

УДК 622.281.74

Р.Н. Терещук (канд. техн. наук, доц.)

ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

Tereschuk_rm@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ОДИНОЧНОГО АНКЕРА НА НЕОДНОРОДНЫЙ ПРИКОНТУРНЫЙ МАССИВ

Целью работы является изучение поведения неоднородного приконтурного массива, закрепленного одиночным анкером, и определение рациональных размеров зоны влияния анкера.

Приведен анализ применяемых методов исследования напряженно-деформированного состояния горного массива в окрестности горной выработки, закрепленного анкерной крепью. Получены зависимости изменения величины рациональной зоны влияния одиночного анкера на неоднородный приконтурный массив от расстояния между кровлей и слоем крепких пород, от мощности слоя крепких пород при изменяющемся расстоянии между кровлей и слоем крепких пород и от угла наклона слоя крепких пород. Выполнен анализ полученных зависимостей. Намечены направления дальнейших исследований поведения приконтурного массива горных выработок, закрепленных анкерной и рамно-анкерной крепью.

Ключевые слова: анкерная крепь, численное моделирование, неоднородный породный массив, плотность анкерования.

Введение. Для успешного решения проблемы подземной угледобычи необходима ритмичная безотказная работа угольных шахт, важным структурным элементом которых является горная выработка. По причине высокой степени неоднородности породного массива, обеспечение надежного функционирования капитальных и подготовительных выработок при относительно небольших затратах на их сооружение и поддержание представляет собой сложную научно-техническую задачу.

Переход в последние годы на отработку пластов в более сложных горно-геологических условиях (в связи с увеличением глубины горных работ, введением в работу лав на пластах со слабыми почвами и труднообрушающимися кровлями) привел к

ухудшению состояния горных выработок и необходимости поиска новых организационных и технических решений.

Опыт работы шахт Донецкого региона показывает, что существующие способы охраны и поддержания горных выработок далеко не всегда позволяют решить задачу обеспечения необходимой эксплуатационной устойчивости выработок в конкретных горно-геологических условиях.

Способы охраны, существующие на сегодняшний день, малоэффективны. Поэтому разработка новых способов охраны и поддержания выработок в изменяющихся горно-геологических условиях, обоснование параметров этих способов на основе изучения закономерностей взаимодействия системы “выработка-породный массив-крепь” является актуальной задачей.

Результаты исследований размеров зоны влияния одиночного анкера на однородный приконтурный массив при различной длине анкера, на различных глубинах разработки и при изменяющихся физико-механических характеристиках вмещающих пород приведены в работах [1-5].

Цель работы – изучить поведение неоднородного приконтурного массива, закрепленного одиночным анкером, и определить рациональные размеры зоны влияния анкера.

Материалы и результаты исследований. Для решения задач, поставленных в данной работе, использовались численные методы механики деформируемого твердого тела. Они обладают наибольшей общностью при описании механических процессов в породных массивах и конструкциях, так как свободны от влияния частных факторов, отражающих специфику горнотехнической ситуации. Численные методы позволяют исследовать механические процессы в более широком диапазоне, т.е. дают возможность не только качественно, но и количественно прогнозировать проявление горного давления.

Среди численных методов решения задач механики сплошной среды можно отметить метод конечных элементов, метод граничных элементов, метод сеток и прямые методы математической физики.

Применительно к данным исследованиям наиболее эффективен метод конечных элементов (МКЭ), поскольку он позволяет легко моделировать самые различные неоднородности среды: слоистость, трещиноватость, анизотропию свойств пород, явления фильтрации [6]. Разработаны специальные приемы для моделирования взаимодействия крепи выработки с окружающим массивом [7].

Отметим также возможность получения МКЭ решений в нелинейной постановке, т.е. в предположении, что среда деформируется неупруго, допускает пластические деформации или хрупкое разрушение. Используя вычислительные возможности метода, нелинейное решение получают как последовательность упругих решений.

В результате приведенного анализа применяемых методов исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) горного массива можно сделать вывод о целесообразности применения для расчета НДС массива в окрестности горной выработки, закрепленного анкерной крепью, метода конечных элементов. Решение реализовывалось на основе нелинейной деформационной модели среды с использованием процедуры “переменных параметров упругости”, позволяющей итерационным путем отразить связь между напряжениями и деформациями согласно реальной диаграмме сжатия образца горной породы.

Напряженно-деформированное состояние нелинейной среды может существенно зависеть от последовательности приложения заданной конечной нагрузки. Поэтому гарантией получения правильного решения является введение в расчет соответствующей последовательности нагружения.

Первоначально к области прикладывается лишь некоторая часть (инкремент) расчетной нагрузки. Решается соответствующая линейная задача и определяется напряженно-деформированное состояние. Напряжения в элементах и перемещения узлов запоминаются. Затем прикладывается следующий инкремент нагрузки и определяется соответствующее ему НДС. Напряжения в элементах и узловые перемещения суммируются. Если приращения нагрузок достаточно малы, то в пределах каж-

дого приращения отклонение характеристик среды от линейной аппроксимации также мало. В данной работе принято 10 шагов нагружения.

Представление о взаимодействии системы “крепь-породный массив” можно получить, только рассмотрев напряженно-деформированное состояние породного массива в окрестности горной выработки. Математическая модель деформирования породной среды в окрестности местных нарушений сплошности, должна отображать основные явления, возникающие вследствие возникновения концентрации напряжений и возможного сопутствующего изменения физико-механических свойств окружающего материала.

Методом конечных элементов моделировалась одиночная выработка прямоугольного сечения с линейными размерами: ширина – 6 м, высота – 3 м; расположенная в центре неоднородного массива (с размерами 50×50 м). С помощью численного моделирования решались следующие задачи: определение рациональной зоны влияния одиночного анкера – 1) при изменении расстояния ($l = 0 \dots 3,75$ м) между кровлей и слоем крепких пород, 2) при изменении мощности ($h_{сл} = 0,25 \dots 4$ м) слоя крепких пород и 3) при изменении угла наклона ($\alpha_{сл} = 0 \dots 50^\circ$) слоя крепких пород.

Физико-механические параметры породного массива: слабых и крепких пород соответственно – модуль упругости $E = 7350$ МПа и $E = 10850$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$ и $\mu = 0,23$, предел прочности на сжатие $R_c = 20$ МПа и $R_c = 50$ МПа, предел прочности на растяжение $R_p = 2,0$ МПа и $R_p = 5,0$ МПа, плотность пород $\gamma = 2,5$ т/м³. Для моделирования породного массива использовались линейные четырехугольные плоские элементы, а для сталеполлимерной анкерной крепи – линейные элементы. Параметры анкера: длина $l_a = 2 \dots 3$ м, модуль упругости $2 \cdot 10^6$ МПа и коэффициент Пуассона 0,35. Глубина заложения выработки 1000 м, что соответствует горному давлению 25 МПа.

Схема к определению зоны влияния b_a одиночного анкера приконтурный массив приведены в работах [3, 5]. Расчетные схемы для исследований влияния одиночного анкера на неоднородный приконтурный массив приведены на рис. 1.

Задача 1. Выработка прямоугольного сечения, закреплена одиночным анкером ($l_a = 2 \dots 3$ м), установленным в центральной части кровли. В кровле залегает слой крепких пород мощностью $h_{сл} = 1$ м (рис. 1, а). Для исследования определены 16 вариантов: 1 вариант – слой крепких пород залегает непосредственно в кровле выработки ($l = 0$ м); 2-16 варианты – ($l = 0,25 \dots 3,75$ м). По результатам расчетов построена зависимость изменения величины рациональной зоны влияния b_a одиночного анкера на неоднородный приконтурный массив от расстояния l между кровлей и слоем крепких пород рис. 2.

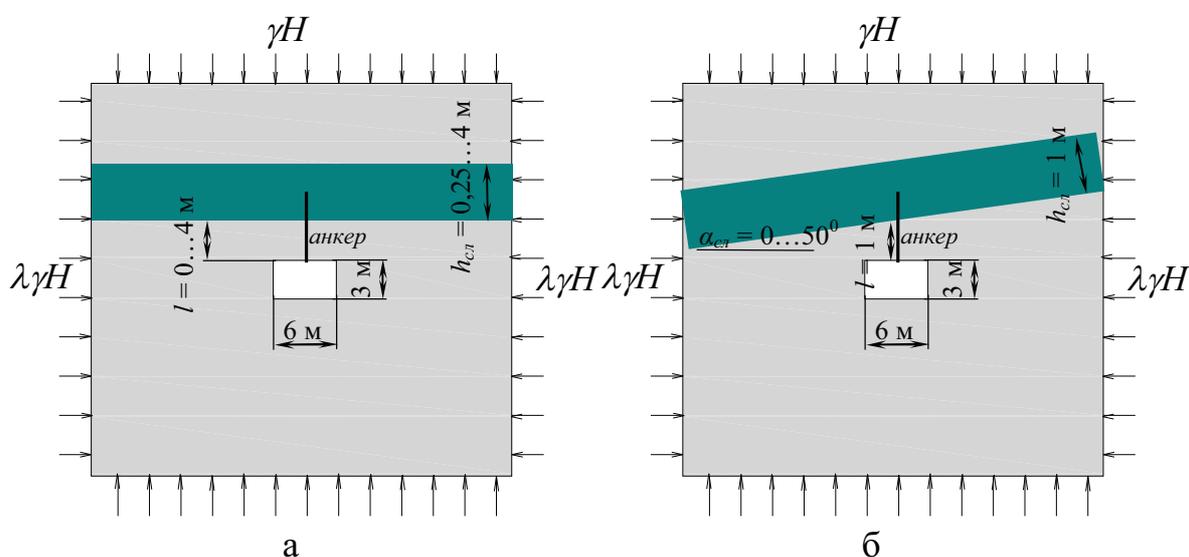


Рис. 1. Расчетные схемы для исследования влияния одиночного анкера на неоднородный приконтурный массив

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы:

- при залегании слоя крепких пород непосредственно в кровле размеры рациональной зоны влияния одиночного анкера практически равны размерам зоны при установке анкера в однородном породном массиве [5];

- при удалении слоя крепких пород от кровли выработки на 20...25 см происходит резкое уменьшение размеров рациональной зоны влияния одиночного анкера (рис. 2);

- при дальнейшем удалении слоя от кровли (25 см и далее) размеры рациональной зоны влияния одиночного анкера увели-

чиваются, но при достижении расстояния $l = 1,75$ м для анкеров $l_a = 2$ м, $l = 2,25$ м – $l_a = 2,5$ м, $l = 2,75$ м – $l_a = 3$ м размеры зоны влияния перестают увеличиваться и практически не меняются (рис. 2);

– полученные зависимости изменения рациональной зоны влияния одиночного анкера на неоднородны приконтурный массив от расстояния между кровлей и слоем крепких пород наиболее хорошо описываются полиномиальными зависимостями пятой степени:

для $l_a = 2$ м – $y = -0,0009x^5 + 0,0452x^4 - 0,8499x^3 + 6,9855x^2 - 21,184x + 84,514$,

для $l_a = 2,5$ м – $y = -0,0012x^5 + 0,0588x^4 - 1,0574x^3 + 8,3838x^2 - 25,171x + 113,67$,

для $l_a = 3$ м – $y = -0,0015x^5 + 0,0691x^4 - 1,2029x^3 + 9,3436x^2 - 28,267x + 125,38$.

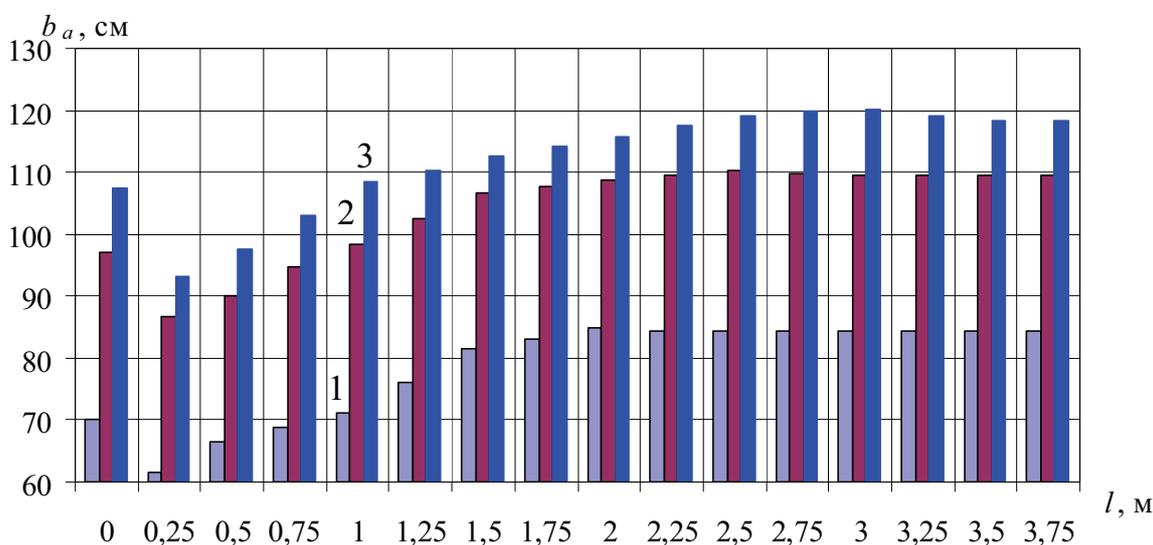


Рис. 2. Изменения рациональной зоны влияния одиночного анкера в зависимости от расстояния между кровлей и слоем крепких пород ($h_{cl} = 1$ м, $f=5$): 1 – $l_a = 2$ м, 2 – $l_a = 2,5$ м, 3 – $l_a = 3$ м

Задача 2. Выработка прямоугольного сечения, закреплена одиночным анкером ($l_a = 2,5$ м), установленным в центральной части кровли. В кровле залегает слой крепких пород (рис. 1, а). Для исследования определены 6 ситуаций по 16 вариантов каждая: 1 ситуация – слой крепких пород залегает непосредственно в кровле выработки ($l = 0$ м) при изменении мощности ($h_{cl} = 0,25 \dots 4$ м) слоя крепких пород; 2-6 ситуации – слой крепких пород залегает в кровле выработки ($l = 0,25 \dots 1,5$ м) при изменении мощности ($h_{cl} = 0,25 \dots 4$ м) слоя крепких пород. По ре-

зультатам расчетов построена зависимость изменения величины рациональной зоны влияния b_a одиночного анкера на неоднородный приконтурный массив от мощности слоя крепких пород при изменяющемся расстоянии между кровлей и слоем крепких пород рис. 3-8.

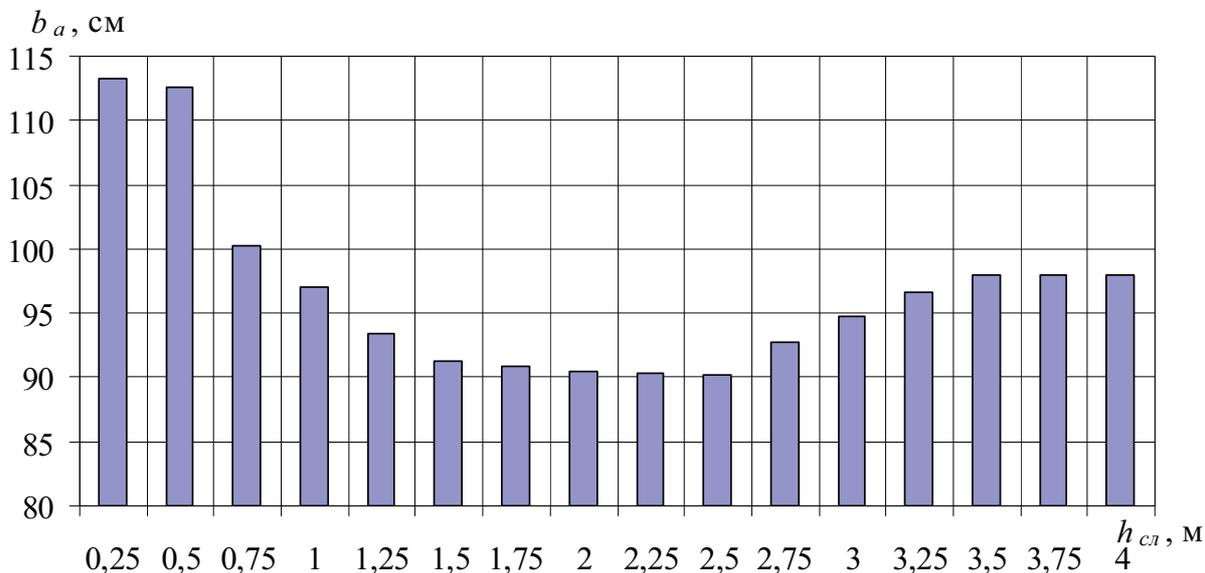


Рис. 3. Изменения рациональной зоны влияния одиночного анкера в зависимости от мощности слоя крепких пород при расстоянии 0 м между кровлей и слоем ($f=5$)

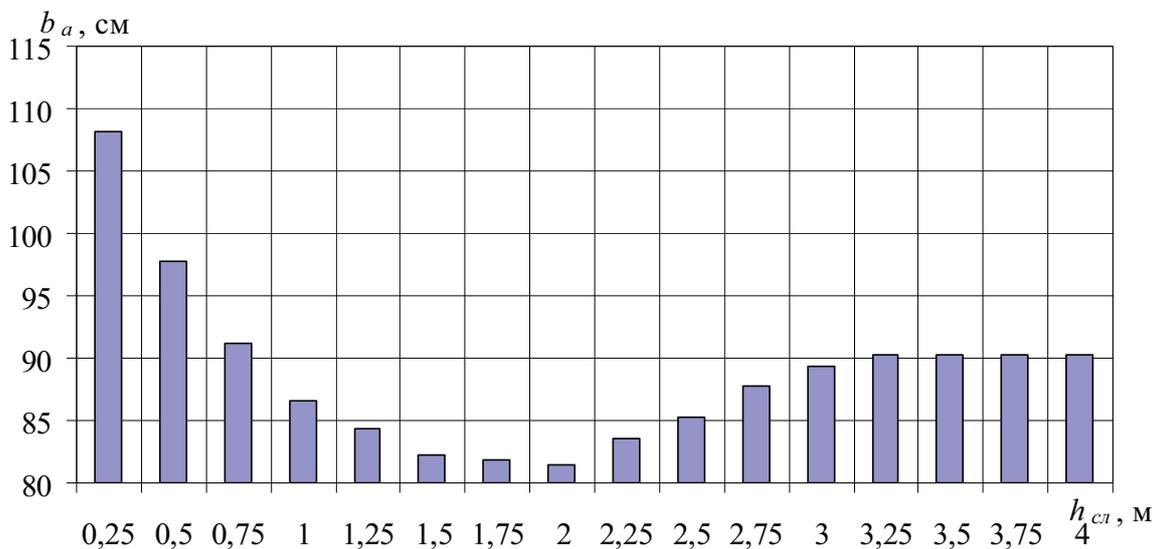


Рис. 4. Изменения рациональной зоны влияния одиночного анкера в зависимости от мощности слоя крепких пород при расстоянии 0,25 м между кровлей и слоем ($f=5$)

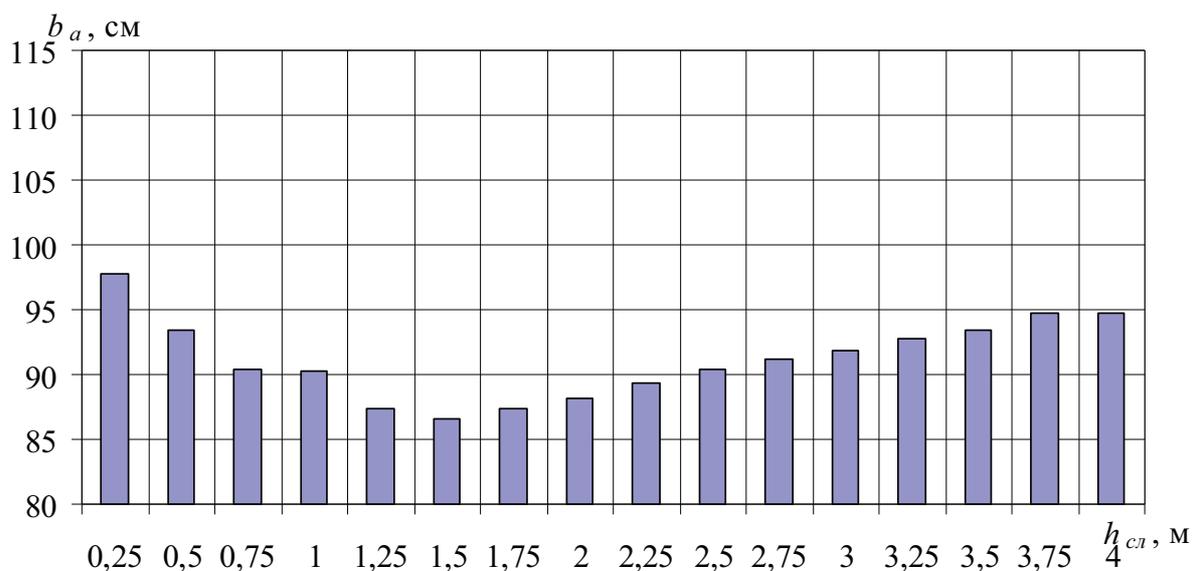


Рис. 5. Изменения рациональной зоны влияния одиночного анкера в зависимости от мощности слоя крепких пород при расстоянии 0,5 м между кровлей и слоем ($f=5$)

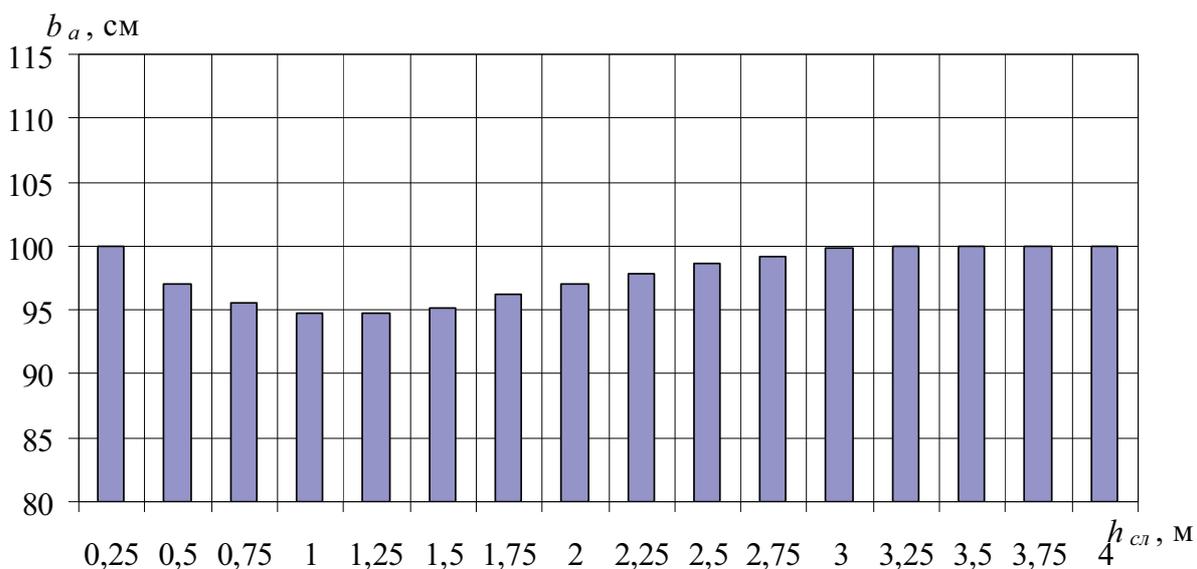


Рис. 6. Изменения рациональной зоны влияния одиночного анкера в зависимости от мощности слоя крепких пород при расстоянии 0,75 м между кровлей и слоем ($f=5$)

Сопоставляя полученные результаты можно сделать следующие выводы:

– при увеличении мощности слоя крепких пород величина рациональной зоны влияния одиночного анкера уменьшается, потом незначительно увеличивается, а далее стабилизируется на определенном значении (рис. 3-7);

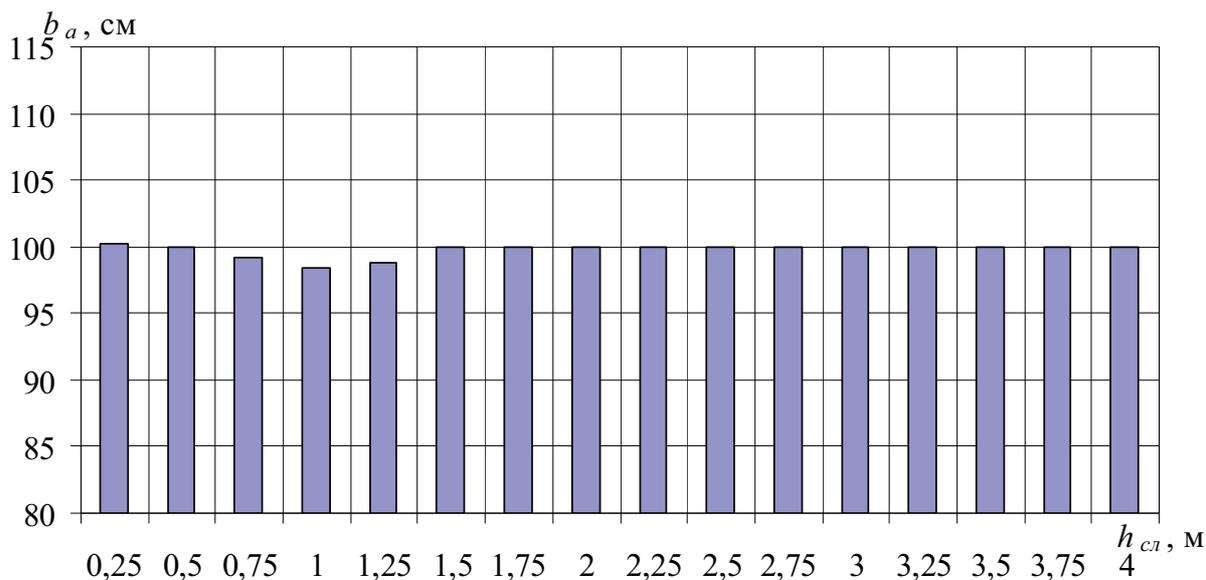


Рис. 7. Изменения рациональной зоны влияния одиночного анкера в зависимости от мощности слоя крепких пород при расстоянии 1,0 м между кровлей и слоем ($f = 5$)

– при увеличении мощности слоя крепких пород и залегании его непосредственно в кровле выработки величина рациональной зоны влияния одиночного анкера уменьшается с 113,2 см до 90,2 см (при $h_{сл} = 2,5$ м), что составляет 20,4%, потом увеличивается до 98 см (при $h_{сл} = 3,5$ м), а далее стабилизируется и описывается полиномиальной зависимостью пятой степени:

$$y = 0,0002x^5 - 0,0121x^4 + 0,1924x^3 - 0,7382x^2 - 5,0401x + 120,23 \text{ (рис. 3);}$$

– при увеличении мощности слоя крепких пород и залегании его на расстоянии 0,25 м от кровли выработки величина рациональной зоны влияния одиночного анкера уменьшается с 108,2 см до 81,4 см (при $h_{сл} = 2$ м), что составляет 24,8%, потом увеличивается до 90,2 см (при $h_{сл} = 3,25$ м), а далее стабилизируется и описывается полиномиальной зависимостью пятой степени: $y = 7E-05x^5 - 0,0024x^4 - 0,0189x^3 + 1,338x^2 - 13,202x + 119,7$ (рис. 4);

– при увеличении мощности слоя крепких пород и залегании его на расстоянии 0,5 м от кровли выработки величина рациональной зоны влияния одиночного анкера уменьшается с 97,8 см до 86,6 см (при $h_{сл} = 1,5$ м), что составляет 11,5%, потом увеличивается до 94,8 см (при $h_{сл} = 3,75$ м), а далее стабилизиру-

ется и описывается полиномиальной зависимостью пятой степени: $y = 1E-04x^5 - 0,0035x^4 + 0,0225x^3 + 0,4307x^2 - 5,3015x + 102,5$ (рис. 5);

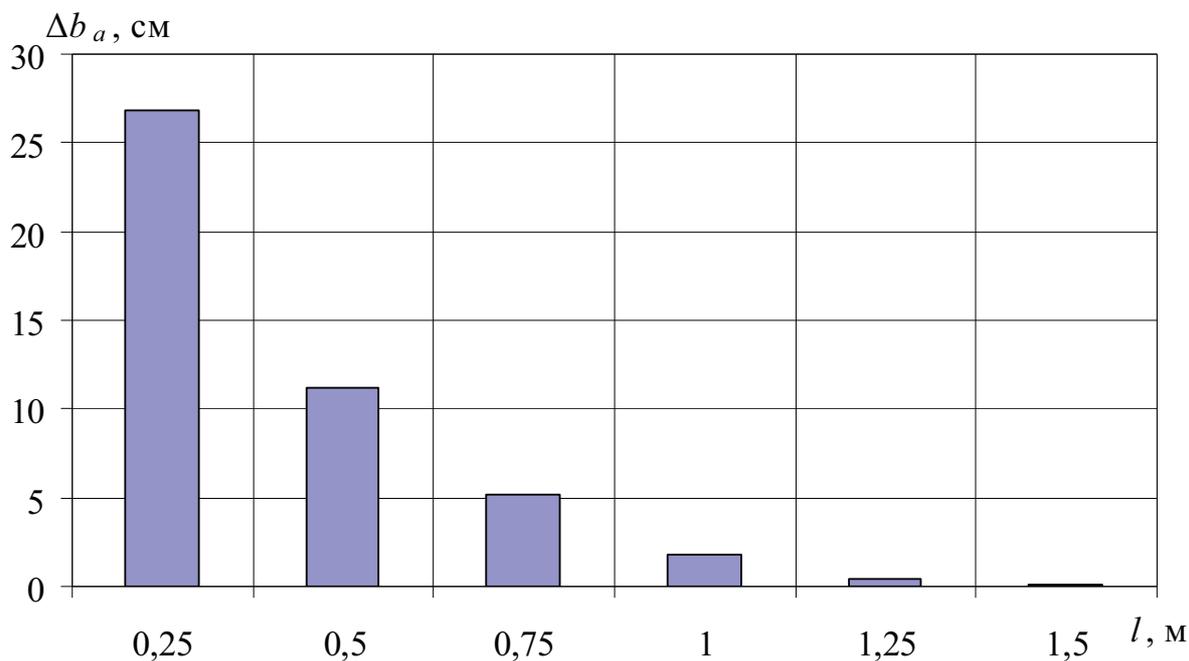


Рис. 8. Изменения рациональной зоны влияния одиночного анкера в зависимости от расстояния между кровлей и слоем крепких пород ($f = 5$) при мощности слоя крепких пород 0,25-4 м

– при увеличении мощности слоя крепких пород и залегании его на расстоянии 0,75 м от кровли выработки величина рациональной зоны влияния одиночного анкера уменьшается с 100 см до 94,8 см (при $h_{cl} = 1 \dots 1,25$ м), что составляет 5,2%, потом увеличивается до 100 см (при $h_{cl} = 3,25$ м), а далее стабилизируется и описывается полиномиальной зависимостью пятой степени: $y = -4E-06x^5 + 0,0015x^4 - 0,0631x^3 + 0,9617x^2 - 5,3295x + 104,4$ (рис. 6);

– при увеличении мощности слоя крепких пород и залегании его на расстоянии 1 м от кровли выработки величина рациональной зоны влияния одиночного анкера уменьшается с 100,2 см до 98,4 см (при $h_{cl} = 1$ м), что составляет 1,8%, потом увеличивается до 100 см (при $h_{cl} = 1,5$ м), а далее стабилизируется и описывается полиномиальной зависимостью четвертой степени: $y = 0,0008x^4 - 0,0317x^3 + 0,4034x^2 - 1,8693x + 101,88$ (рис. 7);

– при увеличении расстояния между кровлей выработки и слоем крепких пород от 0 до 1,25 м (при $h_{сл} = 0,25 \dots 4$ м) изменения величины рациональной зоны влияния одиночного анкера уменьшаются, дальнейшее увеличение расстояния практически не влияет на изменения рациональной зоны влияния (рис. 8).

Задача 3. Выработка прямоугольного сечения, закреплена одиночным анкером ($l_a = 2,5$ м), установленным в центральной части кровли. В кровле залегает слой крепких пород ($h_{сл} = 1$ м) (рис. 1, б). Для исследования определены 2 ситуации по 11 вариантов каждая: 1 ситуация – слой крепких пород залегает в кровле выработки на расстоянии ($l = 1$ м) при изменении угла наклона ($\alpha_{сл} = 0 \dots 50^0$) слоя крепких пород; 2 ситуация – слой крепких пород залегает в кровле выработки на расстоянии ($l = 2$ м) при изменении угла наклона ($\alpha_{сл} = 0 \dots 50^0$) слоя крепких пород. По результатам расчетов построена зависимость изменения величины рациональной зоны влияния b_a одиночного анкера на неоднородный приконтурный массив от угла наклона слоя крепких пород рис. 9-10.

Сопоставляя полученные результаты можно сделать следующие выводы:

– величины рациональной зоны влияния одиночного анкера практически не зависит от угла наклона слоя крепких пород (изменения составляют 2...3%), но при увеличении расстояния между кровлей и слоем незначительно увеличивается 10,5...11,2% (рис. 9 и 10, линии 3);

– при расстоянии между кровлей и слоем крепких пород 1,0 м и изменении угла наклона слоя $\alpha_{сл} = 0 \dots 50^0$, часть рациональной зоны влияния одиночного анкера со стороны падения слоя уменьшается с 49,2 см до 44,3 см, что составляет 10%, и описывается полиномиальной зависимостью второй степени:

$$y = 0,0013x^2 - 0,1665x + 49,231 \text{ (рис. 9, линии 1),}$$

а часть рациональной зоны влияния одиночного анкера со стороны восстания слоя увеличивается с 49,2 см до 55,2 см, что составляет 12,2%, и описывается полиномиальной зависимостью второй степени: $y = -0,0039x^2 + 0,3008x + 49,578$ (рис. 9, линии 2);

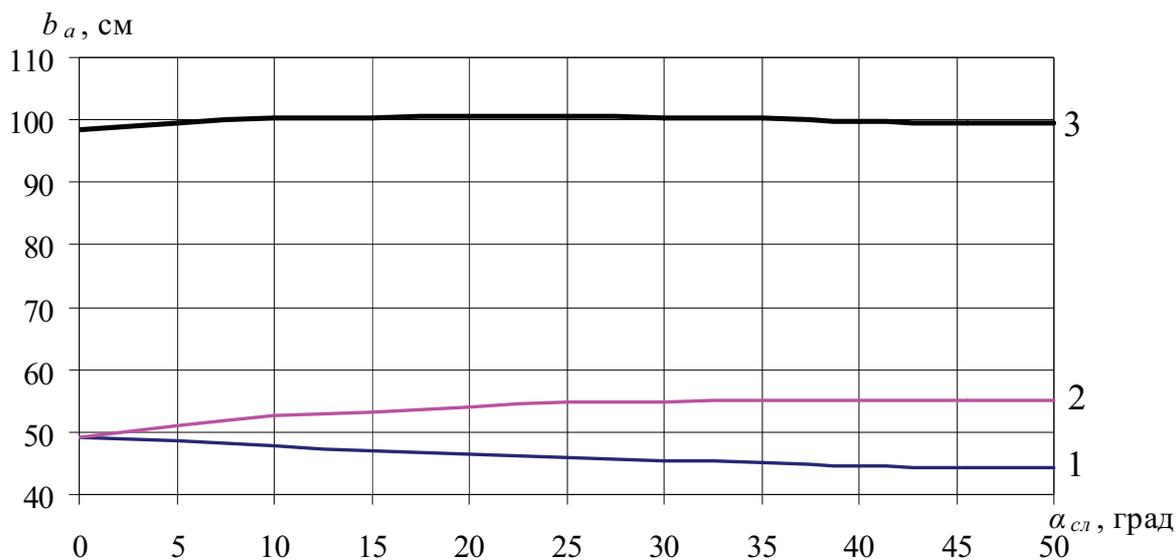


Рис. 9. Изменения рациональной зоны влияния одиночного анкера ($l_a = 2,5$ м) в зависимости от угла наклона слоя крепких пород ($h_{сл} = 1$ м, $f = 5$) при расстоянии между кровлей и слоем 1,0 м:
 1 – часть зоны влияния одиночного анкера со стороны падения слоя,
 2 – часть зоны влияния одиночного анкера со стороны восстания слоя,
 3 – полная зона влияния одиночного анкера

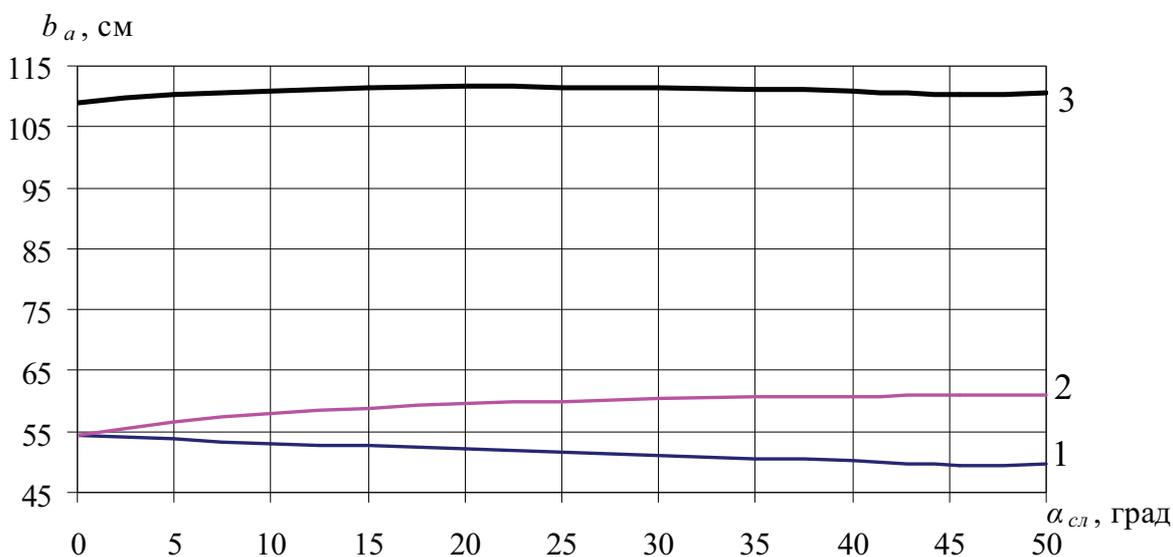


Рис. 10. Изменения рациональной зоны влияния одиночного анкера ($l_a = 2,5$ м) в зависимости от угла наклона слоя крепких пород ($h_{сл} = 1$ м, $f = 5$) при расстоянии между кровлей и слоем 2,0 м:
 1 – часть зоны влияния одиночного анкера со стороны падения слоя,
 2 – часть зоны влияния одиночного анкера со стороны восстания слоя,
 3 – полная зона влияния одиночного анкера

– при расстоянии между кровлей и слоем крепких пород 2,0 м и изменении угла наклона слоя $\alpha_{сл} = 0...50^0$, часть рациональной зоны влияния одиночного анкера со стороны падения слоя уменьшается с 54,4 см до 49,6 см, что составляет 8,9%, и описывается полиномиальной зависимостью второй степени:

$$y = 0,0005x^2 - 0,126x + 54,367 \text{ (рис. 10, линии 1),}$$

а часть рациональной зоны влияния одиночного анкера со стороны восстания слоя увеличивается с 54,4 см до 60,9 см, что составляет 11,9%, и описывается полиномиальной зависимостью второй степени: $y = -0,0037x^2 + 0,3012x + 54,881$ (рис. 10, линии 2);

– основные изменения частей рациональной зоны влияния одиночного анкера происходят при изменении угла наклона слоя крепких пород $\alpha_{сл} = 0...30^0$, при дальнейшем увеличении угла наклона – изменения незначительны (до 10%) (рис. 9 и 10).

Выводы. Таким образом, при удалении слоя крепких пород от кровли выработки на 20...25 см происходит резкое уменьшение размеров рациональной зоны влияния одиночного анкера, но при дальнейшем удалении слоя от кровли размеры увеличиваются и при достижении определенного расстояния практически не меняются. При увеличении мощности слоя крепких пород величина рациональной зоны влияния одиночного анкера уменьшается, потом незначительно увеличивается, а далее стабилизируется на определенном значении. При увеличении расстояния между кровлей выработки и слоем крепких пород от 0 до 1,25 м (при $h_{сл} = 0,25...4$ м) изменения величины рациональной зоны влияния одиночного анкера уменьшаются, дальнейшее увеличение расстояния практически не влияет на изменения рациональной зоны влияния. Величины рациональной зоны влияния одиночного анкера практически не зависят от угла наклона слоя крепких пород, но части этой зоны со стороны падения слоя уменьшаются, а со стороны восстания слоя увеличивается. Основные изменения частей рациональной зоны влияния одиночного анкера происходят при изменении угла наклона слоя крепких пород $0...30^0$.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучения влияния анкерных систем на неоднородный приконтурный массив.

Список литературы

1. Булат А.Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов. – Днепропетровск: Ин-т геотехнической механики НАН Украины, 2002. – 372 с.
2. Круковский А.П. Обоснование параметров и условий применения анкерной крепи на угольных шахтах: дис... канд. техн. наук: спец. 05.15.09 / Круковский Александр Петрович. – Днепропетровск, 2005. – 175 с.
3. Терещук Р.Н. Определение зоны влияния одиночного анкера на однородный приконтурный массив / Р.Н. Терещук // Проблемы гірського тиску. – 2011. – №19. – С. 183-195.
4. Терещук Р.Н. К вопросу о зоне влияния одиночного анкера на деформации приконтурного массива / Р.Н. Терещук, К.В. Кравченко // Матеріали міжнародної конференції (12-15 жовтня 2011 р.) «Форум гірників-2011». – Донецьк: ДВНЗ «Національний гірничий університет», 2011. – С. 231-235.
5. Терещук Р.Н. Определение параметров зоны влияния одиночного анкера, установленного в однородном приконтурном массиве / Р.Н. Терещук // Матеріали міжнародної конференції (2-5 жовтня 2013 р.) «Форум гірників-2013». – Донецьк: ДВНЗ «Національний гірничий університет», 2013. – С. 63-68.
6. Амусин Б.З. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики / Б.З. Амусин, А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1975. – 144 с.
7. Новикова Л.В. Распределение напряжений в массиве горных пород на участке сопряжения двух выработок / Л.В. Новикова, А.И. Калашников, В.С. Лесников // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1984. – № 2. – С. 25.

Стаття надійшла до редакції 15.10.2013.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук А.М. Роєнко

Р.М. Терещук

Національний гірничий університет, м. Дніпропетровськ

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ЗОНИ ВПЛИВУ ОДИНОЧНОГО АНКЕРА НА НЕОДНОРІДНИЙ ПРИКОНТУРНИЙ МАСИВ

Метою роботи є вивчення поведінки неоднорідного приконтурного масиву, закріпленого одиночним анкером, та визначення раціональних розмірів зони впливу анкера.

Наведено аналіз методів, що використовуються для дослідження напружено-деформованого стану гірського масиву навколо гірничої виробки, яка закріплена анкерним кріпленням. Отримані залежності зміни величини раціональної зони впливу одиночного анкера на неоднорідний приконтурний масив від відстані між покрівлею та шаром міцних порід, від потужності шару міцних порід при відстані, що змінюється, між покрівлею та ша-

ром міцних порід і від кута похилу шару міцних порід. Виконано аналіз отриманих залежностей. Намічені напрямки подальших досліджень поведінки приконтурного масиву гірничих виробок, що закріплені анкерним та рамно-анкерним кріпленням.

Ключові слова: анкерне кріплення, чисельне моделювання, неоднорідний породний масив, щільність анкерування.

R. Tereschuk

National Mining University, Dnipropetrovsk

RATIONAL ZONE OF SINGLE ANCHOR INFLUENCE ON HETEROGENOUS SURROUNDING MASSIF

The aim of the article is to study the behavior of heterogeneous surrounding massif, fixed with a single anchor, and to determine rational dimensions of the anchor influence zone.

The analysis of the methods of investigation of the stress-strain state of the rock mass in the vicinity of mine working, fixed with roof bolt, is conducted. The dependences of the change of the rational zone of single anchor influence on heterogeneous surrounding massif on the distance between the top and hard rock layer, the thickness of hard rock layer at varying distance between the top and the layer of hard rock and the angle of inclination of hard rock layer are obtained. The analysis of the obtained relationships is carried out. The directions for further research of the behavior of the surrounding massif of mine workings, fixed with anchor and frame-roof bolting are outlined.

Keywords: roof bolting, numerical simulation, heterogeneous rock massif, the density of anchoring.