

УДК 622.28.281

К ВОПРОСУ РАСЧЕТА РАМНОЙ ПОДАТЛИВОЙ КРЕПИ

Южанин И. А., Дрибан В. А.
(УкрНИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

На основі детального аналізу умов підтримання гірничих виробок за різних геомеханічних ситуацій розроблено перспективні напрями вдосконалення методів розрахунку рамного податливого кріплення.

Based on the detailed analysis of care and maintenance of mine workings in different geomechanical situations prospective lines to improve frame yielding support calculation methods are developed.

В настоящее время рамная податливая крепь является основным видом крепи горных выработок на угольных шахтах, об этом свидетельствует тот факт, что указанная крепь используется почти в 90 % всех подготовительных выработок.

В основе нормативных методов расчета крепи горных выработок, в т. ч. и рамных податливых [1, 2, 3, 4], лежит величина смещений пород на их контуре, которая определяется в зависимости от комплекса горно-геологических и геомеханических условий. В частности, при расчете учитываются прочностные, реологические и структурные свойства окружающих пород, глубина расположения, угол залегания пород, ориентация горных выработок по отношению к элементам напластования, геометрические параметры выработок. К геомеханическим условиям следует отнести параметры расположения выработок по отношению к зонам повышенного горного давления (над и подработка, зоны опорного давления, взаимовлияние горных выработок и др.), определяющие дополнительные концентрации напряжений в массиве, вызванные ведением горных работ.

На основе величины смещений пород в выработках ВНИМИ разработана их классификация по устойчивости [1], получившая широкое распространение (табл. 1).

Таблица 1
Классификация пород по устойчивости ВНИМИ

Категория устойчивости	Оценка состояния устойчивости	Величина смещения пород на контуре выработки U , мм
I	Устойчивое	До 50
II	Средней устойчивости	50–200
III	Неустойчивое	200–500
IV	Весьма неустойчивое	Более 500

В условиях I–II категорий устойчивости допускается эксплуатация выработок без применения крепи либо с использованием облегченных видов крепей: набрызгбетона, анкеров, их комбинаций. В большинстве указанных условий крепь принимается без расчета.

В породах III–IV категорий устойчивости параметры крепи (толщину, плотность установки рам, величину необходимой податливости) определяют расчетным путем.

В методиках ВНИМИ, УкрНИМИ [1–3] нагрузка на крепь определяется по величине смещений пород на контуре выработок на основе установленных эмпирических зависимостей, полученных на обширном экспериментальном материале.

В методике ДонУГИ [4] величина смещений пород используется косвенным образом: по ней с помощью некоего коэффициента α определяется величина отслоившихся пород в своде выработки h_c . Коэффициент α учитывает геомеханические условия расположения и поддержания выработки. Нагрузка на крепь P формируется весом отслоившихся пород в своде выработки:

$$P = \frac{2}{3} B_{np} \gamma h_c, \quad (1)$$

где B_{np} – ширина выработки в проходке, м;

γ – объемный вес породы, кН/м^3 .

Таким образом, для расчета крепи подготовительных выработок используется давно известная формула свода обрушения, полученная М. М. Протодяконовым и которая, вообще говоря, не имеет геомеханического обоснования. И, если, ее использование для выработок, расположенных на малых глубинах было вполне приемлемо, ввиду незначительности размеров зон неупругих деформаций, применение ее на современных глубинах расположения выработок (1000 м и более) вызывает серьезные сомнения.

Относительно продолжительности периода поддержания выработки, за который нужно определять величину смещений пород для расчета крепи, в нормативах нет единого мнения.

В документах [1, 2] смещения рассчитывают за весь период поддержания выработки. Недостатком такого подхода является то, что вся нагрузка при поддержании выработки ложится на основную крепь, и не используются возможности способов и средств управления состоянием и свойствами горного массива, широко распространенных в настоящее время. С помощью данных способов и средств можно облегчить условия работы крепи на последних стадиях ее эксплуатации, снизив в целом стоимость основной крепи за счет уменьшения несущей способности профиля СВП, плотности установки рам.

Более рациональный подход к расчету крепи принят в документе [3]: основная крепь рассчитывается по величине смещений за первый геомеханический период поддержания выработки, а нагрузки на крепь, добавленные смещениями пород в другие периоды, воспринимаются средствами усиления крепи (дополнительные рамы, стойки усиления, анкеры). Плотность крепи усиления n_y определяют из выражения

$$n_y = \frac{P_k - n N_s}{N_y}, \quad (2)$$

где P_k – нагрузка на крепь, определенная по величине смещений пород за весь период поддержания выработки, кН/м ;

n – плотность установки рам основной крепи, рассчитанная по величине смещений за первый геомеханический период, рам/м;

N_s – сопротивление одной рамы крепи в податливом режиме, кН;

N_y – сопротивление единицы средств усиления крепи, кН.

Данный подход к расчету крепи эффективен при поддержании выработки в течение двух (максимум трех) геомеханических периодов. При большем количестве геомеханических периодов ресурса крепей усиления по несущей способности, плотности установки не хватает для достижения оптимальных параметров комбинированной крепи (основной и усиления).

Следует отметить, что в методику расчета крепи по ДонУГИ [4] заложен принципиальный недостаток: крепь рассчитывают не по общей величине смещений пород за весь период поддержания выработки, а за последние один-два геомеханических периода. В таблице 2 приведены результаты анализа примеров расчета крепи в приложении В [4].

Как видно из таблицы 2, в условиях, когда выработка поддерживается более одного геомеханического периода, для расчета крепи используется, как правило, не более 70 % общей величины смещений пород за весь срок ее поддержания. Поэтому данный подход к расчету крепи подготовительных выработок нельзя признать корректным.

Таблица 2
 Результаты анализа примеров расчета крепи по ДонУГИ [4]

№ примера	Количество геомеханических периодов	Величина смещений, мм		Уровень смещений, принятых для расчета крепи относительной общей величины (процент, %)
		За весь период поддержания выработки	Принятая к расчету крепи	
1	2	3	4	5
1	1	1094	1094	100,0
2	2	2451	1357	55,4
3	3	3231	2137	66,1

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
4	4	4311	1080	25,1
5	5	5402	2171	40,2
6	2	1247	1117	89,6
7*	2	1211	1211	100,0
		3520	3530	100,0
8	1	211	211	100,0
9	1	859	859	100,0
10	1	810	810	100,0
11	1	1121	1121	100,0
12	1	132	132	100,0
13	2	2994	1900	63,5

Примечание. * Расчет крепи выполнен по отдельным периодам – предусмотрено перекрепление выработки

Авторами предложен следующий порядок расчета рамной податливой крепи. Расчет производят последовательно по геомеханическим периодам поддержания выработки, начиная с первого этапа. При этом, исходя из величины смещений пород в каждом геомеханическом периоде, выбирают основную крепь, а для последующих периодов – крепь усиления.

Так, для i -го периода поддержания выработки плотность основной крепи n_i находят из выражения

$$n_i = \frac{P_i}{N_S}, \quad (3)$$

а для $(i + 1)$ -го периода поддержания определяют плотность установки крепи усиления $n_{y(i+1)}$ по формуле

$$n_{y(i+1)} = \frac{P_{i+1} - (nN_S)_i}{N_y}, \quad (4)$$

где P_i и P_{i+1} – нагрузка на крепь, рассчитанная по величине смещений пород в i -й и $(i+1)$ -й периоды поддержания выработки соответственно;

$(nN_S)_i$ – сопротивление основной крепи в i -й период поддержания выработки.

Плотность установки крепи усиления должна быть не менее 0,5 плотности установки основной крепи, т. е. $n_y \geq 0,5n$.

Оптимальный способ крепления определяют путем технико-экономического сравнения рассчитанных вариантов. Расчет крепи целесообразно выполнять с привлечением соответствующего программного обеспечения.

На каждом этапе расчета крепи необходимо производить проверку ее параметров по критерию податливости и при необходимости их корректировать (как основной, так и крепи усиления). Расчетные формулы требуемой податливости крепи приведены в таблице 3 [3].

Величины смещений пород U_k и $U_{кп}$ определяют экспериментальным либо расчетным путем, коэффициенты $k_{ос}$, $k_{ус}$ и $k_{анк}$ принимают по "Инструкции ..." [3].

Таблица 3

Расчетные формулы податливости крепи

Условия поддержания выработки	Величина требуемой податливости крепи $U_{пд}$ при залегании пластов	
	Пологом и наклонном	Крутонаклонном и крутом
1. Плотность установки основной крепи $n \leq 1$ рамы/м, без средств усиления крепи	U_k	$0,7U_{кп}$
2. $n > 1$ рамы/м, без средств усиления крепи	$U_k k_{ос}$	$0,7U_{кп} k_{ос}$
3. При усилении основной крепи стойками	$U_k k_{ос}, k_{ус}$	$0,7U_{кп} k_{ос} k_{ус}$
4. При усилении основной крепи анкерами	$U_k k_{ос} k_{анк}$	$0,7U_{кп} k_{ос} k_{анк}$
Примечание. U_k и $U_{кп}$ – величина смещений пород соответственно кровли и суммарное кровли и почвы; $k_{ос}$, $k_{ус}$ и $k_{анк}$ – коэффициенты, учитывающие плотность установки основной крепи, стоек усиления и анкеров соответственно.		

При условии, когда величина требуемой податливости $U_{пд}$ превосходит величину конструктивной податливости крепи, нео-

бходимо предусматривать применение основной крепи и крепи усиления с более высокими параметрами и характеристиками, а также способов управления состоянием и свойствами горного массива, например, упрочнение пород, разгрузку их от горного давления.

В настоящее время нет единого мнения и о величине расчетной нагрузки рамных податливых крепей. В документах [1, 2] она принята равной некоторой промежуточной величине между сопротивлением рамы в податливом режиме и ее несущей способностью, без приемлемых обоснований.

В нормативах [3, 4] за расчетное сопротивление рамы принято ее сопротивление в податливом режиме. Такой подход к назначению рабочего сопротивления рамной крепи нельзя признать рациональным. Дело в том, что величина сопротивления рамы в податливом режиме для крепей КМП-А3 и КМП-А5 составляет 60–67 % (в зависимости от типоразмера спецпрофиля) от ее несущей способности (сопротивления в жестком режиме нагружения). Следовательно, сопротивление крепи в этом случае используется не более чем на 2/3 ее несущей способности.

Авторами предлагается использовать указанный ресурс за счет повышения величины расчетного сопротивления податливых рам по сравнению к их сопротивлению в податливом режиме. В основе данного подхода лежит идея использования коэффициента запаса прочности n_3 , широко используемого в технической механике. Применение при расчетах коэффициента запаса прочности гарантирует устойчивость конструкции по отношению к непредвиденным обстоятельствам, включая погрешности расчетов и определения характеристик (параметров). Величину этого коэффициента для пластичных материалов при статической нагрузке рекомендуется принимать равной $n_3 = 1,4–1,6$ [5].

Применив коэффициент запаса к жесткой части характеристик рамной крепи (на рабочем сопротивлении защита крепи гарантируется ее податливостью в замковых соединениях), получим формулу для определения величины расчетного сопротивления рамной податливой крепи N_p

$$N_p = \frac{N_m + N_s (n_3 - 1)}{n_3}, \quad (5)$$

где N_m – несущая способность рамы (в жестком режиме), kH ;
 N_s – сопротивление рамы в податливом режиме, kH .

При величине коэффициента запаса $n_3 = 1,5$ формула (5) приобретает вид:

$$N_p = 0,67(N_m + 0,5N_s). \quad (6)$$

Определенные по формуле (6) расчетные значения сопротивления спецпрофилей крепи КМП-А3 (КМП-А5) приведены в таблице 4.

Таблица 4

Расчетные значения спецпрофилей крепи КМП-А3 (КМП-А5)

№ спецпрофиля СВП	Значение, kH		
	рабочего сопротивления в податливом режиме N_s	несущей способности N_m и рамы	расчетного сопротивления рамы N_p
17	180	297	260
19	200	330	290
22	220	333	295
27	250	406	355
33 ($S_{св} = 15,5 \text{ м}^2$)	310	505	440
33 ($S_{св} = 18,3 \text{ м}^2$)	310	485	430

Величину расчетного сопротивления следует применять при расчете крепи выработок, поддерживаемых в течение одного геомеханического периода. В подготавливающих и подготовительных выработках, поддерживаемых в течение нескольких геомеханических периодов, величина расчетного сопротивления используется только при расчете крепи на последнем этапе поддержания выработок, в остальные периоды поддержания выработок при расчете крепи используется величина сопротивления рамы в податливом режиме N_s . Таким образом, на последнем этапе под-

держания выработки при расчете крепи усиления необходимо в формуле (2) вместо величины N_S использовать N_p .

Допускается принимать плотность установки основной крепи исходя из производственного опыта поддержания выработок, а крепь усиления рассчитывать по вышеприведенной схеме.

Для оценки предлагаемой методики, приведем пример расчета крепи подготовительной выработки, сохраняемой для повторного использования и погашаемой за вторым очистным забоем. Исходные данные приведены в таблице 5.

Таблица 5

Исходные данные

Наименование параметров		Значение параметров
1. Глубина расположения H_p , м		1000
2. Угол падения пород α , градус		10
3. Ширина в проходке / в свету		5,36 / 4,75
4. Высота в проходке / в свету		3,71 / 3,44
5. Площадь сечения в проходке / в свету		17,5 / 13,8
6. Мощность пласта m , м		1,2
7. Способ проходки		буровзрывной
8. Прочность пород на одноосное сжатие, МПа	кровли $R_{ск}$	56,4
	почвы $R_{сн}$	57,1
	боков $R_{сб}$	45,5
	средневзвешенная $R_{с.ср}$	54,5

Расчет смещений пород на контуре выработки выполнен для отдельных геомеханических зон (периодов) ее поддержания по формулам [1] (табл. 6), результаты расчетов приведены в таблице 7.

Таблица 6

Геомеханические периоды поддержания выработки и расчетные формулы смещений

Наименование геомеханических зон (периодов) поддержания выработки		Вид расчетных формул
1. Вне влияния очистных работ		$U_{кн} = (k_{np} U_{np} + V_0 t_0) k_S$
2. Временного опорного давления первой лавы		$U_{кн} = k_{кр} k_S U_1$
3. Стационарного опорного давления первой лавы		$U_1^{ocm} = (k_{oxp} m + V_1 t_1) k_{кр} k_S$
4. Временного опорного давления второй лавы		$U_{кн} = k_{кр} k_S U_2$
5. Разделение величин общих смещений $U_{кн}$ на смещения кровли U_k и почвы U_n	По пп. 1, 2, 4	$U_k = U_{кн} k_k \quad U_n = U_{кн} (1 - k_k)$
	В общем по всем зонам	$U_k = [k_{np} U_{np} + V_0 t_0 + (U_1 + U_2) k_{кр}] k_S k_k + m k_{oxp} k_S k_{кр};$ $U_n = [k_{np} U_{np} + V_0 t_0 + (U_1 + U_2) k_{кр}] k_S (1 - k_k) + V_1 t_1 k_S k_{кр}$

Обозначения: $k_{np} = 1,0$ – коэффициент, учитывающий способ проведения выработки; $U_{np} = 250$ мм – смещения пород под влиянием проведения выработки; $V_0 = 9,3$ мм/мес. – скорость смещения пород вне зоны влияния очистных работ; $t_0 = 12$ мес. – время поддержания выработки вне влияния очистных работ; $k_S = 1,19$ – коэффициент влияния площади сечения выработки в свету; $k_{кр} = 1,2$ – коэффициент влияния обрушаемости пород кровли; $U_1 = U_2 = 600$ мм – величина смещения пород в зоне влияния временного опорного давления соответственно первого и второго очистных забоев; $U_1^{ocm} = 1099,6$ мм – смещения пород в зоне стационарного опорного давления первой лавы; $k_{oxp} = 0,1$ (литые полосы) – коэффициент влияния способа охраны выработки; $V_1 = 65$ мм/мес. – скорость смещения пород в зоне стационарного опорного давления первой лавы; $t_1 = 10$ мес. – время поддержания выработки в

зоне стаціонарного опорного тиснення; $k_k = 0,52$ – коефіцієнт, характеризує рівень зміщень порід кровлі в загальній величині зміщень.

Таблиця 7

Результати розрахунку зміщень порід в вироботці

№ зон по табл. 6	Величина зміщень порід, со зірочкою – с наростаючим итогом, мм						
	U_K	U_K^*	U_{II}	U_{II}^*	$U_1^{ост}$	$U_{кп}$	$U_{кп}^*$
1	223,8	223,8	206,5	206,5	–	430,3	430,3
2	445,5	669,3	411,3	617,8	–	856,8	1287,1
3	171,4	840,7	928,2	1546,0	1099,6	1099,6	2386,7
4	445,5	1286,2	411,3	1957,3	–	856,8	3243,5

Результати розрахунку кріплення вироботки по вищеразглянутій методикі приведені в таблиці 8. Виконано 4 варіанта розрахунку кріплення: перші три – згідно зі схемою поетапного розрахунку, останній варіант відповідає умові вибору густоти кріплення по практичним даним. Враховуючи складні геомеханічні умови підтримання вироботки (чотири зони) прийнято профіль СВІ 33.

Таблиця 8

Результати розрахунку кріплення вироботки

№ зон	Исходные параметры			Основная крепь			Крепль усиления			$U_{нд}$
	U_K , мм	P' , кПа	P , кН/м	$N_{S,P}$, кН	n , рам/м	k_{oc}	$P-nN_{S,P}$	n_y , ст/м	k_{yc}	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Выбор основной крепль по зміщенням за 1-й період										
1	224	88,4	473,6	310	1,5	0,76	–	–	–	170
2	669	146,2	783,6	"	"	"	318,6	1,27(1,25)	0,65	331
3	841	160,2	858,7	"	"	"	393,7	1,57	0,62	396
4	1286	192,4	1031,3	440	"	"	371,3	1,49	0,63	616
2. Выбор основной крепль по зміщенням за два перших періода										
1-2	669	146,2	783,6	310	2,5	0,51	–	–	–	341
3	841	160,2	858,7	"	"	"	87,3	0,33(1,25)	0,65	279
4	1286	192,4	1031,3	440	"	"	–	–	–	656

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3. Выбор основной крепи по смещениям за три первых периода										
1-3	841	160,2	858,7	310	2,8(3,0)	0,5	–	–	–	420
4	1286	192,4	1031,3	440	3,0	"	–	–	–	643
4. Дополнительный вариант – плотность основной крепи $n=2$ рамы/м										
1	224	88,4	473,6	310	2,0	0,61	–	–	–	137
2	669	146,2	783,6	"	"	"	163,6	0,65(1,0)	0,7	286
3	841	160,2	858,7	"	"	"	238,7	0,95(1,0)		359
4	1286	192,4	1031,3	440	"	"	151,3	0,61(1,0)		549
Примечание. В скобках приведены значения, принимаемые в соответствии с нормативными положениями.										

По результатам выполненных расчетов можно сделать следующие выводы.

1. По критерию требуемой податливости необходимо применить пятизвенную рамную податливую крепь КМП-А5 с дополнительными боковыми стойками длиной по 700 мм (конструктивная податливость $\Delta = 600$ мм). В связи с этим необходимо скорректировать проектную высоту выработки (см. табл. 5).

2. По критерию плотности установки рам все четыре варианта имеют право на дальнейшее рассмотрение (анализ); при этом плотность установки рам основной крепи тесно связана с параметрами крепи усиления. При плотности установки $n = 1,5–2,0$ рамы/м требуется применение крепи усиления в трех геомеханических зонах, при $n = 2,5$ рамы/м – в одной геомеханической зоне и при $n = 3,0$ рамы/м усиления крепи не требуется.

3. Необходимо предусмотреть мероприятия по предотвращению пучения почвы либо их плановую подрывку.

Наиболее рациональный (экономичный) вариант крепи в выработке следует принимать по результатам технико-экономического анализа.

Сформулированные в статье предложения по совершенствованию методов расчета рамных податливых крепей использованы при разработке новой редакции отраслевого стандарта Украины по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах.

Их применение позволит:

– более полно использовать несущую способность рамных податливых крепей при обеспечении достаточной их надежности с позиции нагружения;

– выбирать наиболее рациональные параметры крепи выработки (с использованием крепи усиления и других способов управления состоянием и свойствами горного массива), соответствующие горно-геологическим и геомеханическим условиям поддержания выработки, а с выполнением технико-экономических расчетов – и условиям экономичности.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР. — Утв. Минуглепромом СССР 26.12.84. — Изд. Четвертое. — Л. : ВНИМИ, 1986. — 222 с.
2. КД 12.01.01.201-98 Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах. Методические указания. — Утв. И введ. Минуглепромом Украины. — Донецк, 1998. — 149 с.
3. Инструкция по выбору рамных податливых крепей горных выработок. — Утв. Минуглепромом СССР 30.04.91, согл. Госспроматомнадзором 18.03.91. — Изд. Второе — Л. : ВНИМИ, 1991. — 125 с.
4. СОУ 10.1.00185790.011:2007 Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони. — Чинний від 2008-04-01. — К. : Мінвуглепром України. — 113 с.
5. Писаренко К. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. — К. : Наукова Думка, 1975. — 704 с.