



ГЕОМЕХАНИКА

УДК 539.3+51-74, 539.214, 539.424, 622

М.А. ЖУРАВКОВ, д-р физ.-мат. наук, проф.
заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»¹
E-mail: zhuravkov@bsu.by

М.А. НИКОЛАЙЧИК, магистр физ.-мат. наук
заведующий НИЛ «Прикладная механика»¹
E-mail: nikolaitchik.m@gmail.com

Н.М. КЛИМКОВИЧ
магистрант механико-математического факультета¹
E-mail: nikita.klimkovitch@yandex.ru

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 04.10.2022.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ ОТРАБОТКЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА БОЛЬШИМИ ПЛОЩАДЯМИ

Рассматривается механико-математическое моделирование процесса оседания земной поверхности при отработке массива горных пород столбовой системой ведения горных работ. Задача состоит в исследовании влияния отработанного пространства на состояние породной толщи, находящейся на разных глубинах (горизонтах), на каждом этапе процесса сдвижения горных пород. Цель исследования заключается в разработке численной геомеханической модели массива горных пород при использовании столбовой системы ведения горных работ, которая позволит корректно выделить в подрабатываемой породной толще характерные зоны, формирующиеся вследствие ведения горных работ, а также предоставит возможность моделировать процесс формирования мульды оседания дневной поверхности. Расчетные численные схемы модельных задач строятся с использованием алгоритмов конечно-элементного и дискретно-элементного моделирования. По результатам численного моделирования показано, что характеристики (линейные размеры и максимальное оседание) мульды оседаний, полученные в соответствии с разработанной геомеханической моделью, близки к характеристикам, рассчитанным по инженерной методике, применяемой в условиях Старобинского месторождения калийных солей (Республика Беларусь). Вместе с тем при увеличении глубин ведения горных работ расхождение между ними увеличиваются. Выполнен анализ причин такого поведения. Представлен нелинейный характер изменения граничных углов сдвижения в слоях породной толщи при увеличении глубин отработки и приведены выводы, объясняющие данные изменения. Прикладное применение полученных результатов моделирования заключается в обосновании возможности уменьшения размеров охранных целиков вокруг шахтных стволов и наземных объектов при увеличении глубин ведения горных работ, тем самым снижается количество оставленных в недрах запасов полезных ископаемых и увеличиваются экономические показатели добычи.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, блочные элементы, модель Кулона–Мора, массив горных пород, столбовая система разработки, зона обрушения, зона трещиноватости, граничные углы сдвижения, мульда оседаний

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-4-61-97-104>

Ведение. На Старобинском месторождении калийных солей одна из основных технологических систем отработки пласта полезного ископаемого — столбовая система, представляющая собой сплошную отработку пласта полезного ископаемого широким очистным забоем (лава) на больших площадях (размеры до 200×300 м и более). В ходе отработки массива горных пород столбовой системой между отдельными «столбами» для сохранения устойчивости подрабатываемой толщи оставляют участки нетронутого массива значительных размеров — целики. Их размеры в производственных условиях определяются с использованием инженерных методик. Так, при расчете размеров охранных целиков вокруг вертикальных стволов основным фактором являются граничные углы сдвижения, определяющие область максимального влияния горных работ на породную толщу. В рамках инженерных расчетов эти граничные углы определяются на основе обобщенных результатов натурных исследований и не зависят от механических свойств пород, а также глубины ведения горных работ. Поэтому актуальным является постановка вопроса о линейном изменении граничных поверхностей влияния горных работ на окружающий массив при увеличении глубины ведения горных работ. В связи с этим при выполнении изложенных далее исследований ставилась задача определения изменения формы области влияния горных работ на окружающий массив при увеличении глубины их ведения, т. е. изучить характер изменения граничных углов в различных породных слоях при увеличении глубины ведения горных работ [1–4].

Таким образом, по результатам компьютерного моделирования можно будет построить полную картину области влияния отработанных пространных на массив горных пород.

Постановка задачи. В качестве модельных задач рассматривается процесс отработки массива горных пород «одиночными столбами», находящимися в слоях каменной соли на глубинах 450 (I), 600 (II), 800 (III) и 1000 (IV) м.

Численная модель строилась с учетом введения следующих обобщенных слоев: верхний осадочный слой мощностью 109 м, средний слой глинисто-мергелистой толщи (ГМТ) мощностью 200 м и нижележащая соленосная толща. Геометрические размеры расчетной модели выбирались таким образом, чтобы обеспечить отсутствие влияния отработываемых лав на напряженно-деформированное состояние (НДС) удаленных участков породного массива. Вследствие больших геометрических протяженностей отработываемого столба, задача решалась в условиях плоско-деформированного состояния. Высота лав принималась равной 3 м, а длина — 200 м.

Физико-механические свойства горных пород, используемые в качестве исходных данных, приведены в таблице 1 [5].

Таблица 1 — Физико-механические свойства горных пород
Table 1 — Physical and mechanical properties of rocks

Порода	Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел на сжатие, МПа	Предел на растяжение, МПа	Угол внутреннего трения, град	Коэффициент сцепления, МПа
Осадочный слой	2043	2,76	0,36	—	—	11,12	0,19
ГМТ	2150	0,56	0,4	—	—	46,55	1,25
Соляная пачка	2400	2,05	0,27	~30	~1	41,00	1,47

Модельные задачи решались в двумерной постановке на базе метода конечных элементов (МКЭ). Исследования выполнялись как последовательность решения задач в квазистатической постановке. Все выделенные пачки слоев в общей модели рассматривались как квазиоднородные и квазиизотропные упругопластические тела. В качестве модели, описывающей упругопластическое поведение слоев, выбрана модель Кулона–Мора [6–8].

Граничные условия. Расчетная схема с граничными условиями одинакова для всех глубин. Граничное условие на нижней границе представляет собой условие жесткого закрепления. К боковым границам прикладывается горное давление величиной ρgh . Задача решалась в поле силы тяжести и в полных напряжениях, т. е. на каждом последующем шаге учитывались напряжения, полученные на предыдущем шаге [9, 10].

Ход решения. Задача состояла из *четырёх* расчетных шагов. На первом шаге массив рассматривался как упругая среда. На остальных — как упругопластическая среда.

На *первом* шаге определялось начальное (естественное) НДС ненарушенного массива.

На *втором* шаге вычислялось НДС массива после отработки лавы до момента, когда произошло первоначальное обрушение пород в кровле выработки.

Граничное условие в виде литостатического давления на боковую поверхность модели на дан-

Таблица 2 — Жесткость упругой связи по рассчитанным согласно инженерной методике оседания дневной поверхности на этапе первичного обрушения пород
Table 2 — Stiffness of the elastic bond according to the calculated by the engineering methodology subsidence of the day surface at the stage of primary rock collapse

Глубина ведения горных работ, м	Жесткость упругой связи в горизонтальном / вертикальном направлениях, Н/м	Оседания земной поверхности согласно инженерной методике, м
450	$1,25 \cdot 10^{10} / 1,25 \cdot 10^9$	0,209
600	$1,8 \cdot 10^{10} / 1,8 \cdot 10^9$	0,133
800	$2,3 \cdot 10^{10} / 2,3 \cdot 10^9$	0,077
1000	$7 \cdot 10^{10} / 7 \cdot 10^9$	0,045

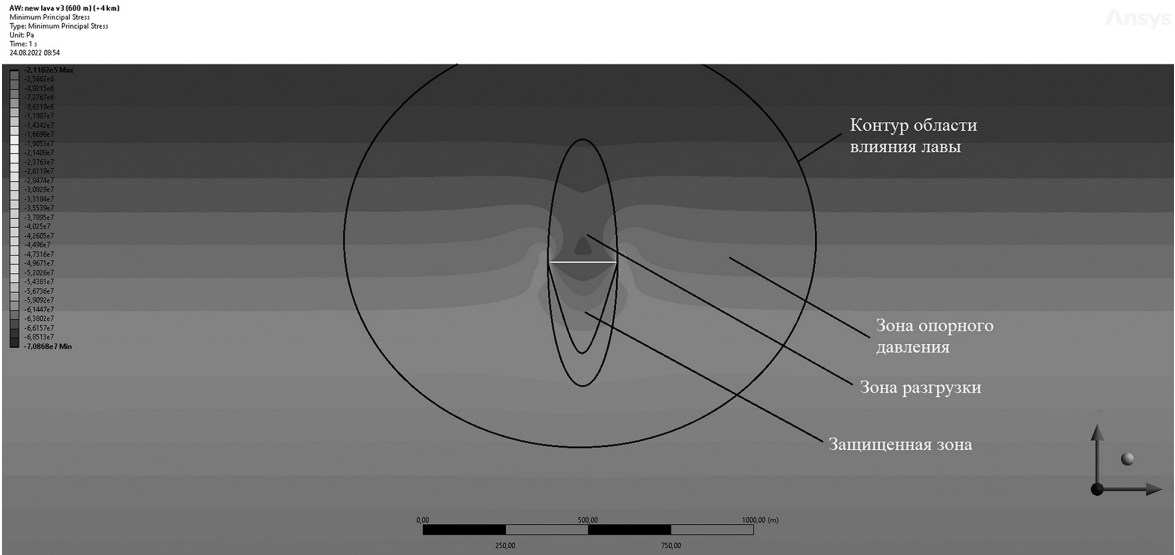


Рисунок 1 — Формирование характерных зон в подрабатываемом массиве (II)
 Figure 1 — Formation of characteristic zones of the array during the mining (II)

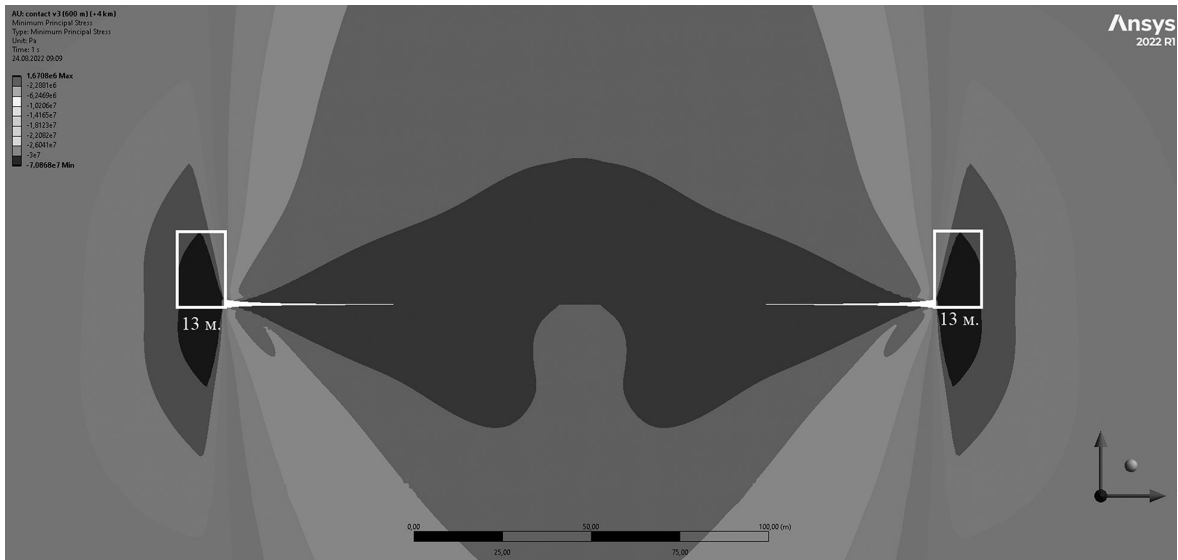


Рисунок 2 — Краевые зоны нарушения предельного условия по напряжениям сжатия (II)
 Figure 2 — Marginal ruptured zones of the limit condition for compression stresses (II)

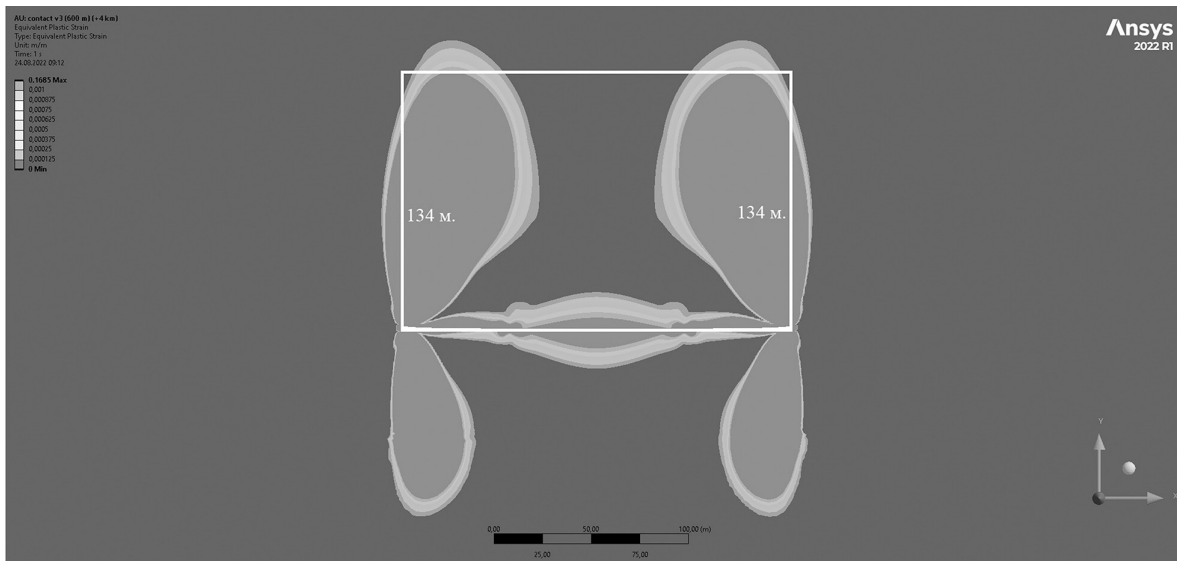


Рисунок 3 — Зона нарушения предельного условия Кулона–Мора (II)
 Figure 3 — Ruptured zone of the Coulomb–Mohr limit condition (II)

Таблица 3 — Жесткость упругой связи по рассчитанным согласно инженерной методике оседаниям дневной поверхности после окончания этапа первичного обрушения пород
Table 3 — Stiffness of the elastic bond according to the calculated by the engineering methodology subsidence of the day surface after the end of the primary rock collapse stage

Глубина ведения горных работ, м	Жесткость упругой связи в горизонтальном / вертикальном направлениях, Н/м	Оседания земной поверхности согласно инженерной методике, м
450	$8,3 \cdot 10^8 / 8,3 \cdot 10^7$	1,184
600	$1,05 \cdot 10^9 / 1,05 \cdot 10^8$	0,753
800	$5 \cdot 10^9 / 5 \cdot 10^8$	0,436
1000	$1,7 \cdot 10^{10} / 1,7 \cdot 10^9$	0,252

Таблица 4 — Жесткость упругой связи по рассчитанным согласно инженерной методике оседаниям дневной поверхности после окончания активного процесса сдвижения пород
Table 4 — Stiffness of the elastic bond according to the calculated by the engineering methodology subsidence of the day surface after the end of the active process of rocks displacement

Глубина ведения горных работ, м	Жесткость упругой связи в горизонтальном / вертикальном направлениях, Н/м	Оседания дневной поверхности согласно инженерной методике, м	Ширина мульды оседаний, м
450	$3,6 \cdot 10^9 / 3,6 \cdot 10^8$	1,393	808
600	$2,5 \cdot 10^9 / 2,5 \cdot 10^8$	0,886	982
800	$3 \cdot 10^{10} / 3 \cdot 10^9$	0,513	1212
1000	$2,1 \cdot 10^{11} / 2,1 \cdot 10^{10}$	0,297	1443

ном шаге заменялось условием ограничения нормальных к данной поверхности перемещений.

Для моделирования первичного обрушения пород в отработанное пространство очистной выработки размещаются дополнительные (блочные) элементы, моделирующие обрушенные породные массы, в виде упругой связи, жесткость которой выбирается согласно рассчитанным оседаниям в мульде оседаний на дневной поверхности (таблица 2) по «Правилам охраны зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на Старобинском месторождении калийных солей» [11, 12].

По результатам моделирования на данном шаге были выделены характерные зоны подрабатываемого массива (рисунок 1).

На рисунке 1 согласно [1–3] используются следующие термины: зона опорного давления — область повышенного обобщенного напряженного состояния сжатия по сравнению с естественным уровнем напряженного состояния; зона разгрузки — область обобщенного напряженного состояния сжатия, где уровень нагрузки меньше естественного напряженного состояния; защищенная зона — область обобщенного напряженного состояния растяжения.

В результате выполненных модельных расчетов установлены следующие размеры (высота × ширина, м) зон возможных полных сдвижений и актив-

ного трещинообразования для лав, находящихся на глубинах: 450 м — 125×212 , 600 м — 134×226 , 800 м — 106×262 и 1000 м — 93×310 .

Размеры областей нарушения сплошности массива начинают формироваться в краевых зонах очистной выработки (начало их образования оценивалось на втором шаге до момента установки блочных элементов). В этих областях можно выделить два типа характерных зон: зоны нарушения предельного условия по напряжениям сжатия, находящиеся около границ очистной выемки (рисунок 2), и зоны, где проявляются развитые линии скольжения (нарушение предельного условия Кулона–Мора, рисунок 3). Данные зоны впоследствии могут формировать свод возможных полных сдвижений в массиве над очистной выемкой и область «разгрузки» (область пониженных напряжений) под очистным пространством [13].

На *третьем* шаге вычислялось НДС массива горных пород после окончания процесса первичного обрушения пород в выработанное пространство и формирования области возможных полных сдвижений и активного трещинообразования. На этом этапе в область полных сдвижений и активного трещинообразования размещались блочные элементы в виде упругой связи, жесткость которой выбирается согласно рассчитанному по инженерной методике оседанию дневной поверхности (таблица 3).

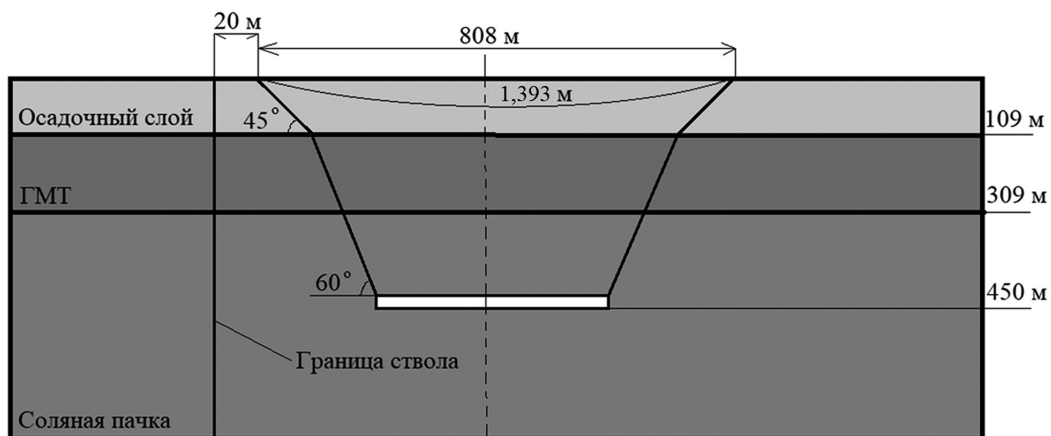


Рисунок 4 — Расчетная модель определения границ зоны влияния выработок по инженерной методике (I)

Figure 4 — Calculation model for determining the boundaries of the zone of influence of mining according to engineering methodology (I)

Таблица 5 — Сравнение результатов моделирования с расчетами согласно инженерной методике
Table 5 — Comparison of simulation results with calculations by the engineering methodology

Этап сдвижения горных пород		Формирование очистного пространства на заданную ширину		Окончание этапа первичного обрушения пород в кровле лавы		Окончание активного процесса сдвижения пород	
		по результатам моделирования	согласно инженерной методике	по результатам моделирования	согласно инженерной методике	по результатам моделирования	согласно инженерной методике
Величина максимально-го оседания мульды, м	I	0,206	0,209	1,185	1,184	1,394	1,393
	II	0,133	0,133	0,749	0,753	0,884	0,886
	III	0,076	0,077	0,437	0,436	0,521	0,513
	IV	0,049	0,045	0,251	0,252	0,292	0,297
Разница значений, % / мм	I	-1 / -3		+0 / +1		+0 / +1	
	II	+0 / +0		-1 / -4		-0 / -2	
	III	-1 / -1		+0 / +1		+2 / +8	
	IV	+9 / +4		-0 / -1		-2 / -5	
Ширина мульды оседаний, м	I	—		—		910	808
	II	—		—		990	982
	III	—		—		1110	1212
	IV	—		—		1240	1443
Разница значений, % / м	I	—		—		+13 / +102	
	II	—		—		+1 / +8	
	III	—		—		-8 / -102	
	IV	—		—		-14 / -203	

На четвертом шаге вычислялось НДС горного массива на момент окончания активного процесса сдвижения пород. На этом этапе в блочных элементах с предыдущего шага изменялась жесткость упругой связи согласно рассчитанным по инженерной методике оседанию и ширине мульды (таблица 4).

Границы зоны влияния горных выработок определяются согласно инженерной методике по граничным углам в наносах (45°) и в коренных породах (60°). Схема построения мульды оседаний приведена на рисунке 4.

При численном моделировании ширина мульды определялась областью земной поверхности с оседанием 15 мм и более.

Результаты моделирования. В таблице 5 представлены полученные в ходе моделирования характеристики мульды оседания и их погрешности от-

носительно инженерной методики на каждом этапе процесса обрушения горных пород для каждого из вариантов расположения очистной выработки.

На рисунках 5–8 приведены значения граничных углов, полученных в ходе численного моделирования (белые линии) и рассчитанные согласно инженерной методике (черные линии) на различных глубинах.

В таблице 6 приведены усредненные значения граничных углов (значения углов между границами эффективных слоев, без учета нелинейности профиля оседаний в каждом из слоев), полученных по результатам моделирования для всех слоев горного массива на каждом горизонте.

Выводы. Построена численная геомеханическая модель, позволяющая моделировать геомеханическое состояние массива горных пород по всей высоте от горизонта ведения горных работ до дн-

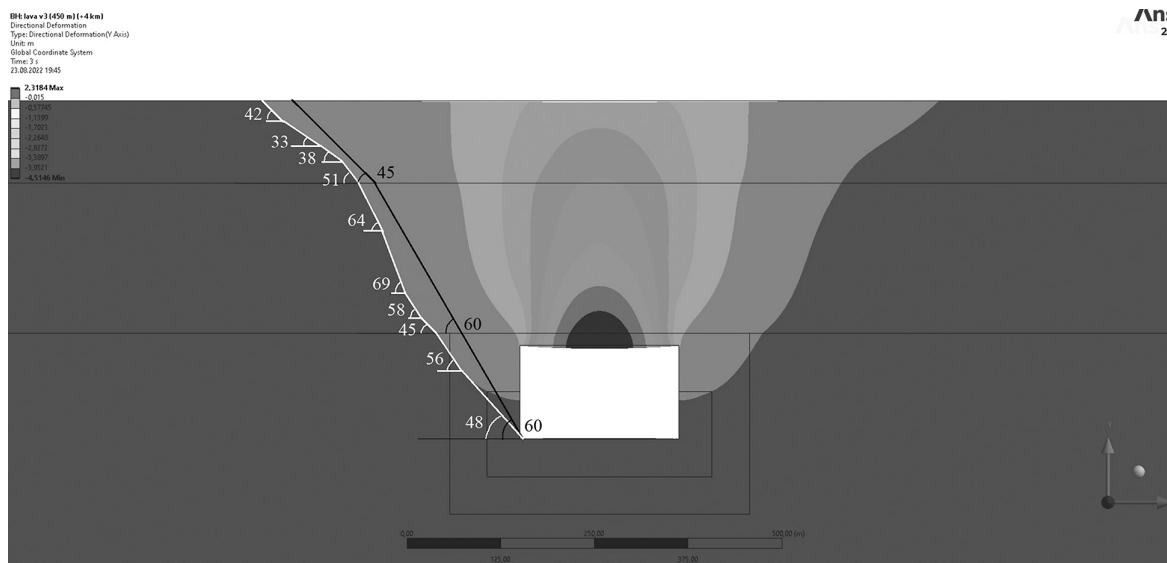


Рисунок 5 — Значения граничных углов, полученных по инженерной методике и по результатам моделирования для задачи I
Figure 5 — Values of the boundary angles obtained by the engineering methodology and by the results of modeling for the task I

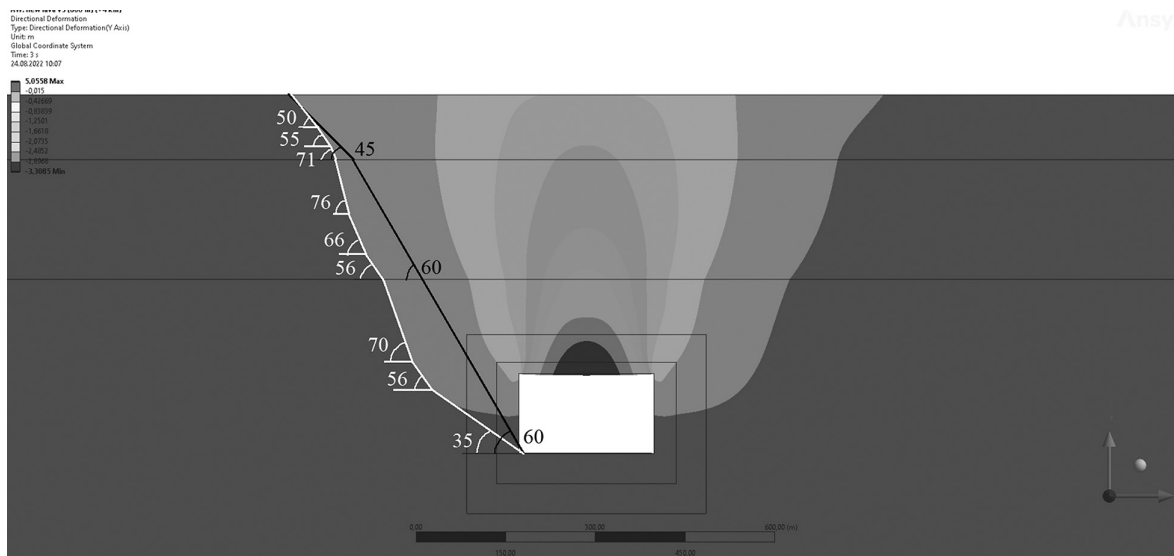


Рисунок 6 — Значения граничных углов, полученных по инженерной методике и по результатам моделирования для задачи II
 Figure 6 — Values of the boundary angles obtained by the engineering methodology and by the results of modeling for the task II

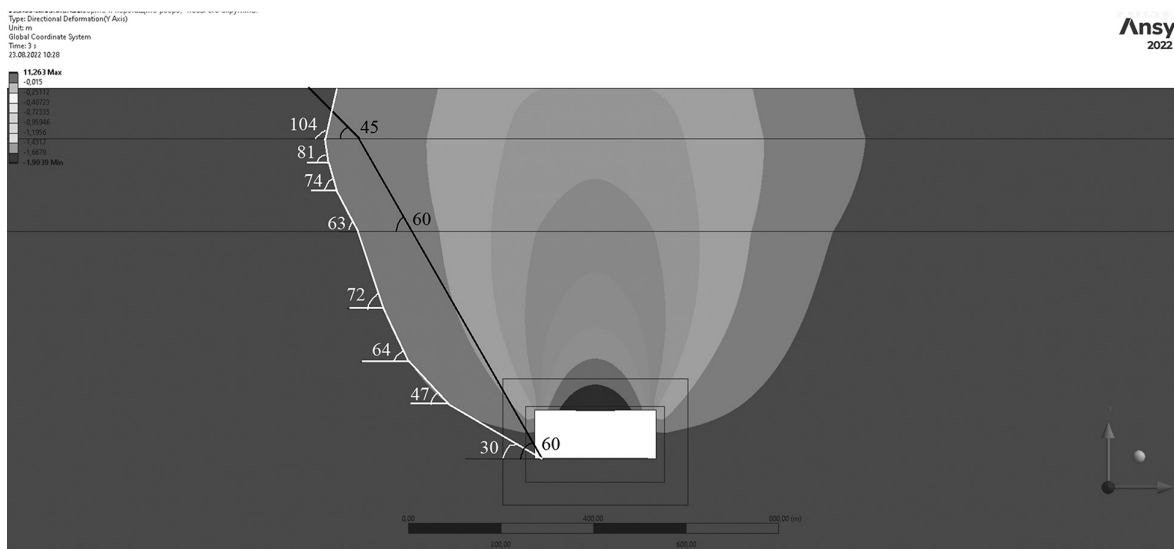


Рисунок 7 — Значения граничных углов, полученных по инженерной методике и по результатам моделирования для задачи III
 Figure 7 — Values of the boundary angles obtained by the engineering methodology and by the results of modeling for the task III

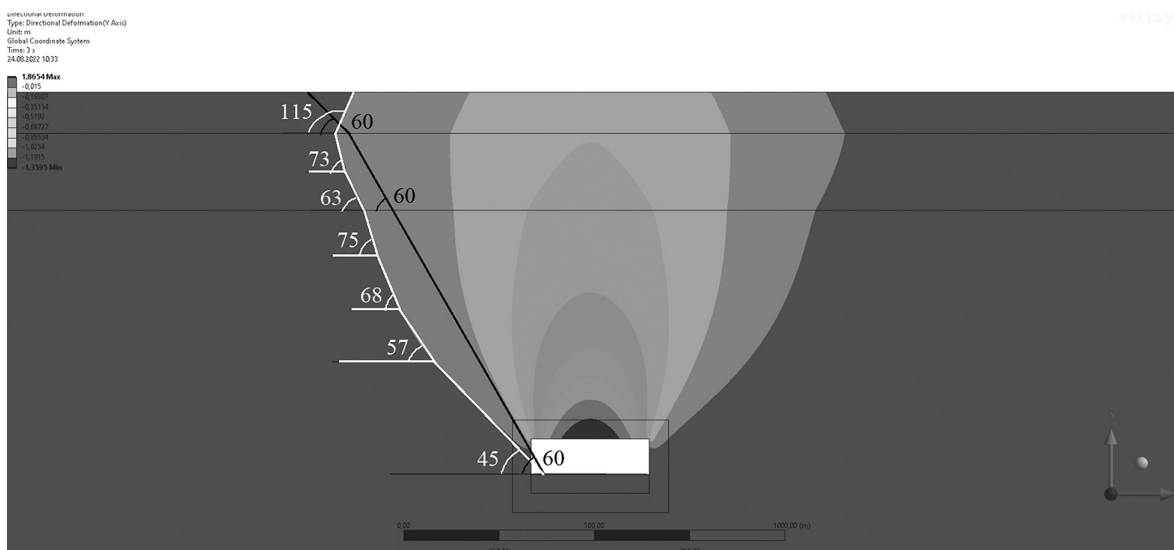


Рисунок 8 — Значения граничных углов, полученных по инженерной методике и по результатам моделирования для задачи IV
 Figure 8 — Values of the boundary angles obtained by the engineering methodology and by the results of modeling for the task IV

Таблица 6 — Усредненные значения граничных углов на различных глубинах
Table 6 — Averaged values of boundary angles at different depths

Глубина, м	Граничный угол, град		
	в осадочном слое	в ГМТ	в соляной пачке
450	40	62	51
600	55	68	51
800	104	71	51
1000	115	70	56
по инженерной методике	45	60	60

ной поверхности с учетом последовательности протекания геомеханических процессов в массиве при очистных работах. Модель верифицирована методикой, основанной на многочисленных натуральных наблюдениях на Старобинском месторождении.

Модельные задачи решаются в плоско-деформированной постановке на базе МКЭ. Все тела механико-математической модели рассматриваются как квазиоднородные и квазиизотропные упруго-пластические. В качестве модели, описывающей упругопластическое поведение горных пород, выбрана модель Кулона–Мора.

Проведенный сравнительный анализ характеристик мульды оседаний (см. таблицу 5), определенных в соответствии с построенной геомеханической моделью и согласно инженерной методике, показывает, что методика коррелирует с результатами модельных расчетов при малых и умеренных глубинах расположения горных выработок. Вместе с тем при увеличении глубины ведения горных работ расхождение результатов моделирования и методики увеличивается.

На рисунках 5–8 хорошо виден нелинейный характер изменения граничных углов, а их усредненные значения (см. таблицу 6) отличны от значений, принятых в инженерной методике. Замечено, что усредненные значения граничных углов с увеличением глубины ведения горных работ:

- в соляной пачке приближаются к значениям, принятым в инженерной методике;

- в ГМТ увеличиваются, начиная со значения, принятого в инженерной методике;

- в осадочном слое до глубинной отметки ведения горных работ, равной 600 м, стремятся к 90°.

После преодоления отметки глубины ведения горных работ более 600 м формируется «кулолообразный» профиль оседаний и расхождения с инженерной методикой становятся значительными.

Список литературы

1. Механика сдвижения и разрушения горных пород / С.Д. Виктор [и др.]. — М.: РАН, 2019. — 360 с.
2. Кратч, Г. Сдвижение горных пород и защита подрабатываемых сооружений / Г. Кратч; пер. с нем. К.К. Глазенапа; под ред. Р.А. Муллера, И.А. Петухова. — М.: Недра, 1978. — 496 с.
3. Виктор, С.Д. Сдвижение и разрушение горных пород / С.Д. Виктор, М.А. Иофис, С.А. Гончаров. — М.: Наука, 2005. — 277 с.
4. Горное дело: практикум для студентов специальности 1-36 1001 «Горные машины и оборудование (по направлениям)» / сост.: Н.И. Березовский, Е.К. Костюкевич. — Минск: БНТУ, 2019. — 39 с.
5. Рассказов, А.А. Минералы глинистых отложений (район Старобинского месторождения) / А.А. Рассказов. — М.: Наука, 1984. — 72 с.
6. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич; под ред. Б.Е. Победря; пер. с англ. — М.: Мир, 1975. — 541 с.
7. Иванов, Д.В. Введение в ANSYS WORKBENCH: учеб.-метод. пособие для студентов естественно-научных дисциплин / Д.В. Иванов, А.В. Доль. — Саратов: Амрит, 2016. — 56 с.
8. Журавков, М.А. Механика сплошных сред. Теория упругости и пластичности: учеб. пособие / М.А. Журавков, Э.И. Старовойтов. — Минск: БГУ, 2011. — 543 с.
9. Компьютерное моделирование в геомеханике: мат. Междунар. науч.-практич. конф. «Современные информационные технологии и механико-математические модели в геомеханике, механике машин и механизмов», Минск, 3–7 нояб. 2008 г. / БГУ; М.А. Журавков [и др.]. — Минск, 2008. — 443 с.
10. Журавков, М.А. Устойчивость и сдвижение массивов горных пород / М.А. Журавков, В.С. Зубович. — М.: РУДН, 2009. — 432 с.
11. Правила охраны зданий, сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на Старобинском месторождении калийных солей: МКС 73, 13.020.30. — Минск: Белнефтехим, 2014. — 116 с.
12. Chanyshv, A.I. Mathematical models of block media in problems of geomechanics. Part I: Deformation of stratified medium / A.I. Chanyshv, L.L. Efimenko // Journal of mining science. — 2003. — Vol. 39, iss. 3. — Pp. 271–280. — DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JOMI.0000013786.64305.7f>.
13. Мамбетов, Ш.А. Геомеханические процессы в породных массивах: учеб. пособие / Ш.А. Мамбетов, А.Р. Абдиев. — Бишкек: Кыргыз.-Рос. славян. ун-т, 2001. — 195 с.

ZHURAVKOV Michael A., D. Sc. in Phys. and Math., Prof.

Head of the Department “Theoretical and Applied Mechanics”¹

E-mail: zhuravkov@bsu.by

NIKOLAITCHIK Mikhail A., M. Sc. in Phys. and Math.

Head of the Research Laboratory “Applied Mechanics”¹

E-mail: nikolaitchik.m@gmail.com

KLIMKOVICH Mikita M.

Master’s Student of the Mechanics and Mathematics Faculty¹

E-mail: nikita.klimkovitch@yandex.ru

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

MODELLING OF GEOMECHANICAL STATE OF THE ROCK MASS DURING THE LARGE SCALE MINING OF UNDERGROUND SPACE

The article considers the mechanical and mathematical modeling of the process of subsidence of the Earth's surface during the mining of rock mass by a pillar mining system. The task is to study the influence of the waste space on the state of the rock strata located at different depths (Horizons) at each stage of the process of rock movement. The purpose of the study is to develop a numerical geomechanical model of a rock mass using a pillar mining system, which makes it possible to correctly identify the characteristic zones formed as a result of mining operations in the rock column, and also provides an opportunity to simulate the process of formation of the daily surface subsidence trough. Computational numerical schemes of model problems are constructed using finite element and discrete element modeling algorithms. Based on the results of numerical modeling, it is shown that the characteristics (linear dimensions and maximum subsidence) of the subsidence trough obtained in accordance with the developed geomechanical model are close to the characteristics calculated by the engineering methodology used in the conditions of the Starobin potassium salt deposit (Republic of Belarus). At the same time, as the depths of mining operations increase, the discrepancies between them increase. The analysis of the reasons for this behavior is carried out. The nonlinear nature of the change in the boundary angles of displacement in the layers of the rock strata with an increase in the depths of mining is presented and conclusions explaining these changes are noted. The application of the obtained modeling results is to substantiate the possibility of reducing the size of the security pillars around the mine shafts and ground objects with an increase in the depths of mining operations, thereby reducing the amount of mineral reserves left in the bowels and increasing the economic indicators of extraction.

Keywords: finite element modeling, block elements, Coulomb–Mohr model, layered rock mass, pillar mining system, zone of collapse, zone of fracturing, boundary displacement angles, displacement trough

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2022-4-61-97-104>

References

- Viktorov S.D., Goncharov S.A., Zakalinskiy V.M., Iofis M.A. *Mekhanika sdvizheniya i razrusheniya gornyykh porod* [Mechanics of displacement and destruction of rocks]. Moscow, Rossiyskaya akademiya nauk Publ., 2019. 360 p. (in Russ.).
- Kratzsch H. *Bergschadenkunde*. Berlin, Springer, 1974. 582 S.
- Viktorov S.D., Iofis M.A., Goncharov S.A. *Sdvizhenie i razrushenie gornyykh porod* [Displacement and destruction of rocks]. Moscow, Nauka Publ., 2005. 277 p. (in Russ.).
- Berezovskiy N.I., Kostyukevich E.K. *Gornoe delo* [Mining]. Minsk, Belorusskiy natsionalnyy tekhnicheskii universitet Publ., 2019. 39 p. (in Russ.).
- Rasskazov A.A. *Mineraly glin kaliyosnykh otlozheniy (rayon Starobinskogo mestorozhdeniya)* [Minerals of clays of potash deposits (the area of the Starobin deposit)]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 72 p. (in Russ.).
- Zienkiewicz O.C. *The finite element method in engineering science*. London, Mcgrew-Hill, 1971.
- Ivanov D.V., Dol A.V. *Vvedenie v ANSYS WORKBENCH* [Introduction to ANSYS WORKBENCH]. Saratov, Amirit Publ., 2016. 56 p. (in Russ.).
- Zhuravkov M.A., Starovoitov E.I. *Mekhanika sploshnykh sred. Teoriya uprugosti i plastichnosti* [Mechanics of continuous media. Theory of elasticity and plasticity]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2011. 543 p. (in Russ.).
- Zhuravkov M.A., et al. *Kompyuternoe modelirovanie v geomekhanike* [Computer modeling in geomechanics]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy universitet Publ., 2008. 443 p. (in Russ.).
- Zhuravkov M.A., Zubovich V.S. *Ustoychivost i sdvizhenie massivov gornyykh porod* [Rock mass stability and displacement]. Moscow, Rossiyskiy universitet druzhby narodov Publ., 2009. 432 p. (in Russ.).
- MKS 73, 13.020.30. *Pravila okhrany zdaniy, sooruzheniy i prirodnykh obektov ot vrednogo vliyaniya podzemnykh gornyykh razrabotok na Starobinskom mestorozhdenii kaliyinykh soley* [Rules for the protection of buildings, structures and natural objects from the harmful effects of underground mining at the Starobin potassium salt deposit]. Minsk, Belneftekhim Publ., 2014. 116 p. (in Russ.).
- Chanyshev A.I., Efimenko L.L. Mathematical models of block media in problems of geomechanics. Part I: deformation of stratified medium. *Journal of mining science*, 2003, vol. 39, iss. 3, pp. 271–280. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:JOMI.0000013786.64305.7f>.
- Mambetov Sh.A., Abdiev A.R. *Geomekhanicheskie protsessy v porodnykh massivakh* [Geomechanical processes in rock mass]. Bishkek, Kyrgyzsko-Rossiyskiy slavyanskiy universitet Publ., 2001. 195 p. (in Russ.).