

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ УГЛЯ ВОДОЙ И АНТИПИРОГЕНАМИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ВОКРУГ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ**¹Круковский А.П., ¹Круковская В.В., ¹Усов О.А.**¹*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины***ВПЛИВ ОБРОБКИ ВУГІЛЛЯ ВОДОЮ ТА АНТИПИРОГЕНАМИ НА ФОРМУВАННЯ ПОЛЯ НАПРУЖЕНЬ ДОВОКОЛО ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ****¹Круковський О.П., ¹Круковська В.В., ¹Усов О.О.**¹*Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України***INFLUENCE OF COAL SEAM TREATMENT BY WATER AND ANTIPYROGENES ON FORMATION OF STRESS FIELDS AROUND MINE WORKING****¹Krukovskyi O.P., ¹Krukovska V.V., ¹Usov O.O.***Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine*

Аннотация. Нагнетание водных растворов антипирогенов в угольный пласт, склонный к самовозгоранию, традиционно применяется для уменьшения вероятности возникновения эндогенных пожаров. Известно, что насыщение угля водой заметно изменяет его механические характеристики и приводит к разгрузке угольного пласта в окрестности горных выработок. Поэтому количественная оценка изменения геомеханических параметров в приконтурной зоне до и после гидрообработки пласта является весьма актуальной задачей. Знание динамики формирования поля напряжений вокруг горной выработки позволит усовершенствовать технологию обработки угольного пласта антипирогенами. Целью работы является исследование изменения напряженного состояния призабойной зоны угольного пласта при различных значениях его влажности с помощью методов численного моделирования. Задача решается в упругопластической постановке. Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора. Для решения применяется метод конечных элементов. Алгоритм позволяет проследить изменение напряженного состояния в зависимости от времени, прошедшего после последнего цикла выемки горной массы. В результате решения задачи получены распределения значений компонент тензора главных напряжений, геомеханических параметров, характеризующих разнокомпонентность поля напряжений и разгрузку пород от горного давления, а также зоны неупругих деформаций. Результаты решения показали, что с течением времени значения рассмотренных геомеханических параметров в призабойной зоне угольного пласта постепенно возрастают. Увеличивается с течением времени и расстояние от забоя до зоны опорного давления (максимума напряжений). В более влажном угле рост зоны опорного давления замедляется. В начальные моменты времени после цикла выемки горной массы заметно влияние разупрочнения угля более высокой влажности, которое проявляется в увеличении зоны неупругих деформаций. После гидрообработки снижается величина максимальных напряжений и разность между максимальной и минимальной компонентами (примерно в 1,5 раза).

Ключевые слова: нагнетание водных растворов, антипирогены, угольный пласт, напряженное состояние, численное моделирование.

Гидрообработка угольных пластов водой под высоким давлением – гидрорыхление – применяется для снижения выбросоопасности угольных пластов при проведении проходческих и очистных работ. Нагнетание в угольный пласт, склонный к самовозгоранию, водных растворов антипирогенов традиционно применяется для уменьшения вероятности возникновения эндогенных пожаров. В связи с участившимися в последнее время экзогенными пожарами возрастает актуальность применения обработки антипирогенами и пластов, не отнесенных к самовозгорающимся – для сокращения сроков ликвидации пожара.

Известно, что насыщение угля водой заметно изменяет его механические характеристики. В работе [1] систематизированы экспериментальные данные по влиянию влаги на модули продольной и поперечной деформации, прочность, коэффициенты сцепления и внутреннего трения угольных образцов. В [2, 3] представлены исследования по определению того же набора свойств угольных образцов. Их результаты в целом подтверждают статистические зависимости [1]. Однако до настоящего времени учет влияния влажности на напряженное состояние пласта в ближайшей окрестности выработки сводился к общим тезисам описательного характера. В последнее время были предприняты попытки теоретического анализа этого вопроса [4] на максимально упрощенных расчетных схемах, допускающих аналитические решения, что не позволяет использовать полученные в них выводы для надежного прогноза влияния гидравлической обработки на напряженное состояние пласта.

Об актуальности этой проблемы свидетельствует тот факт, что эффективность гидрорыхления угольного пласта оценивается по степени его разгрузки от первоначальных напряжений. Разгрузка оценивается сейсмоакустическими измерениями и поинтервальными замерами газовыделения. Однако и тот и другой методы дают нам только косвенную оценку напряженного состояния призабойной зоны. Они позволяют определить геометрические параметры так называемой зоны разгрузки пласта, но не величину напряжений. Применительно к обработке пласта антипирогенами, знание динамики формирования напряженного состояния массива позволит разработать оптимальную ее технологию – в какое время и на какую глубину эту гидрообработку проводить.

Поэтому количественная оценка изменения напряжений в приконтурной зоне выработки до и после гидрообработки пласта является весьма актуальной задачей. Важно, чтобы в решении отражалась динамика изменения напряженного состояния с течением времени – для адекватного отображения, наблюдаемого в натуральных условиях процесса деформирования подготовительных выработок.

Перечисленным требованиям соответствует программа численного моделирования изменений напряженно-деформированного состояния горных пород в приконтурном массиве при отходе забоя горной выработки [5], учете влияния параметров технологии крепления [6, 7], а также при гидроимпульсном воздействии на угольный пласт [8].

Поэтому целью работы является исследование изменения напряженного состояния призабойной зоны угольного пласта при различных значениях его влажности с помощью методов численного моделирования. Решение поставленной задачи позволит в практическом плане повысить эффективность гидрообработки, а в научном плане оценить вклад изменения деформационных характеристик пласта при его увлажнении в общий эффект его разгрузки.

Постановка задачи. Рассмотрим продольное сечение очистной горной выработки (Б-Б), которое расположено в средней части выемочного столба (рис. 1.)

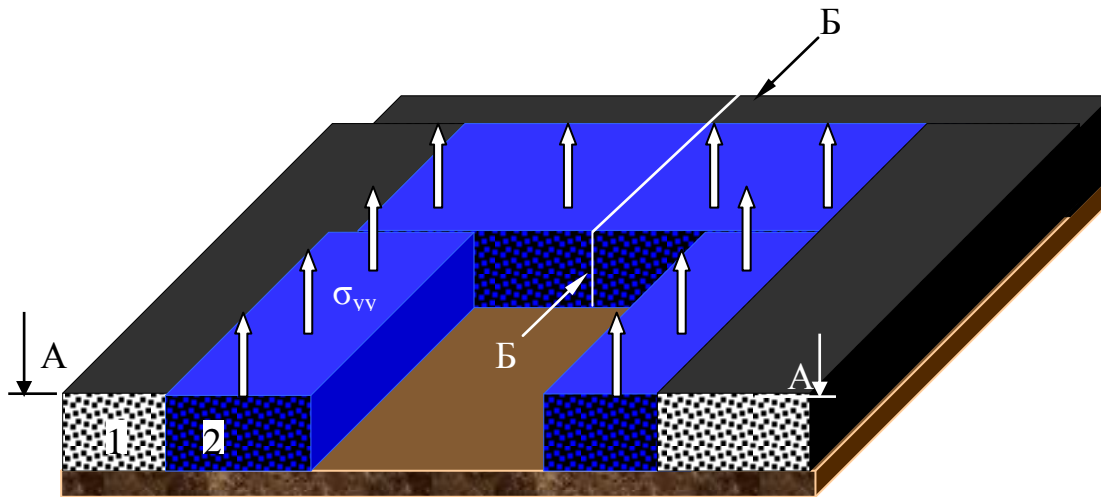


Рисунок 1 – Горизонтальный разрез подготовительной выработки по середине угольного пласта: 1 – сухой уголь; 2 – влажный уголь

Процесс деформирования углепородного массива вокруг нее описывается системой уравнений [5, 9]:

$$c_g \frac{\partial u_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + X_i(t),$$

где c_g – коэффициент демпфирования, кг/с/м³; u_i – перемещения, м; t – время, с; $\sigma_{ij,j}$ – производные от компонент тензора напряжений по x, y , МПа/м; $X_i(t)$ – проекции внешних сил, действующих на единицу объема твердого тела, Н/м³.

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}|_{t=0} &= \lambda \gamma H; & \sigma_{yy}|_{t=0} &= \gamma H; & u_x|_{t=0} &= 0; & u_y|_{t=0} &= 0; \\ u_x|_{\Omega_1} &= 0; & u_y|_{\Omega_2} &= 0, \end{aligned}$$

где λ – коэффициент бокового распора; γ – усредненный вес вышележащих горных пород, Н/м³; H – глубина разработки, м; Ω_1 – вертикальные границы внешнего контура; Ω_2 – горизонтальные границы внешнего контура

Задача решается в упругопластической постановке. Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора. Для решения применяется метод конечных элементов. Свойства пород, используемые для расчета, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристики пород

Порода	Модуль упругости, E , МПа	Коэффициент Пуассона, μ	Сцепление, C , МПа	Угол внутреннего трения, ϕ , °	Прочность на сжатие, $\sigma_{сж}$, МПа
Аргиллит	$11 \cdot 10^3$	0,32	10	30	34,5
Уголь, $w = 1\%$	$10,7 \cdot 10^3$	0,3	6	30	20,8
Уголь, $w = 4\%$	$4,1 \cdot 10^3$	0,4	4	20	11,4

Будем считать, что высота выработки – 3,0 м, мощность угольного пласта – 2,0 м, (рис. 2), вмещающие породы – аргиллит.

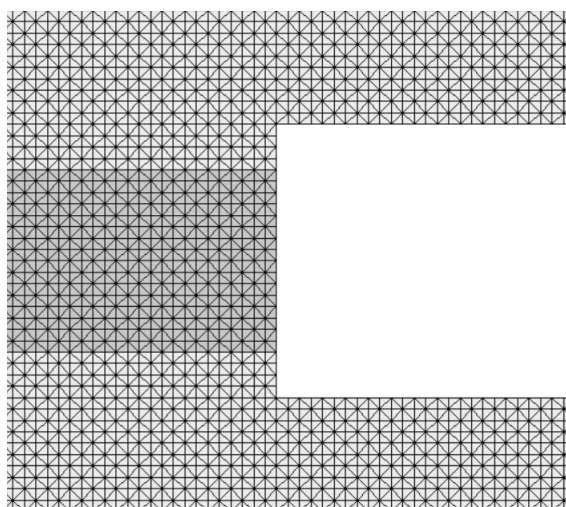


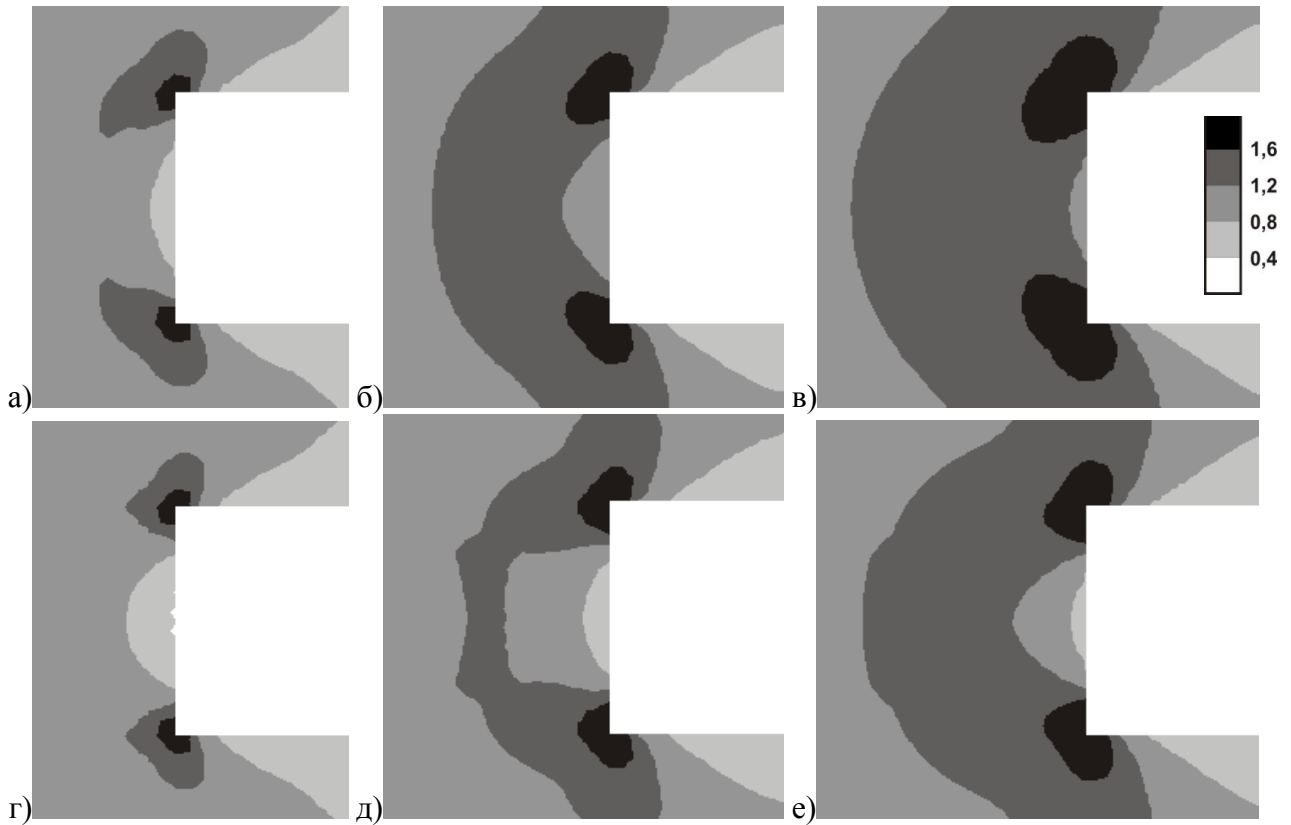
Рисунок 2 – Центральный фрагмент конечно-элементной сетки

Результаты расчетов. Исследуем влияние влажности угля на формирование поля напряжений в приконтурной зоне угольного пласта в двух случаях: при влажности угля 1 и 4%. Значения модуля упругости угля E и коэффициента Пуассона μ при влагонасыщении выбирались на основании экспериментальных данных [2, 10]. Корреляционные зависимости модуля упругости E от влажности угля в экспериментальных работах [2, 10] хорошо совпадают, но в работе [2] коэффициент Пуассона не определялся. Поэтому значения модуля упругости угля E и коэффициента Пуассона μ при влагонасыщении принимались по данным работы [10].

В результате расчета получим поля напряжений в исследуемой области на различных временных итерациях i ($i = 2, 7$ ч.). Распределение значений приведенной максимальной компоненты тензора главных напряжений $\sigma_1 / \gamma H$ наглядно показывает расположение зон повышенной концентрации напряжений, рис. 3. С течением времени в обоих случаях в забое выработки растет зона опорного давления, однако, в более влажном угле ее рост замедляется, рис. 3 г-е. Графики изменения значений $\sigma_1 / \gamma H$ показаны на рис. 4. Уменьшение модуля упругости угля (увеличение его податливости) приводит к снижению уровня максимальной компоненты тензора главных напряжений в призабойной зоне на 7-10%. И это происходит несмотря на то, что снижение модуля упругости с ростом влажности сопровождается определенным повышением коэффициента Пуассона μ . Повышение коэффициента Пуассона сказывается на увеличении значений приведенной минимальной компоненты тензора главных напряжений $\sigma_3 / \gamma H$ увлажненного угля (рис. 5).

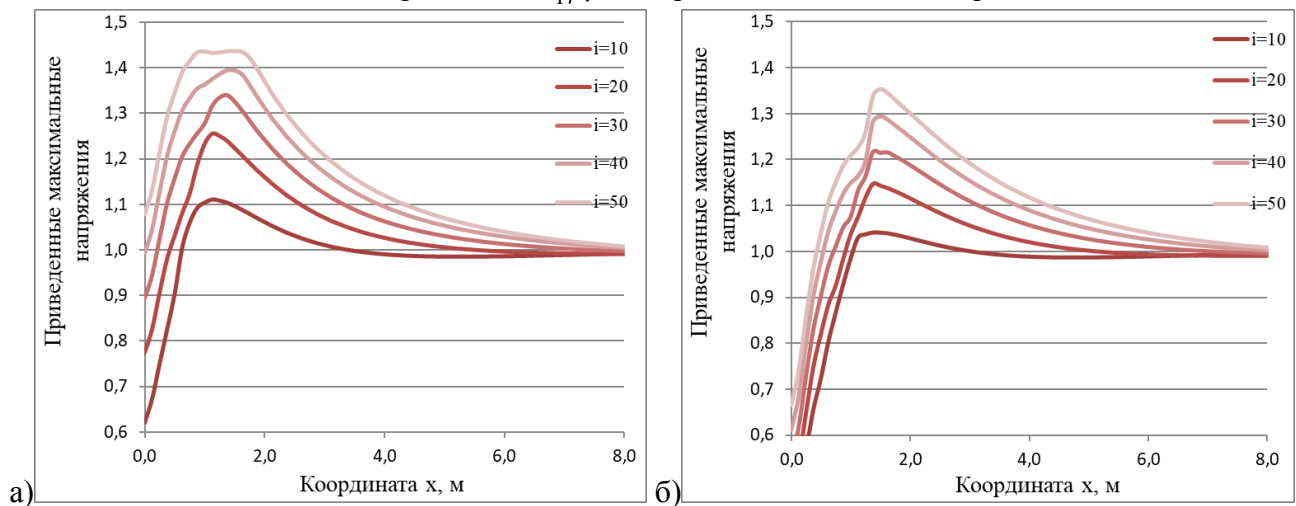
Анализ графиков рис. 4 наглядно показывает динамику развития напряженного состояния массива с течением времени, прошедшим с момента очередного цикла выемки горной породы. Классическая форма кривой распределения максимальных напряжений по расстоянию от забоя выработки,

которая приводится в многочисленных публикациях, формируется не сразу, а с течением времени.



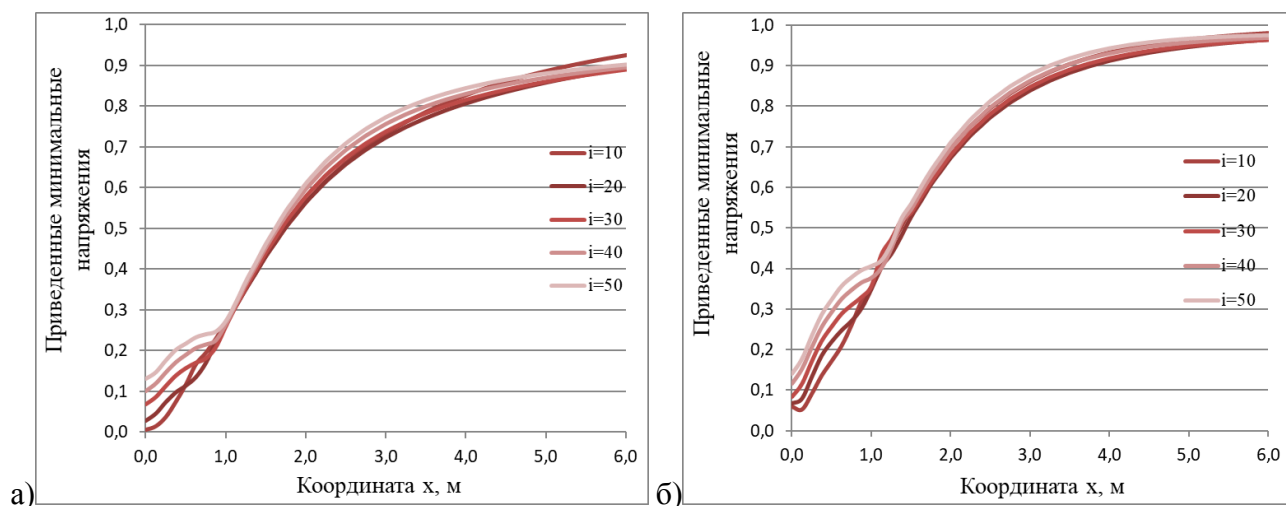
а-в – влажность угля $w = 1\%$; г-е – $w = 4\%$; а, г – $i = 10$; б, д – $i = 30$; в, е – $i = 50$

Рисунок 3 – Распределение значений приведенной максимальной компоненты тензора главных напряжений $\sigma_1/\gamma H$ в различные моменты времени



а – влажность угля $w = 1\%$; б – $w = 4\%$

Рисунок 4 – Изменение значений приведенной максимальной компоненты тензора главных напряжений $\sigma_1/\gamma H$ в угольном пласте



а – влажность угля $w = 1\%$; б – $w = 4\%$.

Рисунок 5 – Изменение значений приведенной минимальной компоненты тензора главных напряжений $\sigma_3/\gamma H$ в угольном пласте

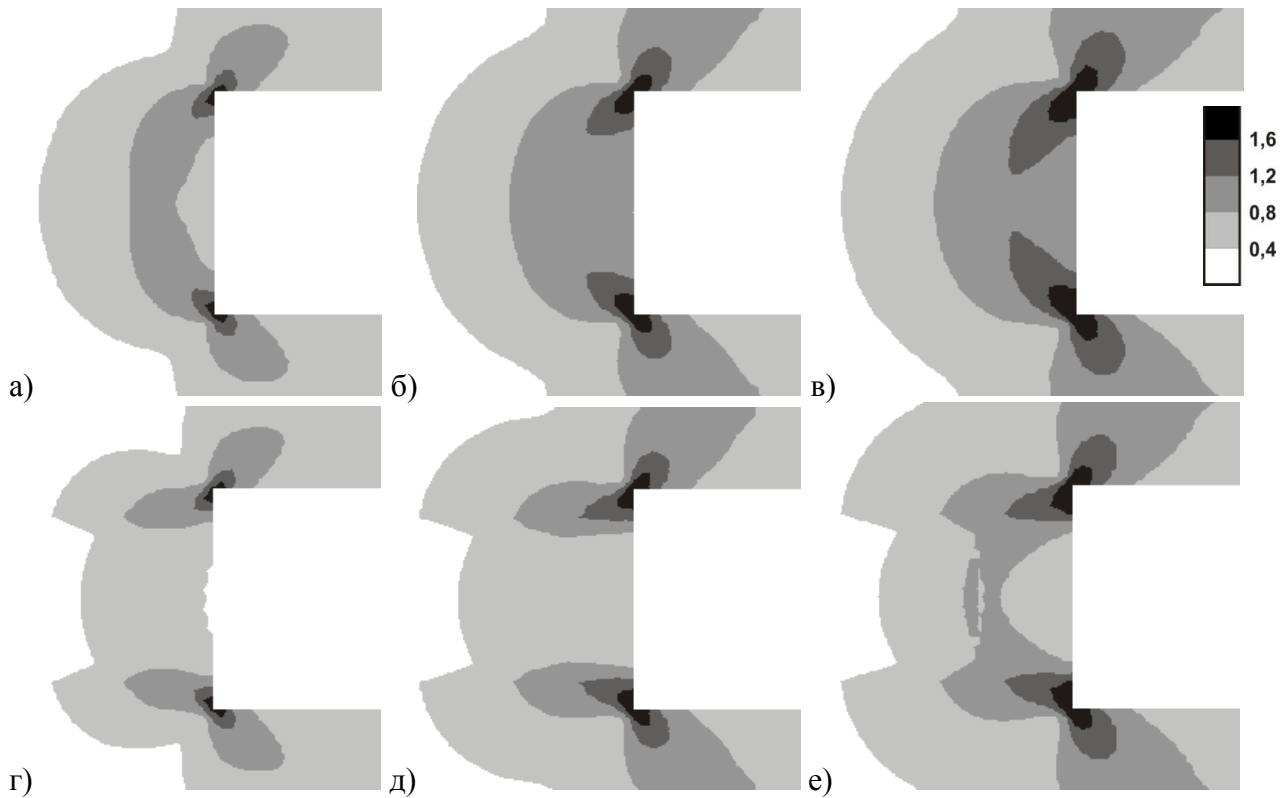
Так для принятых начальных и граничных условий и заданных свойств пород, через 27 ч. ($i = 10$) после цикла выемки максимальные напряжения достигают величины всего $1,1 \gamma H$, а величина $1,4 \gamma H$ достигается только через 135 ч. (5,5 сут.).

Понятно, что во время проведения проходческих или очистных работ таких длительных перерывов между циклами не бывает. Там типичный максимальный интервал между циклами (ремонтная смена) продолжается 6-8 ч. Поэтому упомянутая классическая эпюра максимальных напряжений с пиковым значением $\sim 2 \gamma H$ может наблюдаться только в боках подготовительных выработок (сечение А – А рис. 1) и только через определенное время.

Расстояние от забоя до зоны максимальных напряжений также увеличивается с течением времени. Здесь необходимо напомнить, что слишком жесткие начальные условия сокращают расчетное значение этого интервала примерно в 3 раза по сравнению с натурной оценкой по динамике газовыделения и данным сейсмического мониторинга (АПСС). Причем, натурные значения интервальных измерений скорости газовыделения зависят как раз от величины максимальных напряжений. Заканчивая анализ эпюры максимальной компоненты напряжений, необходимо отметить, что наибольшее влияние гидрообработка оказывает на величину напряжений в плоскости забоя. Гидрообработка снижает величину этих напряжений через 135 ч. ($i = 50$) после цикла выемки примерно в 1,8 раза (с $1,1 \gamma H$ до $0,6 \gamma H$).

Распределение значений параметра $Q^* = (\sigma_1 - \sigma_3)/\gamma H$, характеризующего разнокомпонентность поля напряжений в различные моменты времени, показано на рис. 6. Разнокомпонентность поля напряжений Q^* является основной характеристикой, определяющей близость напряженного состояния к критическому, при котором начинается интенсивное разрушение угля. Именно

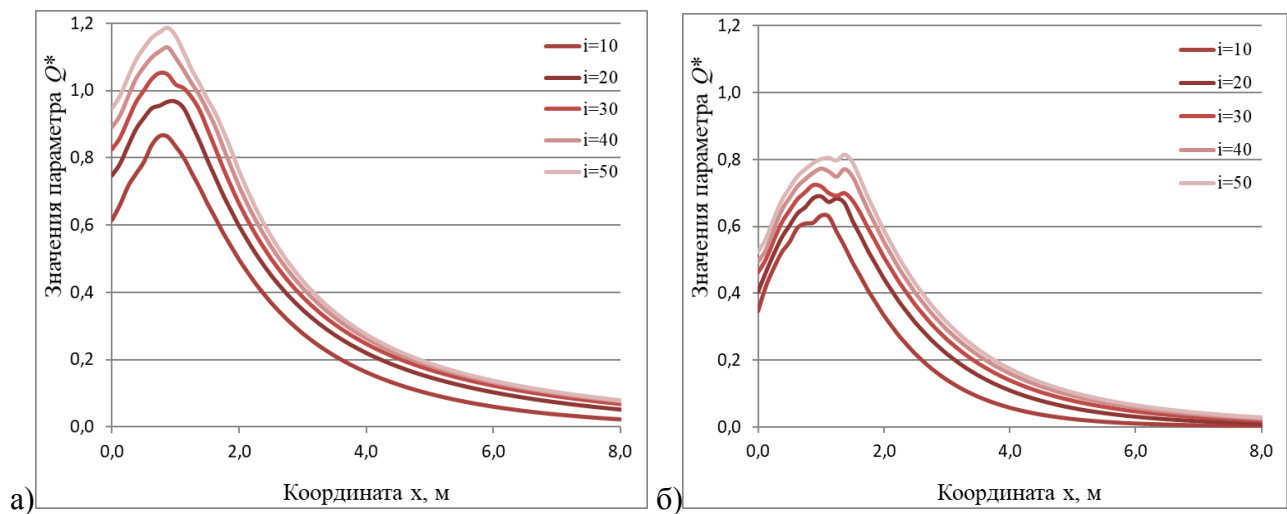
этот параметр влияет на частоту и амплитуду сейсмоакустических сигналов, по которым определяется положение зоны разгрузки аппаратурой (АПСС).



а-в – влажность угля $w = 1\%$; г-е – $w = 4\%$; а, г – $i = 10$; б, д – $i = 30$; в, е – $i = 50$

Рисунок 6 – Распределение значений параметра Q^* в различные моменты времени

Рисунок показывает, что гидрообработка значительно снижает разнокомпонентность поля напряжений в призабойной зоне угольного пласта. Распределение значений параметра Q^* по расстоянию от плоскости забоя в различные моменты времени приведено на рис. 7.



а – влажность угля $w = 1\%$; б – $w = 4\%$

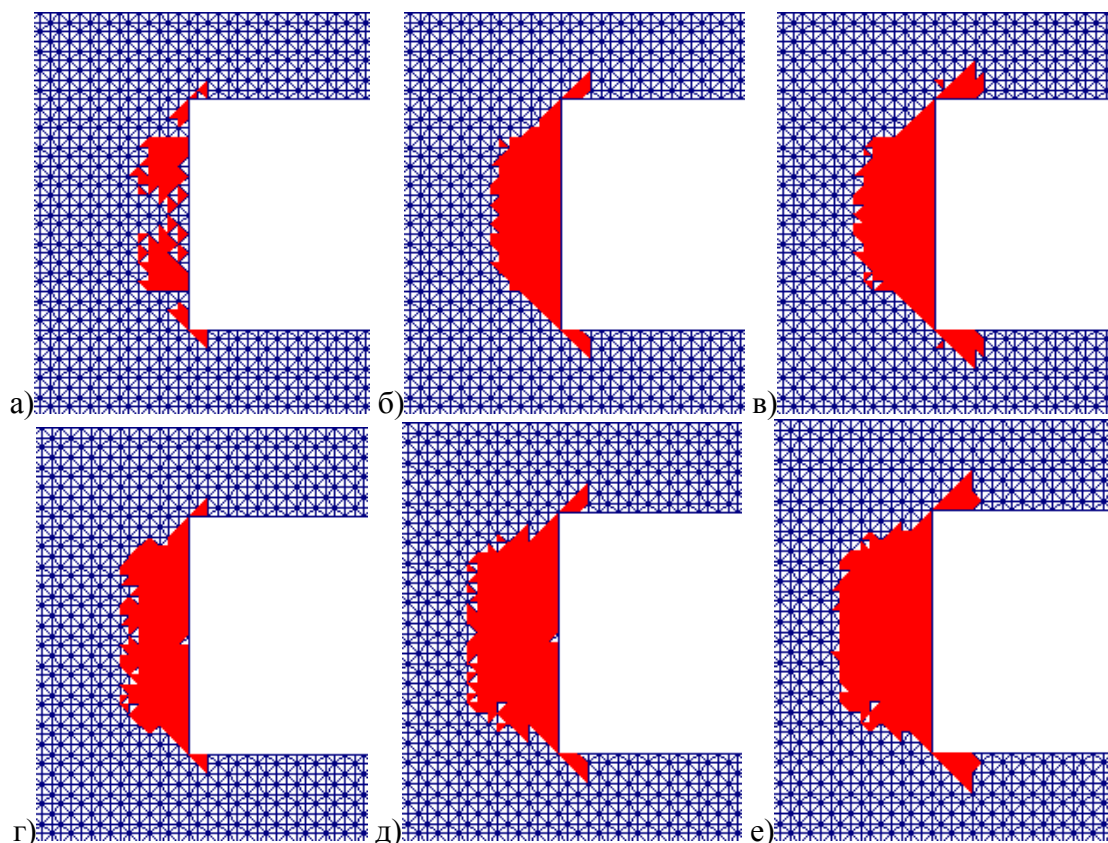
Рисунок 7 – Изменение значений параметра Q^* в угольном пласте в различные моменты времени

Характер приведенных кривых полностью аналогичен характеру изменения максимальной компоненты напряжений. Но на начальных этапах ($i = 10$) после цикла выемки горной массы отношение значения Q^* в плоскости забоя к его максимальному значению гораздо выше, чем для аналогичных напряжений.

Нормальная компонента напряжений на поверхности забоя равна нулю, что является причиной высоких значений параметра Q^* в призабойной части угольного пласта. Но гидрообработка существенно (в 1,5 раза) снижает величину параметра Q^* как на забое, так и в зоне его максимальных значений.

Проанализированные выше результаты отражают совместное влияние двух факторов – деформационной разгрузки (снижения модуля упругости) и разупрочнения (снижения предела прочности) угля при его гидрообработке.

Результаты расчета зоны неупругих деформаций, размеры которой определяются разупрочнением, (рис. 8), позволяют получить определенное представление об относительной роли каждого из этих факторов.



а - в – влажность угля $w = 1\%$; г - е – $w = 4\%$;
а, г – $i = 10$; б, д – $i = 30$; в, е – $i = 50$

Рисунок 8 – Зона неупругих деформаций в различные моменты времени

При малом промежутке времени после цикла выемки горной массы заметно влияние разупрочнения угля более высокой влажности, которое проявляется не только в увеличении зоны неупругих деформаций в глубину массива, но и в охвате ею всей плоскости забоя выработки (рис. 8а и 8г). В дальнейшем влияние снижения модуля упругости возрастает (рис. 8в и 8е).

Выводы. С помощью численного моделирования выполнено исследование влияния влажности угля на формирование поля напряжений в приконтурной зоне угольного пласта в двух случаях: при влажности угля 1 и 4%. Значения модуля упругости угля E и коэффициента Пуассона μ при влагонасыщении выбирались на основании экспериментальных данных. В результате анализа расчетных данных показало следующее.

Напряженное состояние в окрестности горных выработок после очередного цикла выемки горной массы формируется не сразу, а с течением времени. Значения рассмотренных геомеханических параметров постепенно возрастают. Увеличивается с течением времени и расстояние от забоя до зоны опорного давления (максимума напряжений). В более влажном угле рост зоны опорного давления замедляется. В начальные моменты времени после цикла выемки горной массы заметно влияние разупрочнения угля более высокой влажности, которое проявляется не только в увеличении зоны неупругих деформаций в глубину массива, но и в охвате ею всей плоскости забоя выработки.

Гидрообработка угольных пластов приводит к их деформационной разгрузке (снижению модуля упругости) и разупрочнению (снижению предела прочности), что обуславливает изменение напряженного состояния приконтурных горных пород. После гидрообработки снижается как величина максимальных напряжений ($\sim 10\%$), так и приведенной разности между максимальной и минимальной компонентами (примерно в 1,5 раза). Наибольшее снижение максимальной компоненты напряжений (примерно в 1,8 раза) имеет место в плоскости забоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минеев С.П., Потапенко А.А., Мхатавари Т.Я. и др. Повышение эффективности гидравлического рыхления выбросоопасных угольных пластов: монография Донецк: Східний видавничий дім, 2013. 216 с.
2. Usov O., Poliakov Yu., Andrievska L. Investigation of the deformation characteristics of water-saturated coal samples with a hole for estimating the discharge of the reservoir during hydrolysis // *Essays of Mining Science and Practice. E3S Web of Conferences*. 2019. 109. 00107.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900107>
3. Поляков Ю.Е. Деформационная модель разгрузки увлажненного угольного массива // *Геотехническая механика*. Днепропетровск : ИГТМ НАНУ, 2016. № 130. С. 125-136.
4. Поляков Ю.Е., Усов О.А. Факторы влияния гидрообработки угля на разгрузку призабойной части массива // *Геотехническая механика*. Днепропетровск : ИГТМ НАНУ, 2016. № 129. С. 166-172.
5. Круковский А.П. Моделирование изменения напряженно-деформированного состояния приконтурного массива при отходе забоя горной выработки // *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: Зб. наук. праць*. Дніпропетровськ: Ліра, 2011. № 17. С. 175-181.
6. Круковский А.П., Круковская В.В., Виноградов Ю.А. Математическое моделирование неустановившейся фильтрации воды в выработку с анкерной крепью // *Mining of Mineral Deposits*. Дніпро: НГУ, 2017. № 11(2). С. 21-27.
<https://doi.org/10.15407/mining11.02.021>
7. Krukovskiy O., Bulich Y., Zemlianaia Y. Modification of the roof bolt support technology in the conditions of increasing coal mining intensity. // *Essays of Mining Science and Practice. E3S Web of Conferences*. 2019. 109. 00042.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900042>
8. Булат А.Ф., Круковская В.В., Круковский А.П., Зберовский В.В. Численное моделирование гидроимпульсного воздействия на выбросоопасные угольные пласты // *Геотехническая механика*. Днепропетровск : ИГТМ НАНУ, 2012. № 105. С. 14-25.
9. Krukovskiy O., Krukovska V. Numerical simulation of the stress state of the layered gas-bearing rocks in the bottom of mine working // *Essays of Mining Science and Practice. E3S Web of Conferences*. 2019. 109. 00043.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900043>
10. Изменение свойств угля в результате его увлажнения. URL: <http://fccland.ru/sitemap.xml> (дата обращения: 17.06.2019).

REFERENCES

1. Mineev S.P., Potapenko A.A., Mkhatavari T.Ya. [and others] (2013), *Povyshenie effektivnosti gidravlicheskogo rykhleniya vybrosopasnykh ugolnykh plastov* [Increase of efficiency of the hydraulic loosening of phone to outburst coal seams], Skhidnyi vydavnychiy dim, Donetsk, Ukraine.
2. Usov O., Poliakov Yu. and Andrievska L. (2019), "Investigation of the deformation characteristics of water-saturated coal samples with a hole for estimating the discharge of the reservoir during hydrolysis", *Essays of Mining Science and Practice*, E3S Web of Conferences, 109, 00107.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900107>
3. Poliakov Yu.E. (2016), "Deformation model of unloading of the moistened coal array", *Geo-Technical Mechanics*, no. 130, pp. 125-136.
4. Poliakov Yu.E. and Usov O.A. (2016), "Factors of influencing of coal hydro-treatment on unloading of near-face part of array", *Geo-Technical Mechanics*, no. 129, pp. 166-172.
5. Krukovskiy O.P. (2011), "Modelling changes of stress-strain state of solid edge during the distance of working face of mine workings", *Problemy obchysluvalnoi mekhaniky i mitsnosti konstruksii*, no. 17, pp. 175-181.
6. Krukovskiy O.P., Krukovska V.V. and Vynogradov Yu.O. (2017), "Mathematical modeling of unsteady water filtration into anchored mine opening", *Mining of Mineral Deposits*, no. 11(2), pp.21-27.
<https://doi.org/10.15407/mining11.02.021>
7. Krukovskiy O., Bulich Y. and Zemlianaia Y. (2019), "Modification of the roof bolt support technology in the conditions of increasing coal mining intensity", *Essays of Mining Science and Practice*, E3S Web of Conferences, 109, 00042.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900042>
8. Bulat A.F., Krukovska V.V., Krukovskiy O.P. and Zberovskiy V.V. (2012), "Numerical simulation of hydroimpulsive impact on outburst coal seam", *Geo-Technical Mechanics*, no. 105, pp. 14-25.
9. Krukovskiy O. and Krukovska V. (2019), "Numerical simulation of the stress state of the layered gas-bearing rocks in the bottom of mine working", *Essays of Mining Science and Practice*, E3S Web of Conferences, 109, 00043.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900043>
10. Izmenenie svojstv uglja v rezul'tate ego uvlazhneniya. URL: <http://fccland.ru/sitemap.xml> (application date: 17.06.2019).

Об авторах

Круковский Александр Петрович, член-корреспондент НАН Украины, доктор технических наук, заместитель директора института по научной работе, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепрпетровск, Украина, igtm@ua.fm.

Круковская Виктория Викторовна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, igtm@ukr.net.

Усов Олег Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина.

About the authors

Krukovskiy Oleksandr Petrovych, Corresponding Member of NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Deputy Director of the institute, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, igtm@ua.fm

Krukovska Viktoriia Viktorivna, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Control of Dynamic Demonstrations of Rock Pressure, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, igtm@ukr.net

Usov Oleh Oleksandrovych, Candidate of Technical Sciences (Ph, D), Senior Researcher of Department of Rocks Mechanics, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine.

Анотація. Нагнітання водних розчинів антипірогенів у вугільний пласт, схильний до самозаймання, традиційно застосовується для зменшення ймовірності виникнення ендегенних пожеж. Відомо, що насичення вугілля водою помітно змінює його механічні характеристики і призводить до розвантаження вугільного пласта в околі гірничих виробок. Тому кількісна оцінка зміни геомеханічних параметрів в приконтурній зоні до і після гідрообробки пласта є вельми актуальною задачею. Знання динаміки формування поля напружень навколо гірничої виробки дозволить удосконалити технологію обробки вугільного пласта антипірогенами. Метою роботи є дослідження зміни напруженого стану привибійної зони вугільного пласта при різних значеннях його вологості за допомогою методів чисельного моделювання. Задача розв'язується в пружно-пластичній постановці. Для математичного опису процесу переходу гірських порід в порушений стан застосовується умова міцності Кулона-Мора. Для розв'язання задачі застосовується метод скінченних елементів. Алгоритм дозволяє простежити зміну напруженого стану в залежності від часу, що пройшов після останнього циклу виїмки гірської маси.

В результаті вирішення задачі отримані розподіли значень компонент тензора головних напружень, геомеханічних параметрів, що характеризують різнокомпонентність поля напружень і розвантаження порід від гірського тиску, а також зони непружних деформацій. Розрахункові дані показали, що з плином часу значення розглянутих геомеханічних параметрів в привибійній зоні вугільного пласта поступово зростають. Збільшується з плином часу і відстань від вибою гірничої виробки до зони опорного тиску (максимуму напружень). У більш вологому вугіллі зростання зони опорного тиску сповільнюється. У початкові моменти часу після циклу виїмки гірської маси помітно вплив знеміцнення вугілля більш високої вологості, яке проявляється в збільшенні зони непружних деформацій. Після гідрообробки знижується величина максимальних напружень і різниця між максимальною і мінімальною компонентами (приблизно в 1,5 рази) тензора головних напружень.

Ключові слова: нагнітання водних розчинів, антипірогени, вугільний пласт, напружений стан, чисельне моделювання.

Annotation. The injection of aqueous solutions of antipyrogenes into a coal seam prone to self-ignition is traditionally used to reduce risk of endogenous fires. It is known that the saturation of coal with water significantly changes its mechanical characteristics and leads to the unloading of the coal seam near the mine workings. Therefore, a quantitative assessment of changes in geomechanical parameters in the marginal zone before and after treatment of the coal seam with water is a strong business case. Knowledge of the dynamics of the stress field formation around the mine working will allow to improve technology of treating the coal seam with antipyrogenes. The goal of the work is to study changes in the stress state of the face zone of the coal seam at various rates of its humidity by using numerical simulation methods. The problem is solved in an elastoplastic setting. For mathematical description of the process of transition of rocks into a disturbed state, the Coulomb-Moore strength condition is applied. The finite element method is used for solving the problem. The algorithm allows to track the change in the stress state depending on the time passed after the last cycle of the rock mass excavation.

Distribution of the values of the principal stress tensor components, geomechanical parameters characterizing different components of the stress field and unloading of rocks from rock pressure, as well as zones of inelastic deformations were obtained as a result of solving the problem. The calculated data showed that over time, the values of the considered geomechanical parameters in the face zone of the coal seam gradually increase. The distance from the face to the zone of bearing pressure (maximum stress) also increases with time. In a wetter coal, the growth of the bearing pressure zone slows down. At the initial periods of time after the cycle of rock mass extraction, effect of softening of coal with higher level of humidity is noticeable, which is manifested in increase of zone of inelastic deformation. After treatment with water, the magnitude of the maximum stresses and the difference between the maximum and minimum components of the stress field are reduced (about 1.5 times).

Keywords: injection of aqueous solutions, antipyrogenes, coal seam, stress state, numerical simulation.

Стаття надійшла до редакції 06.02.2020

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук С.І. Скіпочкою