

УДК 622.1:622.834.

В.А. Дрибан (д-р техн. наук), **И.В. Назимко** (канд. техн. наук)
Украинский государственный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики и маркшейдерского дела, г. Донецк
iv00@mail.ru

И.А. Садовенко (д-р техн. наук, проф.)
ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА АКТИВИЗАЦИИ СДВИЖЕНИЙ ПОДРАБОТАННОГО МАССИВА И ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МОКРОМ ПОГАШЕНИИ ШАХТ

Исследована активизация ранее подработанной толщи в результате затопления выработанного пространства. Установлена важная роль касательных микродеформаций в уменьшении объема подработанной толщи вследствие уменьшения границ прочности на сдвиг по границам блоков пород.

Ключевые слова: касательные микродеформации, зоны разрушения, затопление выработанного пространства.

Энергетической основой независимости нашего государства остаются запасы каменного угля, которые в состоянии покрывать потребности страны в энергии на 95%. В условиях рыночной экономики конкурентоспособность угольных шахт может быть обеспечена только при условии существенного повышения интенсивности угледобычи и роста производительности труда за счет увеличения нагрузки на лаву. Это можно обеспечить только при гарантировании благоприятных условий отработки запасов. К сожалению, развитие очистных работ на украинских шахтах достигло таких масштабов, что практически все действующие лавы отрабатывают запасы в условиях влияния ранее отработанных участков. Наиболее опасными участками являются те, которые были отработаны ранее и в настоящее время затоплены. Указанные участки не только создают зоны повышенного горного давления, но и представляют угрозу для прорыва подземных вод в

действующие очистные забои. Кроме того, активизация сдвижений подработанной толщи в процессе ее затопления практически не изучена.

Одним из наиболее важных процессов, которые протекают при отработке угольных пластов является процесс необратимых сдвижений, в результате которого образуются новые системы техногенной трещиноватости, происходит беспорядочное обрушение пород и их самоподбутовка, образование разрывов на земной поверхности и т.п.

Затопление ранее подработанного массива сопровождается процессами, которые являются следствием эффекта Ребиндера, проявляющегося в уменьшении поверхностной энергии горных пород при смачивании и изменении их физико-механических свойств. При этом меняются прежде всего деформационные и прочностные свойства, что приводит к активизации сдвижений ранее подработанного массива, последующего его уплотнения вследствие чего снижается его проницаемость и коэффициенты фильтрации. Таким образом, это сложный комплексный процесс с обратными связями (как положительными, так и отрицательными).

Для моделирования указанного процесса разработана специальная численная модель FLAC3D, способная моделировать во времени сопряженные процессы перераспределения механических напряжений, предельное деформирование массива горных пород и фильтрацию подземных вод в трещиноватом массиве [1]. Платформа FLAC3D является открытой и предоставляет возможности исследователю составить свои подпрограммы на языке высокого уровня, которые управляют деформационными, прочностными и гидравлическими свойствами вмещающих пород, а также процессами взаимодействия механических и гидравлических полей.

Для настройки параметров модели авторами использованы ранее выполненные исследования, которые позволили установить ряд существенных особенностей поведения трещиноватых сред в гидравлической среде. Так при затоплении массива горных пород происходит его дополнительное уплотнение, в результате чего

коэффициент фильтрации нижележащих горизонтов падает более интенсивно, чем вышележащих [2]. Поэтому процесс активной фильтрации все время перемещается вверх по падению, а в пределах нижележащих горизонтов он затухает (рис. 1).

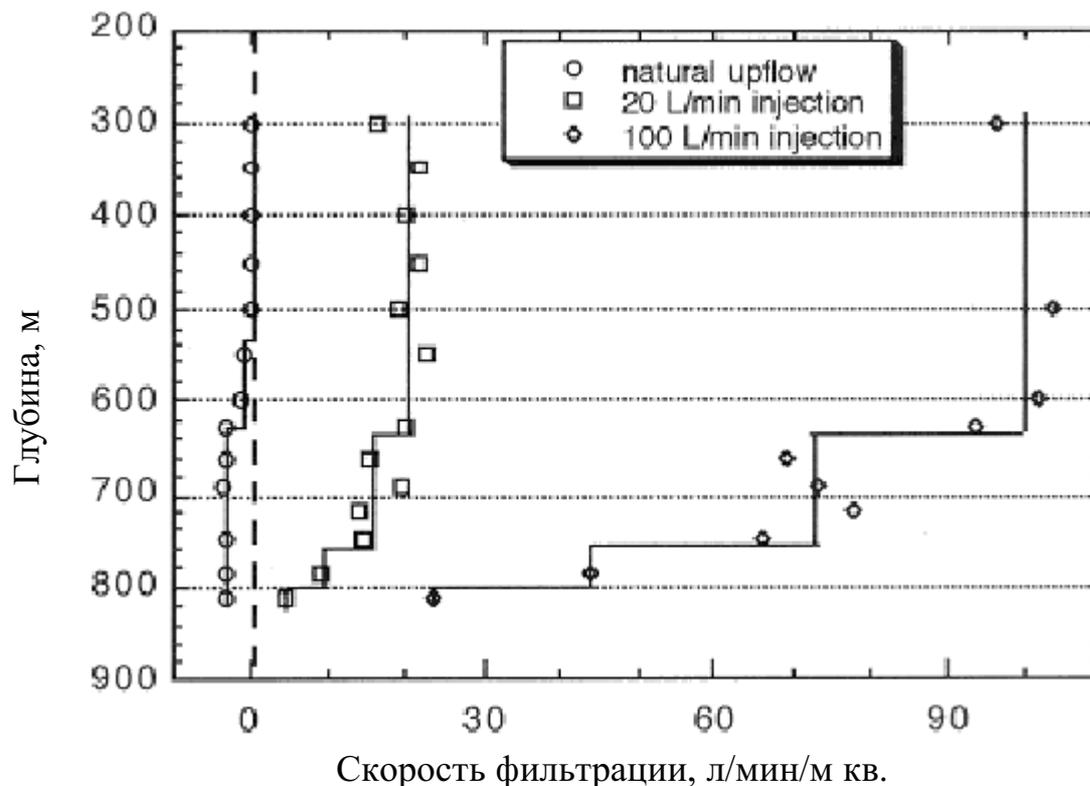


Рис. 1. Изменение скорости фильтрации с глубиной залегания трещиноватых пород

С точки зрения мокрого затопления шахт это имеет большое значение, поскольку фронт процессов активизации во время затопления все время движется с уровнем (зеркалом) подземных вод, уровень которых поднимается. Это значит, что основная активизация процессов сдвижений приходится на земную поверхность и наносы а не на подземные горизонты. Такая закономерность ранее не отмечалась и применительно к мокрому затоплению угольных шахт не адаптировалась.

Вторая особенность активизации сдвижений ранее подработанной толщи в процессе ее затопления заключается в том, что величина перепада интенсивности активизации сдвижений (по-

верхность-глубинные слои) тем больше, чем выше скорость затопления [3].

Исходя из результатов, полученных в [2] и данных испытаний гидравлических свойств пород в трехмерном напряженном состоянии [4] можно сделать вывод о том, что в снижение проницаемости вносит главный вклад нормальная компонента горного давления.

Графики на рис. 2 демонстрируют этот эффект: с увеличением вертикальной компоненты горного давления и расстояния между трещинами проницаемость падает. Однако в реальных условиях важна последовательность механических и гидравлических процессов, поскольку в трещиноватых массивах оба процесса имеют выраженную необратимость. Другими словами реакция трещиноватой среды может быть различна в зависимости от порядка приложения к испытываемому объему механического и гидравлического поля. Так большинство испытаний гидравлических свойств в лабораторных условиях производилось путем изменения механических напряжений в ранее обводненной трещиноватой среде. Эффект изменения напряженно-деформированного состояния трещиноватой среды, которая находилась в исходном напряженном состоянии и затем насыщалась водой исследовался реже. Вместе с тем такой порядок приложения механических и гидравлических полей порождает реакцию, которая характеризуется существенными отличиями.

Так в работе [5] показано, что основными реактивными деформациями на инъекцию воды в трещиноватую породную среду являются сдвиговые деформации. На рис. 3 показано, что в процессе нагнетания деформации относительного сдвига берегов трещин или проскальзывания стенок соседних блоков пород достигают 2,36мм, тогда как нормальные деформации сжатия трещин за счет уплотнения обводняемой трещиноватой среды не превышают 0,37мм. Такой эффект может быть следствием уменьшения сцепления и коэффициента трения по шероховатым контактам породных блоков трещиноватого массива.

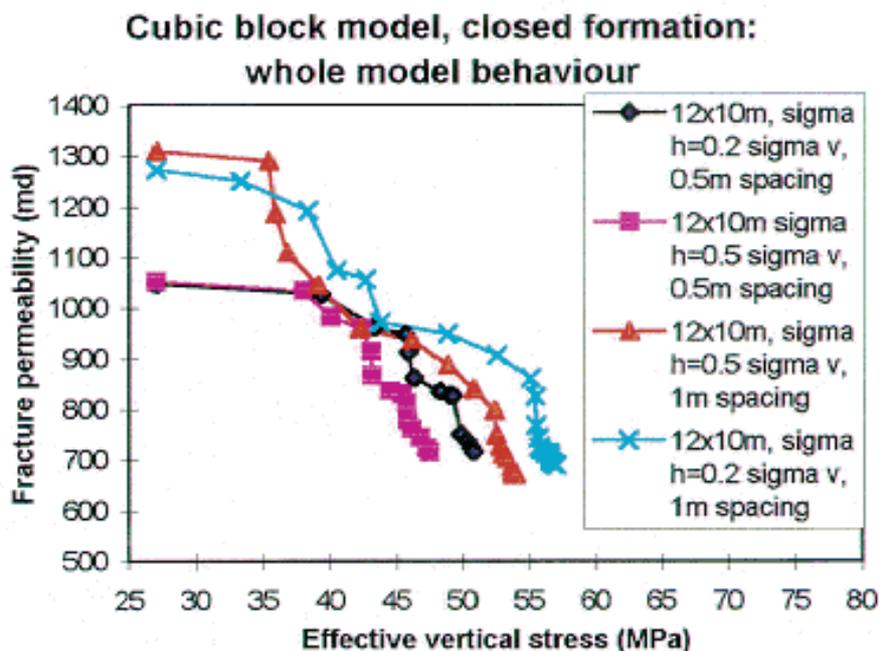
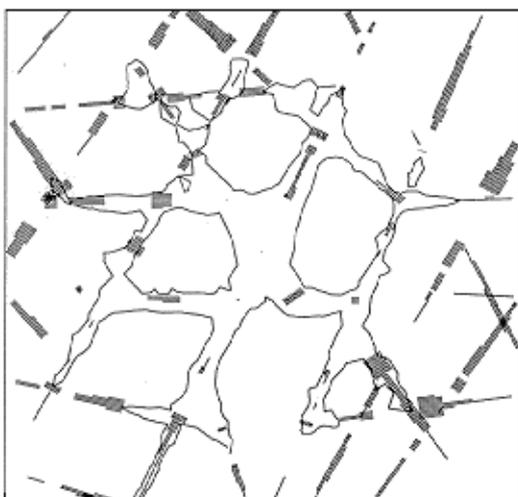
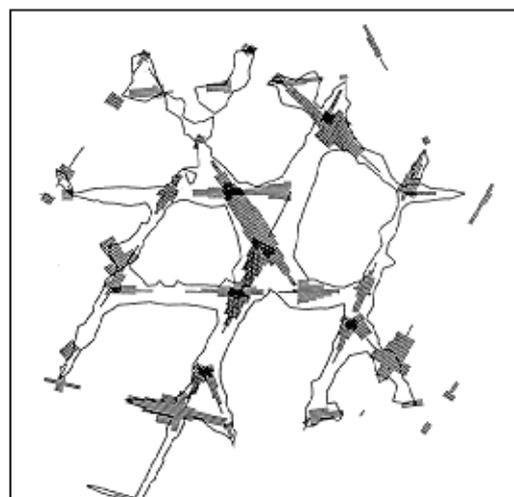


Рис. 2. Уменьшение проницаемости трещиноватого массива с ростом вертикальной компоненты горного давления



Распределение деформаций сдвига вдоль стенок трещин при нагнетании воды



Распределение толщины раскрытия трещин при нагнетании воды

Рис. 3. Реакция трещиноватого массива на нагнетание воды

Полученный физический эффект является хотя и не очевидным, однако его достоверность не вызывает сомнений. Известно, что после завершения активной стадии первичных сдвижений

толщи после обработки запасов обрушенные породы и породы в зоне шарнирно блочных перемещений уплотняются под собственным весом достаточно сильно, причем коэффициент остаточного разрыхления в условиях Донбасса не превышает как известно 0,15 (множитель 0,85 в формуле для определения максимального оседания при условии полной подработки земной поверхности). При затоплении подработанной толщи происходит ее гидравлическое взвешивание. Следовательно вес подработанной толщи не только не увеличивается, но более того, вертикальная компонента напряжений должна уменьшаться. Вместе с тем в результате затопления регистрируются дополнительные оседания земной поверхности. Это значит, что объем трещиноватой подработанной толщи уменьшается. Однако за уменьшение объема отвечают нормальные деформации, которые в подработанном массиве формируются исключительно геостатической вертикальной компонентой горного давления, так как подработанный массив разгружен от тектонических аномальных зон напряжений. Очевидно, что существуют другие причины для уменьшения объема подтопленной трещиноватой толщи.

Установленные особенности поведения затопляемой трещиноватой толщи горных пород введены в геомеханическую модель, которая была разработана группой проф. Кундала. Ими предложен новый алгоритм решения задач механики разрушения горных пород, основанный на решении системы дифференциальных уравнений движения и уравнениях связи напряжений и деформаций горных пород, которые зависят от выбранной теории прочности [6, 7].

Дифференциальные уравнения движения массива горных пород записываются в следующем виде

$$\frac{\partial \sigma_{i,j}}{\partial x_i} + \rho b_i = \rho \frac{dv_i}{dt} \quad (1)$$

где $\sigma_{i,j}$ – нормальные и касательные напряжения, действующие в массиве горных пород, Па;

x_i – координаты декартовой системы, м;

ρ – плотность горных пород, кг/м³;

b_i – удельные силы, развивающиеся в массиве горных пород, и приводимые к единице его массы Н/кг;

v_i - скорость движения элементарных объемов массива горных пород, м/сек;

t - время, сек.

Если правая часть равна нулю (с точностью до погрешности численных вычислений), наступает статическое равновесие массива горных пород. В противном случае породы находятся в состоянии активных сдвижений, что сопровождается конечной скоростью смещений на контуре выработки, в выработанном пространстве которая как показали инструментальные наблюдения, изменяются в пределах от 3 мм/сут до 72 мм/сут.

Система дифференциальных уравнений решается численным методом конечных разностей (пакет FLAC3D). При решении системы дифференциальных уравнений используется современная модель прочности горных пород, основанная на теории Кулона-Мора. При этом учитывается процесс дилатансии пород после разрушения и зависимость величины разуплотнения от среднего уровня сжатия. Это дает возможность реалистично моделировать процесс нелинейного деформирования вмещающих пород, включая участок запредельного деформирования и разуплотнение породы.

Исходные данные моделирования следующие. Толща представлена осадочными породами, в которых доля слоев песчаников составляет 20-25%, алевролитов 30-40%, известняков 2-4%, углей 1%, остальное аргиллиты.

Принято горизонтальное залегание пород, для того, чтобы эффект затопления подработанной толщи исследовать в чистом виде. Иначе не будет понятно, какая доля активизации сдвижений толщи после затопления вызвана собственно затоплением, а сколько добавил или уменьшил угол залегания. Вынимаемая мощность пласта 1,45м.

Глубина отработки лавы 480м. Длина лавы 200м и величина отхода от мотажной камеры 200м. Рассчитывалась симметричная половинка области (правая часть лавы, если смотреть вслед удаляющейся лаве). Расстояние до дна расчетной области от отработываемого пласта 200м. Боковые границы расчетной области отстояли на 50м от предполагаемой [8] границы мульды.

Свойства пород приведены в таблице 1.

Таблица 1

Деформационные и прочностные свойства вмещающих пород

Группа пород	Модуль упругости, ГПа	Модуль сдвига, ГПа	Угол внутреннего трения, гад	Сцепление, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа	Угол дилатансии, град
Почва	15,33	10,2	30	5	2	8
Угольный пласт	5,6	3,9	34	0,3	1	8
Породы в кровле	8,7	6,0	28	2	1,5	5
Наносы	0,5	0,34	18	0,2	0,4	4

Задача решалась в два этапа для учета начального состояния моделируемой системы. Вначале было получено решение о распределении геостатических напряжений в нетронутом массиве. Затем полученные смещения массива горных пород были обнулены и решена задача о сдвигении толщи под действием отработки лавы. Распределение оседаний строилось на момент окончания активной стадии сдвижений примерно спустя 3-5 месяцев после остановки лавы.

Следует подчеркнуть, что в процессе подработки в массиве горных пород и наносах возникают запредельные состояния. Зарождение и развитие запредельных зон возникает в основном в окрестности движущегося очистного забоя. После прохода лавы равновесие подработанной толщи восстанавливается, однако ее прочностные показатели необратимо изменяются, что в последствии обязательно скажется на поведении видоизмененной таким образом толщи при новом воздействии, например при ее затоплении. Поэтому для корректного учета начального состояния системы перед затоплением желательно адекватно смоделировать процесс первичных сдвижений толщи в процессе ее подработки. Другими словами выработанное пространство формируется не мгновенно, а постепенно по мере отработки лавы. Если алгоритм позволяет смоделировать эту существенную особенность, ее следует учесть, потому что характер разрушения толщи подработанной мгновенно и путем последовательного подвигания лавы будет существенно различным.

На рис. 4 приведена симметричная половина мульда сдвижений, образовавшаяся после отработки лавы путем ее последовательного подвигания со скоростью 50м/мес. Расчетное максимальное оседание согласно Правил составляет 250мм, полученное на цифровой модели 248мм. Длина полумульды согласно Правил составляет 275м, на цифровой модели 315м (невязка 14,7%).

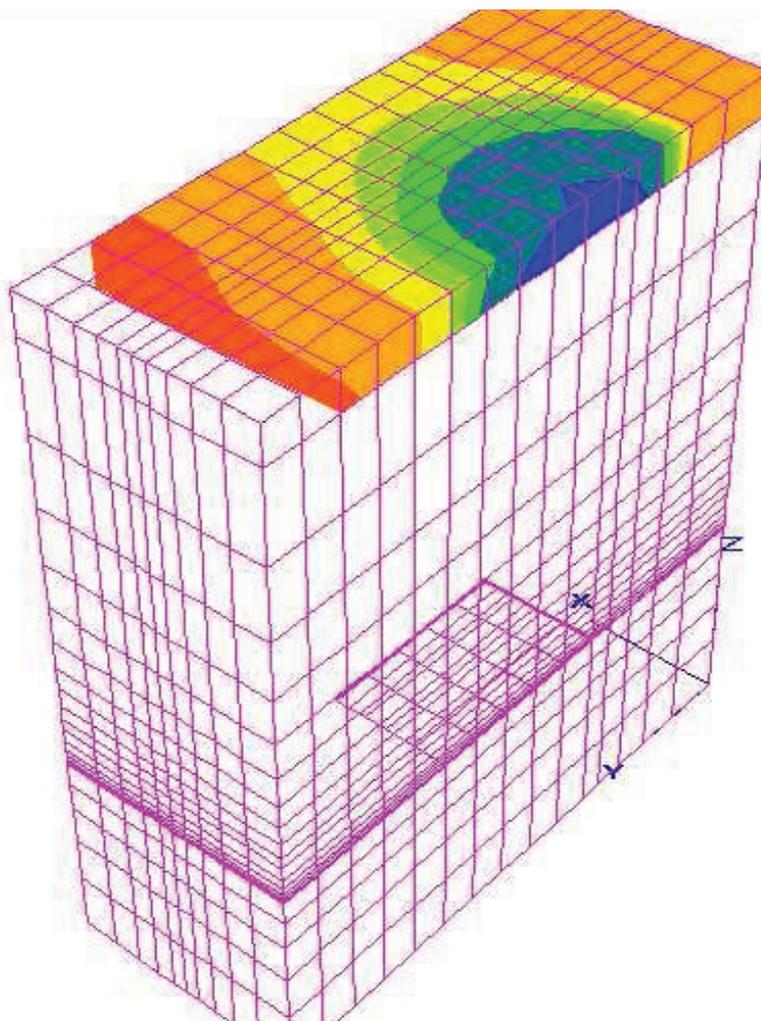


Рис. 4. Вид мульды сдвижений в результате отработки лавы

После достижения равновесия подработанной толщи было смоделировано ее затопление. Ниже приводятся результаты оценки эффекта активизации сдвижений земной поверхности в результате затопления выработанного пространства,

Важно оценить историю процесса сдвижений толщи при ее первичной подработке. Распределение запредельного деформирования показано на рис. 5,а (изнутри мульды, то есть изнутри выработанного пространства, а на рис. 5,б снаружи его). Анализ запредельного состояния участков массива подработанной толщи показал, что основной объем толщи, находящейся в области прямой или косвенной подработки перешел в запредельное состояние в результате сдвига или предельных касательных деформаций (зоны 1, отмеченные коричневым). Вместе с тем имеются области, 2 которые разрушены растягивающими предельными деформациями.. Например такая область приурочена к замковой части зоны полных сдвижений над выработанным пространством лавы то есть в той точке, где сходятся зоны максимальных изгибов толщи с возможным расслоением сплошности. Ниже области 2 расположена область 3, которая в настоящий момент находится в состоянии запредельного сдвига, хотя ранее она разрушилась от действия растягивающих деформаций.

Область 3 оконтуривает границы мульды сдвижений на земной поверхности. Ближе к средней части мульды располагаются области 4, которые перешли в запредельное состояние при одновременном воздействии сдвиговых и растягивающих деформаций. Средняя часть мульды на земной поверхности разрушилась от действия касательных деформаций.

Как видим, в процесс разрушения массива в момент его первичной подработки существенный вклад вносят не только касательные, но и растягивающие предельные деформации.

Теперь посмотрим, как развиваются сдвижения при затоплении ранее подработанной толщи в результате мокрого погашения шахты.

Если подземная часть области полных сдвижений перешла в запредельное состояние под действием растягивающих (2) или комбинации растягивающих и касательных деформаций 3, то земная поверхность испытала активизацию сдвижений исключительно за счет касательных дополнительных деформаций (рис. 6), что хорошо согласуется с результатами [6, 9]. Таким образом это усиливает достоверность полученных выводов о решающей роли

касательных деформаций в реализации дополнительных сдвижений ранее подработанного массива и затопленного подземными водами в результате мокрого погашения шахт.

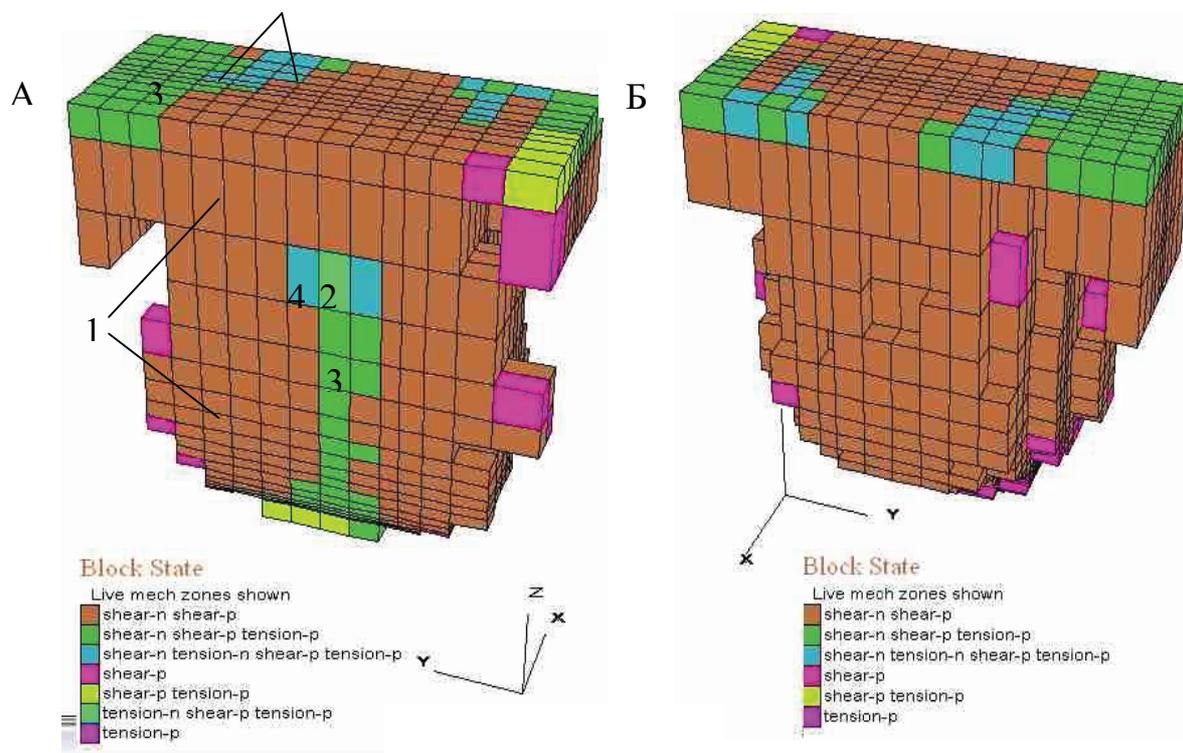


Рис. 5. Зоны разрушений в пределах области сдвижений при подработке лавой (а - вид изнутри, б - снаружи)

На рис. 7 показаны графики оседаний вдоль главного сечения полумульды до и после затопления шахты. Видно, что максимальная величина сдвижений теперь составляет 293мм, что соответствует активизации сдвижений на 45мм. Такая величина активизации сдвижений соответствует 20% от первоначальной величины оседаний после первичной подработки земной поверхности. Кроме того увеличился размер самой мульды. До затопления шахты он равнялся 315мм, после увеличился до 400мм или на 27%. Это означает, что после затопления шахты зона влияния подработки на земной поверхности увеличивается, что следует учитывать при планировании мероприятий по обеспечению устойчивости наземных сооружений.

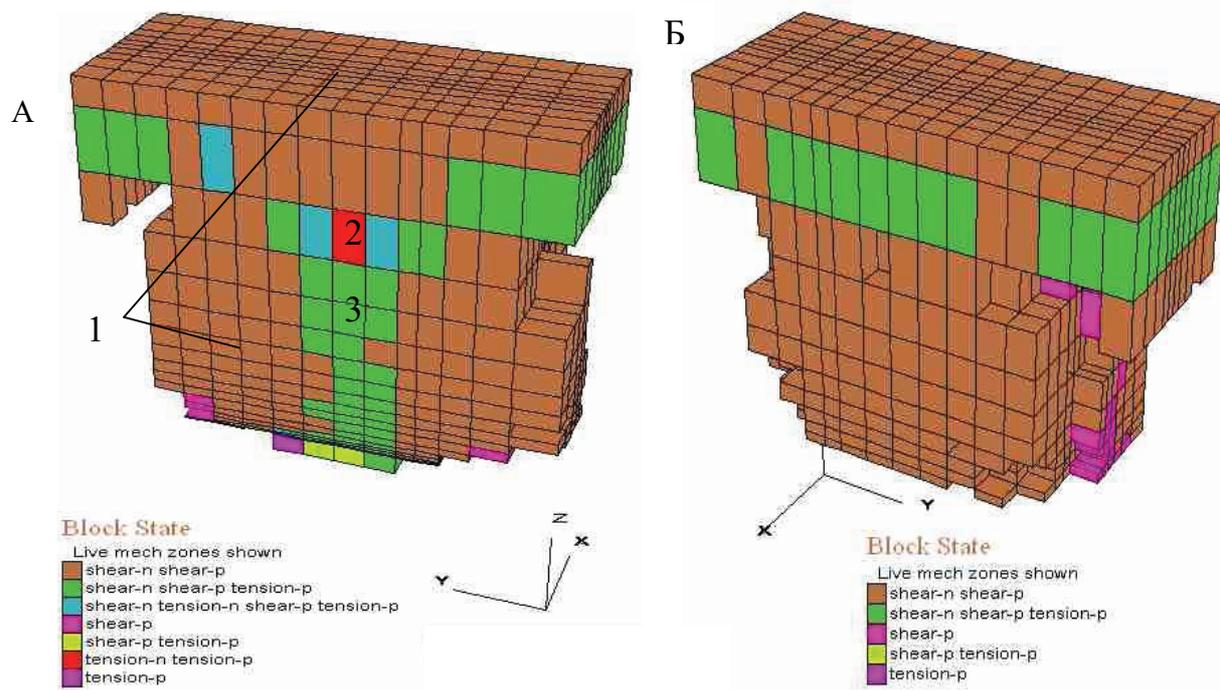


Рис. 6. Зоны разрушений в результате активизации сдвижений подработанной толщи при ее затоплении (а – вид изнутри, б – то же снаружи)

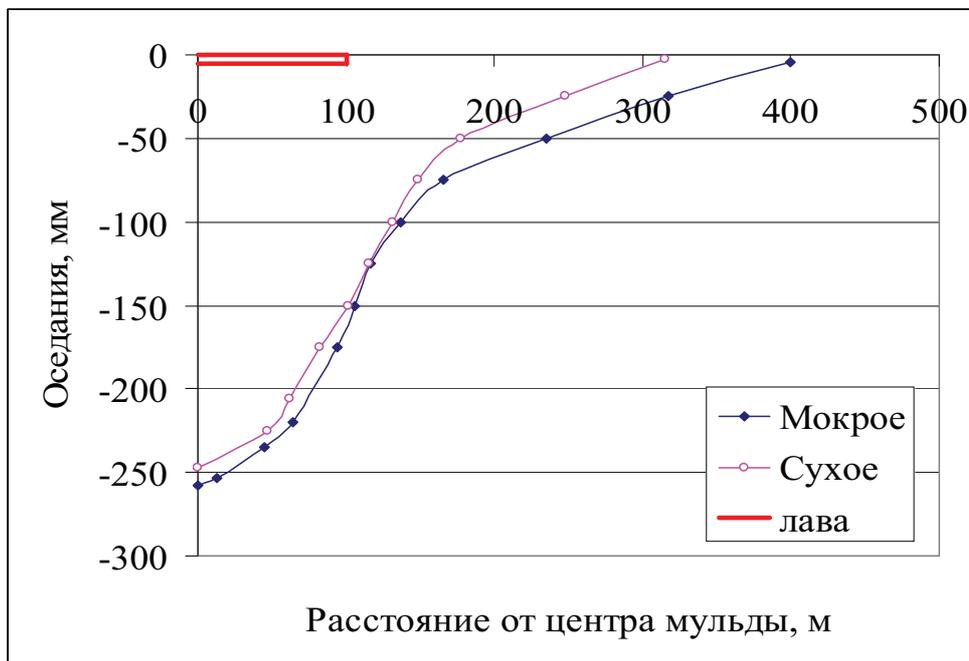


Рис. 7. Распределение оседаний в полумульде

На рис. 8 показан график прироста оседаний в результате активизации сдвижений массива после затопления шахты. Максимум прироста оседаний наблюдается над проекцией краевой части выработанного пространства на земную поверхность.

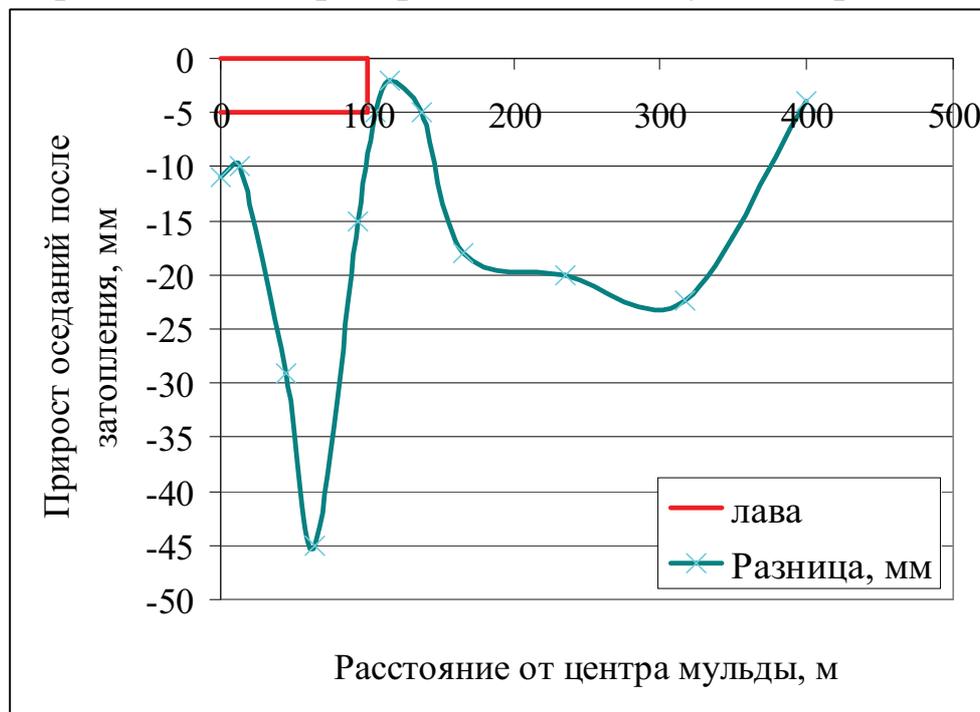


Рис. 8. Распределение величины активизации оседаний

Выводы. При пологом залегании активизация ранее подработанной толщи после затопления выработанного пространства происходит над проекцией краевой части выработанного пространства на земную поверхность. При этом дополнительные оседания могут достигать 20% от первоначального уровня, а размер мульды увеличиться на 27%.

Установлена новая закономерность необратимых сдвижений массива горных пород и земной поверхности при затоплении ранее выработанного пространства подземными водами, которая заключается в том, что нормальные макродеформации ранее подработанной и подтопленной толщи, сопровождающие активизацию сдвижений земной поверхности в виде дополнительных ее оседаний, реализуются за счет необратимых касательных микродеформаций, которые реализуются за счет взаимного перемеще-

ния (в виде проскальзывания по граням) блоков ранее разрушенных пород.

Список литературы

1. FLAC3D. ITASCA Consulting group, 2008.
2. Cornet 1 F.H. (1997). Evaluation of hydromechanical coupling in a granite rock mass from a high-volume, high-pressure injection experiment: le mayet de montagne, francej / F.H. Cornet 1, R.H. Morin. - Rock Mech. & Min. - Sci. 34:3–4, Paper No. 207.
3. Liao Q. H. (1997). Numerical modelling of the hydro-mechanical behaviour of fractured rock masses / Q. H. Liao, S. R.Hencher. - Int. J. Rock Mech. & Min. - Sci. 34:3–4, Paper No. 177.
4. Gutierrez M. (1997). Coupled htm modelling of cold water injection in fractured hydrocarbon reservoirs / M. Gutierrez, A. Makurat. - Int. J. Rock Mech. & Min. - Sci. 34:3–4, Paper No. 113.
6. Cundall P.A. A Microcomputer Program for Modeling Large-Strain Plasticity Problems / P.A. Cundall, M. Board // «Numerical Methods in Geomechanics»: Proceedings of the 6th International Conference. - Innsbruck, Austria, 1988. - Pp. 2101-2108.
7. Cundall P.A. A discrete numerical model for granular assemblies / P.A. Cundall, O.D.L. Strack // Geotechnique. - 2009. – № 1. – Pp. 47-65.
8. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом : ГСТУ 101.00159226.001: 2003. - [Введ. 01.01.2004]. – К., 2004. – 128 с.
9. Dershowitz 1 W. (1997). Analysis of heterogeneously connected rock masses by forward modeling of fractional dimension flow behavior Int. / W. Dershowitz 1, T. Doe 1. - J. Rock Mech. & Min. - Sci. 34:3–4, Paper No. 061.

Стаття надійшла до редакції 20.11.2013

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук С.М. Александровим

В.О. Дрібан, І.В. Назимко

Український державний науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут гірничої геології, геомеханіки і маркшейдерської справи, м. Донецьк

І.О. Садовенко

ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ
ОСОБЛИВОСТІ МЕХАНІЗМУ АКТИВІЗАЦІЇ МАСИВУ ТА ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ У РЕЗУЛЬТАТІ МОКРОГО ПОГАШЕННЯ ШАХТ

Досліджена активізація раніш підробленої товщі внаслідок затоплення виробленого простору. Встановлена важлива роль дотичних мікродефо-

рмацій у зменшенні об'єму підробленої товщі внаслідок зменшення меж міцності на зсув по межах блоків порід.

Ключові слова: дотичні мікродеформації, зони руйнування, затоплення виробленого простору.

V.A. Driban, I.V. Nazimko

Ukrainian State Research and Design Institute of Mining Geology, Geomechanics and Mine Surveying, Donetsk

I.A. Sadovenko

National Mining University, Dnipropetrovsk

UNDERMINED ROCK MASS BEHAVIOR AFTER FLOODING

Subsidence activation of previously undermined rock mass occurs in vicinity of the gob boundary. Additional subsidence reaches 20% of the previous level and though boundary expands by 27%. New behavior of previously undermined and then flooded rock mass has been found. Increase of subsidence and expansion of the through means that undermined rock mass diminishes its volume, that is the consequence of normal macrostrain. However, computer simulation demonstrated that normal macrostrain was deployed by shear microstrain as a result of mutual sliding of rock blocks.

Keywords: shear microstrain, destruction zone, flooding of the gob.