

УДК [622.023.23:539.4]:620.16

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ГОРНЫХ РАБОТ

С. И. Скипочка, Т. А. Паламарчук, Л. В. Прохорец, Н. Т. Бобро

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины
ул. Симферопольская, 2-А, г. Днепр, 49005, Украина.

E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Установлено, что скорость подвигания очистного забоя - практически единственный фактор, управлять которым мы можем в процессе ведения работ с целью уменьшения опасных повреждений массива горных пород и повреждений земной поверхности. Показано, что увеличение скорости подвигания забоя способствует уменьшению неравномерностей распределения деформаций поверхности, а прочность породы обычно возрастает с увеличением скорости нагружения. Выполнен учет изменения физико-механических свойств трещиноватого углепородного массива во времени и установлена зависимость длины консоли, нависающей над выработанным пространством лавы, от скорости подвигания очистного забоя.

Ключевые слова: горные породы, интенсификация, скорость подвигания очистного забоя, скорость нагружения, геомеханическое состояние массива.

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗМІНИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОРОДНОГО МАСИВУ ПРИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ГІРНИЧИХ РОБІТ

С. І. Скіпочка, Т. А. Паламарчук, Л. В. Прохорець, М. Т. Бобро

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України
вул. Сімферопольська, 2-А, м. Дніпро, 49005, Україна.

E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Встановлено, що швидкість посування очисного вибою - практично єдиний фактор, керувати яким ми можемо в процесі ведення робіт з метою зменшення небезпечних ушкоджень масиву гірських порід і ушкоджень земної поверхні. Показано, що збільшення швидкості посування вибою сприяє зменшенню нерівномірностей розподілу деформацій поверхні, а міцність породи зазвичай зростає зі збільшенням швидкості навантаження. Виконано урахування зміни фізико-механічних властивостей тріщинуватого вуглепородного масиву в часі і встановлено залежність довжини консолі, що нависає над виробленим простором лави, від швидкості посування очисного вибою.

Ключові слова: гірські породи, інтенсифікація, швидкість посування очисного вибою, швидкість навантаження, геомеханічний стан масиву.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. При отсутствии капитальных вложений в горнодобывающую отрасль Украины основной путь повышения ее эффективности – это интенсификация горных работ, которая, наряду с повышением производительности, оказывает существенное влияние на безопасность труда шахтеров. Определяющим при этом становится фактор геомеханической безопасности. По-

этому в настоящее время интерес к вопросам влияния интенсификации горных работ на напряженно-деформированное состояние породного массива постоянно растет, о чем свидетельствует всплеск научных публикаций по данной тематике. Отметим, что при изучении этого вопроса по-прежнему применяются традиционные (либо усовершенствованные) экспериментальные и теоретические методы.

Цель работы состоит в установлении закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния породного массива, а также в определении фактора, позволяющего повысить безопасность горных работ, при их интенсификации.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В последнее время все больший интерес представляют работы, посвященные исследованиям влияния скорости нагружения и деформации на прочностные свойства горных пород [1–5]. Еще Г. Кольским установлено, что при высоких скоростях нагружения даже чисто пластические материалы подвержены хрупкому разрушению, т. е. пластические деформации среды не происходят, а появляются радиальные трещины. В таких материалах хрупкого разрушения не наблюдается, т. к. касательные напряжения релаксируют. Чем выше скорость релаксации, тем более пластичен материал. При высоких скоростях нагружения (например, взрывном) даже в пластических материалах касательные напряжения не успевают релаксировать, поэтому характер разрушения не отличается от хрупкого.

Чем больше размер неоднородности, тем выше напряжение при заданной скорости деформации. Если тело велико, то в нем при любой скорости деформации всегда найдутся неоднородности большого размера, на которых избыточное напряжение приведет к разрушению. Если это избыточное напряжение соответствует:

$$\sigma_u = \rho \cdot V_s^2 \cdot \varepsilon' \cdot \frac{l_0}{v}, \quad (1)$$

то минимальный размер неоднородности равен:

$$l_0 = \frac{\sigma_u}{\rho \cdot V_s^2} \cdot \frac{v}{\varepsilon'}, \quad (2)$$

где ρ – плотность породы; V_s – скорость поперечной волны сдвига; ε' – скорость деформации; v – критическая скорость, соответствующая пластическим деформациям.

Таким образом, при постоянной скорости деформации среди параметров твердого тела появляется параметр с размерностью длины, и твердое тело утрачивает свое безразличие к масштабу. Из формулы (2) следует, что для всякого твердого тела конечного размера можно подобрать такую низкую скорость деформации, при которой оно не будет разрушаться, т. е. наблюдается явление крипа из-за релаксации напряжений.

При высокой скорости деформации дополнительные неупругие напряжения, складываясь с упругими, приводят к увеличению жесткости тела, а иногда и к увеличению эффективной прочности, но это не является динамической прочностью.

В работе Т.Н. Синга проведены испытания с циклическим одноосным нагружением образцов горных пород со скоростью 25 с^{-1} [3]. Каждый образец нагружался 100 раз, при этом постепенно увеличивался уровень нагрузки от 5 %

до 60 % от разрушающей, т. е. 99,5 МПа. Из результатов исследований, представленных на рис. 1, следует линейная зависимость между прочностью образца и приложенной нагрузкой. Уравнение регрессии в этом случае записывается в виде:

$$\sigma = -0,1714P + 98,929, R^2 = 0,9829, \quad (3)$$

где σ – прочность образца, МПа; P – приложенная нагрузка, МПа.

В результате исследований установлено, что прочность на сжатие уменьшается по мере увеличения числа циклов нагружения, но после 400 циклов процент снижения прочности наблюдается незначительный. Изменение модуля Юнга показывает ту же тенденцию.

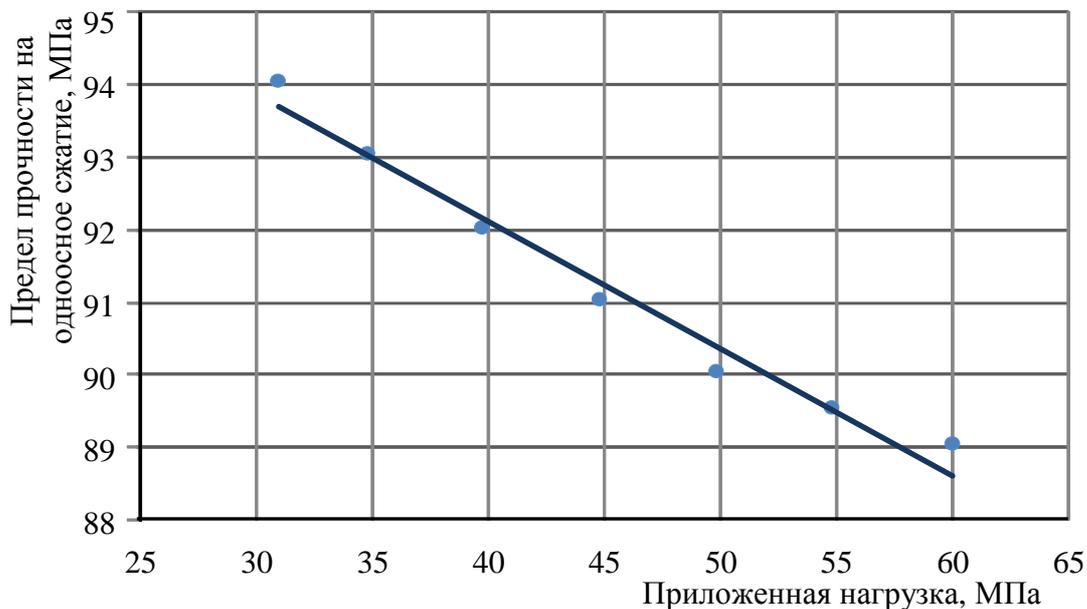


Рисунок 1 – Влияние приложенной нагрузки на прочность при одноосном сжатии

При изучении влияния скорости нагружения на разрушение горных пород показано [4], что статическая трещиностойкость породы остается практически постоянной, в то время как динамическая вязкость разрушения пород существенно возрастает при увеличении скорости нагружения. Следует отметить, что, чем выше скорость нагружения пород, тем наблюдается большее разветвление трещин. Кроме того, при очень высоких скоростях нагружения хрупкие горные породы разрушались на несколько фрагментов, а не пополам. Однако для статически разрушенного образца не наблюдалось каких-либо разветвленных трещин.

В работе [5] показано, что уменьшение трещиностойкости горных пород в зависимости от скорости распространения трещин описывается степенной зависимостью. В работе представлены также зависимости прочности горных пород от скорости их нагружения. Отмечается, что прочность породы обычно возрастает с увеличением скорости нагружения, как показано в табл. 1.

Таблица 1 – Изменение прочности горных пород от скорости их нагружения

Скорость нагружения, 10^{-6} мм/с		Максимальная нагрузка, Н	Прочность, МПа
Быстрая	15900	458,5	36,0
	10600	286,0	24,5
	5770	171,5	35,0
Обычная	150	425,0	31,5
	106	270,0	30,0
	61	159,0	29,5
Медленная	1,42	388,5	31,0
	0,98	242,5	26,5
	0,61	150,0	33,0
Очень медленная	0,336	386,0	30,5
	0,236	263,5	29,5
	0,160	138,0	25,5

Однако, обнаружено явление, что когда скорость нагружения замедляется на четыре порядка, максимальная прочность возрастает более чем на 16 %, что может быть связано со статистическим характером отказа молекулярных связей. Прочность квазихрупкого гетерогенного материала, как правило, трудно измерить из-за ее зависимости от размера и формы образца, т.к. в этом случае очень сильно влияние масштабного эффекта. Вследствие чего разрушение происходит не во всех точках одновременно, а начиная с наиболее слабого звена. Наблюдается также корреляция предела прочности горных пород на сжатие с их упругим разрушением, которое происходит в результате распространения неустойчивой трещины.

Вопросом влияния скорости подвигания очистного забоя (одного из главных показателей интенсификации горных работ) на геомеханические процессы во вмещающих породах продолжительное время занимались многие ученые. На данный момент уже однозначно установлено, что изменение скорости влияет на поведение кровли в призабойном пространстве, а также на выбор параметров работы очистного забоя. Роль скорости еще в середине прошлого века образно показана немецким маркшейдером Ролленсманном: «если из-под предмета мгновенно вынуть лист бумаги, то предмет (сооружение) останется на месте». С увеличением скорости подвигания трещиноватость в породах развивается медленнее, породы начинают меньше деформироваться, вследствие чего устойчивость обнаженных пролетов пород кровли увеличивается.

Увеличение скорости подвигания забоя способствует уменьшению неравномерностей распределения деформаций поверхности, а в том случае, когда забой на длительное время остановлен, деформации поверхности достигают наибольших значений. Показано, что для каждого конкретных горно-технических условий должна существовать такая скорость подвигания очистного забоя, при которой сдвигения и деформации динамической мульды сдвигения становятся равными движениям и деформации окончательно сформировавшейся мульды [6, 7].

Экспериментальними дослідженнями встановлено, що при збільшенні швидкості підвигання очистного забоя смещення кровлі зменшується як впереди забоя, так і в призабойному просторі. Показано, що збільшення швидкості підвигання від 3-4 до 10-12 м/сутки практично не оказує впливу на стан кровлі. При швидкостях підвигання до 40 м/місяць породи непрямої кровлі інтенсивно розслаиваються над вироботаним простором. С збільшенням же швидкості підвигання розслоєння відбувається менш інтенсивно, а смещення кровлі суттєво зменшується при зростанні швидкості підвигання очистного забоя до 4-5 м в сутки. Далі її збільшення практично не впливає на смещення [8].

Дослідження показали, що стійкість кровлі можна забезпечити, регулюючи швидкість підвигання лави до значення, при якому породний шар не буде встигати руйнуватися в зоні опорного тиску. Мінімально допустима швидкість підвигання лави, перешкоджаючи руйнуванню кровлі, повинна бути забезпечена впродовж всього часу обробки виемочного столба, т. к. зупинка очистного забоя на час, більше часу руйнування породи, може призвести до обвалення кровлі.

Встановлено, що при швидкостях руху очистного забоя до 5 м/сутки в порівнюваних умовах ніколи аварії не відбуваються. Це обставина диктує необхідність більш детального розгляду горно-технічних ситуацій і виявити найбільш значимі фактори з точки зору геомеханіки, вплив яких визначає вирішальну роль в виникненні аварійних ситуацій. До таких факторів належать: довжина лави і швидкість підвигання забоя в сутки, збільшення якої призводить до суттєвих змін напружено-деформованого стану крайової зони пласта і до появи додаткових зон ослабленого вугля, являючогося додатковим джерелом виділення метану [9–11].

Свирко С.В. [12] встановив, що зростання швидкості підвигання очистного забоя суттєво впливає на кінцеві величини деформацій земної поверхні, а не лише зменшує їх проміжні динамічні значення в полумульді з боку демонтажної камери, т. е. збільшення швидкості змінює інтенсивність протікання процесу сдвигу в полумульді «впереди забоя».

При швидкості підвигання очистного забоя $V < 5,5$ м/сутки залежність між швидкістю і газоносністю виемочного ділянки майже лінійна, при швидкості підвигання забоя більше $V > 5,5$ м/сут амплітуда на графіку газообильності може досягати катастрофічних величин, що підтверджується високою ймовірністю прориву метановоздушної суміші з штучного газового колектора в вироботаним просторі. Інтенсивність газодинамічних і геомеханічних процесів в углепородному масиві зростає при різкій зупинці комплексно-механізованого забоя (КМЗ) і в перші сутки його простою, а також перед обваленням підроботаних породи налягаючої товщі [13].

Також встановлені закономірності деформування углепородної товщі при нерівномірному підвиганні КМЗ: при збільшенні швидкості підвигання очистного забоя в інтервалі 1-20 м/сутки осідання породи кровлі над перекриттям ділянки механізованої крепи зменшуються в 1,4-2,1 рази, пучення по-

род почвы – в 1,2-5,2 раза, точка максимума эпюры опорного горного давления приближается к краевой части пласта от 0,55 до 0,15 м, а зона активного сдвижения подработанных пород кровли смещается от линии очистного забоя в сторону выработанного пространства. При увеличении периода простоя КМЗ оседания верхнего перекрытия секций механизированной крепи увеличиваются почти линейно со средней скоростью 2-3 мм/сутки. Причём, скорость оседаний перекрытия тем больше, чем больше была ранее скорость движения КМЗ. Наибольшая скорость оседаний (до 10 мм/сутки) зафиксирована в первые сутки после остановки очистного забоя, а при скоростях, превышающих 4 м/сутки наблюдаются незначительные изменения деформации [10, 13].

Установлено, что скорость подвигания очистного забоя является одним из основных факторов, определяющих степень повреждения земной поверхности и горных пород подстилающей толщи, что должно учитываться при решении вопросов состояния подрабатываемой толщи горных пород, при расконсервации запасов угля, при решении вопросов дегазации, улучшении технологии добычи угля. Скорость движения горных пород при подработке зависит от скорости подвигания очистного забоя. Увеличение скорости подвигания очистного забоя благоприятно для состояния дневной поверхности, т. к. при этом имеют место менее значительные повреждения. Одновременно при увеличении скорости подвигания очистного забоя создаются значительные трудности при управлении горным давлением, поддержании выработок и интенсификации газовых выделений с призабойной зоны пласта.

Исследования влияние скорости подвигания на характер обрушения кровли связаны с тем, что современная очистная техника позволяет достигать высоких скоростей подвигания забоя. А это, в свою очередь, несомненно отражается на интенсивности разрушения кровли [14].

Известны случаи, когда повышение скорости подвигания приводило к улучшению состояния кровли [15]. Такие ситуации характерны, например, для слабых пород, которые интенсивно разрушаются при ведении очистных работ. Увеличение же скорости подвигания в данном случае приводило к тому, что породы становились менее разрушенными. Это уменьшало интенсивность вывалов и улучшало состояние кровли.

Установлены зависимости интенсивности вывалообразования от скорости подвигания забоя. Можно предположить, что для любых условий разработки существует оптимальная скорость подвигания, при которой разрушение кровли не вызовет проблем. Выполненные исследования позволяют определить характер разрушения кровли в зависимости от условий разработки и скорости подвигания забоя [15, 16].

Существует утверждение, что увеличение скорости подвигания очистного забоя приводит к увеличению шага посадки кровли. Причем, значительным увеличением скорости можно достичь того, что посадка исчезнет как таковая, т.к. просто не будет хватать времени для разрушения слоя. Однако, следует отметить, что существует максимальная скорость подвигания, при которой шаг посадки будет максимальным. Причем, при наличии в кровле мощных породных слоев эта скорость больше и приближается к 6-7 м/сутки. В другом случае она

колеблется в пределах 3,5-5 м/сутки. Дальнейшее увеличение скорости приведет только к уменьшению шага посадки. Поэтому не существует скорости, при которой посадка кровли вообще исчезнет или достичь ее современным оборудованием пока просто невозможно. Таким образом, скорость подвигания лавы – практически единственный фактор, управлять которым мы можем в процессе ведения работ. Поэтому придерживаясь определенной скорости на протяжении всего периода отработки до первичной посадки, можно с большой точностью предсказать шаг посадки и принять необходимые меры для предупреждения ее опасных последствий. Для конкретных условий скорость варьируется в пределах 3,5-7 м/сутки [6].

Вторая группа методов, используемых при исследовании интенсификации горных работ на напряженно-деформированное состояние углепородного массива, базируется на фундаментальных положениях механики горных пород и заключается в решении систем дифференциальных либо алгебраических (при использовании численных методов) уравнений при заданных граничных условиях.

Проблеме влияния скорости подвигания очистного забоя на напряженно-деформированное состояние массива значительное внимание уделено А. В. Савостьяновым, который предложил учитывать влияние геологических, горнотехнических и производственных факторов на состояние горного массива в процессе ведения очистных работ, что позволяет решать целый ряд технологических задач, в частности, при разных способах управления кровлей [17]. Существенным недостатком этого метода является невозможность исследования технологических параметров и напряжений при скорости подвигания очистного забоя больше 5 м/сутки. В результате обработки статистических данных с помощью метода группового учета аргументов, основанного на рекурсивном селективном отборе моделей на основе которых строятся более сложные модели. Исходя из практической реализации в работе использован полином Колмогорова-Габор. В результате проведенных аналитических исследований было установлено, что нагрузка P на секции механизированной крепи уменьшается по логарифмической зависимости от скорости очистного забоя V :

$$P = -k_1 \ln(V) + k_2, \quad (4)$$

где k_1, k_2 – параметры, характеризующие физико-механические свойства горных пород и горногеологическое расположение очистного забоя [18].

Это позволяет формировать соответствующую технологическую ситуацию по длине выемочного столба и корригировать силовые параметры секций механизированной крепи для эффективного управления состоянием горного массива при изменяющихся скоростях подвигания очистного забоя.

Методом численного моделирования исследовано напряженное состояние комплекса очистных выработок рудника «Карнасурт», отрабатывающего мало-мощные пологопадающие рудные залежи системами с открытым очистным пространством без обрушения и закладки выработок. Моделирование выполнено при гравитационном и гравитационно-тектоническом напряженном состоянии массива. Установлено, что устойчивость большепролетных очистных выработок

рудника забезпечується, головним образом, за счет действия больших тектонических напряжений субгоризонтального направления [19].

В результате численного моделирования методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния углепородного массива при переходе очистным забоем передовой выработки установлено, что при подходе механизированной крепи очистного забоя к диагональной печи резко изменяются вертикальные и горизонтальные напряжения во вмещающих породах; вертикальные напряжения увеличиваются в 1,4-1,6 раза по сравнению с напряжениями в нетронутом массиве, а горизонтальные напряжения изменяются от сжимающих к растягивающим. Кроме того, показано, что по характеру распределения остаточной прочности пород выявлены зоны разрушения в кровле и почве диагональной печи и очистной выработки [20].

На основании выполненного численного моделирования сделан вывод, что при остановке лавы отработывающейся с большой скоростью, в краевой части накапливается значительная энергия упругих деформаций, способная реализоваться при разрушении пород с динамическим эффектом. Именно такие случаи наблюдаются в последнее время на шахтах Кузбасса. Показано, что при высокой скорости подвигания очистного забоя призабойная область может не претерпевать значительных разрушений [21].

Известно, что основные проблемы геомеханического характера, возникающие при высоких скоростях подвигания фронта очистных работ, обусловлены увеличением длины породной консоли основной кровли, нависающей над выработанным пространством лавы. Из этих соображений считаем необходимым и достаточным получить аналитические зависимости, связывающие параметры этой консоли с параметрами лавы и скоростью ее подвигания.

Основными физическими процессами, сопровождающими проведение очистных работ, являются деформации и разрушение кровли, возникновение зон аномального напряженно-деформированного состояния (зоны опорного давления, концентрации и рассеивания напряжений над краевыми зонами), а также восстановление деформаций сжатия в породах подстилающей толщи. Именно с этих позиций разработана математическая модель геомеханических процессов в зоне очистных работ при высоких скоростях подвигания лавы, позволившая установить закономерности поведения углепородного массива при возрастании скорости его обнажения.

В частности, получена зависимость изменения длины нависающей консоли основной кровли от скорости подвигания забоя для случая вязко-упругой пористой (трещиноватой) среды:

$$l_0 \approx \frac{2h}{\pi\lambda H} \cdot \frac{z(\lambda_i^*)}{f(\lambda_i^*)\zeta\left(\left(1 - \frac{V_L^2 \rho}{\lambda_i^*}\right), \lambda_i^*\right)}, \quad (5)$$

где h – толщина угольного пласта; H – глубина залегания угольного пласта; λ – коэффициент бокового распора; V_L – скорость движения очистного забоя; λ_i^* – эффективный модуль упругости мелкослоистой вязко-упругой пористой

(трещиноватой) среды (вязкость учитывается путем введения интегро-дифференциальных параметров [22]); z, f, ξ – функции параметров среды; $\bar{\rho}$ – плотность среды; $\bar{\rho} = \rho_1(1 - k) + k\rho_2$; k – пористость (трещиноватость) среды; ρ_1 – плотность сухой непористой фазы; ρ_2 – плотность заполнителя [1].

Анализ приведенной зависимости позволяет сделать вывод, что с увеличением скорости подвигания забоя размер консоли нависающей кровли возрастает по закону, близкому к линейному (рис. 2).

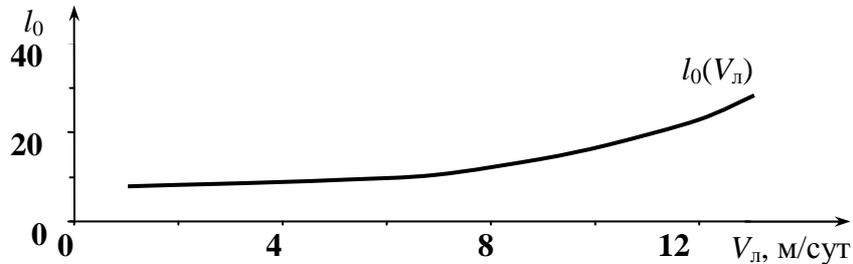


Рисунок 2 – Характер изменения длины нависающей консоли от скорости подвигания очистного забоя

При этом, чем выше модуль упругости вмещающих пород и ниже степень их неоднородности и трещиноватости, тем больше длина консоли.

Для оценки влияния скорости подвигания очистных забоев на напряженно-деформированное состояние массива были проведены также аналитические исследования с использованием известных методов теории упругости и реологических процессов.

Как известно, реологические свойства горных пород характеризуют изменение (рост) во времени деформаций при постоянном напряжении (явление ползучести) либо ослабление (уменьшение) напряжений при постоянной деформации (явление релаксации).

Влияние времени учитывается путем замены деформационных характеристик массива временными функциями. В частности, модули упругости пород $\bar{\lambda}_i$ можно представить как некоторую функцию времени:

$$\bar{\lambda}_i = \lambda_i^* e^{-\beta t}, \quad (6)$$

где β – параметр, характеризующий изменения модуля упругости со временем.

При увеличении скорости подвигания от 2 до 10 м/сут влияние на длину и прогиб консоли параметра β , который изменялся в широких пределах, хорошо прослеживается, с увеличением скорости подвигания влияние этого параметра сильно уменьшается и при скоростях более 30 м/сут практически не ощущается.

Установлено, что при скорости подвигания очистного забоя до 10 м/сут параметры ползучести δ и α оказывают заметное влияние на длину и прогиб консоли, а при большей скорости довольно быстро утрачивают свое влияние. При скорости подвигания более 20 м/сут параметры ползучести горных пород не влияют на характер проявления горного давления.

Можно отметить, что длина консоли и прогибы (деформации) кровли наиболее сильно изменяются при скоростях подвигания очистного забоя от 2 до 10 м/сут, затем происходит постепенное уменьшение их изменения и при скорости подвигания более 20 м/сут их значения становятся практически независимыми от скорости подвигания. Большое влияние на характер поведения пород кровли оказывают реологические свойства и изменение модуля упругости, но эти характеристики пород наиболее сильно проявляются при скоростях до 10 м/сут. Следует отметить, что из зависимости поведения пород кровли от модуля Юнга следует и зависимость от прочностных свойств горных пород, т.к. между прочностными и упругими свойствами горных пород существует тесная корреляционная связь [23].

Для учета изменений свойств угольного массива во времени можно также использовать функцию ползучести горных пород, определяемую по формуле

$$\varphi(t) = \frac{\delta t^{1-\alpha}}{1-\alpha}, \quad (7)$$

где α , δ – параметры ползучести горных пород, значения которых приняты согласно [24].

Метод переменных модулей предполагает замену деформационных характеристик временными функциями для всего массива, однако изменение свойств во времени необходимо учитывать только в зоне влияния очистных выработок. Так в формуле (5) λ_i^* заменится на $\bar{\lambda}_i$:

$$\bar{\lambda}_i = \frac{\lambda_i^*}{1+\varphi(t)}, \quad (8)$$

(или $\bar{\lambda}_i = \lambda_i^* e^{-\beta t}$).

Возрастание скорости подвигания фронта очистных работ и вызванное этим увеличение размеров консоли основной кровли, зависящей над выработанным пространством лавы, ухудшает и условия поддержания выемочных штреков, особенно в области их сопряжений с лавой.

ВЫВОДЫ:

- установлено, что при высокой скорости деформации дополнительные неупругие напряжения, складываясь с упругими, приводят к увеличению жесткости тела, а иногда и к увеличению эффективной прочности. Показано, что прочность породы обычно возрастает с увеличением скорости нагружения. Однако, обнаружено явление, что когда скорость нагружения замедляется на четыре порядка, максимальная прочность возрастает более чем на 16 %, что может быть связано со статистическим характером отказа молекулярных связей;

- установлено, что увеличение скорости подвигания забоя способствует уменьшению неравномерностей распределения деформаций поверхности, а в том случае, когда забой на длительное время остановлен, деформации поверхности достигают наибольших значений;

- установлено, что при увеличении скорости подвигания очистного забоя смещение кровли уменьшается как впереди забоя, так и в призабойном пространстве. При скоростях подвигания до 40 м/месяц породы непосредственной

кровли інтенсивно ряслаиваються над вироботаним пространством. С увеличением же скорости подвигания ряслоение происходит менее интенсивно, а смещение кровли существенно уменьшается при возрастании скорости подвигания очистного забоя до 4-5 м в сутки. Дальнейшее же ее увеличение практически не влияет на смещение;

- увеличение скорости подвигания очистного забоя приводит к значительным изменениям напряженно-деформированного состояния краевой зоны пласта и к появлению дополнительных зон ослабленного угля, являющегося дополнительным источником выделения метана;

- длина консоли и прогибы кровли наиболее сильно изменяются при скорости подвигания очистного забоя от 2 до 10 м/сутки, затем происходит постепенное уменьшение их изменения и при скорости подвигания более 20 м/сутки их значения становятся практически независимыми от скорости подвигания. Показано, что существенное влияние на характер поведения пород кровли оказывают реологические свойства и изменение модуля упругости, но эти характеристики пород наиболее сильно проявляются при скоростях до 10 м/сутки. Следует отметить, что из зависимости поведения пород кровли от модуля Юнга следует и зависимость от прочностных свойств горных пород, т.к. между прочностными и упругими свойствами горных пород существует тесная корреляционная связь;

- при скорости подвигания очистного забоя меньше 5,5 м/сутки зависимость между скоростью и газоносностью выемочного участка почти линейная, при скорости подвигания забоя более 5,5 м/сут. амплитуда на графике газообильности может достигать катастрофических величин, что подтверждается высокой вероятностью прорыва метановоздушной смеси из искусственного газового коллектора в выработанном пространстве;

- установлено, что скорость подвигания очистного забоя - практически единственный фактор, управлять которым мы можем в процессе ведения работ с целью уменьшения опасных повреждений массива горных пород и повреждений земной поверхности;

- выполнен учет изменения физико-механических свойств углепородного массива во времени и установлено, что в вязко-упругом трещиноватом массиве горных пород длина консоли, нависающей над выработанным пространством лавы, прямо пропорциональна ее мощности и модулю упругости пород, обратно пропорциональна глубине проведения горных работ, вязким свойствам углепородного массива и степени неоднородности массива и возрастает по близкому к линейному закону при увеличении скорости подвигания очистного забоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Элементы геомеханики углепородного массива при высоких скоростях подвигания лав / С. И. Скипочка, Б. М. Усаченко, В. И. Куклин. – Днепропетровск: ЧП «Лири ЛТД», 2006. – 248 с.

2. Barbero M., Borri-Brunetto M. Some remarks on the evaluation of loading-rate effects on the shear strength of rock joints // Proc EUROCK'93. - Lisbon, 1993. – Vol. 1. – P. 23–29.

3. Singh T. N., Suresh Naidu A. Influence of strain rate and cyclic compression on physico-mechanical behavior of rock // J. Indian Eng. and Materials Sciences. – 2000. – Vol. 8. – P. 8–12.
4. Effects of loading rate on rock fracture / Z. X. Zhang and other // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1999. – Vol. 36. – P. 597–611.
5. Fracture of rock: effect of loading rate / Zdenek P. [and other] // Engineering Fracture Mechanics. – 1993. – Vol. 45. – No. 3. – P. 393–398.
6. Стаднюк Е. Д. Изучение влияния скорости подвигания очистного забоя на шаг первичной посадки основной кровли // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2013. – Вып. 11. – С. 153–162.
7. Сдвигение и разрушение горных пород / С. Д. Викторов, М. А. Иофис, С. А. Гончаров. – М.: Наука, 2005. – 280 с.
8. Временное давление и пути уменьшения его отрицательного влияния на устойчивость очистных выработок / М. П. Зборщик, М. А. Ильяшов, Е. Н. Халимендигов // Геомеханика подземной разработки угольных пластов. – Донецк: ДонНТУ, 2007. – Т. 1. – С. 56–69.
9. Лобков Н. И. Исследование влияния скорости подвигания на работу очистного забоя // Материалы научно-практической конференции «Наука – жизнь – производство», Красноармейск. – 2001. – С. 28–30.
10. Толстунов С. А., Монтиков А. В. Влияние скорости подвигания очистного забоя на экологические последствия горных работ // Записки горного института. – СПб, 2013. – Т.203. – С. 112–115.
11. Толстунов С. А. Влияние состояния краевой зоны пласта на механизм возникновения взрывов метана на угольных шахтах // Записки Горного института. – СПб, 2011. – Т.190. – С. 249–255.
12. Свирко С. В. О влияния скорости подвигания очистного забоя на процессы сдвижения земной поверхности // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 3. – С. 51–62.
13. Наумкин В. Н. Прогноз параметров взаимодействующих геомеханических и газодинамических процессов при неравномерном движении очистных забоев угольных шахт – Новокузнецк, 2006. – 25 с.
14. Филимонов К. А. Исследование влияния скорости подвигания очистного забоя на разрушение кровли // Вестник КузГТУ. – 2003. – № 6. – С. 10–12.
15. Калинин С. И., Колмогоров В. М. Геомеханическое обеспечение эффективной выемки мощных пологих пластов с труднообрушаемой кровлей механизированными комплексами. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2002. – 113 с.
16. Филимонов К. А. Модель процесса разрушения подрабатываемого массива // Вестн. КузГТУ. – 2003. – № 5. – С. 26–28.
17. Савостьянов А. В., Клочков В. Г. Концепция теории сдвижения пород при подземной разработке угольных месторождений // Сб. научных тр. Национальной горной академии Украины. – 1999. – № 7. – С. 24–29.
18. Методи аналітичних досліджень впливу швидкості посування та форми дуги лінії очисного вибою на напружено-деформований стан масиву гірських порід / Р. О. Дичковський, Є. В. Тимошенко, Д. О. Астаф'єв // Науковий вісник НГУ. – 2014. – № 1. – С. 11–16.

19. Ловчиков А. В., Савченко С. Н. Напряженное состояние горных пород вблизи очистных выработок на руднике «Карнасурт» // Вести МГТУ, 2013. – 16. – № 4. – С. 741–747.

20. Численное моделирование методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния углепородного массива при переходе очистным забоем передовой выработки / С. В. Ряб [и др.]. – ГИАБ. – 2015. – № 3. – С. 414–422.

21. Мустафин М. Г. Влияние скорости подвигания очистного забоя на динамику разрушения пород кровли угольного пласта // ГИАБ. – 2008. – № 1. – С. 17–22.

22. Раджабов А. О., Рахимов В.Р. Исследование напряженного состояния приконтурного массива в условиях комбинированной разработки месторождения открыто-подземным способом // ГИАБ. – 2013. – № 6. – С. 136–139.

23. Оценка влияния скорости подвигания очистных забоев на напряженно-деформированное состояние окружающего массива / Г. И. Коршунов, О. И. Казанин, В. Н. Баранов // ГИАБ. – 1999. – № 7. – С. 44–46.

24. Кизияров О. Л. Исследование влияния скорости подвигания очистного забоя на НДС кровли в лаве // Сб. науч. тр. ДонГТУ. – 2012. – Вып. 37. – С. 102–109.

OBJECTIVE LAWS OF CHANGING STRESS-STRAIN STATE OF THE ROCK MASSIF AT THE INTENSIFICATION OF MINING WORKS

S. Skipochka, T. Palamarchuk, L. Prohorec, N. Bobro

M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine

vul. Simpheropolskaya, 2-A, Dnipro, 49005, Ukraine.

E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Purpose. To establish objective laws of changing stress-strain state of the rock mass at the intensification of mining works. **Methodology.** Critical analysis of the research results on the impact of increasing intensification of mining activities on the geomechanical state of the rock, as well as the methods of mathematical modeling of continuum mechanics and the theory of elasticity. **Results.** The increase in face advance speed reduces uneven distribution deformation surfaces was established. Rock strength generally increases with increasing loading rate are proofed. However, the phenomenon that when the loading rate slows down to four orders of magnitude, maximum strength is increased by more than 16%, which may be due to the statistical nature of the refusal of molecular couplings are discovered. The account changes in physical and mechanical properties of fractured coal rock mass over time are discovered and the dependence of the length console, hanging over the open area of lava on the speed movement of coal face are established. **Originality.** Objective laws of changing geomechanical state of the rock mass at the intensification of mining works are established. Speed movement of coal face practically only one factor we can manage that in the process of work are shown. **Practical value.** It is established, that choosing optimum values of speed movement of coal face can achieve reduction of dangerous infringements both in rocks massif, and on earth's surface. References 24, figures 2.

Key words: rocks, intensification, speed movement of coal face, geomechanical state of the massif.

REFERENCES

1. Skipochka, S.I., Usachenko, B.M. and Kuklin, V.Yu. (2006) "*Elementy geomechaniki ugleporodnogo masiva pri vysokih skorostyah podviganiya lav*" [Elements of geomechanics coal rock mass at high advance rates of lava], PE "Lira Ltd", Dnepropetrovsk, Ukraine.
2. Barbero, M., Borri-Brunetto, M. (1993) "Some remarks on the evaluation of loading-rate effects on the shear strength of rock joints", *Proc EUROCK'93*. – 1993. – vol. 1, pp. 23–29.
3. Singh, T.N. Suresh Naidu, A. (2000) "Influence of strain rate and cyclic compression on physico-mechanical behavior of rock", *J. Indian Eng. and Materials Sciences*, vol. 8, pp. 8–12.
4. Zhang, Z.X. (1999) "Effects of loading rate on rock fracture", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 36, pp. 597–611.
5. Zdenek, P. (1993) "Fracture of rock: effect of loading rate", *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 45, no. 3, pp. 393–398.
6. Stadnyuk, E.D. (2013) "The influence of speed movement of coal face on the primary landing step the main roof", *Geotechnical mechanic*. Collection of scientific papers. *IGTM of NASU*, Ukraine, Dnepropetrovsk. vol. 11, pp. 153–162.
7. Viktorov, S.D., Iofis, M.A. and Goncharov, S.A. (2005) "*Sdvizhenie I razrushenie gornyykh porod*" [Displacement and destruction of rocks], Nauka, Moscow, Russia.
8. Zborschik, M.P., Ilyashev, M.A. and Khalimendik, E.N. (2007) "Temporary pressure and ways to reduce its negative impact on stability treatment workings", *Geomechanics underground mining of coal seam*, Ukraine, Donetsk: DNTU, vol. 1, pp. 56–69.
9. Lobkov, N.I. (2001) "Research of influence movement speed on work coal face", Proceedings of the scientific-practical conference "Science - life - production", Krasnoarmeisk, pp. 28–30.
10. Tolstunov, S.A. and Montikov, A.V. (2013) "Influence movement of coal face on the environmental consequences of mining operations", *Notes Mining Institute*, St. Petersburg, T. 203, pp. 112–115.
11. Tolstunov, S. A. (2011) "Influence state boundary layer zone on the mechanism of occurrence of methane explosions in coal mines", Notes of the Mining Institute, St. Petersburg, vol. 190, pp. 249–255.
12. Svirko, S.V. (2016) "About influence velocity of coal face movement on the processes of displacement of the earth surface", *Vestnik KuzGTU*, № 3, pp. 51–62.
13. Naumkin, V.N. (2006) "The forecast geomechanical parameters of interacting and dynamic processes at non-uniform movement of coal face mines", Novokuznetsk, 25 p.
14. Filimonov, K.A. (2003) "Investigation of the effect speed movement of coal face at the destruction of roof", *Vestnik KuzGTU*, № 6, pp. 10–12.
15. Kalinin, S.I. and Kolmogorov, V.M. (2002) "*Geomechanicheskoe obespechenie effektivnoy vyemki mostchnikh pologikh plastov s trudnoobrushaemoy krovley mehanizirovannymi kompleksami*" [Geomechanical providing effective seizure of thick flat

seams which hard bring down roof mechanized complexes], Kuzbassvuzizdat, Kemerovo, Russia.

16. Filimonov, K.A. (2003) "Process Model destruction of undermined array", *Vestn. KuzGTU*, № 5, pp. 26–28.

17. Savostianov, A.V. and Klotchkov, V.G. (1999) "Concept displacement theory of rocks in underground coal deposits", *Coll. scientific tr. National Mining Academy of Ukraine*, № 7, pp. 24–29.

18. Dichkovsky, R.O., Tymoshenko, Je V. and Astaf'ev, D. O. (2014) "Analytic method of investigation of influence velocity movement and form an arc on line of coal face stress-strain state of rock massif", *Naukoviy visnik NGU*, № 1, pp. 11–16.

19. Lovchikov, A.V. and Savchenko, S.N. (2013) "Stress state of rocks near coal workings at the mine workings "Karnasurt"", *Vesti MGTU*, vol. 16, no. 4, pp. 741–747.

20. Ryab, S.V. (2015) "Numerical modeling by finite element method of the stress-strain state of coal rock mass when moving production face of advanced production", *GIAB*, № 3, pp. 414–422.

21. Mustafin, M.G. (2008) "Effect velocity movement of coal face on the destruction dynamics of the coal seam roof rock", *GIAB*, № 1, pp. 17–22.

22. Radjabov, A.O. and Rakhimov, V.R. (2013) "Research of marginal rock massif stress state in the conditions of the combined development of the field of open-underground way", *GIAB*, № 6, pp. 136–139.

23. Korshunov, G.I. and Kazanin, O.I. (1999) "Assessing the impact velocity movement of coal face on the stress-strain state of the massif", *GIAB*, № 7, pp. 44–46.

24. Kiziyarov, O.L. (2012) "Investigation of influence velocity movement of coal face on stress-strain state of roof in the lava", *Coll. scientific. tr. DonGTU*, vol. 37, pp. 102–109.

Стаття надійшла 01.12.2016.