Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова
т. XLVIII, вып. 1, 1963 г.

УДК 622.272.273.4.83.001.5

РАБОТА ОГРАДИТЕЛЬНОГО ЩИТА В УСЛОВИЯХ УДАРНОЙ НАГРУЗКИ ПРИ СВОБОДНОМ ОБРУШЕНИИ КРОВЛИ

Ю. Д. Дядькин, Ю. А. Модестов, Б. Г. Карепин, Г. М. Вестерман

Для очистной выемки мощных пологих пластов предложена камерно-щитовая система с применением передвижных оградительных щитов [3]. Производственные испытания такой системы (1959 г.) со щитом ЛГНК-1 подтвердили высокую эффективность и работоспособность передвижной крепи оградительного типа [2].

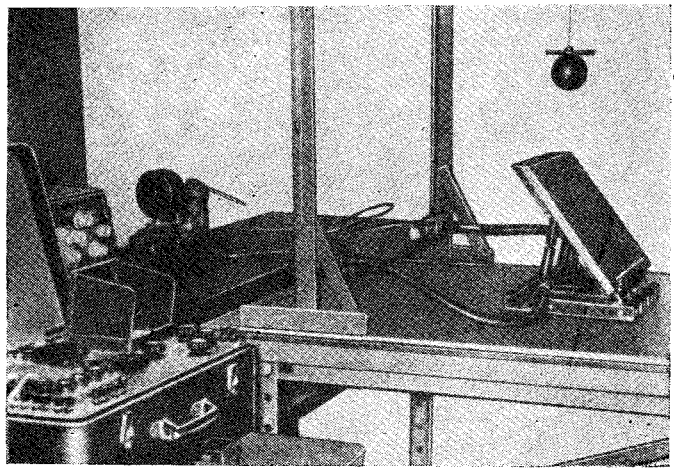


Рис. 1. Общий вид стенда для испытаний моделей щита на ударную нагрузку

Существующие механизированные крепи и щиты рассчитываются на статическую нагрузку от поддерживаемой кровли или разрыхленной «породной подушки». Оградительный щит в условиях узких забоев работает в режиме периодических ударных нагрузок при обрушениях кровли.

Для выяснения особенностей взаимодействия оградительных щитов с обрушающимися породами кровли и разработки методики их расчета на ударную нагрузку в 1960—1961 гг. в Ленинградском горном институте проведены специальные исследования на моделях.

Зависимость воспринимаемых щитом усилий от условий приложения, величины и средств амортизации ударной нагрузки исследовалась на специальном стенде с моделями секций жесткого и гидрофицирован-

ного (рис. 1) щитов, выполненных в масштабе 1 : 10 по конструктивной схеме оградительной крепи ЛГНК-2 [4].

Усилия P, воспринимаемые щитом, записывались на осциллограммы по показаниям встроенных в модель тензометрических опор, оттарированных на ударные и статические нагрузки. Схема опытов с моделью жесткого щита приведена на рис. 2. Задачи и условия экспериментов,

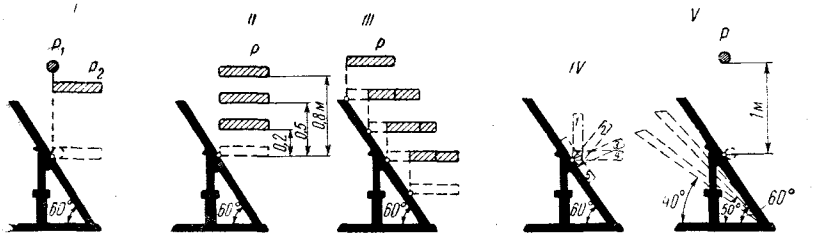


Рис. 2. Схема опытов (I—V) с моделью жесткого щита

а также средние значения (каждый опыт повторялся 3 раза) воспринятых опорами щита нагрузок при различных условиях приложения удара, указаны в табл. 1.

Таблица 1

Условия и результаты опытов на модели жесткого щита

Серия опыта	Условия проведения опыта: постоянные	Условия проведения опыта: переменные	Номер опыта	Теоретическая нагрузка на щит, *кгм*	Нагрузка, воспринятая щитом: передней опорой, *кгм*	Нагрузка, воспринятая щитом: задней опорой, *кгм*	Суммарная: *кгм*	Суммарная: % от теоретической
I	Удар по середине щитового перекрытия при угле наклона 60°	Ударяющее тело:						
		1 — стальная гиря	1	1,0	0,044	0,002	0,138	13,8
			2	2,5	0,156	0,005	0,483	19,3
		2 — песчано-парафиновый блок	3	1,0	0,012	0,0017	0,042	4,2
			4	2,5	0,046	0,003	0,147	5,9
II	Удар песчано-парафиновым блоком по середине щитового перекрытия при угле наклона щита 60°; блок горизонтален	Высота свободного падения, *м*:						
		0,2	5	1,0	0,012	0,017	0,042	4,2
		0,5	6	2,5	0,046	0,003	0,147	5,9
		0,8	7	4,0	0,068	0,014	0,246	6,2
III	Удар песчано-парафиновым блоком весом 5 *кг* с высоты 0,5 *м*; угол наклона щита 60°; блок падает в горизонтальном положении	Место приложения удара по щиту:						
		верхняя кромка	8	2,5	0,0255	0,014	0,12	4,8
		середина консоли	9	2,5	0,040	0,010	0,15	6,0
		середина щитового перекрытия (сопряжение со стойками)	10	2,5	0,050	0,020	0,21	8,4
		середина пролета	11	2,5	0,040	0,006	0,14	5,6
IV	Удар песчано-парафиновым блоком весом 5 *кг* с высоты 0,5 *м* (по центру тяжести) по середине щита; угол наклона щита 60°	Положение блока при ударе:						
		1 — вертикальное	12	2,5	0,013	0,004	0,051	2,05
		2 — под углом 60°	13	2,5	0,064	0,011	0,215	8,6
		3 — под углом 30°	14	2,5	0,080	0,011	0,273	11,0
		4 — горизонтальное	15	2,5	0,05	0,020	0,210	8,4
		5 — удар плашмя	16	2,5	0,032	0,004	0,108	4,4
V	Удар стальной гирей весом 2 *кг* с высоты 1 *м* по середине щитового перекрытия	Угол наклона щитового перекрытия, *град*:						
		60	17	2,0	0,126	0,0035	0,387	19,3
		50	18	2,0	0,165	0,005	0,51	25,5
		40	19	2,0	0,285	0,016	0,903	45,1

Анализ результатов динамических исследований модели жесткого щита показывает следующее:

1. Величина воспринимаемой щитом кинетической энергии удара в основном зависит от деформируемости ударяющего тела. При ударах песчано-парафиновым блоком тензометрические опоры щита фиксируют примерно в три раза меньшие нагрузки, чем при ударах стальной гирей. Следовательно, при обрушениях кровли фактическая нагрузка, испытываемая несущими элементами оградительного щита, будет значительно меньше произведения их массы на высоту падения H, поскольку большая часть кинетической энергии будет расходоваться на трещинообразование, разрушение, смятие и другие деформации самих пород.

2. Значительная часть кинетической энергии удара расходуется на упругие деформации самого щитового перекрытия. Во всех опытах (в том числе и при ударах стальной гирей) воспринимаемая опорами щита нагрузка не превосходила половины ее теоретического значения. Поглощаемая упругими деформациями щитового перекрытия энергия зависит от места приложения ударной нагрузки. Зафиксированные тензометрическими опорами усилия при ударе по верхней кромке щита (при максимальной длине изгибающейся консоли щитового перекрытия) оказывались почти вдвое меньше, чем при «жестком» ударе по оси опорных стоек (табл. 1, опыты 8 и 10).

3. Воспринимаемая щитом нагрузка существенно зависит от положения в пространстве ударяющего породного блока. Максимальной она оказывается при ориентировке блока длинной стороной перпендикулярно щитовому перекрытию (опыт 14), минимальной — при вертикальном положении блока (опыт 12), т. е. при скользящем ударе. В естественных условиях наиболее вероятны положения блока от горизонтального до совпадающего с углом наклона щита (удар плашмя). Для этих положений характерны средние значения воспринимаемых опорами усилий (опыты 15 и 16).

4. С уменьшением угла наклона перекрытия щита к его постели воспринимаемая опорами нагрузка резко возрастает. Так, при изменении угла с 60 до 40° нагрузка на опоры возрастает более чем в два раза (опыты серии V). Следовательно, при конструировании оградительного щита необходимо стремиться к минимальной ширине подщитового пространства и максимальному углу наклона щитового перекрытия. При этом следует отдавать предпочтение плоскому типу щитового перекрытия, так как в коробчатых или криволинейных перекрытиях неизбежно выполаживание верхней части — наиболее вероятного места приложения удара.

5. С увеличением высоты свободного падения ударяющего блока нагрузка, фиксируемая тензометрическими опорами (опыты серии V), растет непропорционально и несколько ускоренно. В связи с этим при динамических расчетах щитов для пластов большой мощности следует принимать повышенные значения коэффициентов запаса.

6. Усилия на передние опоры щита во много раз больше, чем на задние. Поэтому шарнирные соединения опорных стоек щита с постелью должны быть по меньшей мере вдвое прочнее шарнирного соединения постели с перекрытием.

Для ускорения перекрытия кровли, обнажаемой при взрывной отбойке очередной ленты угля, а также для изменений высоты щита при переходе сбросовых нарушений или колебаниях мощности пласта опорные стойки щита должны обладать раздвижностью. Наиболее удобны и совершенны гидравлические раздвижные стойки. С целью проверки работоспособности гидравлических стоек при ударной нагрузке проведены дополнительные исследования гидрофицированной модели щита на описанном выше стенде (табл. 2). Помимо опорных реакций измерялась величина просадки гидравлических стоек при ударе за счет

стравливания масла в предохранительных клапанах, оттарированных на различное критическое давление. Кроме того, измерялось первоначальное (до удара) давление масла в гидроцилиндрах, а также имитировались амортизирующие покрытия щита.

Таблица 2

Результаты исследования модели гидрофицированного щита

Теоретическая нагрузка на гидростойку, *кгм*	Давление, *атм*		Воспринимаемая передней опорой нагрузка, *кгм*	Просадка гидростойки, *мм*
	в цилиндрах опорных гидростоек	стравливания масла в клапанах		
0,8	3,0	5,0	0,060	29,0
0,8	4,0	5,0	0,066	20,3
0,8	10,0	12,0	0,070	12,9
0,4	5,0	12,0	0,022	—
0,4	7,0	12,0	0,026	—
0,4	10,0	12,0	0,029	—

При этом установлено следующее.

1. Стравливание масла в предохранительных клапанах гидравлических опорных стоек амортизирует удар по щиту.

Усилия на тензометрические опоры гидравлических стоек составляют не более 30—40% от нагрузок на опоры жестких стоек при одних и тех же условиях приложения и величине удара.

2. Воспринимаемые опорами щита нагрузки зависят от первоначального давления масла в гидроцилиндрах стоек p_0 и критического давления $p_{кр}$, при котором происходит стравливание масла в предохранительных клапанах. При увеличении разности этих давлений воспринимаемая щитом ударная нагрузка несколько снижается (см. табл. 2).

3. Просадка гидравлических стоек щита в момент удара зависит от первоначального давления масла в гидроцилиндрах: с увеличением давления масла уменьшается просадка, хотя несколько увеличивается воспринимаемая опорами нагрузка.

4. Амортизирующее покрытие (резина) снижает воспринимаемую опорами щита нагрузку с 0,022 *кгм* (при отсутствии амортизатора) до 0,018 *кгм* при толщине слоя резины 7 *мм*, до 0,015 *кгм* при 14 *мм*, до 0,011 *кгм* при 21 *мм*.

Таким образом, гидравлические стойки и амортизирующие покрытия (например, деревянный накатник) обеспечивают резкое снижение воспринимаемых щитом нагрузок, а следовательно, и уменьшение его необходимой несущей способности, веса и стоимости.

Закономерности механики свободного обрушения незакрепленной кровли камеры на оградительный щит изучались на крупномасштабном объемном стенде (*ширина* 1,8 *м*, *длина* 6 *м*), где в масштабе 1 : 10 моделировалась отработка пологого пласта мощностью 4,5 *м**, камерой 60×14 *м*. Модель отвечала условиям разработки пласта I на шахте «Кайеркан» в Норильске. Пласт угля был изготовлен в модели из песчано-парафиновой смеси, а слои непосредственной кровли общей мощностью 2,6 *м* — из песчано-гипсовых материалов. В нижних слоях непосредственной кровли имитировалась естественная трещиноватость. Вышележащая толща пород была заменена эквивалентной пригрузкой. Поскольку прочные песчаники основной кровли в условиях одиночной камеры указанной ширины вполне сохраняют устойчивость, оказалось возможным воспроизводить за счет пригрузки лишь условия заделки непосредственной кровли над опорными целиками. Для этого выполняющие роль жестких целиков швеллерные балки стягивались длин-

* Здесь и ниже все размеры даны в пересчете на натурные условия.

ными болтами с толстыми досками, уложенными поверх непосредственной кровли. Балки защемляли кровлю с усилием, соответствующим расчетной пригрузке при глубине работ 150 *м* (табл. 3).

Камера отрабатывалась с моделью щита ЛГНК-2 (длиной 12 *м*, шириной 2,5 *м*, высотой 4 *м*) при подвигании за один цикл на 1 *м*, а за сутки — на 3 *м*. Масштаб времени 1 : 3. Измерение нагрузок на щит при обрушениях кровли осуществлялось аналогично предыдущим опытам, а смещений и расслоения кровли — индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 *мм*.

Таблица 3

Сравнение шагов обрушения пород кровли в модели и в натуре

Обрушающаяся порода	Толщина слоя, *м*	Длина консоли обрушения, *м*	
		в модели	в натуре
Углистый сланец	0,2	1—2	Около 1
Аргиллит	0,3	3—4	3—4
Песчаник	0,3	10—20	Около 25
Песчаник	0,8	17—20	Около 30
Грязный уголь .	1,1	18—21	Около 35

Характер обрушения различных слоев непосредственной кровли (рис. 3) при отработке модели характеризуется следующими данными. Углистый сланец мощностью 0,2 *м* («ложная кровля») обрушался (рис. 3, *а*) вслед за подвиганием забоя с зависанием консоли не более чем на 2 *м*. Обрушения, как и в шахтных условиях, происходили «по забой» с разубоживанием отбитого угля перед щитом [2].

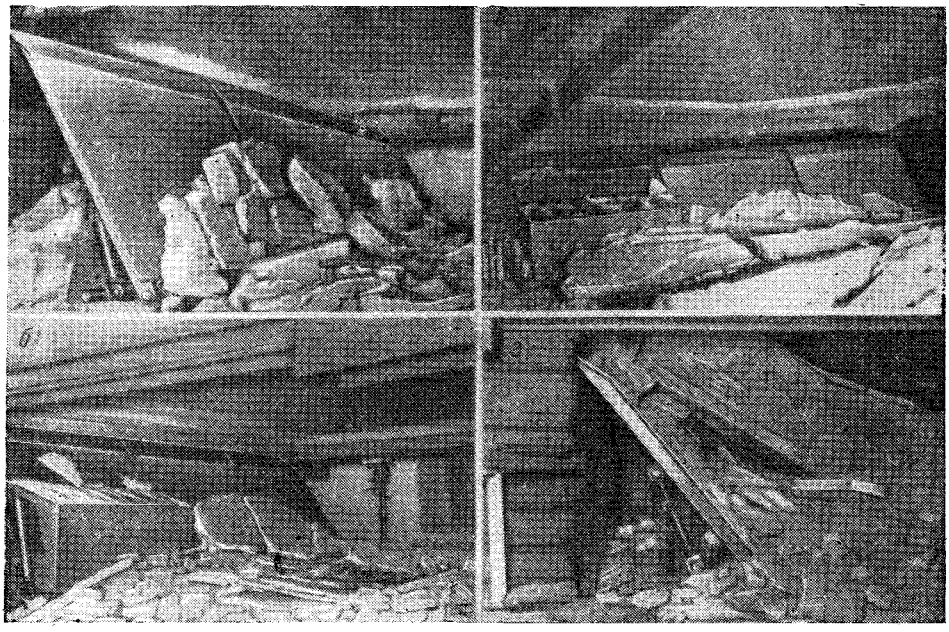


Рис. 3. Характер обрушения слоев непосредственной кровли на модели:
а — углистого сланца мощностью 0,2 *м*; *б* — аргиллита мощностью 0,3 *м*; *в* — нижней пачки песчаника мощностью 0,3 *м*; *г* — всей непосредственной кровли

Пачка аргиллита мощностью 0,3 *м*, как правило, обрушалась с отставанием линии излома от забоя на 1—2 *м* (рис. 3, *б*) и предшествующим отслоением от вышележащей толщи на 100—130 *мм*. Шаг обрушения около 3 *м*, объем обрушающихся одновременно блоков $3 \times 12 \times 0{,}3 = 10{,}8$ *м*^{3}.

Первое обрушение нижней пачки песчаника (0,3 *м*) произошло при длине камеры 21 *м* с отставанием линии излома от забоя на 4,3 *м*

(рис. 3, *в*), т. е. позади щита. Абсолютный прогиб перед обрушением достигал 145 *мм*, а отслоение от верхней пачки песчаника — около 90 *мм*. Установившееся обрушение этого слоя пород происходило с шагом 7,5—10 *м* при отставании от забоя в среднем на 2 *м*. Максимальный объем обрушающихся одновременно пород достигал 17,5 $м^3$. При обрушении блока объемом 12 $м^3$ воспринятая щитом и записанная на осциллограмму энергия удара составила 4,5 *тм*. При высоте свободного падения 2 *м* и объемном весе материала 2,2 $т/м^3$ расчетная нагрузка на щит $12 \times 2{,}2 \times 2 = 52{,}8$ *тм*, т. е. фактически воспринятая нагрузка составила лишь 8,5% от расчетной. Это объясняется тем, что основная часть кинетической энергии удара расходуется на деформации самого ударяющего блока пород.

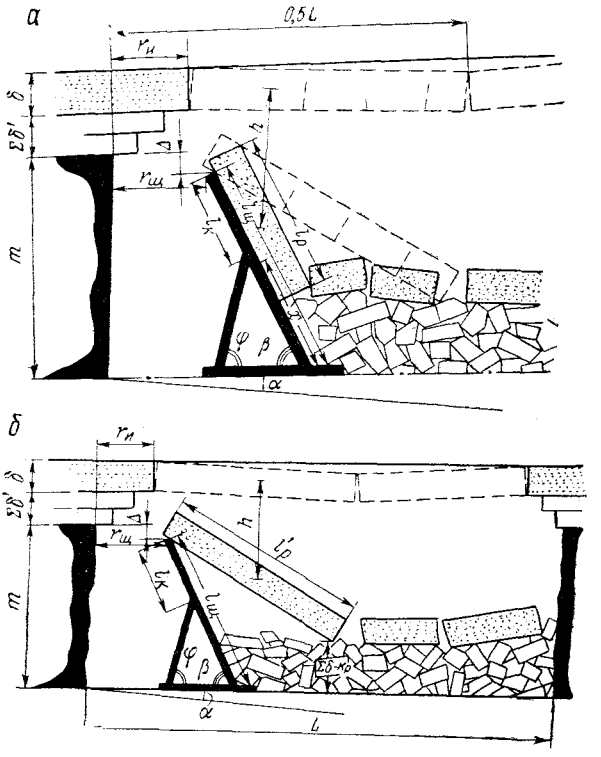


Рис. 4. Схема к динамическому расчету оградительного щита

Первое обрушение верхнего слоя песчаника и грязного угля (рис. 3, *г*) произошло при длине камеры 30,5 *м*. Отставание общей линии излома от забоя составляло при этом по различным слоям от 3,5—4,5 до 7—8 *м*.

Второе обрушение верхних слоев непосредственной кровли произошло при средней длине консоли 21,5 *м* с отставанием линий излома от забоя (считая по нижней пачке песчаника) на 3 *м*. Отслоение нижней пачки песчаника от верхней в среднем 47 *мм*, а трещина расслоения между песчаником и грязным углем достигала 10 *мм*. Общий объем обрушившихся на щит пород 126 $м^3$.

Характер и величина шага обрушения породных слоев непосредственной кровли при отработке модели хорошо согласуются с данными наблюдений на шахте «Кайеркан» (см. табл. 3) во время производственных испытаний щита ЛГНК-1 на пласте I [5].

Материалы лабораторных и шахтных исследований механики свободного обрушения кровли и ее взаимодействия со щитом оградительного типа в условиях камеры послужили базой для разработки методики динамического расчета оградительных щитов.

В основу методики расчета положены следующие принципиальные положения: незакрепленная кровля расслаивается на отдельные пачки, излом и обрушение которых происходят последовательно; совместное обрушение породных слоев возможно лишь при резко различной их прочности, когда слабый верхний слой, полностью потеряв несущую способность, играет роль пригрузки для более прочного нижнего слоя; обрушение породных слоев в условиях камеры происходит с отставанием линии излома от забоя и целиков на 0,2—0,5 *м* по каждому слою; по углам между забоем и стенками камеры породы зависают, а линия

излома приближается к дуге с радиусом не более половины ширины камеры; нагрузка на щит может быть максимальной при первом обрушении рассматриваемого слоя пород кровли; максимальная длина ударяющего по щиту блока пород определяется расположением трещин перед обрушением породного слоя и не может быть больше половины ширины камеры за вычетом суммарного отставания обрушений от забоя; свободное падение породного блока сопровождается его разворотом относительно передней кромки (считая от забоя), поэтому условия приложения ударной нагрузки на щит могут быть резко различными; динамический расчет щита следует производить для наиболее тяжелых условий приложения удара — когда блок пород ударяет по щиту плашмя (рис. 4, *а*) или блок пород одновременно ударяет по щиту и почве (рис. 4, *б*).

Шаг первого обрушения рассматриваемого слоя пород толщиной δ

$$L = 10t\sqrt{\delta} + \frac{100t^2\delta}{c\,(a - 2\sum r_и) - 10t\sqrt{\delta}} \quad *, \tag{1}$$

где t — коэффициент, учитывающий прочность пород; при пределе $\sigma_{сж} \leqslant 1000$ *кг/см*^{2} принимается $t = 1{,}2$; при $\sigma_{сж} > 1000$ *кг/см*^{2} $t = 1{,}7$;

c — коэффициент, учитывающий трещиноватость пород, колеблется от 2 до 3;

a — ширина камеры, *м*;

$\sum r_и$ — суммарное отставание линии излома ранее обрушившихся породных слоев, *м*.

Расчет на совместное обрушение двух породных слоев следует вести при

$$L_{i+1} < L_i - 2r_и, \tag{2}$$

где $r_и$ — отставание линии излома i-того слоя от забоя, *м*.

Для удара породного блока по щиту плашмя получены следующие формулы. Расчетная длина блока $l_р$ выбирается минимальной из трех значений

$$l_p \leqslant \begin{cases} 0{,}5L - r_и \\ 0{,}5a - r_и \\ l_щ - \dfrac{\sum \delta k_р}{\sin(\beta - \alpha)} + \dfrac{r_щ - r_и}{\cos(\beta - \alpha)}, \end{cases} \tag{3}$$

где $l_щ$ — длина балок щитового перекрытия, *м*;

$\sum \delta$ — суммарная толщина ранее обрушившихся породных слоев, *м*;

$k_р$ — коэффициент разрыхления обрушенных пород;

$r_щ$ — расстояние между передней кромкой щитового перекрытия и забоем, *м*;

α — угол падения пласта, *град*;

β — угол наклона перекрытия к постели щита, *град*.

Общий вес ударяющего блока пород

$$Q = l_р\,(a - 2r_i)\,\delta\gamma, \tag{4}$$

где γ — объемный вес пород обрушающегося слоя, *г/м*^{3}.

Высота свободного падения блока (по траектории его центра тяжести)

$$h = \left[\sum \delta + 0{,}5\delta\,(1 - \sin\beta) + \Delta + \left(0{,}5l - \frac{r_щ - r_и}{\cos\beta}\right)\sin\beta\right]\frac{1}{\cos\alpha}, \tag{5}$$

где Δ — высота первоначального зазора между щитом и кровлей, *м*.

* Несколько измененная формула С. Г. Андрушкевича [1].

Расстояние по перекрытию щита до точки приложения удара

$$x = l_{щ} - 0{,}5l + \frac{r_{щ} - r_{и}}{\cos(\beta - \alpha)} - 0{,}5\delta \operatorname{tg}(\beta - \alpha). \qquad (6)$$

Для одновременного удара породного блока по щиту и почве получены формулы:

$$Q' = 0{,}5l'_{р}(a - 2r_{и})\delta\gamma, \qquad (7)$$

$$h' = \frac{1}{2\cos\alpha}\left[m - \sum\delta(2 - k_{р}) + \Delta + (r_{и} - r_{щ})\operatorname{tg}\beta\right], \qquad (8)$$

где m — мощность пласта, *м*;

$$x' = l_{щ} - \frac{r_{и} - r_{щ}}{\cos(\beta - \alpha)} \leqslant l_{щ}. \qquad (9)$$

Величина $l'_{р}$ выбирается из неравенства

$$l'_{р} \leqslant \left\{\begin{matrix} 0{,}5L - r_{и} \\ 0{,}5a - r_{и} \end{matrix}\right\} > l_{щ} - \frac{\sum\delta k_{р}}{\sin(\beta - \alpha)} + \frac{r_{щ} - r_{и}}{\cos(\beta - \alpha)}. \qquad (10)$$

При известных $l_{р}$, Q, h и x напряжения, возникающие при ударе в основных несущих элементах щита — стойках,

$$\sigma_{сж} = \frac{1000Qxk_{д}k_{н}\cos(\beta - \alpha)}{nF_{ст}(l_{щ} - l_{к})\sin(\varphi + \beta)} \times$$

$$\times\left[1 + \sqrt{1 + \frac{EF_{ст}nh(l_{щ} - l_{к})\sin(\varphi + \beta)}{500Ql_{ст}k_{д}k_{н}x\cos(\beta - \alpha)}}\right], \qquad (11)$$

где $k_{д}$ — коэффициент, учитывающий деформируемость обрушающегося блока; по лабораторным данным $k_{д} \approx 0{,}1$;

$k_{н}$ — коэффициент неравномерности нагрузки по длине щита; учитывая трещинообразование в породном блоке перед обрушением, $k_{н} \approx 1$;

$l_{к}$ — длина консольной части балок щитового перекрытия, *см*;

$l_{ст}$ — длина опорной стойки щита, *см*;

E — модуль упругости, *кг/см*^{2};

$F_{ст}$ — площадь поперечного сечения стойки, *см*^{2};

n — число стоек по длине щита;

φ — угол наклона опорных стоек к постели щита, *град*.

Консольные и пролетные элементы щитового перекрытия могут быть рассчитаны по эквивалентной статической нагрузке, равной на всю длину щита

$$p_{э} = nF_{ст}\sigma_{сж}. \qquad (12)$$

Условия ее приложения определяются ранее подсчитанными значениями l и x.

В сентябре 1960 г. на шахте «Кайеркан» в Норильске испытывался упрощенный деревянный щит ЛГНК-1д, изготовленный без каких-либо расчетов, в связи с отсутствием в то время соответствующей методики. Щит выдержал нагрузки при обрушениях первого и второго породных слоев кровли. Однако при обрушении третьего слоя — песчанистого аргиллита мощностью 0,45 *м* — большинство опорных стоек и консольные части бревен перекрытия щита были поломаны. Расчетное определение динамических напряжений в элементах щита показало (табл. 4), что при обрушении третьего слоя они значительно превосходили допускаемые значения. Этот пример иллюстрирует необходимость динамического расчета оградительных щитов и возможность практического использования предлагаемой методики.

Таблица 4

Расчетные напряжения в элементах щита ЛГНК-1д при обрушениях различных слоев кровли

Обрушающаяся порода	Толщина слоя, *м*	Шаг первого обрушения, *м*		Напряжение при ударе, *кг·см²*	
		по формуле (1)	действительное значение	допускаемое	по формулам (11), (12)
Опорные стойки щита					
Аргиллит	0,3	9,9	10	280	247
Песчанистый аргиллит .	0,2	10,9	10	280	210
То же	0,45	20,3	18	280	327
Консольные части бревен перекрытия					
Аргиллит	0,3	9,9	10	420	252
Песчанистый аргиллит .	0,2	10,9	10	420	282
То же	0,45	20,3	18	420	825

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрушкевич С. Г. К вопросу устойчивости обнажений кровли пологопадающих пластов Донбасса. Сб. трудов ИГД АН УССР, 1960, № 9 (18).
2. Борисов Д. Ф., Дядькин Ю. Д., Лебедев В. Н. Испытания камерно-щитовой системы разработки мощного пологого пласта на шахте «Кайеркан» (Норильск). «Технология и экономика угледобычи», 1960, № 12.
3. Дядькин Ю. Д. Выбор передвижной крепи при разработке мощных пологих пластов узкими забоями. Записки ЛГИ, 1960, т. XLII, вып. 1.
4. Дядькин Ю. Д. Щитовая крепь для разработки мощных пологих пластов узкими забоями. Передовой опыт применения щитовых крепей в Кузбассе. Госгортехиздат, 1962.
5. Модестов Ю. А., Маханько Ю. А. Деформация кровли в очистных камерах Норильского угленосного района. Известия вузов, «Горный журнал», 1961, № 3.