

7. Немчин Н.П., Терентьев П.Ю. Полуэмпирические формулы определения модуля деформации и модуля спада массива горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 11. – С. 305-313.
8. Torbica S., Lapčević V. A model for estimation of stress-dependent deformation modulus of rock mass // International Journal of Mining and Geo-Engineering. – 2019. – V. 53, № 1. – P. 63-67.
9. Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф. Свойства горных пород и методы их определения / под ред. М.М. Протодяконова. – М.: Недра, 1969. – 392 с.: ил.
10. Meyer T.O., McVey J.R. NX borehole jack modulus determinations in homogeneous, isotropic, elastic materials // US Bur Mines Rep Invest. – 1974. – № 7855.
11. Heuze F.E. Scale effects in the determination of rock mass strength and deformability // Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roches. – 1980. – V. 12, № 3-4. – P. 167-192.
12. Паньков И.Л., Асанов В.А. Изучение механизма масштабного эффекта при сжатии квазипластичных соляных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2015. – № 2. – С. 273-278.
13. Goodman, R.E., Van, T.K., Heuze, F.E. Measurement of Rock Deformability in Boreholes // Proceedings of the 10th U.S. Symposium on Rock Mechanics American Institute of Mechanical Engineers. – Austin, 1970. – P. 523-555.
14. ASTM D4971-08 Standard Test Method for Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Using Diametrically Loaded 76-mm (3-in.) Borehole Jack. – 2008. – 7 p.
15. Heuze, F.E. Suggested Method for Estimating the In-Situ Modulus of Deformation of Rock Using the NX-Borehole Jack // Geotechnical Testing Journal. – 1984. – V. 7, № 4. – P. 205-210.
16. Park S., Kim J.-S., Kwon S. Investigation of the development of an excavation damaged zone and its influence on the mechanical behaviors of a blasted tunnel // Geosystem Engineering. – 2018. – V. 21. № 3. – P. 165-181.

УДК 622.831

DOI:10.7242/echo.2022.1.8

ОЦЕНКА ГРАНИЧНЫХ УГЛОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

С.Ю. Лобанов, А.К. Федосеев
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Вопрос влияния отработки калийных залежей на больших глубинах на сохранность объектов на земной поверхности в настоящее время не является до конца изученным. Использование инженерных подходов, принятых для месторождений меньшей глубины, при переходе к большим глубинам зачастую приводит к существенной ошибке. В статье на примере Гремячинского месторождения калийных солей рассматривается изменение мульды сдвижений земной поверхности в зависимости от горнотехнических условий при выемке продуктивных пластов с глубины более 1 км. Геомеханическое моделирование осуществлялось с использованием реологического подхода, основанного на математическом описании прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверхности. Численная реализация осуществлялась методом конечных элементов. Расслоение по границам геологических пластов моделировалось контактными элементами Гудмана. По результатам моделирования показана возможность значительно уменьшить ширину охранного целика под железной дорогой, проходящей по территории рудника.

Ключевые слова: калийные рудники, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование, метод конечных элементов

Увеличение глубины горных работ, а также наличие достаточно мощного жесткого слоя пород, перекрывающего обрабатываемые пласты, приводит к существенному отличию расчетных оседаний от фактических при использовании традиционных методов прогнозирования развития деформаций земной поверхности [1]. Это, в свою очередь, может приводить как к завышенной, так и к заниженной оценке воздействия выемки продуктивных пластов на сохранность наземных объектов и сооружений. Такая ситуа-

ция складывается для рассматриваемого в данной статье Гремячинского месторождения калийных солей, расположенного на территории Котельниковского района Волгоградской области, где расчетная ширина охранного целика под магистральной железной дорогой, проходящей через территорию калийного рудника, составляет около 2 км, что значительно снижает объем возможной добычи калийной руды (рис. 1).

Построение геомеханической модели подработанного массива Гремячинского месторождения выполнялось аналогично [2]. Изменения состояния водозащитной толщи Гремячинского месторождения оценивались с помощью математической модели, которая учитывала весь комплекс горно-геологических и горнотехнических факторов. Для анализа деформирования подработанного массива во времени применялся известный реологический подход, основанный на математическом описании прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверхности [3]. В модели учитывалось расслоение по границам геологических пластов, которые при численной реализации моделировались контактными элементами Гудмана [4, 5]. Свойства контактов принимались по данным лабораторных исследований [6].

Численная реализация осуществлялась методом конечных элементов в перемещениях [7] с дискретизацией рассматриваемой области на треугольные элементы первого порядка. Решение упругопластической задачи основывалось на методе начальных напряжений [8, 9].

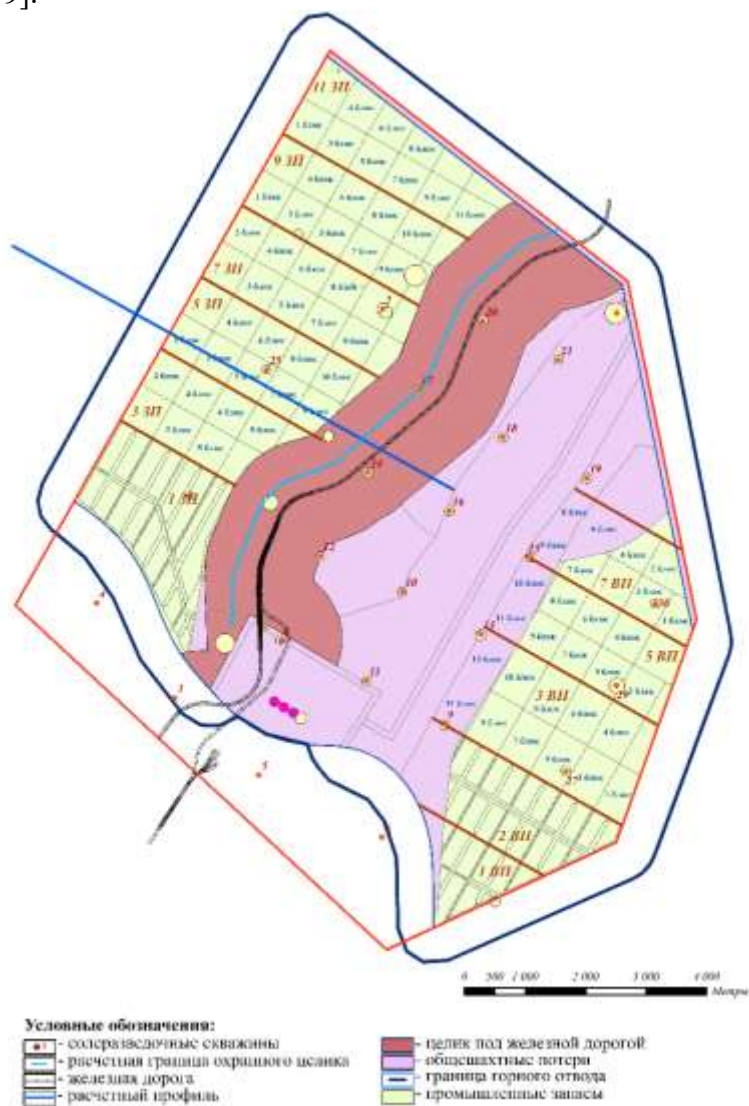


Рис. 1. Обзорная схема района исследований

Оценка безопасной эксплуатации магистральной железной дороги осуществлялась вдоль субширотного расчетного профиля почти перпендикулярного магистральной железной дороге (рис. 1). Границы зоны влияния отработки продуктивного пласта на объекты на земной поверхности определялись согласно [10]: при значениях наклона – $i = 0.5 \cdot 10^{-3}$ и горизонтальных деформаций – $\varepsilon = 0.5 \cdot 10^{-3}$.

Вследствие значительной глубины отработки на Гремячинском месторождении при развитии горных работ в широтном направлении не выполняются условия полной подработки: $L < 1.54H$, где L – полумульда сдвижения, H – глубина горных работ. Для обеспечения условий полной подработки протяженность выработанного пространства для Гремячинского месторождения должна превышать 4 км (рис. 2). При этом условный граничный угол со стороны железной дороги, определяемый по минимальным наклонам и горизонтальным деформациям, составляет 72° .

Для фактических параметров отработки граничный угол на конец сдвижения на восточной границе расчетного профиля (рис. 3а), т.е. вблизи железной дороги, составляет 73° (наклон и деформации в точке поверхности, определяемой этим углом, не превышают $0.5 \cdot 10^{-3}$), что несколько больше, чем для условий полной подработки. Оседания под железной дорогой составляют менее 4 см. Это позволяет увеличить зону отработки на 600 м.

Вариация жесткости перекрывающих отложений в пределах одного порядка практически не оказывает влияния на величину граничного угла.

Увеличение коэффициента извлечения вследствие изменения параметров отработки в восточной части западной панели (рис. 3) ведет к росту максимальных оседаний (до 1.08 м) и уменьшению граничного угла с 73° – при $\omega = 0.31$, до 60° – при $\omega = 0.45$ (рис. 4).

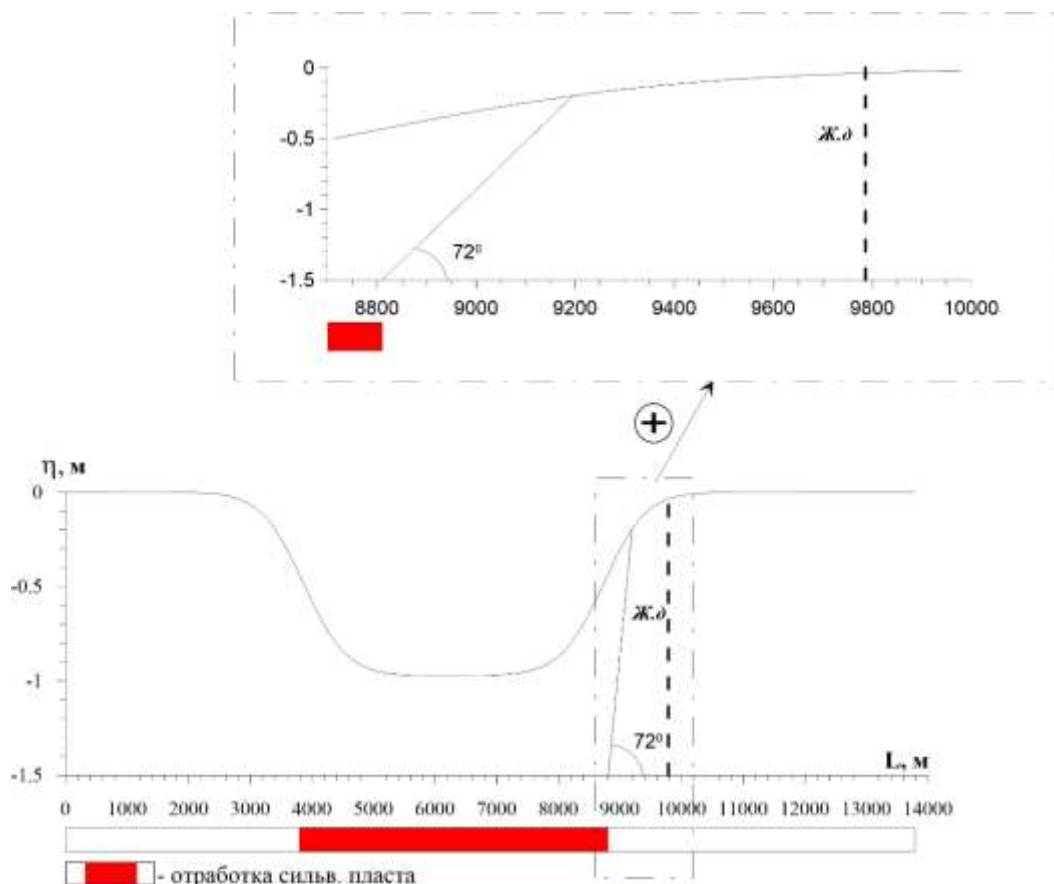


Рис. 2. Мульда сдвижения для условия полной подработки

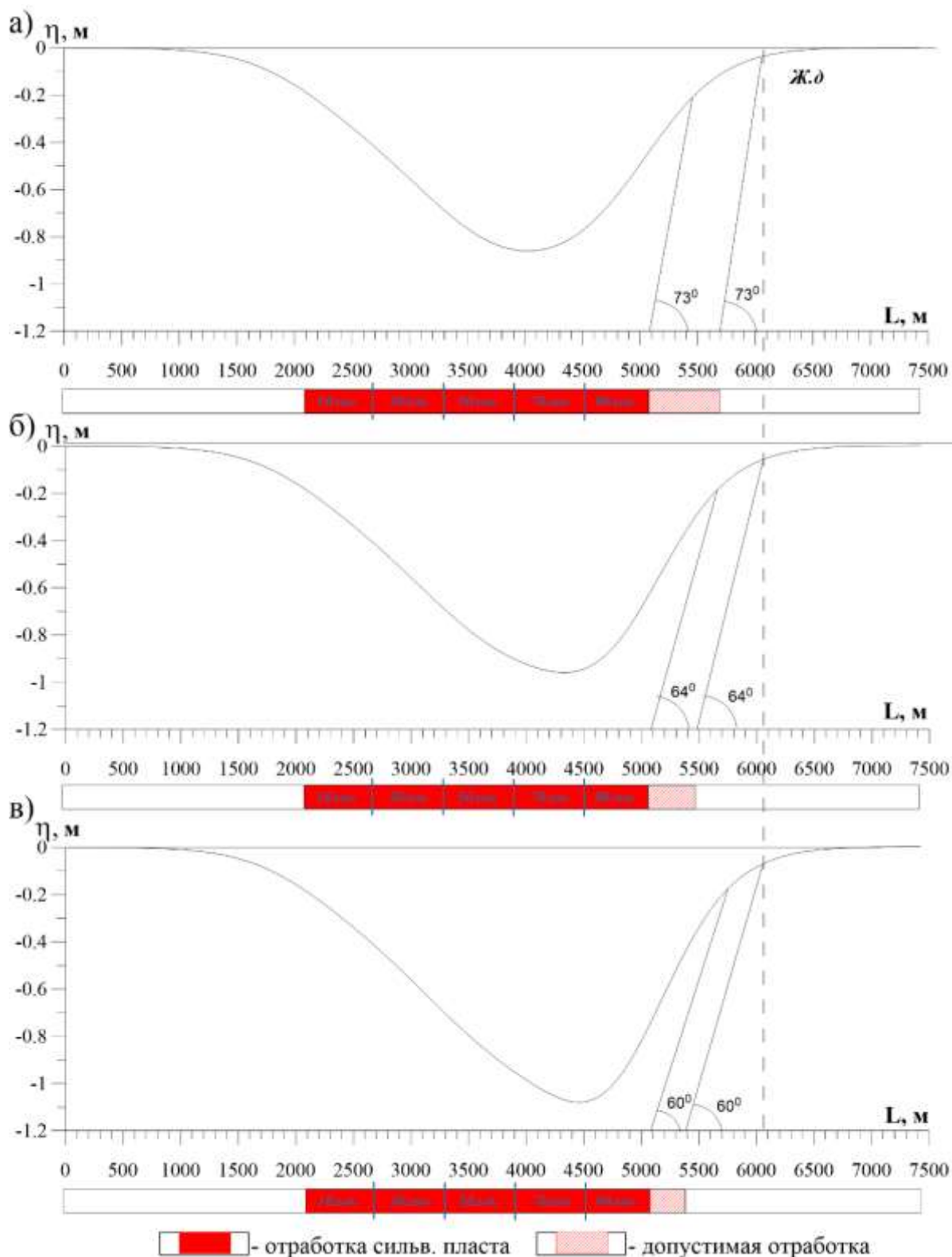


Рис. 3. Изменение оседаний земной поверхности в зависимости от коэффициента извлечения руды в краевой части: а) $\omega = 0.31$, б) $\omega = 0.40$, в) $\omega = 0.45$

С учетом полученного граничного угла в 73° размер охранного целика к западу от железной дороги должен составлять 360-370 м, что почти в три раза меньше изначально проектируемого (рис. 1) [11]. Установленный размер охранного целика для линейных объектов является предварительным и должен корректироваться по мере накопле-

ния фактической информации о развитии процесса сдвижения на Гремячинском месторождении.

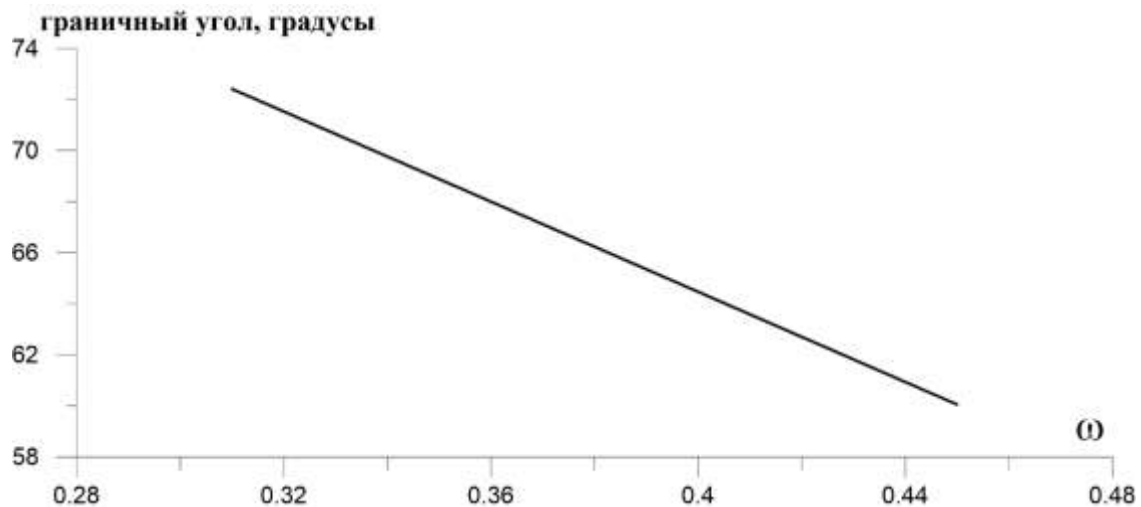


Рис. 4. Влияние степени извлечения в краевой части на величину граничного угла

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования и науки Пермского края в рамках проекта 20-45-596001 р_НОЦ_Пермский край и при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от «29» декабря 2020 г. (рег. номер 122012000403-1)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hongkai Han, Jialin Xu, Xiaozhen Wang, Jianlin Xie, Yantuan Xing. Surface Subsidence Prediction Method for Coal Mines with Ultrathick and Hard Stratum // *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, Article ID 3714381, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/3714381>
2. А.А. Барях, А.К. Федосеев, С.Ю. Лобанов. Deformations and fracture of rock strata during deep level potash mining // *Procedia Structural Integrity*, vol. 32, 2021, Pages 109-116, ISSN 2452-3216, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.09.016>.
3. Барях А.А., Самodelкина Н.А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2005. – № 6. – С. 32-41.
4. Goodman R.E. The mechanical properties of joints // *Adv. Rock Mech.* 1974. V.1, Pt A. P. 127-140.
5. Groth T. Description and applicability of the BEFEM code. // *Applied Rock Mechanics Mining: Proceedings Conference*, Lulea. 1-3 June, 1980. – London, 1981. – P. 204-208.
6. Асанов В.А. Взаимодействие слоев в соляном массиве: сообщ. I. Механические свойства контактов / Асанов В.А., Барях А.А., Дудырев И.Н., Паньков И.Л. // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 1992. – № 2. – С. 48-52.
7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
8. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987.
10. Правила охраны сооружений природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях ПБ 07-269-98, утв. постановлением Госгортехнадзора России от 16 марта 1998 г.
11. Горно-обогатительный комбинат по добыче и обогащению калийных солей мощностью 2,3 млн. т/год 95% КС1 Гремячинского месторождения Котельниковского района Волгоградской области. Рудник Гремячинского ГОК. Проектная документация. Свидетельство № 1114.09-2009-5904001952-П-063 от 07 декабря 2016 г. Пермь, 2016 г.