

УДК 622.016.3.112.3

А.О. Новиков, И.Н. Шестопапов

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ
«КРЕПЬ – ОБОЛОЧКА ИЗ УКРЕПЛЕННЫХ ПОРОД»
ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАМНО-АНКЕРНОЙ КРЕПИ

Донецкий национальный технический университет

В статье изложены результаты выполненных в ДонНТУ комплексных исследований по изучению особенностей и закономерностей кинетики деформирования породного массива, вмещающего выработки, закрепленные рамно-анкерными конструкциями крепи. Обоснованы рациональные параметры крепи и разработана методика их расчета.

Ключевые слова: крепь, вмещающий массив, методика расчета, параметры крепи

Эффективность работы угольных шахт определяется себестоимостью добываемого угля, в которой до 45% составляют затраты на поддержание горных выработок. В настоящее время на шахтах Украины до 90% поддерживаемых подготовительных горных выработок закреплены металлической арочной податливой крепью, причем, по имеющимся статистическим данным, не менее, чем 30% из них деформированы и нуждаются в ремонте. Причинами неудовлетворительного состояния выработок являются, в частности, недостаточная несущая способность крепи, а также несоответствие ее технических характеристик горно-геологическим условиям применения.

Одним из перспективных направлений улучшения состояния крепи горных выработок является вовлечение вмещающего породного массива в совместную работу с рамной крепью. В 70% случаев этот процесс осуществляется путем анкерования пород кровли и боков выработок, что позволяет на 30–40% снизить смещения пород, до двух раз уменьшить затраты на поддержание выработок. Несмотря на то, что комбинированные крепи на основе анкерных уже более 40 лет успешно используются за рубежом, а в Украине – с 80-х годов XX века, в практике их применения накопилось немало количество вопросов.

Большой вклад в исследование процессов деформирования и разрушения пород вокруг горных выработок, закрепленных, в том числе, и комбинированными крепями на основе анкерных, внесли ученые и специалисты отечественных и зарубежных научно-исследовательских центров [1–3]. В их трудах комбинированные крепи на основе анкерных (анкерно-рамные и рамно-

анкерные) представляются как усиленные анкерами металлические рамные крепи, позволяющие в большей или меньшей степени использовать несущую способность вмещающих выработку пород.

Представления, изложенные в трудах отечественных и зарубежных исследователей, о работе анкерной крепи, являющейся основным элементом в системе «крепь – оболочка из укрепленных пород», можно выразить в виде следующих геомеханических моделей: присоединения слабых пород к более прочным («подшивка») или объединения слабых приконтурных пород в единую несущую конструкцию («сшивка»), локального укрепления нарушенных пород [1], а также управления напряженно-деформированным состоянием массива путем изменения его структурно-механических свойств при армировании пород анкерами по пространственным схемам [4].

Опыт применения комбинированных крепей показывает, что для поддержания выработок наиболее эффективно устанавливать анкерную крепь сразу после выемки породы в забое выработки. Однако на практике более чем в половине случаев анкеры устанавливаются с некоторым отставанием от забоя. Как правило, это связано с угрозой обрушения в забое пород непосредственной кровли, что требует первоочередной установки рамной крепи для обеспечения безопасности работ. При этом установка анкеров с отставанием от забоя по проведению выработки существенно снижает эффективность их применения.

Следует отметить, что существующие представления о работе системы «крепь – оболочка из укрепленных пород» по восприятию горного давления, действующего в выработке, имеют ряд системных недостатков, что в определенных геомеханических условиях приводит к ошибкам проектирования. Во-первых, указанные подходы рассматривают породно-анкерную конструкцию как статическую систему с фиксированными физико-механическими свойствами, в то время как по мере развития полей деформаций и напряжений в массиве либо часть, либо вся система переходит за предельное состояние, сохраняя при этом определенную несущую способность. Во-вторых, в виду необратимости геомеханических процессов поведение системы существенным образом зависит от стадии ее ввода в работу по отношению к степени реализации необратимого деформирования вмещающего массива при проходке выработки до установки анкеров.

Следствием указанных обстоятельств явилось то, что на данный момент отсутствуют четкие разграничения между существующими конструкциями комбинированных крепей на основе анкерных систем, а расчетные методики [5] не принимают к учету изменение грузонесущей способности породно-анкерных конструкций в процессе эксплуатации. Это не позволяет достоверно определять параметры крепи, обеспечивающие длительную устойчивость выработок. Таким образом, можно констатировать, что в настоящее время отсутствуют научно обоснованные рекомендации по определению времени и места установки анкеров относительно проходческого забоя.

В этой связи исследование механизма взаимодействия элементов системы «рама – оболочка из укрепленных анкерами пород» и обоснование параметров комбинированной крепи с учетом разрыва во времени между выемкой пород и установкой анкеров является актуальной научной задачей.

Цель работы – установление закономерностей деформирования системы «рамно-анкерная крепь – вмещающий массив» для обоснования параметров рамно-анкерной крепи.

Для достижения поставленной цели авторами были выполнены:

- лабораторные исследования влияния усиления рамной крепи анкерами на процесс формирования вокруг выработки зоны разрушенных пород (ЗРП);

- шахтные эксперименты по изучению особенностей деформирования и разрушения пород, вмещающих выработку с рамно-анкерной крепью;

- теоретические исследования закономерностей деформирования системы «рамно-анкерная крепь – вмещающий массив».

Установленные в результате выполненных исследований особенности деформирования вмещающего массива позволили:

- разработать способы повышения устойчивости выработок на основе комбинированных крепей и методику расчета их параметров;

- провести шахтные испытания и осуществить внедрение рекомендаций по креплению выработок комбинированной крепью.

Лабораторные исследования влияния усиления рамной крепи анкерами на процесс формирования вокруг выработки ЗРП проводили в два этапа [6]. Сначала на структурных моделях изучали влияние усиления рамной крепи анкерами на устойчивость выработки в зависимости от размера ЗРП, сформировавшейся к моменту установки анкеров. В моделях имитировали различный размер ЗРП, сформировавшийся в окрестности выработки к моменту установки анкеров, глубину и схему анкерования. Было установлено, что усиление рамной крепи анкерами эффективно, когда глубина анкерования больше размера ЗРП, сформировавшегося вокруг выработки к моменту установки анкеров. При глубине анкерования, равной или меньшей размера ЗРП, влияние анкеров на устойчивость выработки практически отсутствует.

Для уточнения особенностей влияния усиливающей раму анкерной крепи на процесс деформирования вмещающего массива (в том числе, зоны неупругих деформаций и ЗРП) во времени было проведено моделирование с помощью эквивалентных материалов. Имитировались различные горно-геологические условия и степень реализации геомеханических процессов во вмещающем массиве к моменту установки усиливающей анкерной крепи. Установлено, что эффективность использования анкеров, возводимых с отставанием от забоя выработки, с целью вовлечения породного массива в совместную работу с рамной крепью определяется размером ЗРП, образовавшейся вокруг выработки на момент установки анкеров. Если размер этой зоны не превышает половины глубины анкерования, то ее рост от контура в

глубь массива прекращается, а фронт разрушения переносится на внешнюю границу области скрепленных анкерами пород. При этом коэффициент разрыхления k_p в пределах неразрушенной заанкеренной части массива не превышает 1,02, а суммарный размер ЗРП на 30–40% меньше, чем вокруг выработки с рамной крепью.

Шахтные исследования особенностей деформирования и разрушения пород, вмещающих выработки с рамно-анкерной крепью проводили в двух подготовительных выработках шахты «Добропольская» на 11 комплексных замерных станциях [7]. Комплексная замерная станция представляла собой 3 скважины глубиной до 7 м, пробуренные в кровлю и бока выработки, и контурный репер – в почве выработки. Расстояние между реперами в скважинах 0,5–1,0 м. Контрольные замерные станции устанавливали на участках этих же выработок с рамным креплением

Конвейерный штрек 5-й северной лавы пласта m_4^0 проводился с двусторонней подрывкой по породам с прочностью 15–45 МПа. Мощность пласта – 1,2 м, угол залегания пород – 10° , глубина работ – 700 м. Выработка проводилась комбайном 1П110, сечение – арочное. Первые 5 пикетов были закреплены КМП-А3/13,8 с шагом установки 0,5 м. На этом участке была оборудована контрольная замерная станция. На остальной части выработки между рамами, возводимыми с шагом 0,8 м, в кровлю под металлическую полосу устанавливались четыре анкера длиной 2,4 м.

Усиливающую анкерную крепь в месте заложения комплексных замерных станций устанавливали с различным отставанием от забоя (0, 1, 2, 5 и 8 м), что соответствует разрыву во времени между выемкой породы в забое и анкерованием, равным 0; 0,23; 0,46; 1,14; 1,81 сут. Размер ЗРП на станциях №1–5 на момент анкерования составил, соответственно, 0; 0,12; 0,28; 0,44 и 1,1 м. На рис. 1 представлены графики смещений глубинных реперов (а) и изменения k_p между глубинными реперами в кровле выработки (б) на 300-е сутки наблюдений.

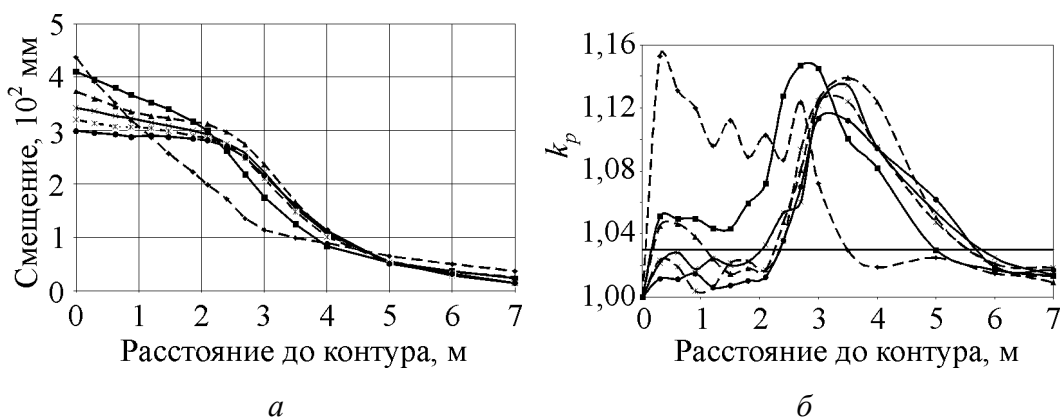


Рис. 1. Смещения глубинных реперов в кровле выработки (а) и изменения k_p на участках скважины между глубинными реперами (б) на 300-е сутки наблюдений: \diamond – рамы, \blacksquare – 1,81 сут, \blacktriangle – 1,14 сут, \times – 0,46 сут, \square – 0,23 сут, \bullet – 0 сут, — граница

Как видно из представленных графиков, на 300-е сутки смещения кровли на контрольной станции и станциях № 1–5 составили, соответственно, 437, 299, 320, 342, 373 и 410 мм, размер ЗРП в местах установки станций – 4,75; 3,5; 3,2; 3,9; 3,6 и 5,0 м, при этом общий размер ЗНД в кровле практически не отличался. Среднее значение k_p на контрольной станции составило 1,063, а на остальных станциях – 1,042–1,059.

На станциях №1–3 ЗРП образовывалась за пределами скрепленного анкерами участка, при этом породно-анкерная оболочка практически не разрушилась. На станции № 4 размер ЗРП от контура в глубь массива увеличился до 1,1 м, а на станции №5 скрепленный анкерами массив был полностью разрушен.

Аналогичные результаты были получены на замерных станциях, установленных в другой выработке. Так, было установлено, что при возведении анкеров спустя 0–27 ч. после выемки породы развитие деформационных процессов от контура вглубь массива прекращается, при этом уменьшаются: конечный размер ЗРП – на 41%, а смещения контура – в 1,7 раза по сравнению с контрольным участком. При установке анкеров спустя 28–54 ч. после выемки породы происходит дальнейшее развитие ЗРП от контура вглубь массива и полное разрушение создаваемой породно-анкерной оболочки. Однако за счет снижения общей степени нарушенности приконтурного массива смещения контура уменьшаются в 1,1–1,2 раза по сравнению с контрольным участком. При установке анкеров с еще большим разрывом во времени смещения пород кровли не отличаются (различие менее 10%) от смещений на контрольной станции.

Аналитические исследования закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния системы «рамно-анкерная крепь – вмещающий массив» выполняли в два этапа. Сначала с использованием положений кинетики хрупкого разрушения и теории предельного равновесия решали задачу по определению допустимого разрыва во времени между выемкой породы и установкой анкеров. Были получены зависимости для его расчета при различных горно-геологических и горно-технических условиях заложения выработки. Для глубины анкерования 2,2 м (длина анкера $l_a = 2,4$ м) эта формула имеет вид

$$t = -9,36 + 10,14 \cdot R_B + 15,48 \cdot \left(\frac{\gamma H - P}{\sigma_{сж}} \right) + 0,6 \cdot R_B^2 - 27,65 \cdot R_B \cdot \left(\frac{\gamma H - P}{\sigma_{сж}} \right) + 41,33 \cdot \left(\frac{\gamma H - P}{\sigma_{сж}} \right)^2, \text{ сут, } R^2 = 0,92, \quad (1)$$

где R_B – приведенный радиус выработки, м; P – отпор рамной крепи, МПа; H – глубина работ, м; $\sigma_{сж}$ – предел прочности пород на сжатие, МПа.

Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что допустимый разрыв во времени между выемкой породы и установкой анкеров в составе рамно-анкерной крепи находится в степенной зависимости от

горно-геологических условий заложения выработки, ее размеров и отпора рамной крепи. Так, в условиях, где $\gamma H/\sigma_{сж} = 0,20-0,74$ при ширине выработки 4,8–5,0 м, отпоре рамной крепи 0,05-0,10 МПа этот параметр составляет от 2,0 до 8,3 сут.

На втором этапе [8] с использованием численных методов, разработана математическая модель, описывающая НДС системы «рамно-анкерная крепь – вмещающий массив». В качестве расчетной схемы принята толстая оболочка из трансверсально-изотропных слоев пород, опирающаяся через слой разрушенных пород на раму. Оболочка находится под действием равномерно распределенной нагрузки q . Два края ее заземлены, а два других – свободны. В модели варьировались следующие параметры: количество слоев пород i , диаметр анкеров d_a , упругие характеристики анкеров и пород (модули упругости E_a, E_n^i и сдвига G_a, G_n^i , коэффициенты Пуассона ν_a, ν_n^i в двух направлениях, а также приведенные расчетные упругие характеристики конструкции).

При решении задачи использовали энергетический метод, основанный на вариации потенциальной энергии системы и потенциала внешней нагрузки. Полный прогиб оболочки w представляли в виде

$$w(x, y) = \sum_{j=1}^n a_j f_j(x) g_j(y), \quad (2)$$

где a_j – неизвестные коэффициенты; $f_j(x), g_j(y)$ – заданные координатные функции.

Решали систему линейных алгебраических уравнений, в которые входят различные сочетания сумм произведений координатных функций и их производных различных порядков на неизвестные коэффициенты. Расчеты выполняли по специально разработанной программе. Был получен комплекс закономерностей, описывающих НДС породно-анкерной оболочки, армированной по различным пространственным схемам. Зависимость для определения безразмерного прогиба породно-анкерной оболочки со стороны кровли выработки имеет вид:

$$\begin{aligned} w/P &= f(u_1, u_2, u_3) \\ w/P &= (5,7u_1 - 0,32u_2 + 19,41u_1u_2 + 7,29u_1u_3 + \\ &+ 0,31u_2u_3 - 0,03u_1u_2u_3 - 0,64) \cdot 10^{-3}, R^2 = 0,997, \quad (3) \\ u_1 &= q/E_{np}, u_2 = H/R, u_3 = t/d_a, \end{aligned}$$

где E_{np} – приведенный модуль упругости породно-анкерной оболочки, Па; H – глубина работ, м; R – приведенный радиус выработки, м; t – расстояние между анкерами, м; P – периметр выработки, м.

Установлено, что НДС многослойной породно-анкерной оболочки, армированной по различным пространственным схемам и являющейся составной частью системы «рама – оболочка из укрепленных анкерами пород», описывается зависимостями от безразмерных параметров, учитывающих внешнюю нагрузку, приведенные упругие параметры породно-анкерной оболочки, ее размеры и физико-механические свойства горных пород. Это позволило дифференцировано рассчитать параметры рамной и анкерной крепей.

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов, выполненных по разработанной методике, показало их удовлетворительную сходимость (максимальное расхождение не превышало 21%). Разработанная математическая модель позволила с учетом данных о количестве составляющих оболочку слоев, их физико-механических свойств и геометрических размеров горной выработки рассчитать рациональные параметры комбинированной крепи (рамы и анкерной системы), обеспечивающие длительную устойчивость поддерживаемой выработки.

Установление особенностей взаимодействия анкеров с породным массивом позволило разработать новые схемы армирования пород (рис. 2) и способы крепления выработок, основанные на использовании несущей способности породного массива [9, 10].

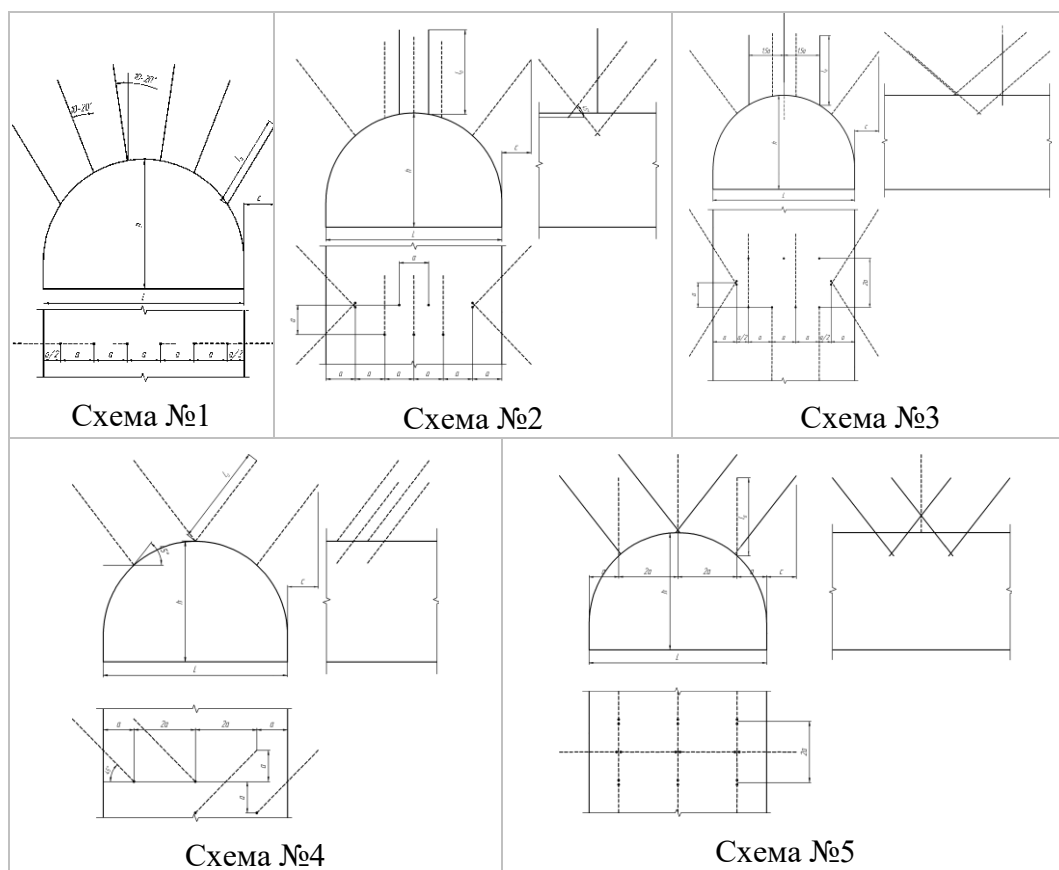


Рис. 2. Схемы анкерования кровли и боков выработки

Выполненный комплекс исследований позволил разработать методику расчета параметров рамно-анкерных конструкций крепи, алгоритм которой представлен на рис. 3. При определении параметров комбинированной

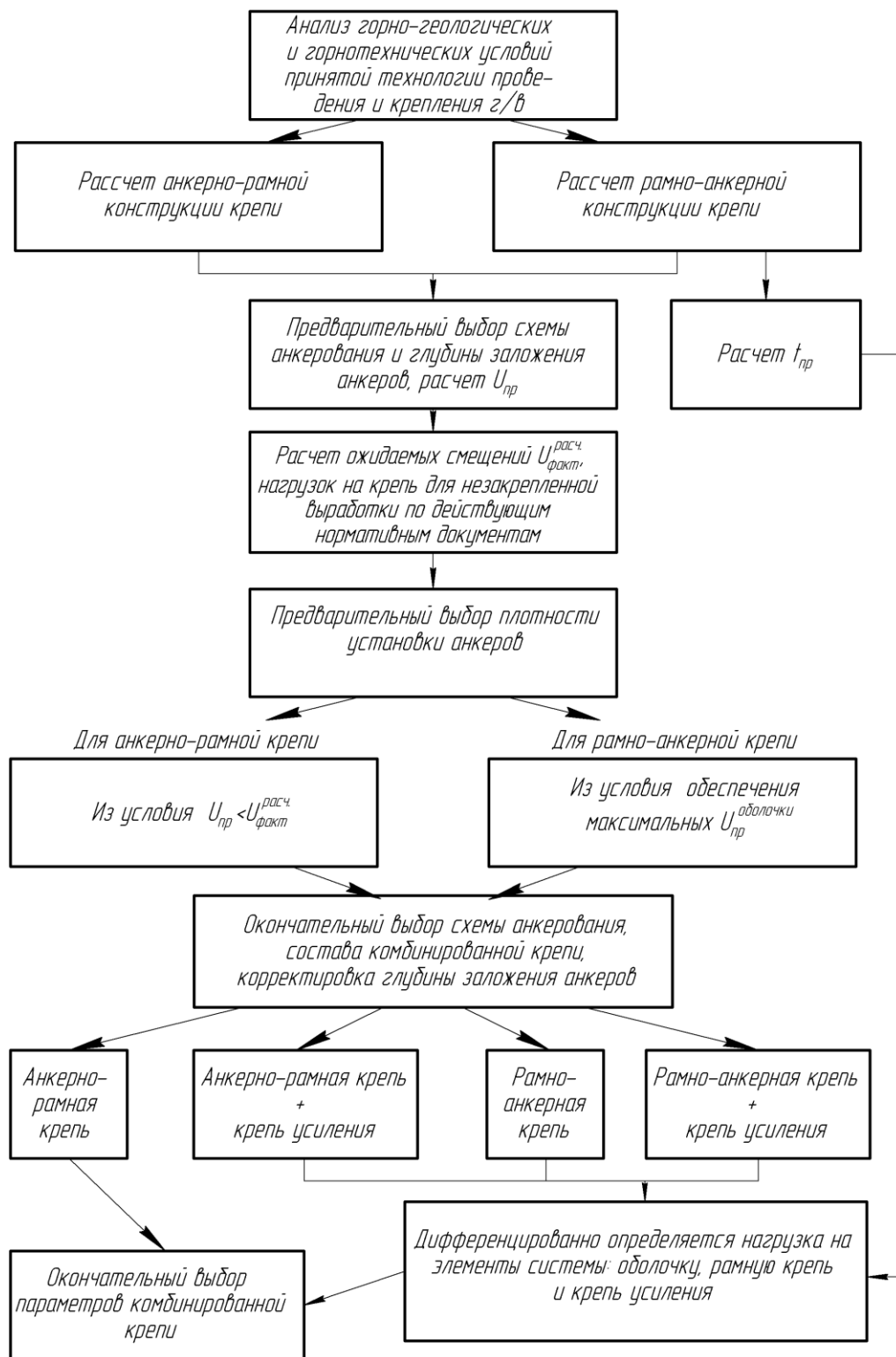


Рис. 3. Блок-схема к расчету параметров комбинированной крепи

(анкерно-рамной и рамно-анкерной) крепи впервые предложено дифференцированно рассчитывать ее элементы с учетом долей нагрузок, воспринимаемых ими по мере включения их в работу. Из общей нагрузки, действующей на систему, выделяется часть, воспринимаемая оболочкой из укрепленных анкерами пород, и нагрузка, воспринимаемая рамной крепью.

При этом в предлагаемой методике учитываются следующие факторы: характер развития деформационных процессов в массиве; ожидаемая степень разрушения вмещающих пород, а также их остаточная несущая способность.

Шахтные испытания и внедрение рекомендаций по креплению выработок комбинированной крепью проводили в условиях 7-го северного конвейерного штрека пл. $m_5^{1в}$ шахты «Добропольская» [11]. Для оценки технической эффективности разработанных рекомендаций на контрольных (с рамной крепью) и экспериментальных участках оборудовали комплексные замерные станции. Экспериментальный участок располагался между 6-м и 97-м пикетами. Выработка проводилась с двухсторонней подрывкой по породам с прочностью 15–45 МПа. Мощность пласта – 1,2 м, угол залегания пород – 10° . Выработка проводилась комбайном, сечение – арочное. На экспериментальном участке (1840 м) параметры крепления выработки были следующие: рамная крепь – КМП-А3/13,8, шаг установки рам – 0,8 м, схема установки усиливающей анкерной крепи – № 4, длина анкеров – 2,4 м, плотность установки анкеров – $0,96 \text{ анк/м}^2$, угол наклона анкеров к вертикальной плоскости – 30° с наклоном в сторону забоя. Крепление контрольного участка осуществлялось металлической рамной податливой крепью с плотностью установки 2 рамы/м. Результаты наблюдений обрабатывали путем построения графиков смещений глубинных реперов и изменения k_p на участках скважины между реперами (рис. 4, 5).

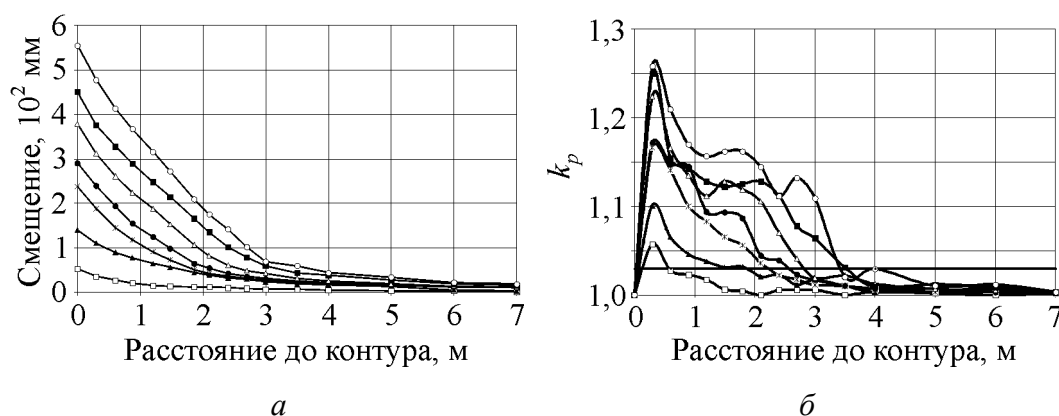


Рис. 4. Смещения глубинных реперов в кровле выработки (а) и изменения k_p на участках скважины между глубинными реперами (б) на контрольном участке: \square – 3 сут, \blacktriangle – 10 сут, \square – 21 сут, \bullet – 30 сут, Δ – 59 сут, \blacksquare – 103 сут, \circ – 185 сут, — — граница

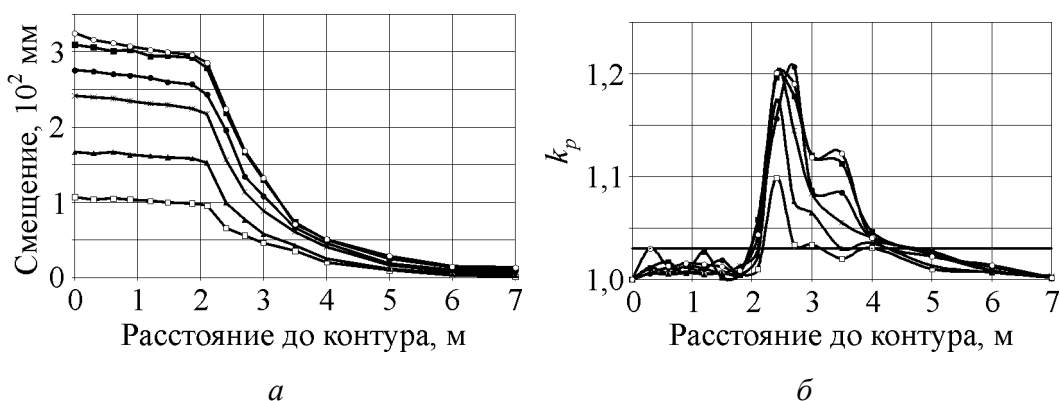


Рис. 5. Смещения глубинных реперов в кровле выработки (а) и изменения k_p на участках скважины между глубинными реперами (б) на экспериментальном участке: □ – 12 сут, ▲ – 25 сут, ◻ – 64 сут, ● – 99 сут, ■ – 150 сут, ○ – 181 сут, — – граница

Внедрение рекомендаций позволило в сравнении с выработками, закрепленными только рамной крепью: уменьшить смещения кровли в 1,7 раза, боков – в 1,5, увеличить темпы проведения выработок в 2 раза, увеличить шаг установки рамной крепи в 1,6 раза. Экономический эффект от внедрения предложенных рекомендаций составил 4,1 млн. грн.

Положительные результаты шахтных испытаний и внедрения конструкций комбинированной крепи позволили утвердить объединением ГП «Добропольеуголь» стандарт предприятия [СТП (02070826)(26319481):2010] «Методика определения параметров анкерных породо-армирующих систем для обеспечения устойчивости горных выработок».

1. Широков А.П. Анкерная крепь: справочник / А.П. Широков. – М. : Недра, 1990. – 295 с.
2. Бондаренко В.І. Геомеханіка взаємодії анкерного та рамного кріплення гірничих виробок в єдиній вантажонесучій системі. Монографія / В.І. Бондаренко, Ю.Я. Чередниченко, І.А. Ковалевська, Г.А. Симанович, О.В. Вівчаренко, В.В. Фомичов // Дніпропетровськ: «ЛізуновПрес», 2010. – 174 с. – Російською мовою.
3. Mark C. Design of Roof Bolt Systems / C. Mark / Proceedings, New Technology for Coal Mine Roof Support : NIOSH Publication No. 2000-151, IC 9453. – P. 111–131.
4. Новиков А.О. Развитие научных основ управления устойчивостью выработок с использованием анкерных систем: : дис. ... докт. техн. наук : 05.15.02. : защищена 07.07.11 : утв. 22.12.11 / А.О. Новиков – Донецк, 2011. – 479 с.
5. Система забезпечення надійного та безпечного функціонування гірничих виробок із анкерним кріпленням. Загальні технічні вимоги: СОУ 10.1.05411357.010:2008
6. Новиков А.О. Исследования влияния усиления рамной крепи анкерами на процесс формирования вокруг выработки зоны разрушенных пород [Текст] / А.О. Новиков, И. Н. Шестопалов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Гірничо-геологічна» / Редкол.: Башков Є.О. (голова) та ін. – Вип. 16(206). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. – С. 173–179

7. Дрибан В.А. О деформировании массива, вмещающего выработки с комбинированной рамно-анкерной крепью / В. А. Дрибан, А. О. Новиков, И. Н. Шестопа-лов // Зб. наук. пр. УкрНДМІ НАНУ. – Донецьк, 2013. – №12. – С. 228–254.
8. Новиков А.О. О напряженно-деформированном состоянии системы «рама-оболочка из укрепленных анкерами пород» [Текст] / А. О. Новиков, И. Н. Ше-стопапов // Науковий вісник національного гірничого університету. – Дніпро-петровськ, 2012. – №6. – С. 66–71.
9. Патент 42320 Україна, МПК Е 21 D 11/00, Е 21 D 13/00, Спосіб кріплення гірничих виробок / Касьян М. М., Плетнев В. А., Гладкий С.Ю., Сахно І.Г., Новіков О.О., Шестопапов І.М.; заявитель и патентообладатель ДонНТУ. – №u200901503; заявл. 23.02.2009 ; опубл. 25.06.2009. Бюл. №12. – 6 с.: ил.
10. Патент 62682 Україна, МПК Е 21 D 21/00, Рамно-анкерне кріплення / Касьян М.М., Новіков О.О., Петренко Ю.А., Шестопапов І.М., Дрипан П.С., Виговський Д.Д.: заявитель и патентообладатель ДонНТУ. – №u201101509; заявл. 10.02.2011; опубл. 12.09.2011. Бюл. №17. – 6 с.: ил.
11. Новиков А.О. Проверка рекомендаций по расчету параметров комбинированной крепи / А.О. Новиков, И.Н. Шестопапов // Зб. наук. пр. УкрНДМІ НАНУ. – До-нецьк, 2012. – №1. – С. 250–271.

О.О. Новіков, І.М. Шестопапов

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ДЕФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ «КРІПЛЕННЯ – ОБОЛОНКА З УКРІПЛЕНИХ АНКЕРАМИ ПОРІД» ДЛЯ ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РАМНО-АНКЕРНОГО КРІПЛЕННЯ

У статті викладено результати виконаних у ДонНТУ комплексних досліджень, при-свячених вивченню особливостей та закономірностей кінетики деформування порідного масиву, що вміщує виробки, закріплені рамно-анкерними конструкціями кріплення. Обґрунтовано раціональні параметри кріплення та розроблено методика їхнього розрахунку

Ключові слова: кріплення, вміщуючий масив, методика розрахунку, параметри кріплення

A.O. Novikov, I.N. Shestopalov

RESEARCH OF KINETICS OF DEFORMATION OF «SUPPORT – THE COVER FROM THE STRENGTHENED BREEDS» SYSTEM FOR JUSTIFICATION OF PARAMETERS FRAME AND ANCHOR FIX

In article results of the complex researches executed in DONNTU on studying of features and regularities of kinetics of deformation of the pedigree massif containing develop-ments are stated, fixed by frame and anchor designs fix which allowed to prove rational parameters fix and to develop a technique of their calculation.

Keywords: support, the containing massif, a calculation procedure, parameters fix