

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
2. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат. – 1947. – 180 с.
3. Барях А.А., Самоделкина Н.А. К расчету устойчивости целиков при камерной системе разработки // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 1. – С. 11-20.
4. Барях А.А., Маловичко А.А., Шумихина А.Ю. Формирование зон техногенной нарушенности над выработанным пространством калийных рудников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996. – № 2. – С. 36-47.
5. Барях А.А., Федосеев А.К. Геомеханический прогноз распределения зон трещиноватости в соляной толще Верхнекамского месторождения калийных солей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 5. – С. 11-21.

УДК 622.831

DOI:10.7242/echo.2020.3.8

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ
ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ СИЛЬВИНИТА
НА КОЭФФИЦИЕНТ ФОРМЫ**

И.Л. Паньков, А.А. Ударцев
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Для оценки влияния протяженности поддерживающих целиков на их устойчивость проведены исследования на сжатие прямоугольных образцов сильвинита, имеющих размеры: ширина – 35 мм, высота – 35 и 70 мм, длина – 35, 70, 140 и 210 мм. По результатам экспериментов получены прочностные показатели, используемые для построения экспериментальных зависимостей влияния длины образца на коэффициент формы.

Ключевые слова: протяженность поддерживающих целиков, несущая способность, коэффициент формы, образцы сильвинита различной длины.

Разработка месторождений полезных ископаемых подземным способом невозможна без поддержания налегающей толщи пород с помощью оставляемых целиков различного назначения. Например, на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) применяется камерная система разработки с оставлением прямоугольных ленточных поддерживающих целиков, обеспечивающих сохранность сплошности водозащитной толщи, предохраняющей продуктивные отрабатываемые пласты от поступления пресных вод из вышележащих водоносных горизонтов. Для оценки несущей способности целиков используют коэффициент формы, который определяется на образцах с различным отношением высоты (h) к ширине (a) в лабораторных условиях. Достаточно подробный обзор существующих зависимостей коэффициента формы, а также их классификация изложена в работе [1]. Используемые для определения несущей способности соляных пород расчетные зависимости коэффициента формы приведены в работах [2, 3]. Согласно предложенной классификации, существующие зависимости, традиционно используемые при определении несущей способности поддерживающих целиков, подразделяют на прямые, гиперболические и логарифмические [1]. По результатам испытаний соляных пород, проведенных в ГИ УрО РАН, предложено коэффициент формы записывать в виде экспоненциальной зависимости [4, 5]. Несмотря на значительное количество предложенных уравнений, известные зависимости определения коэффициента формы не включают в свое математическое выражение влияние протяженности целиков, что может приводить к существенным погрешностям оценки несущей способности поддерживающих элементов подземных конструкций, влияющей как на безопасность ведения горных работ, так и на коэффициент извлечения полезных ископаемых.

С целью разработки нового коэффициента формы, учитывающего фактор протяженности поддерживающих целикков, проведен комплекс экспериментальных исследований на прямоугольных образцах сильвинита различной длины (*l*). Изготовление образцов осуществлялось из четырех породных монолитов (блоков), отобранных на шахтном поле рудника БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий», обрабатывающего ВКМКС. Места отбора: блок № 789 (сильвинит полосчатый, пласт АБ, 2-3 юго-западная панель, 5 восточный блок, южный выемочный штрек), блоки № 791, №792, №798 (сильвинит красный, пласт КрII, 8-9 северо-восточная панель, 2 западный и 1 восточный блоки, южный и северный выемочные штреки). Для изготовления образцов из монолитов изготавливались пластины постоянной толщины, ориентированные параллельно естественной слоистости. Размеры образцов составляли: ширина – 35 мм, высота – 35 и 70 мм, длина – 35, 70, 140 и 210 мм. Вид монолитов и изготовленных образцов приведен на рис. 1.



Рис. 1. Вид породных монолитов и изготовленных из них образцов сильвинита различной длины

Эксперименты по определению предела прочности на сжатие сильвинитовых образцов различной длины проводились на электромеханических испытательных прессах – Zwick/250 (25 тонн) и Zwick/400 (40 тонн), работающих в режиме контролируемого деформирования. Испытания осуществлялись при постоянной скорости перемещения траверса прессы, составляющей 1 мм/мин. По результатам эксперимента строились полные диаграммы деформирования, используемые для определения полного комплекса прочностных и деформационных показателей по схеме, приведенной в работе [3]. В табл. 1 приведены осредненные результаты определения предела прочности (σ_{np}) образцов сильвинита каждого типоразмера.

Таблица 1

**Осредненные результаты определения предела прочности
прямоугольных образцов сильвинита различной длины**

№ блока	a, мм	h, мм	l, мм	кол-во образцов	σ_{np} , МПа
789	35	70	35	6	19,0
			70	5	22,2
			140	2	23,4
			210	1	22,2
		35	35	4	30,5
			70	3	37,2
			140	2	39,8
			210	1	43,0
791	35	70	35	11	24,5
			70	4	27,1
			140	2	32,9
			210	1	34,2
		35	35	10	34,7
			70	4	40,7
			140	4	47,0
			210	1	48,6
792	35	70	35	9	26,7
			70	4	32,8
			140	4	34,6
			210	1	39,3
		35	35	4	29,1
			70	2	41,1
			140	2	43,9
			210	1	42,9
798	35	70	35	9	30,4
			70	6	34,7
			140	1	32,9
			210	1	39,5
		35	35	5	35,7
			70	4	43,5
			140	3	48,6
			210	1	-

Значения предела прочности использовались для определения коэффициента формы образцов произвольного размера, который вычислялся по формуле:

$$K_f = \frac{\sigma_{\text{пр}}(a, l, h)}{\sigma_{\text{пр}|a=l=0,5h}}. \quad (1)$$

Характер влияния относительной длины образца (l/a) на осредненный коэффициент формы приведен на рис. 2.

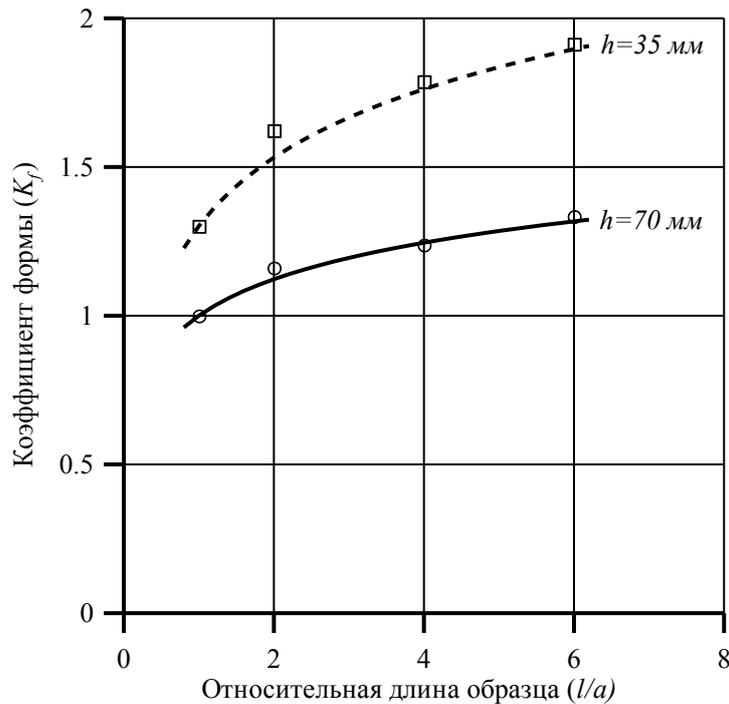


Рис. 2. Характер изменения коэффициента формы прямоугольных образцов сильвинита в зависимости от длины

Полученные регрессионные зависимости описываются уравнениями:
образцы высотой $h=70$ мм

$$K_f = 0,18 \ln(l/a) + 1,0. \quad (2)$$

образцы высотой $h=35$ мм

$$K_f = 0,33 \ln(l/a) + 1,3. \quad (3)$$

Анализ результатов проведенных исследований позволил установить, что с увеличением длины образца коэффициент формы возрастает, при этом интенсивность роста коэффициента формы уменьшается с увеличением высоты и длины образца.

Проведенные исследования направлены на разработку нового коэффициента формы, учитывающего фактор протяженности поддерживающих целиков при определении параметров камерной системы разработки калийных рудников, работающих в условиях ВКМКС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №19-45-590004 и программы ФНИ (проект № 0422-2019-0148-С-01, регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690032-2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ведмедев А.В. Коэффициент формы в расчётах подземных сооружений // Геотехническая механика: межведомств. сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2004. – Вып. 51. – С. 250-257.
2. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей: утв. ПАО «Уралкалий», ЗАО «Верхнекамская калийная компания», ООО «ЕвроХим-Усольский Калийный комбинат». – введ. в действие 30.03.2017 в ред. 2014 г. – Пермь; Березники, 2014. – 130 с.
3. Барях А.А, Асанов В.А., Паньков И.Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 198 с.
4. Паньков И.Л., Шубина С.В. Результаты экспериментальных исследований коэффициента формы образцов сильвинитовых пород Верхнекамского калийного месторождения // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромышленного оборудования. – 2018. – Т. 1. – С. 171-176.
5. Паньков И.Л., Шубина С.В. К оценке несущей способности сильвинитовых целиков пласта Красный 2 Верхнекамского месторождения калийных солей // IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле: материалы конф. – Новосибирск, 2018. – С.456-458.

УДК 622.831-539.376

DOI:10.7242/echo.2020.3.9

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
СОЛЯНЫХ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ ВО ВРЕМЕНИ**

Н.А. Самоделкина

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Проведено математическое моделирование деформации камерного блока с жесткими целиками с учетом эффекта ползучести. Получены графики изменения во времени оседаний земной поверхности в зоне полной подработки, проведен анализ динамики напряженно-деформированного состояния.

Ключевые слова: реология (ползучесть), камерная система отработки, математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние.

Оценка изменения напряженно-деформированного состояния породного массива во времени является крайне важным элементом обеспечения безопасности горных работ и анализа негативных воздействий подземной разработки на геологическую среду [1].

Процесс нарастания во времени оседаний земной поверхности при камерной системе отработки обусловлен пластическими и реологическими деформациями целиков и потолочин камер. Математическое моделирование деформирования камерного блока с учетом этих двух видов необратимых деформаций является весьма сложной задачей. Поэтому в данной работе рассмотрен вариант отработки, при котором необратимые деформации обусловлены преимущественно эффектами ползучести. Этому варианту соответствует отработка с жесткими целиками, когда степень их нагружения $C \leq 0.3$.

На основе эмпирических наблюдений [2] при отработке сильвинитовых пластов с жесткими целиками было получено соотношение, определяющее развитие во времени процесса сдвижения земной $\eta(t)$ поверхности в зоне полной отработки

$$\eta(t) = 0.2\eta_{ok} \frac{t}{100}, \quad (1)$$

где η_{ok} – величина максимальных оседаний земной поверхности на момент окончания процессов сдвижения, t – рассматриваемый период времени, лет.

Для учета реологических процессов, происходящих в массиве горных пород под действием техногенных факторов, использовалась конечно-элементная процедура рас-