что при скоростях нагружения 10-15 МПа/с (динамические нагрузки) у углей проявляются специфические свойства кристаллогидратов: ступенчатость дегидратации, существование областей давлений, обеспечивающих максимальное выделение жидкой воды.

Под давлением осуществляется обратимый переход кристаллогидратная $\rightarrow$ жидкая вода (рис. 2). Наибольшее содержание воды в углях (до 1,6–2 %) наблюдается после воздействия давлений 198-220 МПа (первая тройная точка воды и льдов), а также 479-636 МПа (третья тройная точка). Минимум влажности отмечается при давлениях 250-400 МПа (вторая тройная точка воды и льдов).

Наличие капелек воды на кровле пласта и повышенная влажность штыва после всех геодинамических явлений свидетельствует о том, что в зоне опорного давления величина напряжения находилась именно в диапазоне 198-220 МПа. И лишь последнее явление (после гидрообработки) могло произойти при меньших давлениях.

Следует отметить, что ещё один минимум влажности (особенно при скоростях нагружения менее 5 МПа/с) наблюдается при давлении 150 МПа, т.е. происходит переход части жидкой воды в твердую фазу. Поэтому при отсутствии значительных пиков опорного давления влажность угля, как правило, не превышает 1-1,2%.

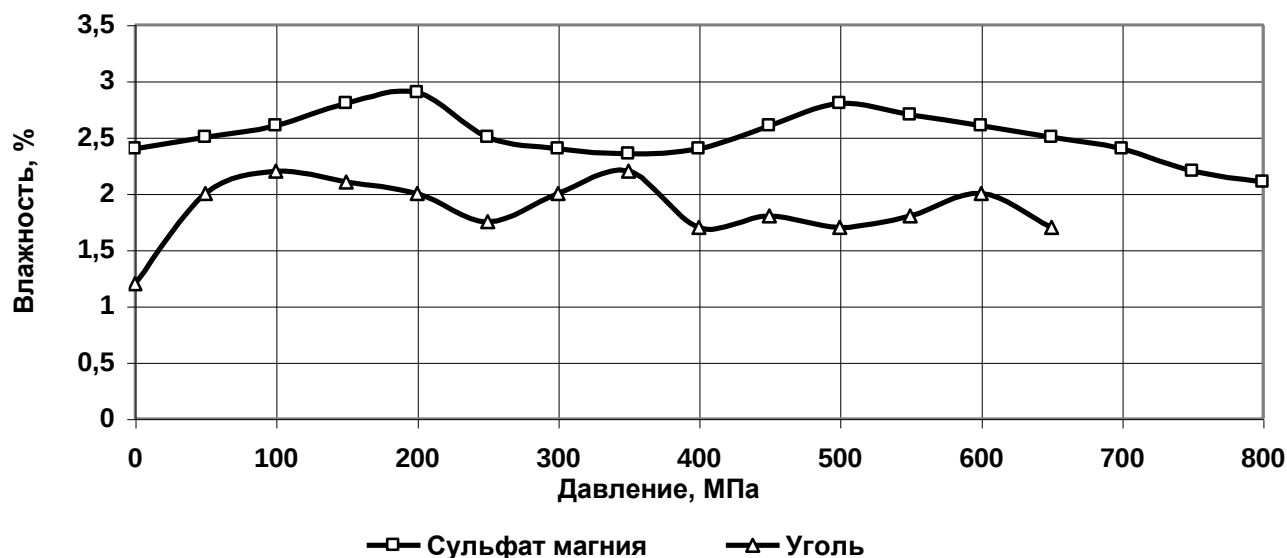


Рис. 2. Зависимость содержания жидкой воды от величины давления.

Отсутствие видимой влаги после гидрообработки (около 5 м³ в скважину) может быть объяснено именно переходом свободной воды в кристаллогидратную при уменьшении горного давления впереди лавы за счет оставления целика шириной 30 м между 1-й и 2-й лавами. В то же время напряжения в целике по оценкам УкрНИМИ составляет более 500 МПа.

Динамическое разрушение угля, глинистого сланца (при мощности менее 0,1 м), песчаника (при выбросах, спровоцированных взрывными работами) может быть обусловлено структурно-фазовым переходом кристаллогидратная → жидкая вода, сопровождающимся скачкообразным (взрывоподобным) изменением объема. Сильный и продолжительный (до 3 сек) внутренний рассредоточенный взрыв при гео- и газодинамическом явлении существенно отличается от резкого и короткого взрыва взрывчатого вещества. Разнонаправленность и избирательность разрушения связаны с наличием широкого спектра разнонаправленных волн, образующихся в результате деформационно-взрывных процессов (геодеформационных волн).

В процессе адиабатического сжатия угольного пласта и развивающихся деформаций сдвига возникает существенное повышение температуры, которое ощущается в полостях спустя несколько суток после явления. За счет высокой температуры и давления часть угольного вещества претерпевает структурные изменения (аморфизацию) и тонкодисперсная пыль по плоскостям скольжения («бешеная мука»), образующуюся в процессе явления, имеет буроватый цвет (черта фюзенита).

Таким образом, в работе произведена оценка напряженного состояния и показано, что динамические явления во 2 лаве центрального бремсберга пласта l_1

могли быть результатом структурно-фазовых переходов воды и угольного вещества под действием высоких давлений порядка 200-220 МПа.

Литература.

1. Якоби О. Практика управления горным давлением. – М.: Недра, 1987.
2. Черняк И.Л. Повышение устойчивости подготовительных выработок. – М.: Недра, 1993.
3. Черняк И.Л., Зайденварг В.Е. Периодичность изменения напряженно-деформированного состояния массивов угля и пород впереди очистного забоя. – Горный журнал, 1993. - №3. – С. 25-28.
4. Жданкин Н.А., Жданкин А.А. Геомеханика горных выработок. Сопряжение лава-штрек. Новосибирск: Наука, 1990. – 112 с.
5. Лобков Н.И. Определение основных параметров управления кровлей при разработке пластов в сложных условиях глубоких шахт Донбасса. - Автореф. дисс. на соиск. учен. ст. канд. техн. наук. – Донецк, 1985.
6. Инструкция по безопасному ведению горных работ на шахтах, разрабатывающих пласты, склонные к горным ударам. Утв. МУП СССР 18.11.1988 г. – Л.: ВНИМИ, 1988. – 87 с.
7. Расчет и экспериментальная оценка напряжений в целиках и краевых частях пласта угля (методические указания). – Л.: ВНИМИ, 1979. – 130 с.
8. Носач А.К., Рязанцева Н.А., Бачурин Л.Л., Рязанцев Н.А. Распределение влаги в горном массиве и влияние горных работ на обводнение выработок // Материалы научно-практической конференции «Наука-Жизнь-Производство». Красноармейск: КФ ДонНТУ, 2001. – С.