

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-

чета напряженно-деформированного состояния [3, 4]. Описание развития процесса деформирования во времени базировалось на известном принципе Вольтерра [5].

Реологическое уравнение для трехмерного напряженного состояния записывалось через девиаторные части тензоров напряжений и деформаций

$$e_{ij} = \frac{1}{2G} \left[s_{ij} + \int_0^t H(t-\tau) s_{ij}(\tau) d\tau \right],$$

где e_{ij} , s_{ij} – соответственно, девиаторы тензора деформаций и тензора напряжений, обусловленные техногенными нагрузками; $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль сдвига; E, ν – соответственно, модуль упругости и коэффициент Пуассона; $H(t-\tau)$ – некоторая убывающая во времени функция. В качестве функции $H(t-\tau)$ было выбрано обобщенное ядро Абеля $H(t-\tau) = \beta \frac{(t-\tau)^\alpha}{\Gamma(\alpha+1)}$, где $\Gamma(\alpha+1)$ – гамма-функция; α, β – параметры релаксации.

Математическое моделирование деформирования во времени подработанного массива (рис. 1, а) основывалось на методе конечных элементов, расчетная схема с учетом симметрии представлена на рис. 1, б).

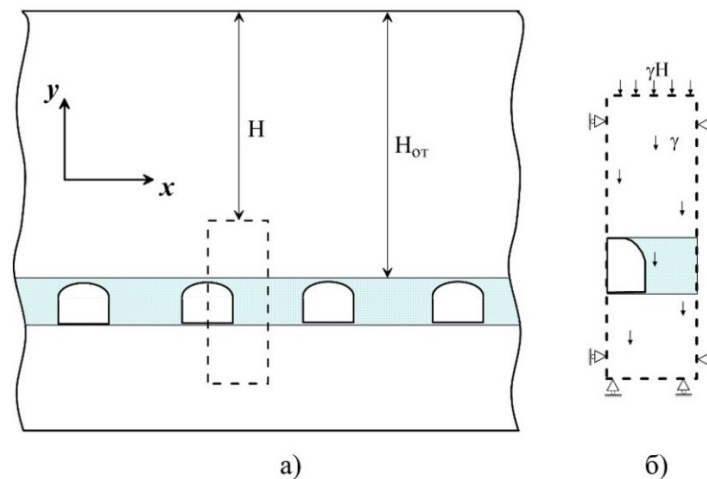


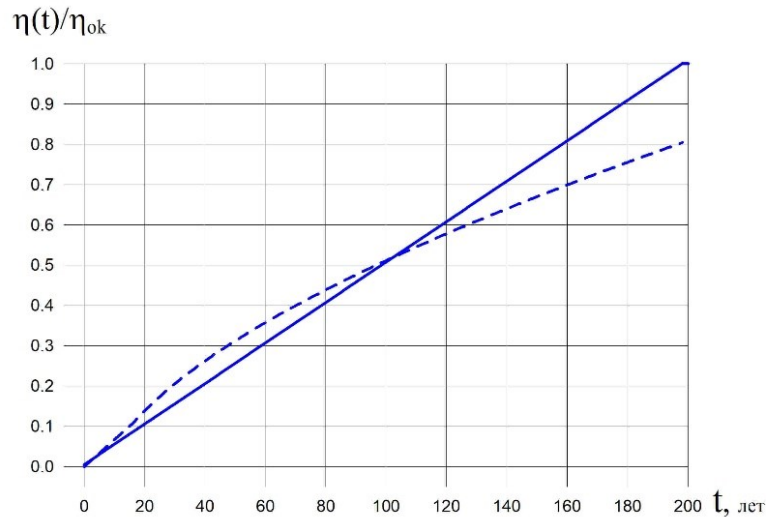
Рис. 1. Подработанный массив а) и расчетная схема б)

Расчеты проводились для трех степеней нагружения целиков: $C = 0.15$, $C = 0.20$ и $C = 0.25$, при этом геометрия камер и целиков оставалась без изменения, а варьировалась только глубина отработки $H_{от}$. Параметр релаксации α в соответствии с [6] был принят $\alpha = -0.6$, а параметр $\beta = -0.000525$ был определен из условия соответствия расчетных и фактических графиков нарастания оседаний земной поверхности во времени.

На рис. 2 приведен график нарастания оседаний земной поверхности в зоне полной подработки ($\eta_{ок} = 57, 116, 196$ мм, соответственно, при $C = 0.15$, $C = 0.20$ и $C = 0.25$).

Из рисунка видно, что наблюдается хорошее совпадение расчетных и «экспериментальных» оседаний практически во всем временном интервале.

Как показали расчеты, напряженное состояние камерного блока на всем рассматриваемом временном интервале $0 \leq t \leq 200$ лет остается практически неизменным, наблюдается только незначительное его «выравнивание» со временем, снижение градиентов при этом не превышает 4%. Момент времени $t = 0$ соответствует окончанию отработки.



- - график, построенный по результатам обобщения экспериментальных данных о развитии процесса сдвижения во времени (формула 1)
- - - - - график, построенный по результатам математического моделирования деформирования камерного блока во времени

Рис. 2. Графики нарастаний оседаний земной поверхности в зоне полной подработки

На рис. 3 приведены изолинии вертикальных необратимых деформаций, обусловленных эффектом ползучести.

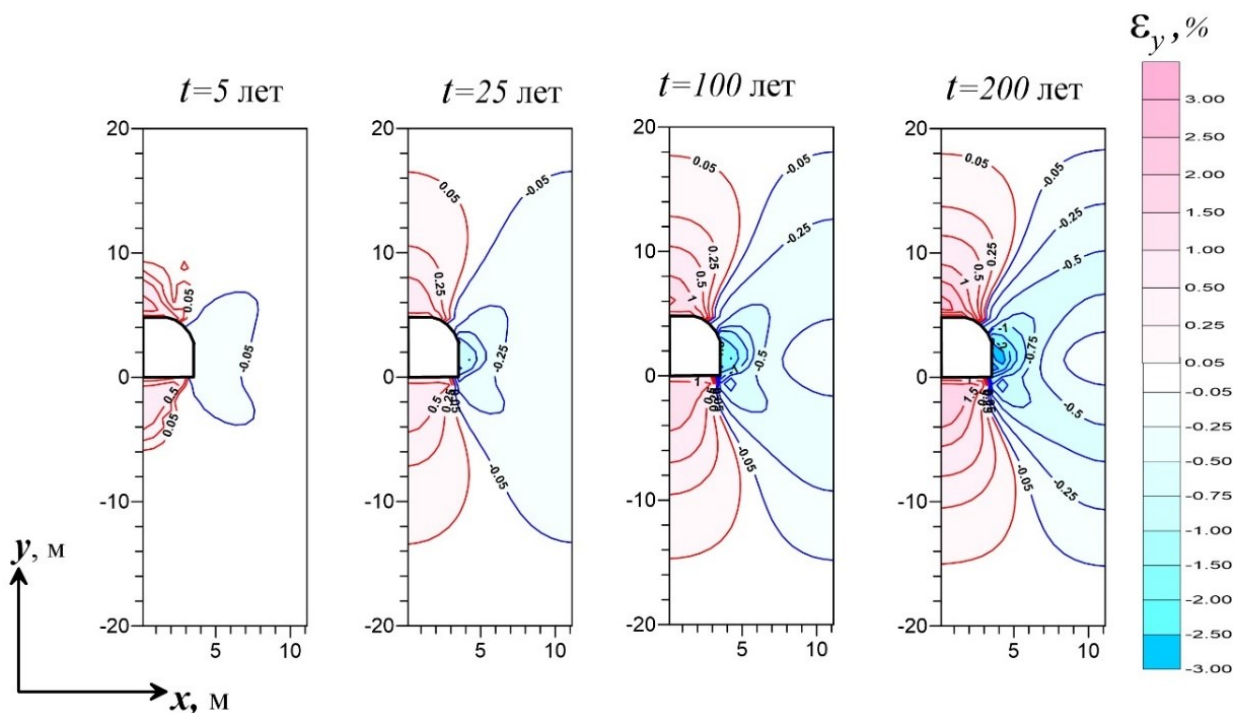


Рис. 3. Динамика распределения необратимых вертикальных деформаций растяжения («+» – красное) и сжатия («-» – синее) в сечении камерного блока

Деформации, представленные на рис. 3 и определяют нарастание оседаний земной поверхности. Наличие растягивающих деформаций обуславливает опускание кровли камер $\eta_{кр}$ (рис. 4а), а также пучение почвы камеры $\eta_{нод}$ (рис. 4б).

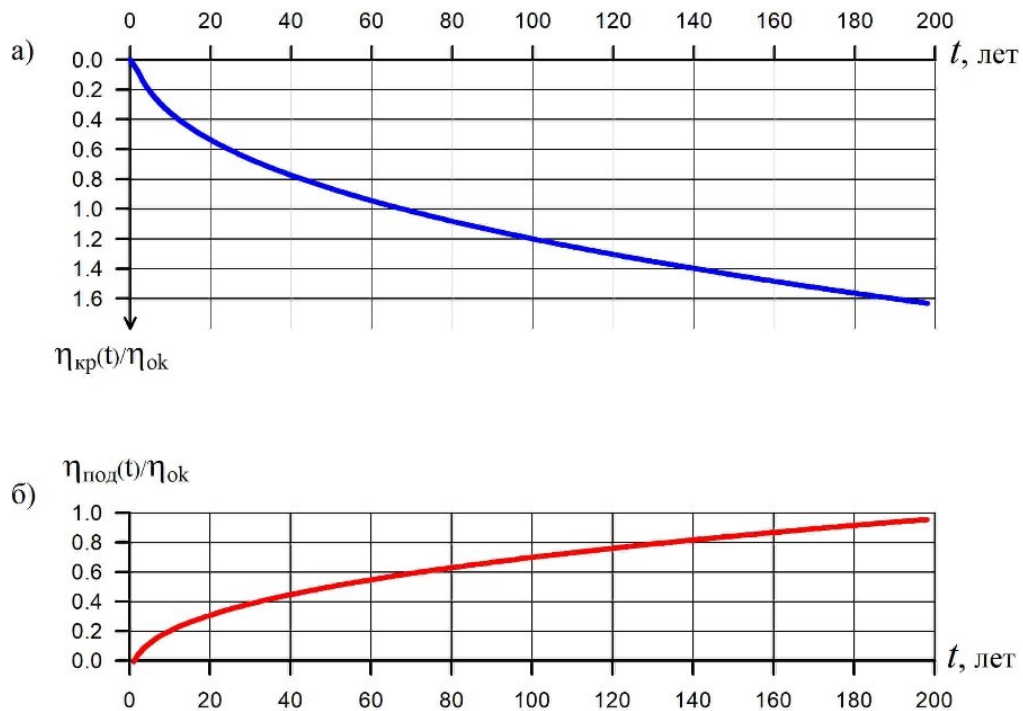


Рис. 4. Графики нарастания смещений кровли а) и подошвы б) камеры

На всем рассматриваемом временном интервале проводилась оценка возможности возникновения пластических деформаций по объемному критерию прочности [7], которая показала, что вклад пластических деформаций в величину оседаний земной поверхности при заданной степени нагружения междукамерных целиков практически отсутствует и составляет менее 0.05%. Зоны пластических деформаций приурочены к контуру камеры.

Таким образом, предложенная методика реологического анализа показала свою эффективность при оценке изменения напряженно-деформированного состояния породного массива, подработанного камерной системой разработки с «жесткими» целиками. Выбранные реологические параметры $\alpha = -0.6$, $\beta = -0.000525$ обеспечили приемлемое соответствие расчетных и «условно-экспериментальных» графиков нарастания оседаний земной поверхности во времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Baryakh A.A., Samodelkina N.A., Pan'kov I.L. Water-tight stratum rupture large-scale mining. Part II // Journal of Mining Science. – 2012. – V. 48, № 6. – P. 954-961.
2. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых 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. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
4. Самоделкина Н.А. Об одном способе учета реологических свойств пород в конечноэлементном анализе геомеханических процессов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2003. – №6. – С. 14-20.
5. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
6. Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А. Деформирование соляных пород / ГИ УрО РАН; [отв. ред. Н.С. Булычев]. – Екатеринбург, 1996. – 204 с.: ил.
7. Барях А.А. Об одном критерии прочности горных пород / А.А. Барях, Н.А. Самоделкина // Чебышевский сборник. – 2017. – Т. 18, № 3 (63). – С. 72-87. DOI: 10.22405/2226-8383-2017-18-3-72-87.