УДК 622.831

Д.Н.ПЕТРОВ, *канд. техн. наук, ассистент, petrovgs@mail.ru.*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

D.N.PETROV, *PhD in eng. sc., assistant lecturer, petrovgs@mail.ru.*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

ФОРМИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНОГО МАССИВА ДО И ПОСЛЕ ОСУШЕНИЯ

Приведены результаты и выполнен анализ численного моделирования формирования естественного напряженного состояния массива горных пород до и после проведения мероприятий по его осушению. Для описания поведения пород применялась упругая и упруго-пластическая модели деформирования.

Ключевые слова: массив, напряжения, поровое давление, подземные воды, осушение.

STRESS AND STRAIN STATE OF STRATA BEFORE AND AFTER DRAINAGE

Result of numerical modeling of natural in-situ stress formation before and after drainage work is given. Elastic and elastic-plastic material model is used for soil behavior.

Key words: strata, stress, pore pressure, underground water, drenage.

Большое количество эксплуатируемых и разведанных рудных месторождений полезных ископаемых на территории Российской Федерации располагается в сложных горно- и гидрогеологических условиях. Многие из них либо обводнены, либо залегают под напорными водоносными горизонтами, мощность которых может достигать 500 м. Освоение таких месторождений сопровождается осушительными и водопонизительными мероприятиями. В результате происходит существенное изменение естественного напряженного состояния массива, формируются крупные депрессионные воронки, изменяются условия питания и разгрузки подземных вод. Как показывает практика, существующие методы прогноза геомеханического состояния массива не всегда оказываются эффективными, что увеличивает риски возникновения аварийных ситуаций при ведении горно-проходческих и очистных работ.

Задачей исследования было изучение влияния фактора осушения массива на перераспределение напряжений и деформаций в массиве до начала ведения горных работ применительно к условиям Яковлевского железорудного месторождения Курской магнитной аномалии. Решением проблемы по определению полей напряжений в рудном массиве Яковлевского месторождения посвящена работа [5], однако в ней при постановке задачи не учитывался фактор присутствия в геологическом разрезе подземных напорных водоносных горизонтов.

В геологическом строении месторождения выделяются два различных генетических комплекса пород: докембрийский кристаллический фундамент и перекрывающая его мощная толща осадочных пород горизонтального залегания. Богатые руды залегают среди выветрелых железистых кварцитов на глубине 480-590 м с углом падения 65-75° полосами клинообразной формы. Гидрогеологические условия месторождения характеризуются наличием в разрезе семи водоносных горизонтов, разделенных на два водоносных комплекса

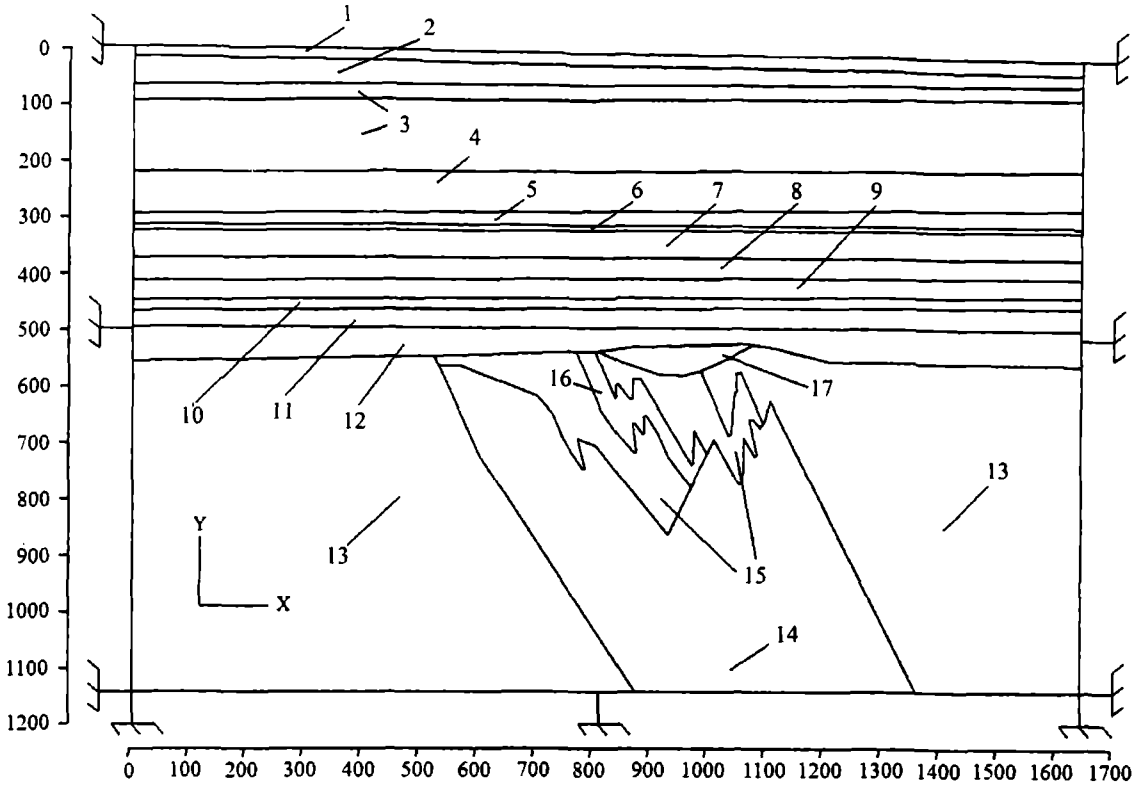


Рис.1. Геологический разрез Яковлевского месторождения (расчетная схема к моделированию)

1 – почвенно-растительный слой; 2 – песок; 3 –мергель; 4 – мел; 5 – песок, песчаная глина; 6 – глинистый песок; 7 – глинистый сланец; 8 – глина; 9 – песчаник, аргиллит; 10 – песчаник, глинистый песок; 11 – глинистый песок, глина; 12 – известняки карбона; 13 – сланец; 14 – железистые кварциты; 15 – руда железослюдково-мартитовая; 16 – руда гидрогематитовая; 17 – переотложенные руды

Физико-механические свойства горных пород

Наименование породы	Характеристики					
	γ, кН/м^3	Е, МПа	ν	φ, град.	С, кПа	*n*, %
Почвенно-растительный слой и пески	19,2	200	0,27			
Мела кампана	18,6	650	0,24	20	100	50
Мергель	22,3	6300	0,24	15	60	43
Мела коньяк-турона	19,7	6300	0,26	20	175	42
Пески	20,2	480	0,32	27	150	38
Глины	21,3	460	0,34	18	120	32
Пески и глины карбона	20,6	470	0,34	15	250	36
Известняки карбона	24,5	3640	0,26	28	780	16
Руды переотложенные	34,8	1500	0,27	33	100	20
Руды железослюдково-мартитовые	33,0	500	0,35	23	380	40
Руды гидрогематитовые	32,0	2600	0,26	32	600	26
Железистые кварциты	34,3	10700	0,23	42	15100	13
Сланцы	31,1	2890	0,22	40	6300	21

в осадочном чехле и кристаллическом фундаменте. Водоносные горизонты осадочной толщи не оказывают влияния на обводнение рудной залежи месторождения из-за наличия в разрезе региональных водоупоров. На рис.1 представлен геологический разрез Яковлевского месторождения вкрест простиранию.

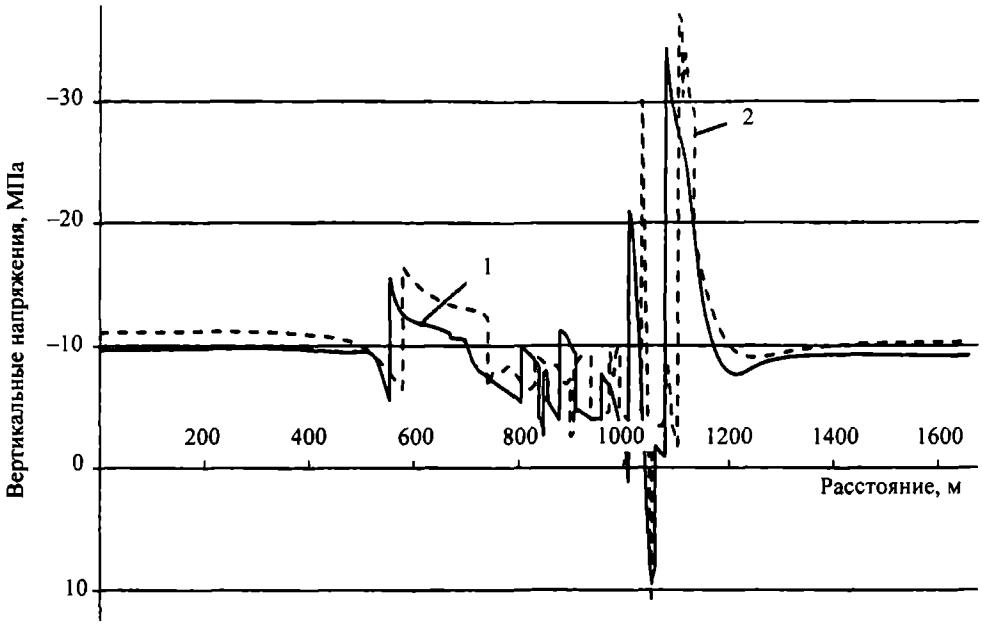


Рис.2. Распределение вертикальных напряжений на горизонтах –370 (1) и –425 м (2) до осушения

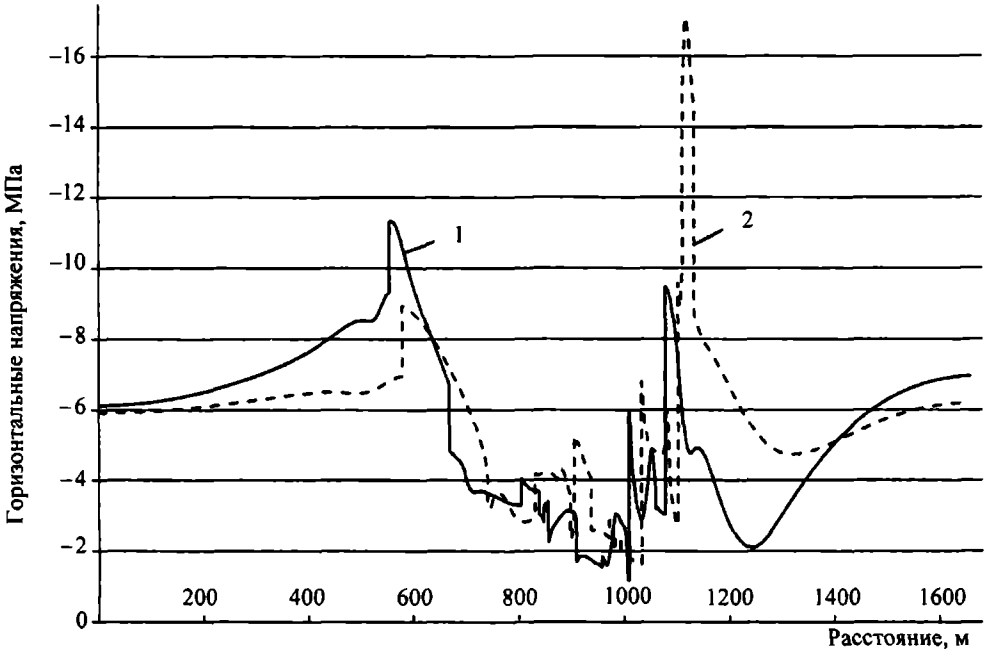


Рис.3. Распределение горизонтальных напряжений на горизонтах –370 (1) и –425 м (2) до осушения

Конечно-элементная модель рассматриваемого месторождения имела размеры 1650 м в длину и 1150 м в глубину. На первом этапе моделирования напряженное состояние массива формировалосьза счет собственного веса пород и взвешивающего действия воды (порового давления). Величина напора подземных вод в районе ведения горных работ составляла от 450 до 530 м. На втором этапе путем снятия порового давления моделировался процесс осушения рудного тела. Поведение горных пород и руд описывалось упруго-пластической моделью Кулона – Мора. В таблице приведены физико-

механические показатели вмещающих пород и руд [1, 2], принятые для моделирования: γ – объемный вес, E – модуль деформации, ν – коэффициент поперечной деформации, φ – угол внутреннего трения, C – сцепление, n – пористость.

На рис.2, 3 приведено распределение вертикальных и горизонтальных напряжений по горизонтам –370 м и –425 м до осушения месторождения. Максимальная концентрация эффективных напряжений прослеживается в сланцах висячего бока месторождения. Здесь величина вертикальных напряжений достигает 32-37 МПа, горизонтальных – 9 и 18 МПа. В рудном теле вертикальные напряжения уменьшаются и в зависимости от типа руды колеблются в интервале от 2 до 12 МПа. В железнослюдково-мартитовых рудах, обладающих большей деформативной способностью происходит снижение напряжений, в гидрогематитовых – концентрация. В железистых кварцитах лежащего бока напряжения составляют 13-16 МПа, в приконтактной зоне со сланцами резко падают до 5,5 МПа и затем выравниваются до уровня 10-12 МПа. В среднем вертикальные напряжения на горизонте –425 м превосходят напряжения на горизонте –370 м на 1,5-3 МПа. Для горизонтальных напряжений характерна разгрузка в рудном массиве до значений 1,8-5 МПа. Скачки напряжений приурочены к участкам контакта пород и руд с различными деформационными и прочностными характеристиками.

Проведение осушительных работ (снятие порового давления в рудах от горизонта –425 м до известняков карбона) вызвало изменение в напряженно-деформированном состоянии как рудного, так и вмещающего массива горных пород. Наибольшие вертикальные деформации происходят в центре известняков карбона на контакте с переотложенными рудами и составляют 70 см (рис.4), в породах висячего и лежащего бока их величина уменьшается до 20-30 см. Таким образом, еще до начала ведения горных работ произошел прогиб водоупорного слоя карбона на 40-50 см. На дневной поверхности образовалась воронка с центром под рудным телом, мульда оседания составила 32-35 см. Полученные величины смещений обусловлены только непосредственным осу-

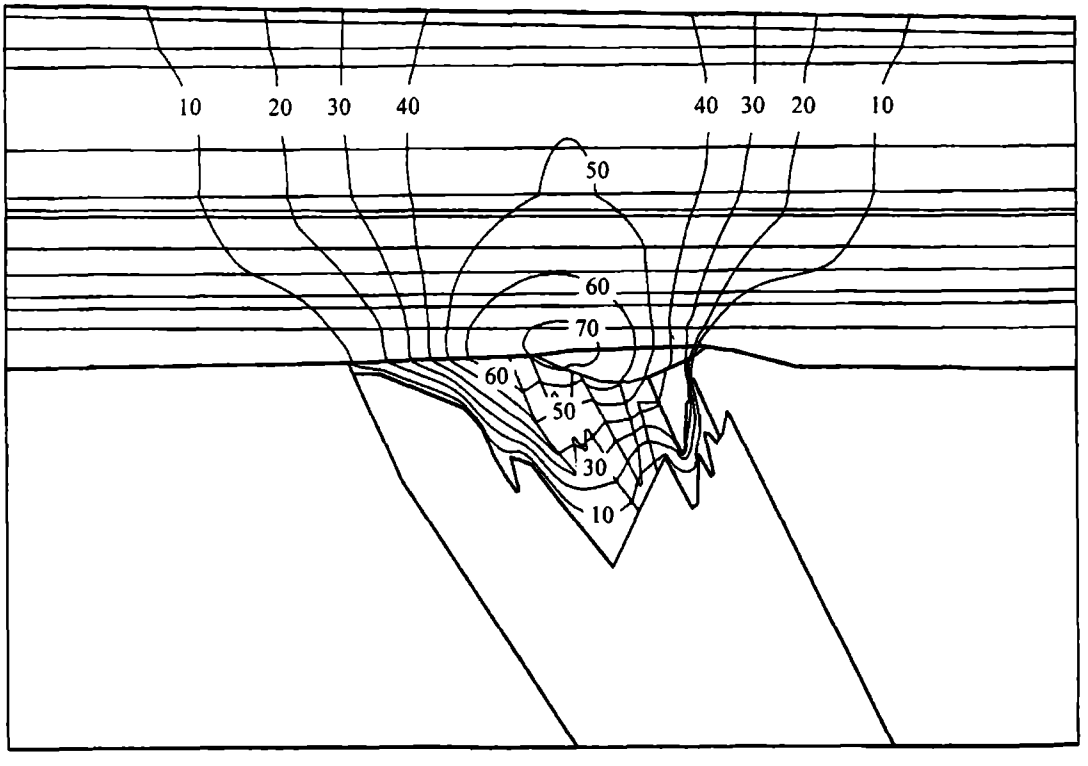


Рис.4. Изолинии распределения вертикальных смещений массива после проведения осушения (см)

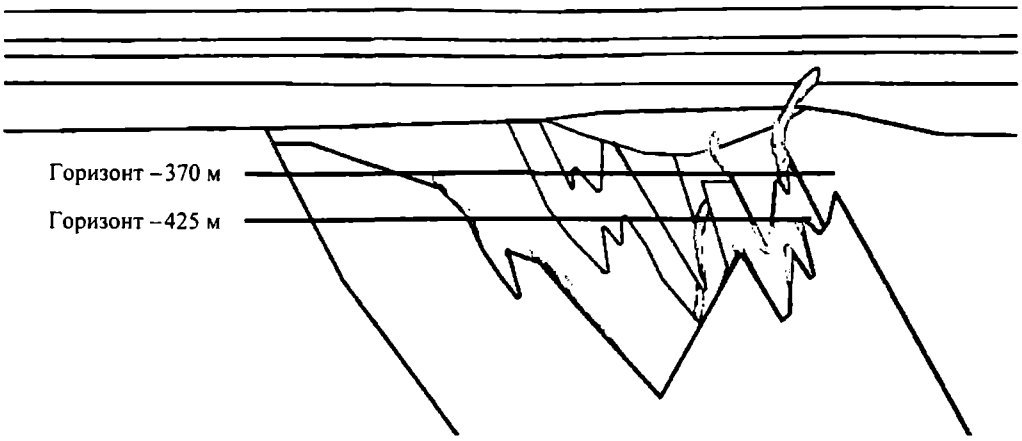


Рис.5. Формирование зон пластических деформаций в массиве после осушения

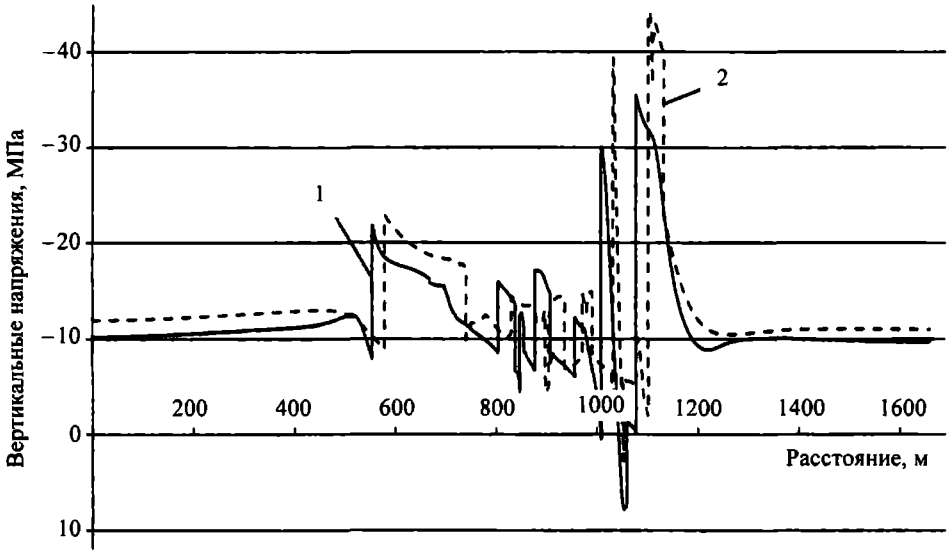


Рис.6. Распределение вертикальных напряжений на горизонтах –370 (1) и –425 (2) м после осушения

шением рудного тела, понижение напоров подземных вод в вышележащих водоносных горизонтах не учитывалось.

На рис.5 показаны зоны пластических деформаций, образовавшихся в результате осушения. Формирование зон пластических деформаций происходит в лежащем и висячем боках и приурочены к участкам контакта прочных вмещающих пород и слабых железослюдково-мартитовых руд. Обеспечению устойчивости выработок на данных участках должно уделяться особое внимание, поскольку еще до начала ведения проходческих работ массив будет разупрочнен. К наиболее опасной области следует отнести зону пластических деформаций, проходящую через породы карбона в районе переотложенных руд. Наличие пластических деформаций может привести к раскрытию трещин, увеличению скорости фильтрации воды и тем самым создать гидравлическую связь между водоносными комплексами в осадочном чехле и кристаллическом фундаменте.

Распределение вертикальных и горизонтальных напряжений после осушения рудного массива приведены на рис.6, 7. Характер их изменения аналогичен распределению напряжений до осушения, с тем отличием, что за счет снятия взвешивающего действия воды произошло возрастание эффективных напряжений. Величина вертикальных напряжений изменяется от 3 до 15 МПа, горизонтальных – от 2 до 9 МПа.

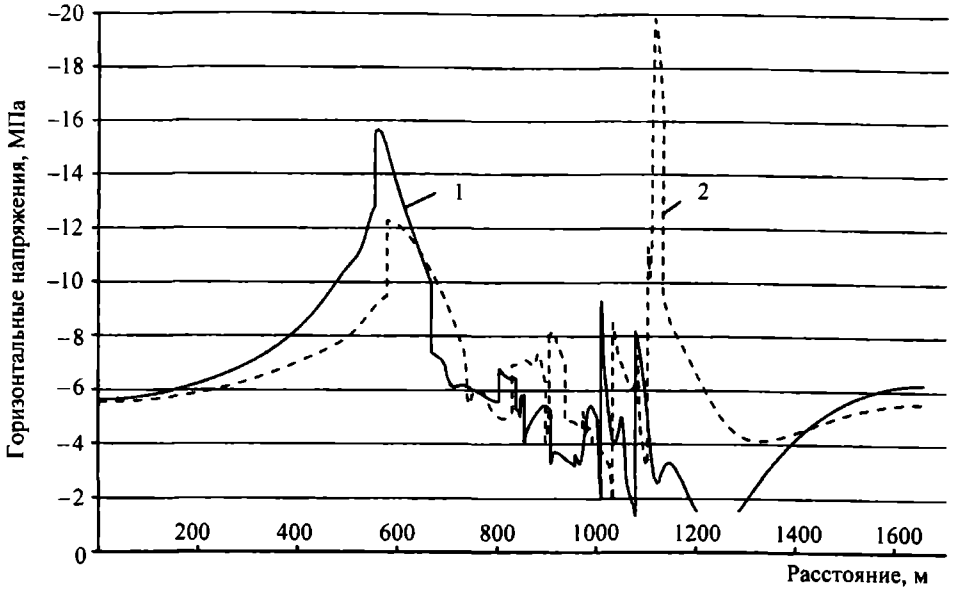


Рис.7. Распределение горизонтальных напряжений на горизонтах –370 (1) и –425 (2) м после осушения

На рис.8, 9 показано распределение коэффициента бокового давления в рудном массиве на горизонтах –370 и –425 м.На обоих горизонтах в лежащем боку в железослюдково-мартитовых рудах его величина составляет 0,3, при удалении от лежащего блока происходит плавное возрастание до 0,6-0,7. При входе в гидрогематитовые руды на горизонте –370 м коэффициент бокового давления резко падает до 0,42, на горизонте –425 м также наблюдается его уменьшение, но с меньшей интенсивностью. В прослойке гидрогематитовых и железослюдково-мартитовых руд происходит пиковое увеличение коэффициента бокового давления до 1-1,1. Далее, в зависимости от типа руд, скачкообразное увеличение (уменьшение) в диапазоне 0,75-0,23. В висячем боку коэффициент бокового давления выравнивается до 0,4-0,45. Характерным для обоих горизонтов является увеличение коэффициента бокового давления после осушения рудного массива. В среднем его величина возрастает на 10-15 %.

Результаты глубокого водопонижения на существующих месторождениях Курской магнитной аномалии, например, Южно-Белозерского, показали, что мульда оседания земной поверхности может доходить до 2,5-3 м [4]. Деформации произошли в результате предварительного и активного водопонижения толщи пород с суммарным напором подземных вод около 250 м.

Применительно к Яковлевскому месторождению в работе [3] на основе расчетных методик и экспериментально полученных характеристик пород (коэффициент сжимаемости и пористости) был сделан прогноз осадки пород от водопонижения. Расчет производился в следующей постановке: геологический разрез принимался усредненным из разрезов пяти скважин, расположенных в лежащем боку рудного тела; начальный напор для каждого пласта определялся разностью между высотными отметками статического уровня воды и среднего сечения рассматриваемого пласта, конечные напоры принимались равными нулю; осушение производилось на всю мощность от поверхности до рудного тела; влажность пород до и после осушения не изменялась.

Результаты показали, что кривая оседания земной поверхности в связи с большим радиусом влияния водопонижений будет пологой с максимальным значением вертикальных деформаций 0,9 м. Были выполнены инструментальные наблюдения за оседанием земной поверхности на первоначальном этапе водопонижения (понижение пьезомет-

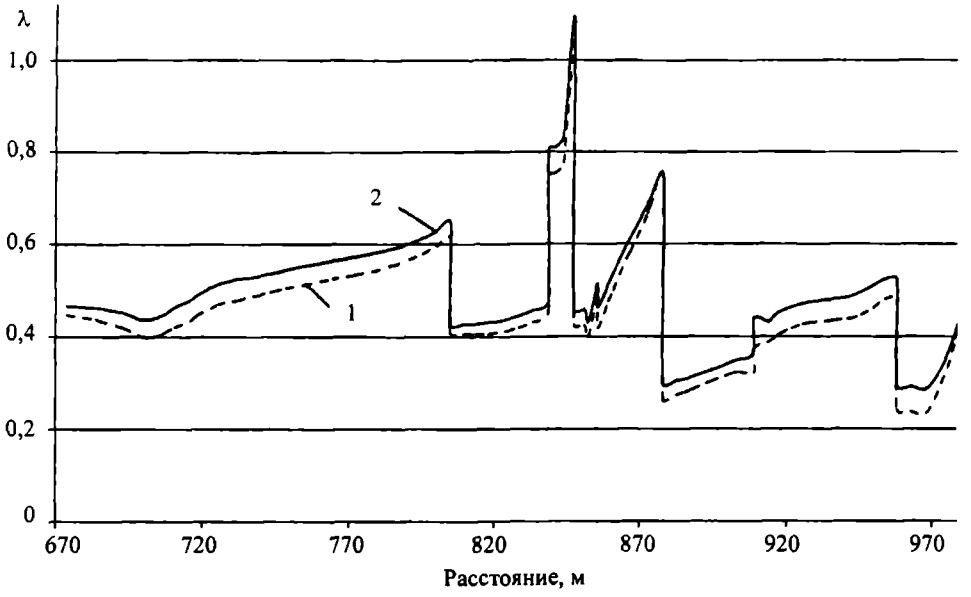


Рис.8. Распределение коэффициента бокового давления λ на горизонте –370 м до (1) и после (2) осушения

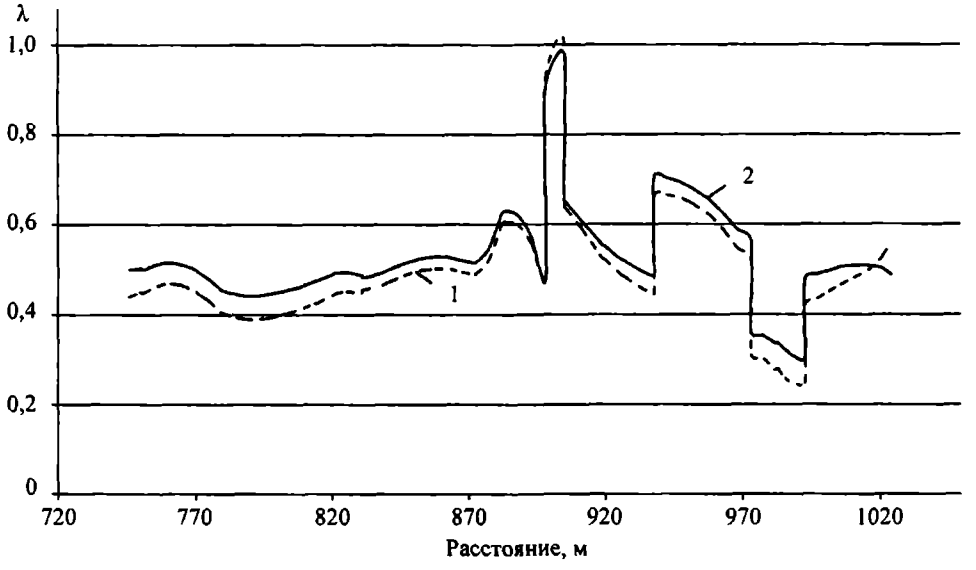


Рис.9. Распределение коэффициента бокового давления λ на горизонте – 425 м до (1) и после (2) осушения

рического уровня воды на 170 м). Наибольшая зафиксированная величина оседания составила приблизительно 50 мм и достаточно близко совпала с расчетной. Если сравнить результаты численного моделирования и расчета осадок по методике [3], видно, что они отличаются приблизительно в 2,5-3 раза. Стоит отметить отличие в постановке граничных условий – если в конечно-элементной модели рассматривалось водопонижение только в рудном теле, то в расчетной методике закладывалось осушение всей толщи пород, что и привело к такой значительной разнице.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геология, гидрогеология и железные руды Курской магнитной аномалии. Т.1-3. М.: Недра. 1970.

2. *Дашко Р.Э.* Инженерно-геологическая характеристика и оценка богатых железных руд Яковлевского рудника // Записки Горного института. 2006. Т.168.

3. *Кацнельсон Н.Н.* Определение углов сдвижения и расчет осадки пород от водопонижения / Н.Н.Кацнельсон, Н.М.Никольская, И.П.Иванов; Труды ВНИМИ. СПб, 1961. Сб.42.

4. *Мироненко В.А.* Гидрогеологические исследования в горном деле / В.А.Мироненко, Ю.А.Норватов, Л.И.Сердюков. М.: Недра, 1976.

5. *Потемкин Д.А.* Параметры поля напряжений в руднокристаллическом массиве до начала ведения горных работ / Д.А.Потемкин, В.Ф.Плащинский // Записки Горного института. 2006. Т.168.

REFERENCES

1. Geology, hydrogeology and iron ores of the Kursk magnetic anomaly. Moscow: Nedra. 1970. V.1-3.

2. *Dashko R.E.* Engineering geological characterization and evaluation of high-grade iron ore mine Yakovlevskiy // Notes of the College of mines. 2006. V.168.

3. *Kaznelson N.N., Nikolskaya N.M., Ivanov I.P.* Determination of the angles and the calculation of subsidence sediments of rocks from dewatering; The works of VNIMI. 1961. V.42.

4. *Mironenko V.A., Norvatov Y.A., Serdykov L.I.* Hydrogeological investigations in the mining sector. Moscow: Nedra, 1976.

5. *Potemkin D.A., Plashinskiy V.F.* Parameters of the stress field in ore-crystal array before mining // Notes of the College of mines. 2006. V.168.