

УДК 622.83

**д.т.н. Бабиук Г.В.,
Ермаков А.Н.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)**

ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАМНОЙ КРЕПИ С ПОРОДАМИ ПРИ ЕЕ РАСПОРЕ

Запропоновані моделі для визначення параметрів системи «кріплення-масив» при розпорі рамного кріплення.

Ключові слова: породний масив, рамне кріплення, розпір, навантаження, напруження, деформація.

Предложены модели для определения параметров системы «крепь-массив» при распоре рамной крепи.

Ключевые слова: породный массив, рамная крепь, распор, нагрузка, напряжения, деформации.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В настоящее время одним из основных типов крепи подготовительных выработок на пологих угольных пластах является металлическая податливая рамная крепь КМП-Т (П) трапециевидной (прямоугольной, бочкообразной) формы из специального взаимозаменяемого профиля (СВП) [1, 2]. Такая крепь обладает повышенной вертикальной податливостью (до 1300мм) и высокой несущей способностью (до 400кН) в зависимости от вида податливых узлов. На практике рамную крепь возводят, как правило, без заполнения закрепных пустот, поэтому долгое время она работает без надлежащего контакта с породным массивом и с огромным конструктивным зазором между породным обнажением и элементами крепи, особенно при буровзрывном способе проведения выработки. Поэтому в начальный момент после сооружения выработки такая крепь и породный массив конструктивно работают обособленно, это ведет к образованию обширных зон неупругих деформаций и неиспользованию собственной несущей способности пород, снижает работоспособность крепи и приводит к необходимости частых ремонтов и перекреплений выработки. В этой связи при решении проблемы обеспечения устойчивости подготовительных выработок актуальным является разработка способов, направленных на повышение эффективности работы податливой рамной крепи ресурсосберегающими методами.

Анализ последних достижений и публикаций. Во многом данная проблема может быть решена за счет активного распора рамной податливой крепи на различных этапах существования выработки [3], что приведет к уплотнению нарушенных пород, более полному использованию несущей способности пород за пределом прочности и повышению работоспособности крепи.

Значимые экспериментальные исследования по изучению влияния отпора крепи на устойчивость подготовительных выработок в условиях шахт Донбасса выполнены под руководством проф. И.Л. Черняка [4, 5]. Эти эксперименты позволили изучить качественные и количественные характеристики взаимодействия крепи и пород в режимах пассивного отпора и предварительного распора как вне, так и в зонах влияния очистных работ при креплении выработок рамной и арочной крепью. Проведенные инструментальные наблюдения за смещениями пород подтвердили эффективность распора крепи при втором и третьем типах (по Черняку) деформирования массива вокруг выработок и позволили установить степень его влияния на величину смещений пород для отдельных горно-геологических условий.

Влияние крепи, быстро воспринимающей нагрузку, на величину конвергенции пород в штреках исследовалось и за рубежом. По данным работы [6] даже при использовании крепи со сверхвысоким сопротивлением, например с $1200 \text{ кН}/\text{м}^2$ (такие крепи неприемлемы на практике по экономическим и техническим соображениям), не удается полностью приостановить развитие смещений пород. При этом эффект снижения конвергенции за счет применения крепи с более высоким сопротивлением падает при мере его повышения. При сопротивлении крепи $50 \text{kH}/\text{m}^2$ можно предупредить 40%, а при сопротивлении $500 \text{kH}/\text{m}^2$ – 60% смещений пород, ожидающихся в незакрепленной выработке. В принципе удельное сопротивление крепи порядка $400 \text{kH}/\text{m}^2$ вполне может быть реализовано за счет уменьшения расстояния между рамами и установки промежуточных стоек. Однако такое решение проблемы будет сопровождаться очень высокими материальными издержками.

Выполненные во ВНИМИ [7] исследования влияния сопротивления крепей на состояние выработок показали, что каждому сочетанию горно-геологических условий и геометрических параметров выработки соответствует нелинейная зависимость отпора крепи от податливости, являющаяся характеристикой взаимодействия крепи с массивом. Тогда точка пересечения кривой взаимодействия и деформационной зависимости крепи (жесткости) характеризует состояние силового равновесия системы «крепь-массив» для конкретных условий.

Однако до настоящего времени не установлены закономерности совместного деформирования породного массива и крепи при ее прину-

дительном распоре и не определены рациональные параметры способа [3], что является актуальной задачей.

Целью исследований является обоснование моделей для оценивания эффективности взаимодействия распорной крепи с породами и выявление закономерностей совместного деформирования системы «крепь-массив».

Изложение основного материала. В случае активного распора крепи параметры ее взаимодействия с породами, в первую очередь, зависят от реакции породного массива на силовое воздействие, которая, совместно с горным давлением, составляет внешнюю нагрузку на крепь. При этом породы в результате совместной работы крепи с массивом в значительной мере сами формируют действующее на крепь реактивное давление, зависящее не только от конструктивных особенностей крепи, активной распорной нагрузки и жесткости элементов, но и от деформационных характеристик породы и контактных условий взаимодействия.

Для **теоретического** изучения давления на контакте системы «крепь-порода», а также внутренних усилий в элементах крепи, выбран метод расчета инженерных конструкций на упругом основании [8]. В качестве основной предпосылки принято, что породный массив является сплошной однородной упругой средой, характеризуемой модулем деформации E_0 и коэффициентом Пуассона μ , а верхняк крепи рассматривается как тонкий упругий брус (балка), деформации по высоте сечения и трение между балкой и горной породой не учитываются, что идет в запас прочности.

При выводе формул для расчета верхняка крепи с учетом упругого основания использовано дифференциальное уравнение упругой линии балки [8]:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + p_x = \varphi_x, \quad (1)$$

где EI – жесткость балки (верхняка крепи);

y – вертикальное перемещение нейтральной оси балки;

x – координаты точки по длине балки;

p_x – распределенная реакция со стороны массива;

φ_x – заданная активная нагрузка (усилие распора).

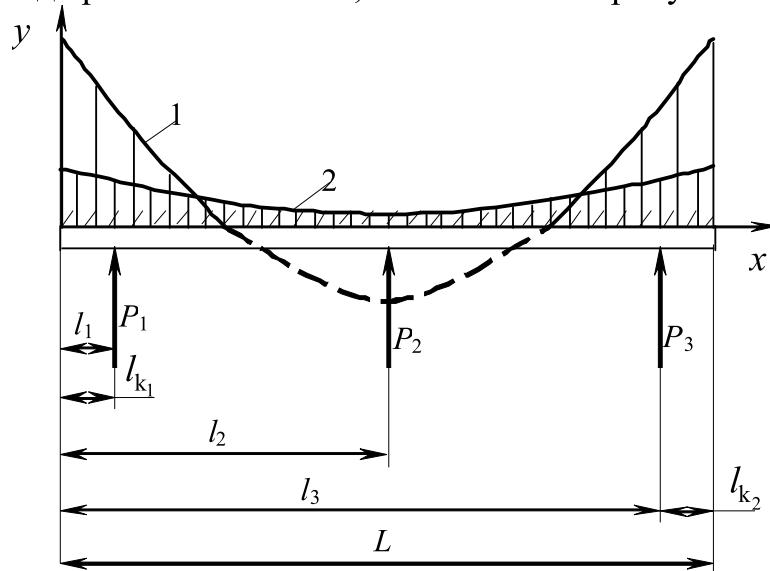
Неизвестными величинам в (1) являются y и p_x . Поэтому для их определения составляется еще уравнение контактности из условия, что во время деформирования балка по всей длине должна взаимодействовать с породой, а реактивное давление представляется четырехчленным степенным рядом:

$$p_x = a_0 + \frac{2a_1}{L} \left(x - \frac{L}{2} \right) + \frac{4a_2}{L^2} \left(x - \frac{L}{2} \right)^2 + \frac{8a_3}{L^3} \left(x - \frac{L}{2} \right)^3, \quad (2)$$

где L – длина балки (верхняка);

a_0, a_1, a_2, a_3 – неизвестные параметры, зависящие от вида нагрузки и ее местоприложения, жесткости и длины балки, а также модуля деформации пород.

В общем случае загружение сосредоточенными силами в месте примыкания стоек верхняка, взаимодействующего с породами, можно представить в виде расчетной схемы, показанной на рисунке 1.



1 – p_x для балки без консолей; 2 – p_x для балки с консолями

Рисунок 1 – Расчетная схема к определению контактного давления

Частными ее случаями являются схемы с отсутствующей промежуточной стойкой и без консолей по концам верхняка, т.е. при $P_2=0$ и $l_k=0$. На схеме для простоты углом наклона боковых стоек пренебрегли, так как горизонтальные составляющие распорных сил сравнительно невелики и уравновешивают друг друга.

В наиболее простом случае симметричного загружения параметры $a_1=a_3=0$, а выражения для определения a_0 и a_2 записываются в виде [8]:

$$a_0 = \frac{8252 - 34\alpha}{13440 + 29\alpha} \cdot \frac{2P_i}{L}; \quad a_2 = \frac{5188 - 63\alpha}{13440 + 29\alpha} \cdot \frac{2P_i}{L}, \quad (3)$$

где P_i – усилие, создаваемое домкратом при распоре крепи;

α – показатель гибкости, который, если обозначить ширину балки через ϑ , можно определить по формуле

$$\alpha = \pi \cdot E_0 \cdot \vartheta \cdot L^3 / (EI). \quad (4)$$

Отсюда, учитывая симметричный характер нагрузки, реакцию массива (2) на действие верхняка крепи можно записать в виде

$$p_x = a_0 + 4a_2(\zeta - 0,5)^2, \quad (5)$$

где $\zeta = x/L$ – приведенная абсцисса перемещающейся точки.

Для анализа выбранной модели при значении параметров $E_0 = 50 \dots 5 \cdot 10^7 \text{ кН/м}^2$, $P = 0 \dots 210 \text{ кН}$, $L = 1,0 \dots 4,2$, $P_2/P_1 = P_2/P_3 = 0 \dots 4$, $l_k = 0 \dots 0,8 \text{ м}$ для СВП-22 и СВП-27 рассчитаны реактивное давление горных пород p_x , распределение напряжений в упругом основании, поперечные силы и изгибающие моменты и построены эпюры по длине верхняка. Их анализ показал, что выбранная математическая модель дает приемлемые для практики результаты лишь при оценке контактного давления, которое распределяется вдоль верхняка крайне неравномерно. При приложении сил распора $P_1 = P_3 = 50 \text{ кН}$ по концам верхняка ($l_k = 0$) теоретическая эпюра реактивного давления пород (1 на рисунке 1) распределена вдоль верхняка по параболе с максимальным давлением ($p_x = 161 \text{ кН/м}$) по краям балки в местах опирания верхняка на стойки и минимальным ($p_x = -31 \text{ кН/м}$) по оси выработки, причем в крепких породах (при модуле деформации $E_0 \geq 5 \cdot 10^4 \text{ кН/м}^2$) контактное давление в центре выработки меняет знак. Относительные прогибы балки направлены внутрь выработки и имеют максимальное значение по оси симметрии. В реальных же условиях при отсутствии связи верхняка с массивом реактивный отпор в срединной его части (штриховая линия на рисунке 1) будет равен нулю, а его значения по краям верхняка еще более возрастут. Следует заметить, что эпюра p_x на рисунке 1 приведена для профиля СВП-27, пролета $L = 3,0 \text{ м}$ и модуля деформации пород $E_0 \geq 5 \cdot 10^6 \text{ кН/м}^2$.

Более рациональное распределение контактного давления при распоре крепи достигается за счет использования консолей, применяемых в строительстве для повышения работоспособности балочных конструкций. При активном силовом воздействии на породное обнажение верхняком с консолями уплотнение пород кровли производится по всей ширине выработки. Для рассмотренных выше условий величина p_x по

краям балки снижается до 52 кН/м, а в центре пролета возрастает до 14 кН/м, т.е. распределение давления от верхняка становится более равномерным. В верхняке с консолями распределение вертикальных прогибов изменяется кардинально. Так, при постепенном перемещении сил P_1 и P_3 от края верхняка к его середине прогибы внутрь выработки снижаются, а при относительной длине консоли $l_k / L = 0,15$ они приобретают противоположное направление с максимумом по середине балки. Это согласуется с распределением прогибов от сил горного давления, которые также максимальны по центру, но направлены внутрь выработки.

Благодаря наличию управляющих консолей, давление пород, приходящееся на консольные участки верхняка, как бы противодействует силам горного давления в пролетной части выработки. Регулируя длину консолей и контактные условия их взаимодействия с породным обнажением с учетом деформационных свойств пород и верхняка крепи, а также величину усилия предварительного распора, можно, с одной стороны, за счет более полного использования несущей способности пород в уплотненной зоне снизить нагрузки на крепь, а, с другой стороны, добиться более рационального распределения усилий в верхняке, что равносильно экономии металла. Так, например, в верхняке с $l_k = 0,75$ м предельная равномерно распределенная нагрузка, установленная из условия образования пластических деформаций, превышает 1,45 раза предельную нагрузку для обычного верхняка.

Исследование закономерностей совместного деформирования системы «крепь-массив» выполнено в **лабораторных** условиях методом физического моделирования [7] с учетом особенностей запредельного деформирования в сложном напряженно-деформированном состоянии. Фрагмент породного массива, состоящий из монолитных или связно-нарушенных пород, имитировался гипсо-песчаной кубической моделью, а воздействие на него рамной крепи воспроизводилось с помощью специального устройства, имеющего деформационную зависимость, подобную крепи.

В ходе испытания модели системы «крепь-массив» подвергались неравнокомпонентному трехосному сжатию в режиме многократного нагружения и разгрузки с регистрацией действующих усилий, а также продольных и поперечных перемещений. Для обеспечения подобия напряженного состояния приkontурных пород главная максимальная компонента напряжений σ_1 воспроизводилась активной нагрузкой от пресса, а деформация ε_1 в этом направлении контролировалась путем непрерывного измерения перемещений его плит. Отсутствие деформаций вдоль выработки ($\varepsilon_2 = 0$) обеспечивалась установкой по двум противоположным граням куба ограничителей перемещений. В третьем главном

направлении (радиальном) минимальная компонента напряжений σ_3 воспроизводилась подпором (распором) крепи, а перемещения фиксировались индикаторами в центре граней.

Результаты испытаний моделей представлялись в виде полных диаграмм «напряжение-деформация» с учетом запредельного деформирования. Для минимизации числа опытов при одновременном гарантировании заданной точности лабораторные исследования производились с использованием методов планирования эксперимента [9], что позволило получить математическую зависимость определяемых параметров от совокупного действия влияющих факторов.

Эксперимент состоял из двух этапов: вначале испытывались однородные, а затем трещиноватые модели. На первом шаге выбора математической модели система «крепь-массив» была представлена четырьмя факторами, характеризующими управляющие воздействия крепи: x_1 – плотность установки крепи; x_2 – усилие сопротивления узлов податливости; x_3 – податливость крепи; x_4 – момент сопротивления верхняка. На втором шаге к перечисленным факторам добавлялись трещинная пустотность пород в направлении минимального главного напряжения (коэффициент поперечных деформаций) x_5 , т.е. фактор, контролируемый при активном силовом воздействии на массив горных пород, а модель уточнялась. При таком подходе вектор входных факторов \bar{x} изображается точкой в многомерном факторном пространстве x_j , $j = 1, 2, \dots, k$. Если обозначить через i номер опыта ($i = 1, 2, \dots, n$), то комплекс условий i -го опыта можно записать как $\bar{x}_i = |x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}|$, где x_{ij} – уровень j -го фактора в i -ом опыте; $k = 5$ – число факторов. Область определения факторного пространства назначена на основании анализа априорной информации, причем каждый из управляемых факторов был определен на двух уровнях (верхнем и нижнем).

Исследуемая система, кроме того, характеризуется выходными параметрами y_s , $s = 1, 2, \dots, m$, которыми являются числовые показатели диаграмм деформирования пород (предельная $[\sigma]$ и остаточная σ_0 прочности; модули упругости E и полных деформаций D ; коэффициенты Пуассона μ и полных поперечных деформаций μ_n , модуль спада M и коэффициент разрыхления k_p и т.д.). Выходные параметры представлялись в безразмерном виде, что дает возможность распространить результаты моделирования на породы иной прочности. Так, например, уровень сохранившейся несущей способности моделей характеризует относительная величина $\sigma^* = \sigma / [\sigma_m]$, где $[\sigma_m]$ – максимальное сопротивление модели без крепи, тогда отношение $[\sigma_k] / [\sigma_m] = k_k$ представля-

ет собой коэффициент повышения сопротивляемости массива за счет воздействия крепи. Аналогичным образом коэффициент $\beta_k = M_k / M_m$ характеризует снижение модуля спада на запредельной ветви, а коэффициент $\zeta_k = \varepsilon_{pk} / \varepsilon_{pn}$ – увеличение запредельных деформаций, где ε_p – деформации, характеризующие степень разупрочнения пород за пределом прочности.

В качестве примера ниже приведено полученное экспериментально уравнение регрессии для коэффициента повышения сопротивляемости массива:

$$k_k = 0,06 + 0,612h_k - 0,014N_k + 0,014W_x - \\ - 0,06k_{tp} + 0,021n_k \cdot N_k - 0,007n_k W_x, \quad (6)$$

где n_k – плотность установки рам крепи (1...2 рам/м);

N_k – сопротивление крепи в податливом режиме (16,3...34,9 кН/раму);

W_x – момент сопротивления верхняка ($74,8..133,5\text{см}^3$);

k_{tp} – коэффициент трещинной пустотности (0...9%).

Следует отметить, что формула (6) справедлива только в приведенных диапазонах варьирования факторов, а интерпретация степени влияния факторов по величинам и знакам изменения коэффициентов регрессии при таком виде уравнения невозможна. Подобные зависимости использованы для построения nomogramm приближенного определения коэффициентов повышения сопротивляемости k_k , увеличения запредельных деформаций ζ_k и снижения модуля спада β_k массива при взаимодействии с рамной крепью.

Проведенные лабораторные исследования показали, что деформационные характеристики системы «крепь-массив» существенно отличаются от характеристик отдельных ее элементов. Это отличие обусловлено эффектом механического взаимодействия крепи и пород, с объединением которых в систему последняя приобретает специфические интегративные свойства, не присущие ни одной из слагающих ее подсистем. При этом характеристики системы не являются простой суммой характеристик ее элементов, а представляют собой сложные зависимости, отражающие совокупное действие влияющих факторов. Так, например, сопротивляемость породного массива в режиме взаимодействия с рамной крепью увеличивается с ростом плотности установки рам, несущей способности крепи в податливом режиме и момента сопротивления спецпрофиля верхняка и уменьшается с ростом трещинной пус-

тотности пород, причем степень влияния последнего фактора в сравнении с остальными максимальна.

На основание выполненных теоретических и лабораторных исследований предложена модель взаимодействия податливой крепи с породным массивом, которая графически демонстрируется на рисунке 2.

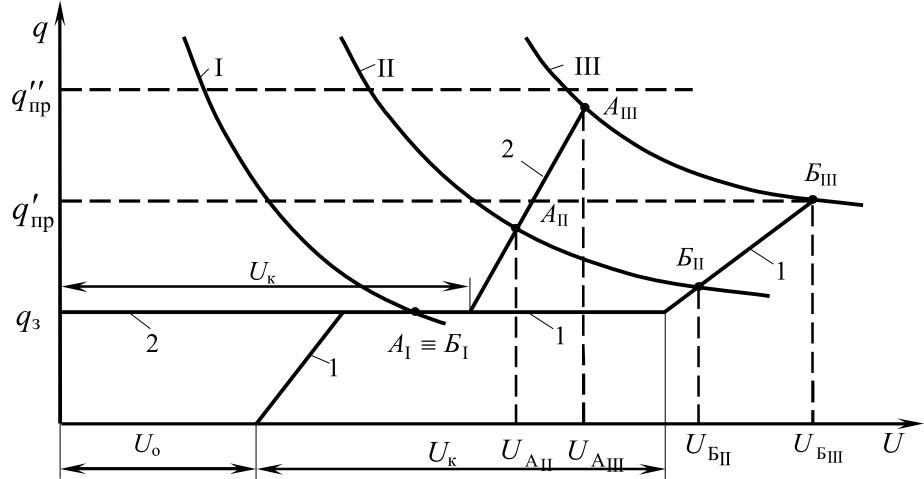


Рисунок 2 – Графики взаимодействия податливой крепи с породным массивом

Состояние массива, ослабленного выработкой, характеризуется тремя кривыми, построенными в координатах $q - u$ (q – нагрузка, U – смещения), которые для различных условий обозначены: I – легкие; II – средние; III – тяжелые. Деформационные характеристики податливой крепи представлены на рисунке 2 зависимостями 1 и 2. График 1 соответствует установке крепи без предварительного распора с начальными смещениями породного контура U_0 за промежуток времени от обнажения пород до момента включения крепи в работу, а график 2 – с предварительным распором, равным сопротивлению замков крепи при проскальзывании q_3 и $U_0 \approx 0$. Конструктивная податливость крепи равна U_k . После исчерпания конструктивной податливости крепь работает с постоянной жесткостью, равной $k_1 = q_1/U_1$ при пассивном отпоре и $k_2 = q_2/U_2$ при монтаже рамы с предварительным распором, причем $k_2 > k_1$, так как при активном распоре верхняк крепи работает совместно с уплотненными породами, имеющими большее сопротивление за пределом прочности. Точки пересечения A и B линий 1 и 2 с кривыми I, II, III соответствуют моменту равновесия системы «крепь-массив», при этом смещения пород U_A, U_B и реакции крепи q_A и q_B являются характеристиками конкретных условий взаимодействия массива с крепью.

Из приведенного графика следует, что в легких условиях, независимо от способа монтажа крепи, равновесное состояние достигается до исчерпания ее конструктивной податливости (в одной и той же точке кривой I при малых смещениях и большой прочности пород), поэтому в данных условиях предварительный распор крепи излишен. В средних условиях (кривая II) равновесие наступает в точках A_{II} и B_{II} до появления предельной нагрузки на безконсольный верхняк q'_{np} . При этом общие смещения пород при распоре крепи меньше смещений в случае пассивного отпора на величину

$$U_{B_{II}} - U_{A_{II}} = U_0 + \frac{q_1}{k_1} - \frac{q_2}{k_2}. \quad (7)$$

В сложных условиях при взаимодействии крепи с массивом в режиме пассивного отпора равновесие системы может быть достигнуто на пределе работоспособности безконсольного верхняка (точка B_{III}). Распор крепи обеспечивает равновесие системы в точке A_{III} до появления предельной нагрузки на консольный верхняк q''_{np} . При этом смещения $U_{A_{III}}$ существенно меньше смещений $U_{B_{III}}$, реализующихся при работе крепи без распора.

Таким образом, равновесие системы «крепь-массив» в результате взаимодействия ее элементов соблюдается, если действующая нагрузка не превышает несущей способности крепи, причем оно будет тем более устойчивым к внешним воздействиям, чем на более ранних стадиях за предельного деформирования пород достигается равенство между остаточной прочностью пород и действующими в зоне неупругих деформаций напряжениями, которые, в свою очередь, во многом зависят от величины и характера распределения активного давления крепи на породное обнажение.

Выводы. За счет более полного использования несущей способности пород кровли при распоре крепи и разгружающего эффекта консолей верхняка рамную крепь можно приспособить к изменяющейся горно-геологической обстановке при проведении и поддержании подготовительных выработок и значительно повысить эффективность ее работы в средних и тяжелых условиях. Установленные закономерности позволяют обосновать параметры ресурсосберегающего способа управления состоянием массива за счет активного распора крепи, обеспечивающего повышенную надежность выработок и снижение стоимости их проведения и поддержания.

Библиографический список

1. Каратников В.Н. *Крепление капитальных и подготовительных горных выработок. Справочник / В.Н. Каратников, В.Б. Клейменов, А.Г. Нуждихин – М.: Недра, 1989.* – 571с.
2. Сытник А.А. *Рамные крепи горных выработок. Обзорная информация и справочные материалы / А.А. Сытник, Ф.С. Зигель, В.Ф. Компанец, В.С. Поляковский. – Донецк: ЦБНТИ, 1992.* – 35с.
3. Пат. 10567A України. МКІ Е21Д 11/14. *Спосіб розпору рамного податливого кріплення / Бабіюк Г.В., Литвинський Г.Г., Стельмах В.М.- опубл. 25.12.96, Бюл. № 4.*
4. Черняк И.Л. *Управление горным давлением в подготовительных выработках глубоких шахт / И.Л. Черняк, Ю.И. Бурчаков. – М.: Недра, 1984.* – 304с.
5. Черняк И.Л. *Влияние сопротивления крепи на устойчивость подготовительных выработок / И.Л. Черняк, В.Г. Ильюшенко, Е.Л. Звягильский // Уголь Украины. – 1990. – №8. – С.27-28.*
6. Якоби О. *Практика управления горным давлением Пер. с нем. / О.Якоби. – М.: Недра, 1987.* – 566с.
7. *Моделирование в геомеханике / Ф.П. Глушихин, Г.Н. Кузнецов, М.Ф. Шклярский и др. – М.: Недра, 1991.* – 240с.
8. Симвулиди И.А. *Расчет инженерных конструкций на упругом основании: [учебн. пособие для строит. спец. вузов] / И.А. Симвулиди. – М.: Высшая школа, 1987.* – 576с.
9. Адлер Ю.П. *Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.М. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976.* – 279с.