

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЯЗАННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ НАГНЕТАНИИ УПРОЧНЯЮЩЕГО СОСТАВА В ТРЕЩИНОВАТЫЙ МАССИВ С ПОМОЩЬЮ ИНЪЕКЦИОННЫХ АНКЕРОВ**¹Круковская В.В., ¹Круковский А.П.**¹*Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины***ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗВ'ЯЗАНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ ПРИ НАГНІТАННІ ЗМІЦНЮЮЧОЇ СУМІШІ У ТРІЩИНУВАТИЙ МАСИВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІН'ЄКЦІЙНИХ АНКЕРІВ****¹Круковська В.В., ¹Круковський О.П.**¹*Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України***NUMERICAL SIMULATION OF COUPLED PROCESSES AT INJECTION OF STRENGTHENING COMPOSITIONS IN CRACKED ROCK WITH INJECTION ANCHORS****¹Krukovska V.V., ¹Krukovskyi O.P.**¹*Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine*

Аннотация. Разработана численная модель протекания связанных процессов деформирования породного массива вокруг горной выработки и фильтрации жидких компонентов полимерного состава. В постановке задачи учитывается и начальная проницаемость вмещающих пород, и проницаемость, обусловленная особенностями проведения и крепления выработки. Учитывается время установки анкера после отхода забоя, время нагнетания и застывания полимера, эффект вспенивания (увеличения в объеме) полимерного состава при смешивании его компонент и протекании химических реакций. Моделируется изменение физико-механических и фильтрационных свойств породного массива с трещинами, заполненными полимером, при его застывании (модуль упругости, пределы прочности на сжатие и растяжение, проницаемость). Учитывается, что металлическая нагнетательная трубка вступает в работу в качестве анкера только после прочного закрепления в шпуре, то есть после застывания полимерного состава. Разработанную модель можно использовать для исследования влияния геомеханики формирования области фильтрации вокруг выработки на процесс нагнетания упрочняющего состава с помощью инъекционного анкера, на изменение прочностных и фильтрационных свойств нарушенного массива. В данной статье рассмотрен случай, когда в кровле выработки устанавливается один инъекционный анкер. Приведены результаты расчета напряжений, проницаемости, давления жидкого полимерного состава, геометрии упрочненной области породного массива. Показано, что к моменту установки инъекционного анкера приконтурные породы частично разгружены от горного давления, вокруг выработки сформирована зона повышенной разнокомпонентности. После бурения шпура, установки инъекционного анкера и начала нагнетания полимерных смол области повышенной разнокомпонентности и неупругих деформаций вокруг выработки продолжают увеличиваться. Однако в кровле выработки, в зоне влияния анкера, разнокомпонентность поля напряжений и проницаемость массива значительно снижены. Диаметр зоны упрочненных, непроницаемых пород вокруг инъекционного анкера достигает 2,0 м для данных начальных и граничных условий.

Ключевые слова: упрочнение породного массива, нагнетание упрочняющего состава, инъекционный анкер, численное моделирование связанных процессов.

Проведение горных выработок по сильно трещиноватым, неустойчивым горным породам представляет собой серьезную проблему, одним из решений которой является применение инъекционных анкеров. Они служат для упрочнения нарушенного приконтурного массива, повышения устойчивости горных выработок, уменьшения проницаемости горного массива, снижения газовыделения и водопритока в выработку [1-3]. Инъекционные анкера представляют собой металлическую бесшовную трубку с герметизатором для подачи упрочняющего состава в трещиноватый массив, рис. 1.

После процесса нагнетания такие анкера остаются в массиве для дополнительного армирования, обеспечивая высокую прочность при сдвиге. Технические характеристики инъекционных анкеров ИРМА приведены в табл. 1 [3].

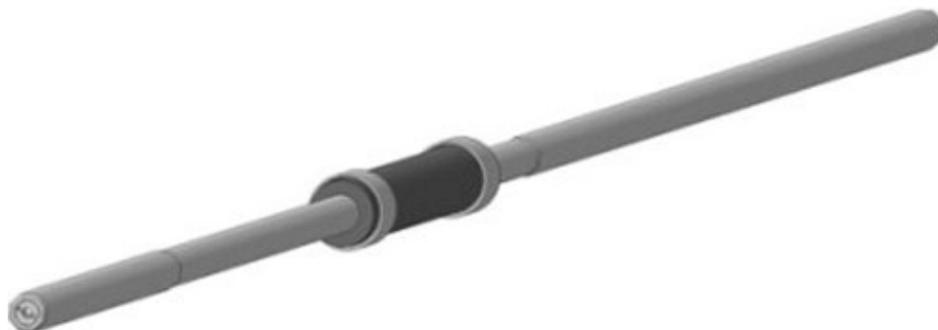


Рисунок 1 – Инъекционный анкер с герметизатором [3]

Таблица 1 – Технические характеристики инъекционных анкеров ИРМА

Наименование показателя	ИРМА 40	ИРМА 110	ИРМА 200	ИРМА 250
Разрывная нагрузка, кН	40	110	178	229
Разрывное удлинение, %	–	–	>15	>15
Предел прочности при разрыве, Н/мм ²	360	400	700	700
Диаметр внешний, мм	22	22	22	25
Диаметр внутренний, мм	12	12	8	11

Нагнетаемый состав, как правило, состоит из двух жидких компонентов, которые при помощи насоса подаются отдельно по шлангам, перемешиваются в смесителе и через анкерную систему и герметизатор нагнетаются в горный массив под давлением 6-9 МПа. Плотность состава при 25°C – 1000-1500 кг/м³, вязкость при 15°C – 110-670 МПа·с. Реакция полимерной смеси протекает с увеличением ее объема в 1,5-3,5 раза. Вспененный состав проникает под давлением даже в небольшие трещины в породном массиве [3]. После застывания вспененного эластичного состава в массиве формируется упрочненная, газо- и водонепроницаемая область.

Однако ее формирование зависит от конфигурации и размеров области фильтрации – проницаемой зоны вокруг инъекционного анкера, в которой распространяется нагнетаемый состав. Проницаемость в этой зоне определяется как природными, так и технологическими факторами проведения и крепления выработки. Поэтому целью работы является разработка математической и численной моделей для исследования влияния геомеханики формирования области фильтрации вокруг выработки на процесс нагнетания упрочняющего состава с помощью инъекционного анкера, изменение прочностных и фильтрационных свойств нарушенного массива.

Математическая модель деформирования породного массива вокруг горной выработки и фильтрации жидких компонентов полимерного состава. Связанные процессы деформирования породного массива и фильтрации жидких полимеров в нарушенной области описываются системой уравнений [4]:

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

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{\mu \cdot \beta \cdot m} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) + q(t),$$

где c_g – коэффициент демпфирования, кг/с/м³; u_i – перемещения, м; $\sigma_{ij,j}$ – производные от компонент тензора напряжений по x, y , МПа/м; $X_i(t)$ – проекции внешних сил, действующих на единицу объема твердого тела, Н/м³; $P_i(t)$ – проекции сил, обусловленных давлением нагнетаемого состава в трещинном пространстве, Н/м³; p – давление нагнетаемого состава, МПа; k – коэффициент проницаемости, мДа; μ – вязкость полимера, Па·с; β – коэффициент сжимаемости полимера; m – пористость породы, %; $q(t)$ – функция вспенивания.

Задача решается в упругопластической постановке. Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется условие прочности Кулона-Мора. Начальные и граничные условия для поставленной задачи:

$$\sigma_{yy}|_{t=0} = \gamma H; \quad \sigma_{xx}|_{t=0} = \lambda \gamma H; \quad p|_{t=0} = 0,1 \text{ МПа},$$

$$u_x|_{\Omega_1} = 0; \quad u_y|_{\Omega_2} = 0; \quad p|_{\Omega_3} = p_0; \quad p|_{\Omega_4} = 0,1 \text{ МПа},$$

где γ – усредненный вес вышележащих горных пород, Н/м³; H – глубина разработки, м; λ – коэффициент бокового распора; p_0 – давление нагнетания, МПа; Ω_1 – вертикальные границы внешнего контура; Ω_2 – горизонтальные границы внешнего контура; Ω_3 – фильтрующая часть поверхности шпура; Ω_4 – внутренний контур (выработка).

Для решения применяется метод конечных элементов [5, 6]. На каждой временной итерации i ($i \approx 5$ мин.) учитывается влияние поля напряжений на формирование области фильтрации, влияние изменения давления полимерного состава на напряженное состояние породы [7], а также изменение физико-механических и фильтрационных свойств породного массива при застывании полимера. Анкерная крепь моделируется стержневыми конечными элементами [8]. Для оценки напряженного состояния используются геомеханические параметры: $Q^* = (\sigma_1 - \sigma_3)/\gamma H$, характеризующий степень разнокомпонентности поля напряжений, и $P^* = \sigma_3/\gamma H$, характеризующий возможность хрупкого разрушения горных пород.

В результате проведения горной выработки перераспределяется поле начальных напряжений, во вмещающем массиве формируются системы трещин. На поле начальной проницаемости K_0 накладывается поле технологической проницаемости $K_{техн}$ [7, 9], которая определенным образом зависит от значений компонент тензора напряжений:

$$K = K_0 + K_{\text{мехн}}(\sigma_{ij}).$$

В каждом узле конечно-элементной сетки

$$k = \begin{cases} k_0 & \text{при } Q^* < 0,4; P^* > 0,2; \\ k_0 + k_{\text{min}} & \text{при } 0,4 < Q^* < 0,6; \\ k_0 + e^{0,26Q^* - 4,65} & \text{при } 0,6 < Q^* < 1,0; \\ k_0 + k_{\text{max}} & \text{при } Q^* > 1,0; P^* < 0,1. \end{cases}$$

Моделирование упрочнения породного массива при нагнетании и застывании полимерного состава. Рассмотрим горную выработку прямоугольного поперечного сечения шириной 5,2 м, высотой 3,0 м, рис. 2, которая проводится по слабым породам (модуль упругости $E=10^4$ МПа, предел прочности на сжатие $\sigma_c = 28$ МПа).

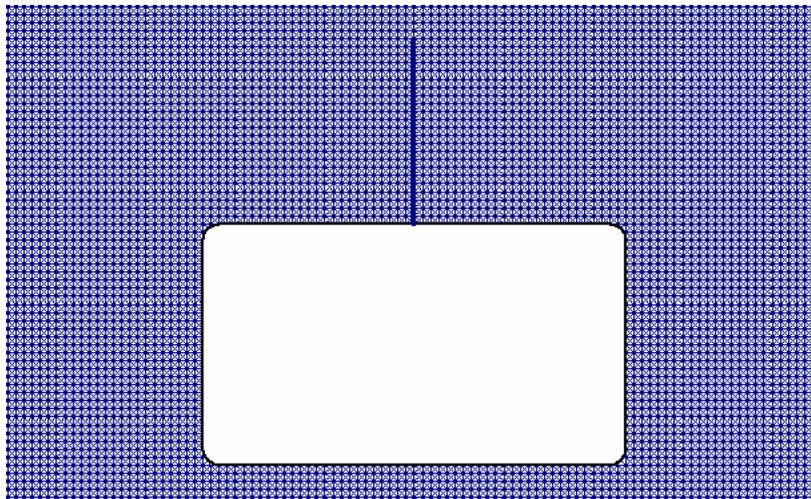


Рисунок 2 – Центральный фрагмент конечно-элементной сетки с инъекционным анкером

Для исследования влияния геомеханики формирования области фильтрации вокруг выработки на процесс нагнетания упрочняющего состава с помощью инъекционного анкера рассмотрим случай, когда в кровле выработки устанавливается один инъекционный анкер длиной 2,5 м, рис. 2. Герметизатор длиной 0,26 м расположен на расстоянии 0,7 м от головки анкера.

Будем считать, что в месте проведения выработки вмещающие породы нарушены и имеют начальную проницаемость $K_0 = 0,1$ мДа.

Нагнетательные анкера обычно устанавливаются через некоторое время после отхода забоя. Например, при проведении откаточного квершлага пласта C_5 ШУ имени Героев Космоса в зоне тектонического нарушения «Богдановский сброс», закачку полимерных химических составов производили с отставанием 5 м от забоя [2]. За это время приконтурные породы вокруг выработки успевают частично разгрузиться от горного давления, приобретая дополнительную проницаемость $K_{\text{мехн}}$. Поэтому моделирование процесса нагнетания будем производить, начиная не с 1-ой временной итерации i , а с 12-

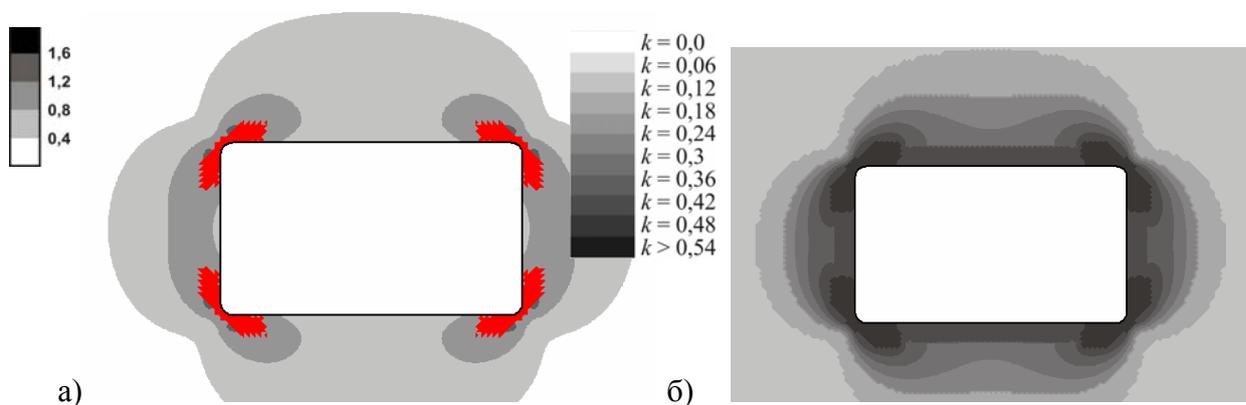
ой. Время нагнетания – 4 итерации (около 20 мин., 12-15 итерации). Будем считать, что такое же время необходимо для полного застывания полимера. Давление нагнетания $p_0 = 6$ МПа. Вспенивание (увеличение в объеме) полимерного состава при смешивании его компонент и протекании химических реакций моделируется с использованием функции источника (стока) $q(t)$ в уравнении фильтрации жидких компонентов полимерного состава.

При застывании нагнетаемого состава, заполняющего трещины и пустоты твердого тела, происходит изменение его свойств. Следовательно, физико-механические и фильтрационные свойства упрочненной области породного массива также изменяются. При решении данной задачи принято, что за время застывания полимера в конечных элементах, трещинное пространство которых занято полимером:

- модуль упругости упрочняемого конечного элемента линейно увеличивается с 10^4 МПа до $1,7 \cdot 10^4$ МПа;
- предел прочности на сжатие σ_c линейно увеличивается в 1,5 раза;
- предел прочности на растяжение σ_p линейно увеличивается в 2,0 раза;
- коэффициент проницаемости конечного элемента линейно уменьшается до 0.

Металлическая нагнетательная трубка вступает в работу в качестве анкера только после прочного закрепления в шпуре, то есть после застывания полимерного состава, поэтому учитывать армирующее воздействие стержневых конечных элементов будем, начиная с момента времени $i = 16$.

Результаты расчетов. В результате выполнения расчетов получены распределения значений геомеханических и фильтрационных параметров на различных временных итерациях. На рис. 3 показаны значения разнокомпонентности поля напряжений Q^* и коэффициентов проницаемости породного массива вокруг выработки прямоугольного поперечного сечения перед установкой инъекционного анкера и началом нагнетания упрочняющего состава.



а) значения параметра Q^* и зоны неупругих деформаций; б) проницаемость.

Рисунок 3 – Распределение значений геомеханических и фильтрационных параметров перед началом нагнетания упрочняющего состава

При проведении выработки равновесное состояние горных пород нарушается, происходит перераспределение начального поля напряжений. К

моменту установки инъекционного анкера приконтурные породы частично разгружены от горного давления, вокруг выработки сформирована зона повышенной разнокомпонентности, рис. 3 а. При разнокомпонентном нагружении в области начала микрорастрескивания ($0,4 < Q^* < 0,6$) рост коэффициента проницаемости очень незначителен, так как для этой стадии нагружения характерно накопление одиночных, невзаимодействующих дефектов [10]. За пределами упругости и при достижении предела прочности, что соответствует области интенсивного трещинообразования ($0,6 < Q^* < 1,0$), имеет место неуправляемый рост трещин. На данной стадии быстро увеличиваются деформации за счет распространения трещин и разрыхления породы. Когда напряжения достигают предела прочности данной горной породы ($Q^* > 1,0, P^* < 0,1$ – зона неупругих деформаций), начинается процесс макроскопического разрушения. Хрупкое разрушение породы характеризуется ростом деформаций, разрыхления и, соответственно, объема материала [10], что вызывает резкое увеличение проницаемости. Таким образом, значения коэффициентов проницаемости вокруг выработки возрастают, рис. 3 б.

После бурения шпура, установки инъекционного анкера и начала нагнетания полимерных смол поля напряжений и проницаемости заметно изменяются, рис. 4. Области повышенной разнокомпонентности и неупругих деформаций вокруг выработки увеличивается с течением времени, рис. 4 а-г, породный массив продолжает разгружаться от горного давления. В месте установки анкера, в кровле выработки, при $i = 14$ связная область ($0,8 < Q^* < 1,2$) разрывается, на 10-15 минутах нагнетания полимера начинает сказываться его влияние на напряженное состояние и проницаемость приконтурных пород. Анкер окружает зона, где $0,8 < Q^* < 1,2$.

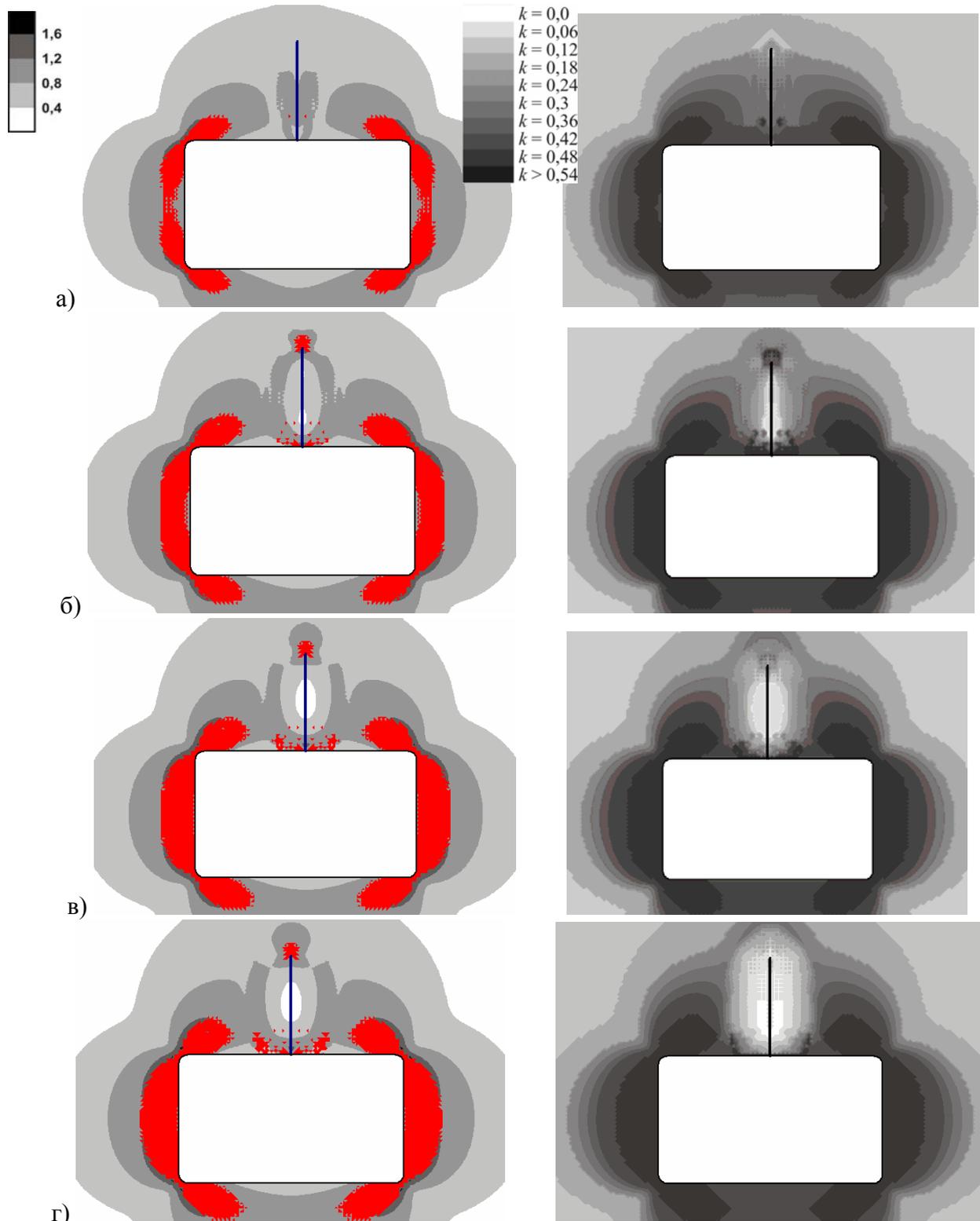
При $i = 16$ процесс нагнетания уже завершен, полимер частично застыл. Металлическая трубка начинает работать как анкер. Модуль упругости, пределы прочности упрочненных полимером пород повышаются. Общим результатом таких преобразований является снижение разнокомпонентности поля напряжений и проницаемости массива. Значения параметра Q^* вокруг анкера уменьшаются, теперь в этой области $Q^* < 0,8$, рис. 4 б. Значения коэффициентов проницаемости, хоть и в небольшом объеме породы, снижаются до величин, меньших, чем K_0 .

Еще через 2 временные итерации, при $i = 18$ (рис. 4 в), область упрочненных пород вокруг анкера расширяется, диаметр зоны, где $0,4 < Q^* < 0,8$, составляет 1,4 м. Появляется зона равнокомпонентного сжатия $Q^* < 0,4$ диаметром 0,55 м. Соответственно вокруг анкера увеличивается объем непроницаемых пород, что хорошо видно на рис. 4 в, справа. Диаметр зоны, где $K < 0,1$, – 1,1 м.

При $i = 20$ полимер полностью застыл, размеры области упрочненных пород вокруг анкера практически не изменились по сравнению с $i = 14$, а объем непроницаемых пород вокруг анкера увеличивается еще больше. Диаметр зоны пониженной проницаемости достигает теперь 2,0 м.

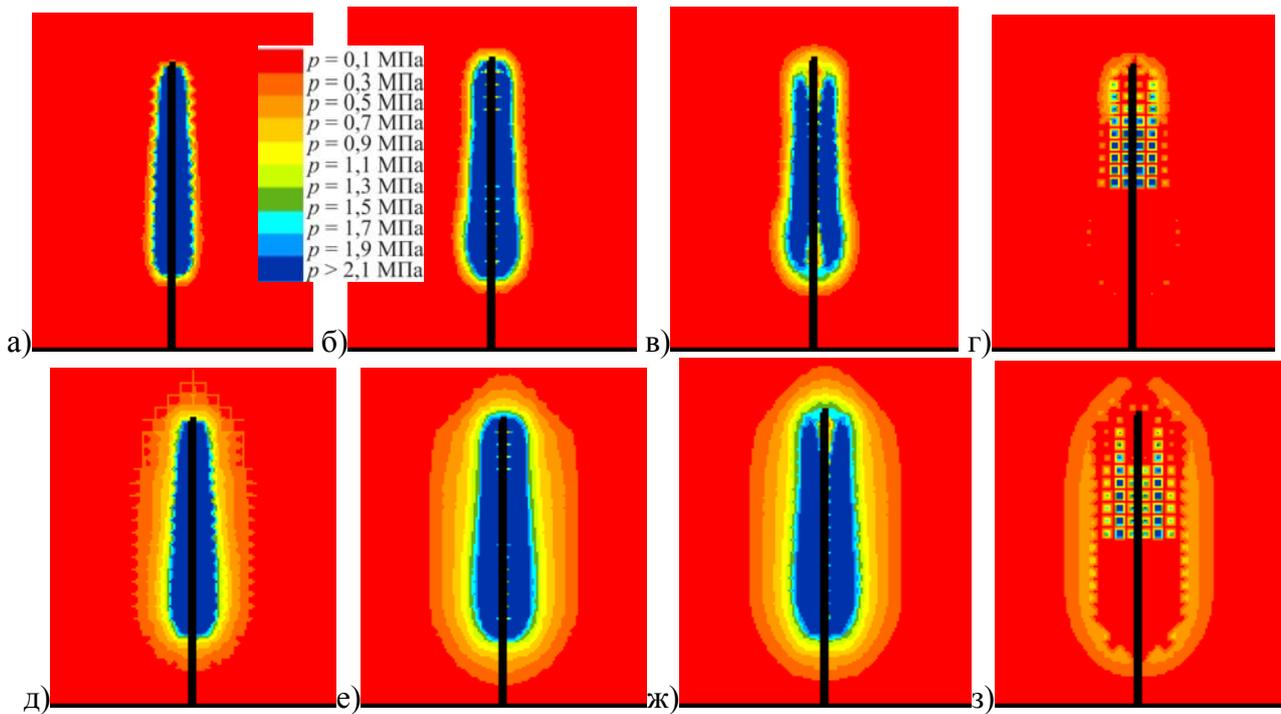
Далее рассмотрим распределение давления полимерного состава в исследуемой области в период его нагнетания и застывания. Для демонстрации

влияния эффекта увеличения объема полимера при протекании химических реакций на область распространения упрочняющего состава на рис. 5 приведены результаты расчетов, выполненные с учетом вспенивания и без него.



а) $i=14$; б) $i=16$; в) $i=18$; г) $i=20$.

Рисунок 4 – Распределение значений параметра Q^* (слева) и коэффициентов фильтрации (справа)



а, д) $i=14$; б, е) $i=16$; в, ж) $i=18$; г, з) $i=20$.

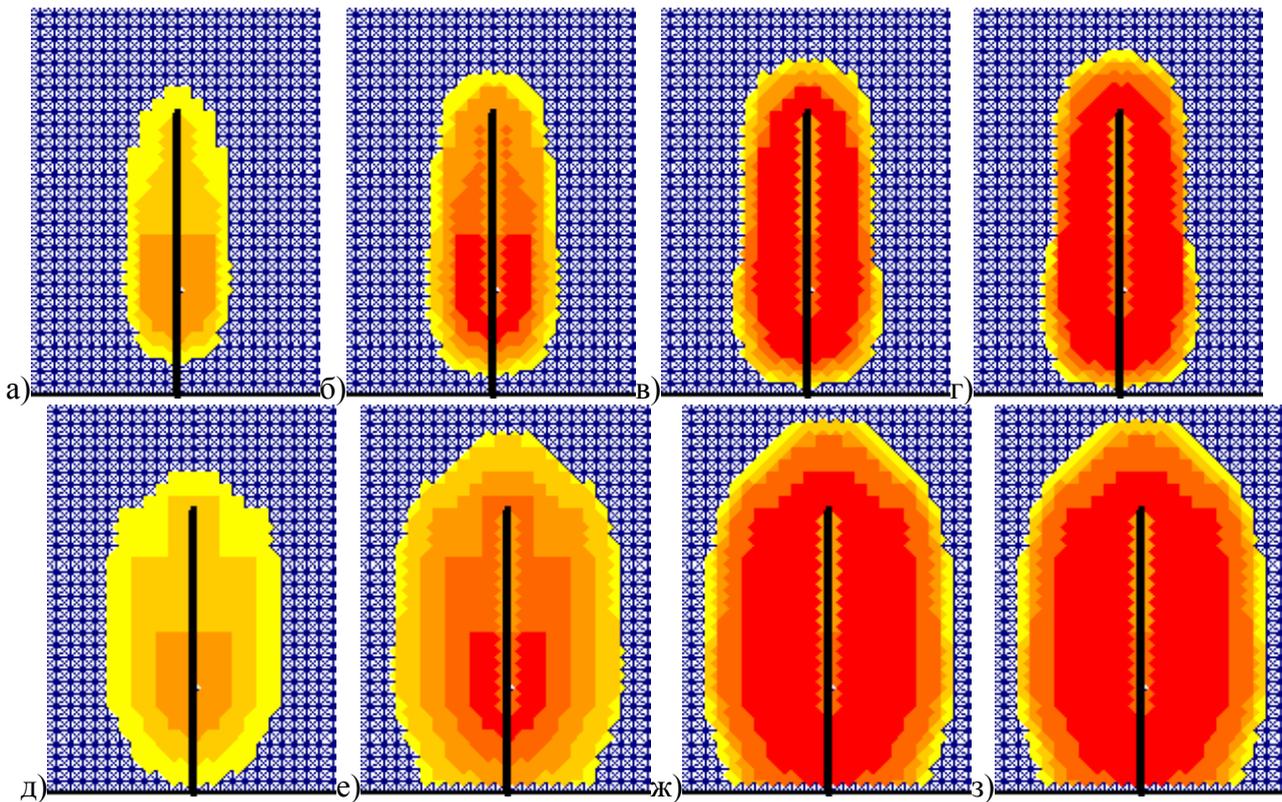
Рисунок 5 – Распределение значений давления полимерного состава без учета (а-г) и с учетом его вспенивания (д-з)

Нагнетание упрочняющего состава происходит через проницаемую поверхность шпура, вблизи него давление имеет максимальные значения, рис. 5 а-д. Начиная с 16-й временной итерации нагнетание завершается, полимер продолжает застывать, его давление начинает постепенно снижаться.

Протекание процесса фильтрации жидкого полимера ограничено областью породного массива с достаточно развитой системой трещин. Химическая реакция при смешивании компонентов полимерной смеси протекает с увеличением объема. Увеличиваясь в объеме, полимер создает дополнительное давление внутри трещинно-порового пространства породы. Вспененный состав проникает под давлением даже в небольшие трещины в породном массиве. Поэтому область повышенного давления вокруг анкера, где давление жидкого полимера $p > p_0$, в случае учета вспенивания (рис. 5 д-з), значительно больше.

На рис. 6 показаны области трещиноватого породного массива вокруг анкера, заполненные полимерным составом, в различные моменты времени. Расчеты выполнены без учета и с учетом вспенивания полимера. Диаметр упрочненной области в первом случае составляет 1,25 м (рис. 6 г), во втором – 2,15 м (рис. 6 з).

Выводы. Разработана численная модель протекания связанных процессов деформирования породного массива вокруг горной выработки и фильтрации жидких компонентов полимерного состава. В постановке задачи учитывается и начальная проницаемость вмещающих пород, и проницаемость, обусловленная особенностями проведения и крепления выработки. Учитывается время установки анкера после отхода забоя, время нагнетания и застывания полимера, эффект вспенивания (увеличения в объеме) полимерного состава при



а, д) $i=14$; б, е) $i=16$; в, ж) $i=18$; г, з) $i=20$.

Рисунок 6 – Упрочненная область вокруг инъекционного анкера без учета (а-г) и с учетом его вспенивания (д-з)

смешивании его компонент и протекании химических реакций. Моделируется изменение физико-механических и фильтрационных свойств породного массива с трещинами, заполненными полимером, при его застывании (модуль упругости, пределы прочности на сжатие и растяжение, проницаемость). Учитывается, что металлическая нагнетательная трубка вступает в работу в качестве анкера только после прочного закрепления в шпуре, то есть после застывания полимерного состава.

В данной статье рассмотрен случай, когда в кровле выработки устанавливается один инъекционный анкер. Приведены результаты расчета напряжений, проницаемости, давления жидкого полимерного состава, геометрии упрочненной области породного массива. Показано, что к моменту установки инъекционного анкера приконтурные породы частично разгружены от горного давления, вокруг выработки сформирована зона повышенной разнокомпонентности. После бурения шпура, установки инъекционного анкера и начала нагнетания полимерных смол области повышенной разнокомпонентности и неупругих деформаций вокруг выработки продолжают увеличиваться. Однако вокруг анкера, в кровле выработки, разнокомпонентность поля напряжений и проницаемость массива значительно снижены. Диаметр зоны упрочненных, непроницаемых пород вокруг анкера достигает 2,0 м для данных начальных и граничных условий.

Таким образом, разработанную модель можно использовать для исследования влияния геомеханики формирования области фильтрации вокруг

выработки на процесс нагнетания упрочняющего состава с помощью инъекционного анкера, а также на изменение прочностных и фильтрационных свойств нарушенного массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ground Consolidation with Material Injection Case Study for Collapse Rehabilitation in Tambang Emas Cibaliung, Cibitung Decline X/C-5 / Doandy Y. Wibisonoa, Era Setiawan, Cakra Anugrah, Rizky Nasution // 10th Asian Rock Mechanics Symposium 2018 (ARMS10), Singapore. ISBN: 978-981-11-9003-2.
2. Специальный проект ведения горных работ по проведению откаточного квершлага пл. С₅ ШУ имени Героев Космоса в опасной зоне тектонического нарушения «Богдановский сброс» // ДТЭК ЭНЕРГО Шахтоуправление имени Героев Космоса. Павлоград, 2016. 27 с.
3. Каталог продукции Минова. [https://minovaru.com/files/Catalog_Minova_2017%20\(Minova_RUS\).pdf](https://minovaru.com/files/Catalog_Minova_2017%20(Minova_RUS).pdf)
4. Krukovska V., Vynohradov Y. Water stability influence of host rocks on the process of water filtration into mine working with frame and roof-bolting support // Essays of Mining Science and Practice 2019. E3S Web of Conferences. №109(00041). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900041>
5. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. Butterworth-Heinemann, 2000. Т. 1. 690 p.
6. Hutton D.V. Fundamentals of Finite Element Analysis. McGraw-Hill, 2004. 505 p.
7. Круковская В.В. Моделирование связанных процессов, происходящих в углепородном массиве при ведении горных работ // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. Днепропетровск, 2015. № 121. С. 48-99.
8. Круковский А.П. К вопросу о моделировании работы анкерной крепи // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / НАН Украины ИГТМ. Днепропетровск, 2005. № 57. С. 54-59.
9. Лукинов В.В., Круковский А.П., Круковская В.В. Моделирование процесса выброса угля и метана вблизи тектонических нарушений // Форум гірників-2007: Матеріали міжнародної конференції. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2007. С. 63-69.
10. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. Киев: Наук. думка, 1989. 192 с.

REFERENCES

1. Doandy Y. Wibisonoa, Era Setiawan, Cakra Anugrah and Rizky Nasution (2018), "Ground Consolidation with Material Injection Case Study for Collapse Rehabilitation in Tambang Emas Cibaliung, Cibitung Decline X/C-5", 10th Asian Rock Mechanics Symposium 2018 (ARMS10), Singapore. ISBN: 978-981-11-9003-2
2. *Spetsialnyy proekt vedeniya gornyyh rabot po provedeniyu otkatochnogo kvershlagu pl. S₅ ShU imeni Geroev Kosmosa v opasnoy zone tektonicheskogo narusheniya «Bogdanovskiy sbros»* [The special project of conduct of mine works on conducting of haulage crosscut of S₅ seam of Colliery Group Heros of Space in the dangerous area of tectonic violation is the «Bogdanovsky upcast»](2016), DTEK ENERGO Shahtoupravlenie imeni Geroev Kosmosa, Pavlograd, Ukraine
3. Minova Product Catalog. [https://minovaru.com/files/Catalog_Minova_2017%20\(Minova_RUS\).pdf](https://minovaru.com/files/Catalog_Minova_2017%20(Minova_RUS).pdf)
4. Krukovska, V. and Vynohradov, Y. (2019), "Water stability influence of host rocks on the process of water filtration into mine working with frame and roof-bolting support", *Essays of Mining Science and Practice 2019. E3S Web of Conferences*, 109, 00041. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900041>
5. Zienkiewicz, O.C. and Taylor, R.L. (2000), *The finite element method*, Butterworth-Heinemann
6. Hutton, D.V. (2004), *Fundamentals of Finite Element Analysis*, McGraw-Hill
7. Krukovska, V.V. (2015), "Simulation of coupled processes that occur in coal-rock massif during mining operations", *Geo-Technical Mechanics*, no. 121, pp. 48-99.
8. Krukovskiy, O.P. (2005), "On the issue of modeling the anchor support action", *Geo-Technical Mechanics*, no. 57, pp. 54-59.
9. Lukinov, V.V., Krukovskiy, O.P. and Krukovskaya, V.V. (2007), "Simulation of coal and methane outburst process near tectonic dislocations", *Forum himykviv-2007*, Dnipropetrovsk, UA, pp. 63-69
10. Vinogradov, V.V. (1989), *Geomehanika upravleniya sostoyaniem massiva vblizi gornyyh vyrobotok* [Geomechanics of control by the state of array nearby the mine working], Nauk. dumka, Kyiv, SU.

Об авторах

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 НАН Украины), Днепр, Украина, igtm@ukr.net.

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 НАН Украины), Днепр, Украина, igtm@ua.fm.

About the authors

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. Poyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS OF UKRAINE), Dnipro, Ukraine, igtm@ukr.net.

Krukovskyi Olexandr 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. Poyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS OF UKRAINE), Dnspro, Ukraine, igtm@ua.fm.

Анотація. Розроблено чисельну модель протікання зв'язаних процесів деформування породного масиву навколо гірничої виробки і фільтрації рідких компонентів полімерного складу. У постановці задачі враховується і початкова проникність порід, що вміщують виробку, і проникність, обумовлена особливостями проведення і кріплення виробки. Враховується час установки анкера після відходу забою, час нагнітання і застигання полімеру, ефект спінювання (збільшення в об'ємі) полімерного складу при змішуванні його компонент і протіканні хімічних реакцій. Моделюється зміна фізико-механічних і фільтраційних властивостей породного масиву з тріщинами, заповненими полімером, при його застиганні (модуль пружності, межі міцності на стиск і розтяг, проникність). Враховується, що металева нагнітальна трубка вступає в роботу в якості анкера тільки після міцного закріплення в шпурі, тобто після застигання полімерного складу. Розроблену модель можна використовувати для дослідження впливу геомеханіки формування області фільтрації навколо виробки на процес нагнітання зміцнюючого складу за допомогою ін'єкційного анкера, на зміну міцності і фільтраційних властивостей порушеного масиву.

В даній статті розглянуто випадок, коли в покрівлі виробки встановлюється один ін'єкційний анкер. Наведено результати розрахунку напружень, проникності, тиску рідкого полімерного складу, геометрії зміцненої області породного масиву. Показано, що до моменту установки ін'єкційного анкера приконтурні породи частково розвантажені від гірського тиску, навколо виробки сформована зона підвищеної різнокомпонентності. Після буріння шпуру, установки ін'єкційного анкера і початку нагнітання полімерних смол області підвищеної різнокомпонентності і непружних деформацій навколо виробки продовжують збільшуватися. Однак в покрівлі виробки, в зоні впливу анкера, різнокомпонентність поля напружень і проникність масиву значно знижені. Діаметр зони зміцнених, непроникних порід навколо ін'єкційного анкера досягає 2,0 м для даних початкових і граничних умов.

Ключові слова: зміцнення породного масиву, нагнітання зміцнюючого складу, ін'єкційний анкер, чисельне моделювання зв'язаних процесів.

Annotation. A numerical model is developed for describing coupled processes of rock deformation around the mine working and filtration of liquid components of polymer composition. In the problem definition, initial permeability of the host rocks and permeability caused by peculiarities of the working driving and supporting are taken into account. Moment of the anchor installation after the face withdrawal, time of injection and solidification of the polymer and the effect of foaming (increase in volume) of the polymer composition during mixing of its components are taken into account as well. A change in the physical, mechanical and filtration properties of rock with cracks filled with polymer during its solidification (elastic modulus, compressive and tensile strengths, permeability) is modeled. It is taken into account that the metal injection tube starts to operate as an anchor only after its firmly fixing in the borehole, that is, after the polymer composition has been hardened. The developed model can be used for studying influence of geomechanics of filtration area formation around the mine working on the process of reinforcing composition injection with the help of injection anchor and on change the strength and filtration properties of the disturbed massif.

In this article, the authors consider the case when one injection anchor is installed in the mine roof. Results of calculation of stresses, permeability, pressure of liquid polymer composition, geometry of the hardened rock region are given. It is shown that by the moment when the injection anchor had been installed, the near-edge rocks were partially unloaded from the rock pressure, and a zone with increased diversity of the stress field components was formed around the working. When a borehole has been drilled, an injection anchor has been installed, and injection of polymer resins has started, areas with increased diversity of the stress field components and inelastic deformations around the mine continue to increase.

However, in the mine roof, in zone under the action of the anchor, diversity of the stress field components and the rock permeability are significantly reduced. Diameter of the zone with hardened, impermeable rocks around the injection anchor reaches 2.0 m for these initial and boundary conditions.

Keywords: rock massif consolidation, reinforcing composition injection, injection anchor, numerical modeling of coupled processes.

Стаття надійшла до редакції 18.10. 2019

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