

УДК [622.236:622.023].004.94

Ильясов Булат Тагирович

кандидат технических наук,
руководитель отдела разработки
и исследований,
ООО «ТЕРЕТАУ»,
453800 Республика Башкортостан,
Хайбуллинский р-н, с. Акъяр,
пер. Ветеранов, д. 3
e-mail: info@teretau.com

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ
МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД
С ПРИМЕНЕНИЕМ ПК «PROROCK»***Аннотация:*

С использованием ПК PROROCK выполнены расчеты деформаций группы уступов с различными горнотехническими и структурно-геологическими условиями. Возможность явного моделирования трещинообразования и разрушения, реализованная в данном программном комплексе, позволяет проследить образование тела обрушения, закономерности его формирования в зависимости от направления падения систем трещин.

Модели групп уступов отличаются углами заткоски и углами наклона систем трещин. Рассмотрено три варианта углов откосов и углов наклона систем трещин, расчеты выполнены для девяти моделей. Прочностные свойства пород в моделях заданы как функция времени и напряженного состояния, то есть учитывается длительная прочность горных пород.

Анализ результатов расчетов показал наличие зависимости направления смещений как от угла падения трещин, так и от угла наклона участка борта карьера. Сделан вывод, что по направлениям смещений можно оценить степень опасности наблюдаемых деформаций. По результатам моделирования возможен прогноз контуров и объема потенциального тела обрушения с учетом структурно-геологических условий, определяются предельные величины смещений, после достижения которых начинается стадия прогрессирующего разрушения борта.

Ключевые слова: борта карьеров, механизм разрушения, долговременная прочность, метод конечно-дискретных элементов, численное моделирование, прогрессирующее разрушение, предельные параметры деформаций

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.01.039

Pyasov Bulat T.

Candidate of Technical Science,
R&D department head,
TERETAU LLC,
453800, Bashkortostan Republic,
Khaybullinsky District,
Akyar, Veteranov, 3
e-mail: info@teretau.com

**PROGNOSTICATION OF ROCK MASS
DEFORMATIONS WITH USING
«PROROCK» SOFTWARE***Abstract:*

Deformations of benches group with various mining and structural-geological conditions using of PROROCK software have been calculated. The possibility of an explicit modeling of fracturing and fragmentation realized in this software package allows observing the formation of the failure body, the patterns of its formation depending on dip angle of the fissure systems.

The models of bench groups differ in the bench face angles and the angles of inclination of the fissure systems.

Three various inclination angles and fissure systems inclination angles have been examined, so the calculations have been performed for nine models. Strength properties of rocks in models have been given as a function of time and stress state, that is, the long-term strength has been taken into account. Analysis of the calculation results showed the dependence of the direction of displacements both on the fissure system inclination angle and on the inclination angle of the pit wall part. It allows the conclusion that after analyzing of displacement directions it is possible to estimate the danger grade of the observed deformations.

Based on the modeling results and taking into account the structural-geological conditions, it is possible to forecast the form and the volume of the potential failure body, to determine the critical values of the displacements, beyond which the progressive failure stage of the pit wall begins.

Keywords: pit walls, failure mechanism, long-term strength, finite-discrete elements method, numerical modeling, progressive failure, critical deformation parameters.

Введение

Опасные геомеханические процессы чаще всего протекают с разрушением горных пород, поэтому важно, чтобы используемые для их прогнозирования средства обеспечивали учет процессов разрушения. Задачей, не имеющей надежного решения, является прогнозирование геометрических и кинетических параметров возможных обруше-

ний при открытых и подземных горных работах. Например, прогноз предельных кинетических параметров обрушений на карьерах или размеров обрушений при подземной разработке возможен с использованием некоторых эмпирических зависимостей [1, 2], которые получены для определенных инженерно-геологических и горнотехнических условий. Необходимость учета структурно-геологических особенностей делает эту задачу более сложной. Еще одной проблемой является большая сложность использования в прогнозах данных маркшейдерских наблюдений.

При этом прогноз геометрических и кинетических параметров деформаций имеет большую практическую ценность. Например, расчет объема потенциального обрушения необходим для планирования объемов и оценки стоимости противодеформационных мероприятий, а анализ кинетики нужен для определения степени опасности наблюдаемых деформаций.

Перспективными инструментами для решения задач с разрушением являются различные численные методы механики дискретной среды, в частности метод конечно-дискретных элементов. Достаточно подробное описание особенностей метода и сравнение его с другими методами выполнено в работах [3, 4].

Практическое применение специалистами метода конечно-дискретных элементов до сих пор очень ограничено, несмотря на его перспективность, из-за ценовой недоступности компьютерных программ, позволяющих выполнять геомеханические расчеты данным и аналогичными методами.

Для выполнения серии описанных в статье симуляций использована ранняя версия разрабатываемого компанией Teretau программно-аппаратного комплекса PRO-ROCK.

Сведения о численном методе и модели

Реализованный в процессоре программно-аппаратного комплекса PROROCK метод конечно-дискретных элементов предоставляет возможность явного моделирования трансформации сплошной среды в дискретную посредством трещинообразования, роста трещин и последующей фрагментации среды.

В методе конечно-дискретных элементов сплошная среда представляется в виде треугольных конечных элементов, соединенных четырехугольными трещинными (связующими) элементами. На рис. 1 изображена элементная сетка. При отсутствии напряжений в элементах трещинные элементы имеют нулевую толщину, то есть на рисунке конечные элементы уменьшены по сравнению с нормальным состоянием.

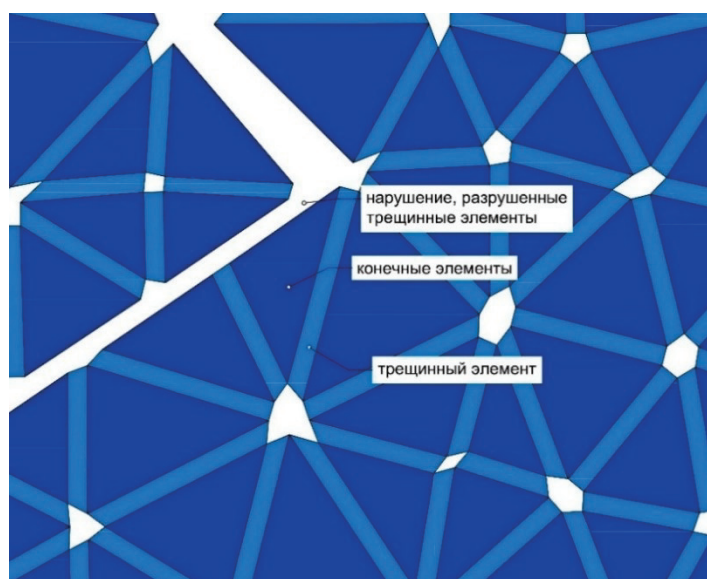


Рис. 1 – Сетка в методе конечно-дискретных элементов

Упругое деформирование в модели, то есть деформирование сплошности, воспроизводится посредством конечных элементов, пластические деформации воспроизводятся при помощи трещинных элементов. При достижении больших величин пластических деформаций учет разрывов сплошности обеспечивается алгоритмами поиска контактов и взаимодействия на контактах.

Образование в материале трещин в методе конечно-дискретных элементов моделируется в явном виде на основе принципов нелинейной упругой механики разрушения. Это является важной особенностью метода. Моделирование трещинообразования производится с учетом полной диаграммы деформирования, иначе говоря при трещинообразовании учитывается работа как в допредельной, так и в запредельной стадии деформирования. В трещинных элементах смещение вдоль элемента (скольжение) определяется кривой, представленной на рис. 2. Аналогичная кривая без остаточной прочности регулирует смещение по нормали к элементу (раскрытие).

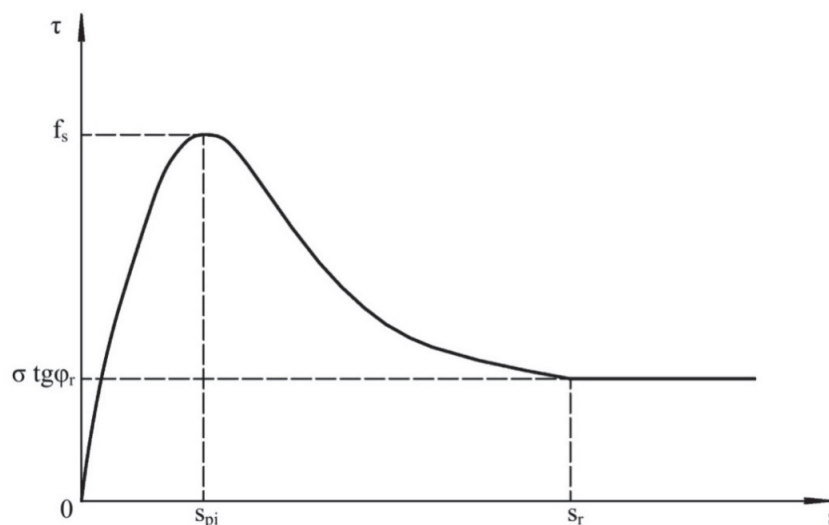


Рис. 2 – Зависимость напряжений в трещинных элементах от смещения вдоль элемента

В использованной модели также реализован учет долговременной прочности, для этого рассчитывается снижение прочности горных пород со временем под влиянием напряжений [5]. В модели сцепление и прочность на растяжение горных пород определяются в соответствии с зависимостями:

$$C = C_0 \left(1 - D \frac{t}{t_f} \right);$$
$$f_t = f_{t0} \left(1 - D \frac{t}{t_f} \right),$$

в которых C и f_t – сцепление и прочность на растяжение; C_0, f_{t0} – начальные (мгновенные) сцепление и прочность на растяжение; D – коэффициент, отражающий скорость снижения прочностных параметров; t – время и t_f – длительность разрушения.

Длительность разрушения при разрушении сдвигом и разрывом t_f определяется, соответственно, по формулам:

$$t_f = t_0 \left(\frac{f_t}{\sigma} \right)^b;$$
$$t_f = t_0 \left(\frac{f_{s0} - f_{s\infty}}{\tau - f_{s\infty}} \right)^b,$$

где t_0, b – константы материала; f_{s0} – начальная (мгновенная) прочность на сдвиг при текущем нормальном напряжении; $f_{s\infty}$ – предел долговременной прочности; σ и τ – соответственно, нормальное и касательное напряжения.

Используемые в модели зависимости аналогичны зависимостям, представленным в работах [6, 7].

В общем виде схема выполнения вычислений с акцентом на схеме снижения прочности со временем показана на рис. 3.

Более подробное описание метода конечно-дискретных элементов и особенностей его реализации в процессоре программно-аппаратного комплекса PROROCK выполнено в работах [5, 8].

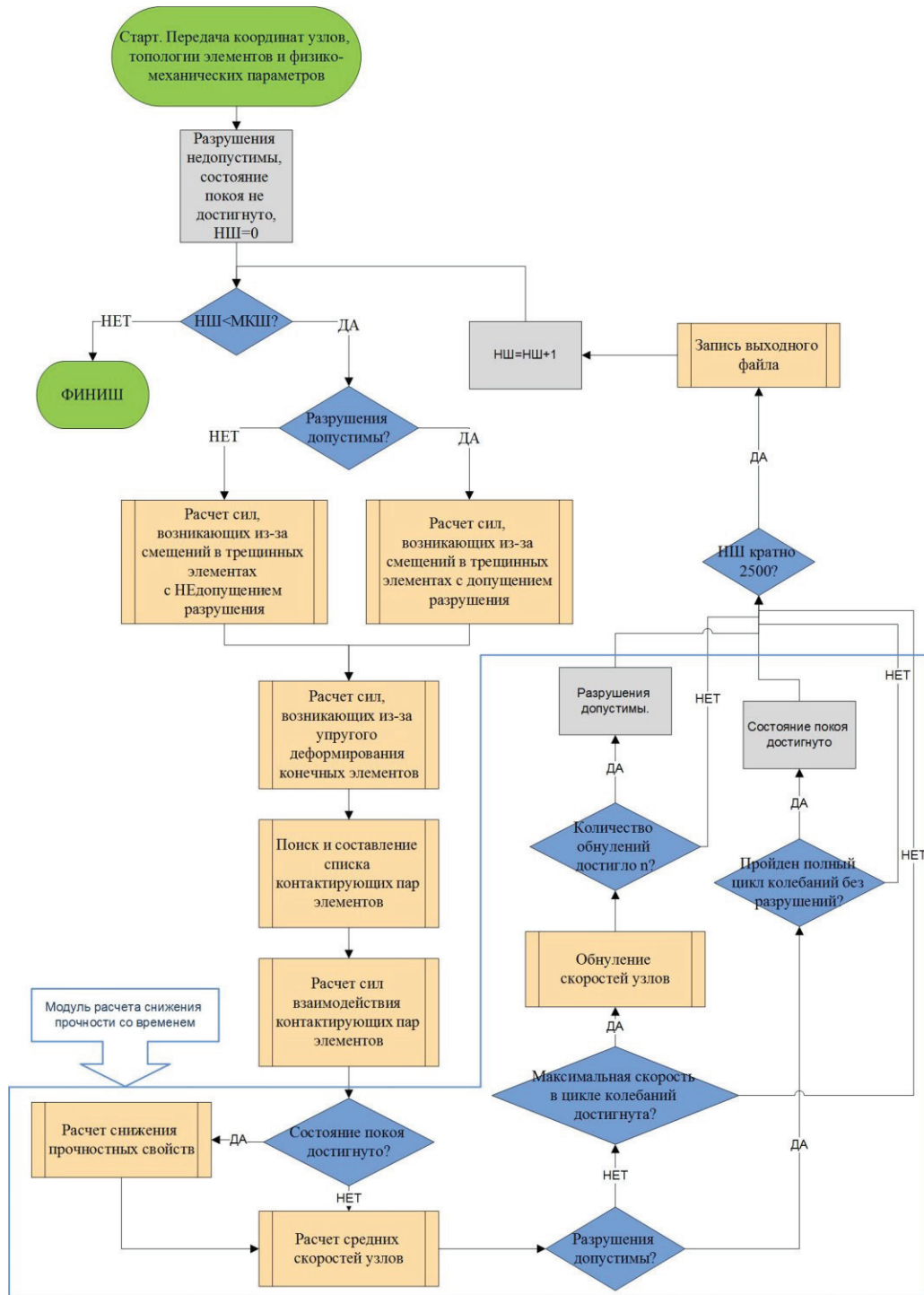


Рис. 3 – Схема работы рассчитывающей программы с подробным описанием модуля расчета снижения прочности:

НИШ – номер текущего временного шага; МКШ – максимальное количество шагов; в желтых прямоугольниках записаны названия алгоритмов (функций); в синих ромбиках – условия; в серых прямоугольниках – логические и арифметические операции

Исходные данные моделирования

В качестве объекта моделирования принят участок борта карьера, сложенный сильнотрещиноватыми скальными породами. Карьером разрабатывается месторождение Юбилейное, находящееся в Хайбуллинском районе Республики Башкортостан. Для расчетов использованы сведения о физико-механических свойствах пород из проекта разработки месторождения и отчета о детальной разведке.

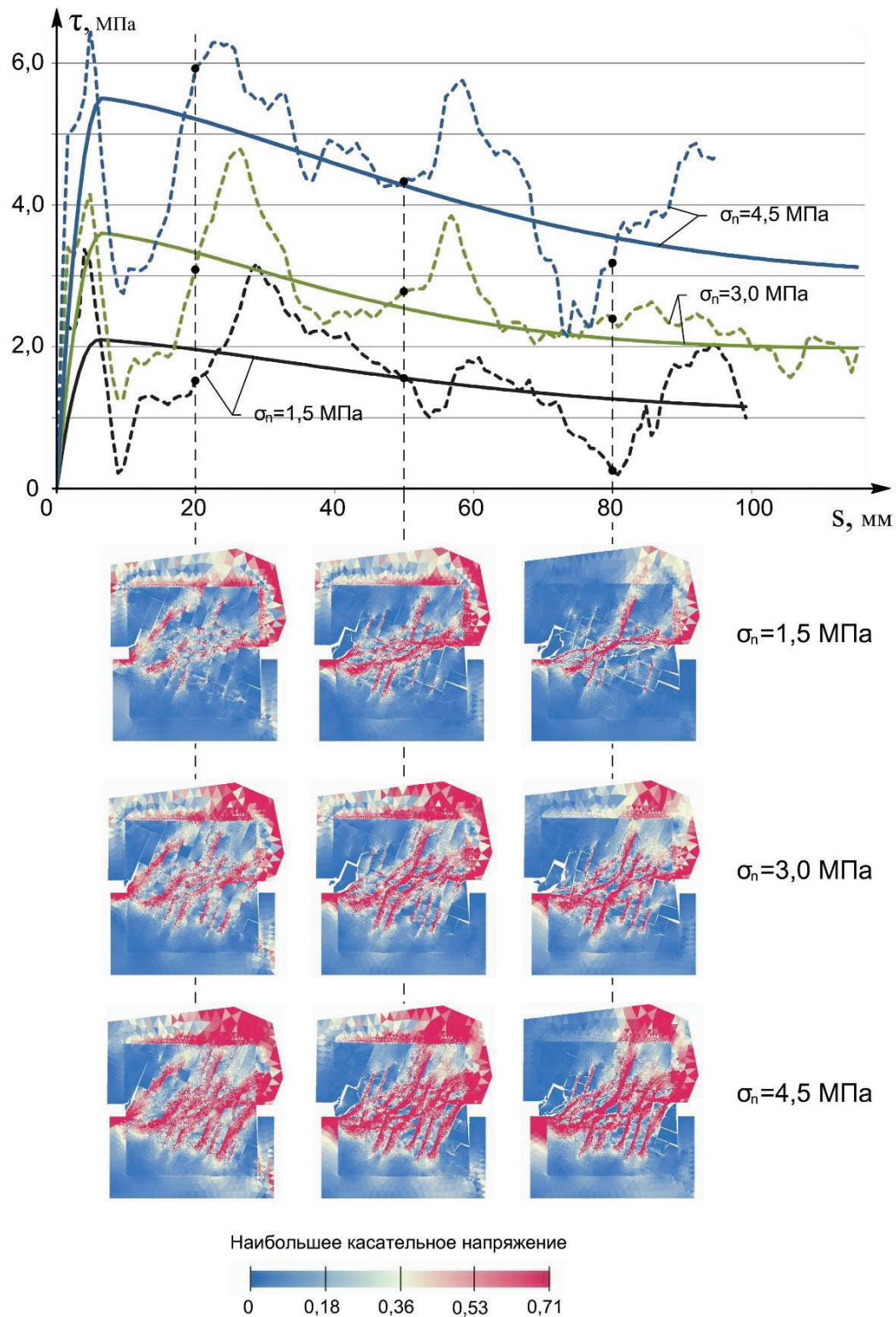


Рис. 4 – Диаграмма деформирования и процесс сдвигового разрушения при угле наклона систем трещин 67°

При расчетах методом конечно-дискретных элементов необходимо учитывать размеры элементов в модели при выборе прочностных характеристик пород. В построенных моделях средняя длина трещинного элемента около 1,2 м, поэтому необходимо пересчитывать полученные лабораторными испытаниями прочностные свойства пород с учетом эффекта масштаба и трещиноватости массива.

Пересчет прочностных параметров выполнен с помощью симуляций испытаний на сдвиг и растяжение больших участков массива размерами порядка 2×2 м. Всего выполнено 16 симуляций испытаний на сдвиг и растяжение.

Пример выполненных симуляций испытаний на сдвиг и полученные диаграммы деформирования представлены на рис. 4.

По данным, полученным посредством симуляций прочностных испытаний, построены кривые, отображенные на рис. 5. Отличие между кривыми объясняется различиями в угле наклона систем трещин в моделях участков массива.

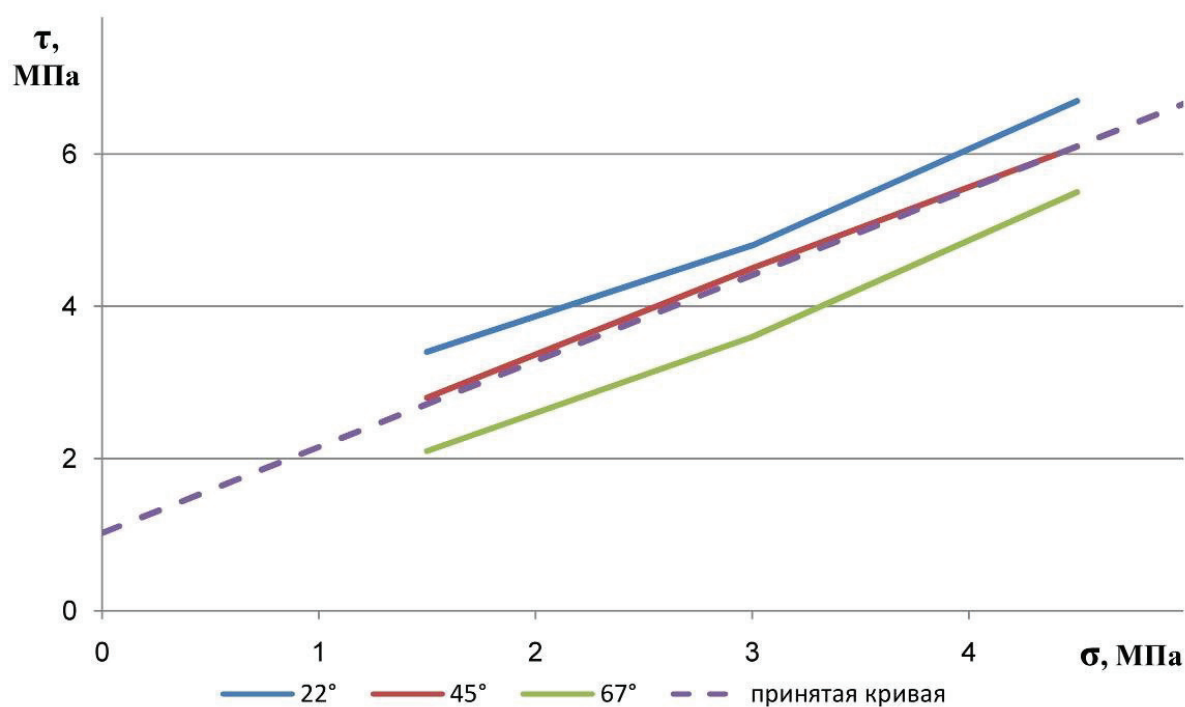


Рис. 5 – Кривые прочности по результатам моделирования испытаний и принятая аппроксимирующая кривая

Необходимые для расчетов длительного деформирования константы b и t_f получены посредством численного моделирования длительных испытаний горных пород. Параметры долговременной прочности для выполнения численного моделирования длительных испытаний приняты по данным лабораторных испытаний горных пород [8, 9, 10].

Прочностные свойства трещин рассчитаны с использованием критерия прочности Бартона с учетом масштабного эффекта [11].

Сводные данные по всем физико-механическим параметрам представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические параметры модели участка борта карьера

Общие механические параметры			
Модуль деформации E	60 ГПа	Вязкостное демпфирование k_s	$5 \cdot 10^5$ кг · с/м
Коэффициент Пуассона ν	0,28	Коэффициент шероховатости трещин JRC	3,8
Нормальный параметр штрафа p	600 ГПа	Коэффициент вариации прочностных свойств V	20 %
Объемный вес ρ	2800 кгс/м ³		
Прочностные свойства участков между трещинами			
Прочность на разрыв f_{t0}	18 кПа	Сцепление C_0	583 кПа
Остаточный угол трения φ_r	32°	Угол внутреннего трения φ	47°
Предельные касательные смещения s_p/s_r , (отн.)	$3,9 \cdot 10^{-3}/$ $1,6 \cdot 10^{-1}$	Предельные нормальные смещения o_p/o_r , (отн.)	$5 \cdot 10^{-5}/$ $3 \cdot 10^{-4}$
Прочностные свойства трещин			
Прочность на разрыв f_{t0}	0,8 кПа	Сцепление C_0	28 кПа
Остаточный угол трения φ_{r0}	25°	Угол внутреннего трения φ_0	28°
Предельные касательные смещения s_p/s_r , (отн.)	$2,6 \cdot 10^{-3}/$ $1,0 \cdot 10^{-1}$	Предельные нормальные смещения o_p/o_r , (отн.)	$5 \cdot 10^{-5}/$ $3 \cdot 10^{-4}$
Параметры длительного деформирования			
Параметр b при сдвиге/растяжении	10,4/ 9,69	Константа t_0 при сдвиге/растяжении, с	240/ 1900

Более подробно нахождение физико-механических параметров описано в диссертации [8].

Анализ результатов расчетов

Вычисления выполнены для 9 моделей участка борта с тремя различными углами наклона борта (соответственно, коэффициентами запаса устойчивости) и тремя различными положениями систем трещин. Модели заселены двумя системами трещин с углами наклона -70° и 20° , -40° и 50° , -10° и 80° для изучения влияния ориентации трещин на устойчивость и кинетические параметры деформирования. Наличие трещин в моделях учитывалось как анизотропия прочностных свойств, то есть трещинные элементы по выбранным направлениям имели более низкие прочностные показатели [8].

Среднее количество элементов во всех моделях составило около 90 000, из них 40 000 конечных и 50 000 трещинных.

Средние размеры моделей участка борта 550×300 м, при этом разрушения возможны внутри области размером 240×130 м (рис. 6), вне этой области среда разбита только на конечные элементы и возможны только упругие деформации.

На рис. 7 представлены изображения всех 9 моделей в момент разрушения. Пунктирной черной линией на рисунках изображен исходный контур борта карьера. На рисунке показана центральная часть модели размером около 120×120 м.

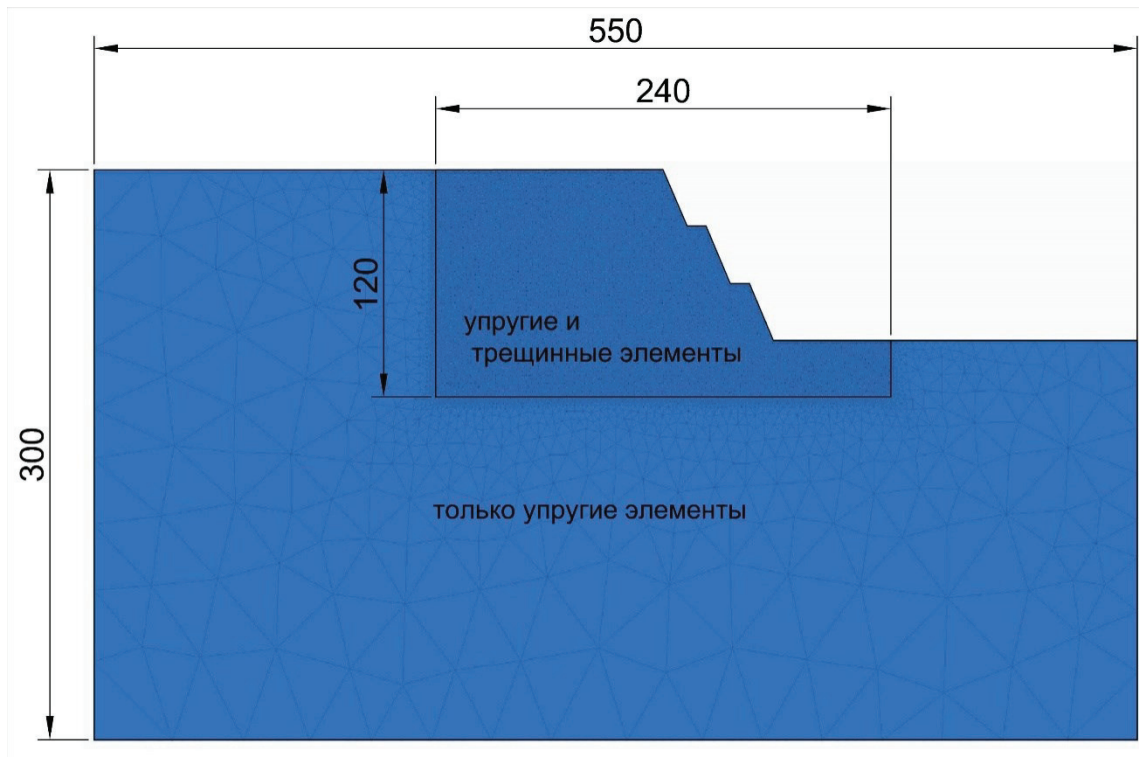


Рис. 6 – Схема построения элементной сети моделей

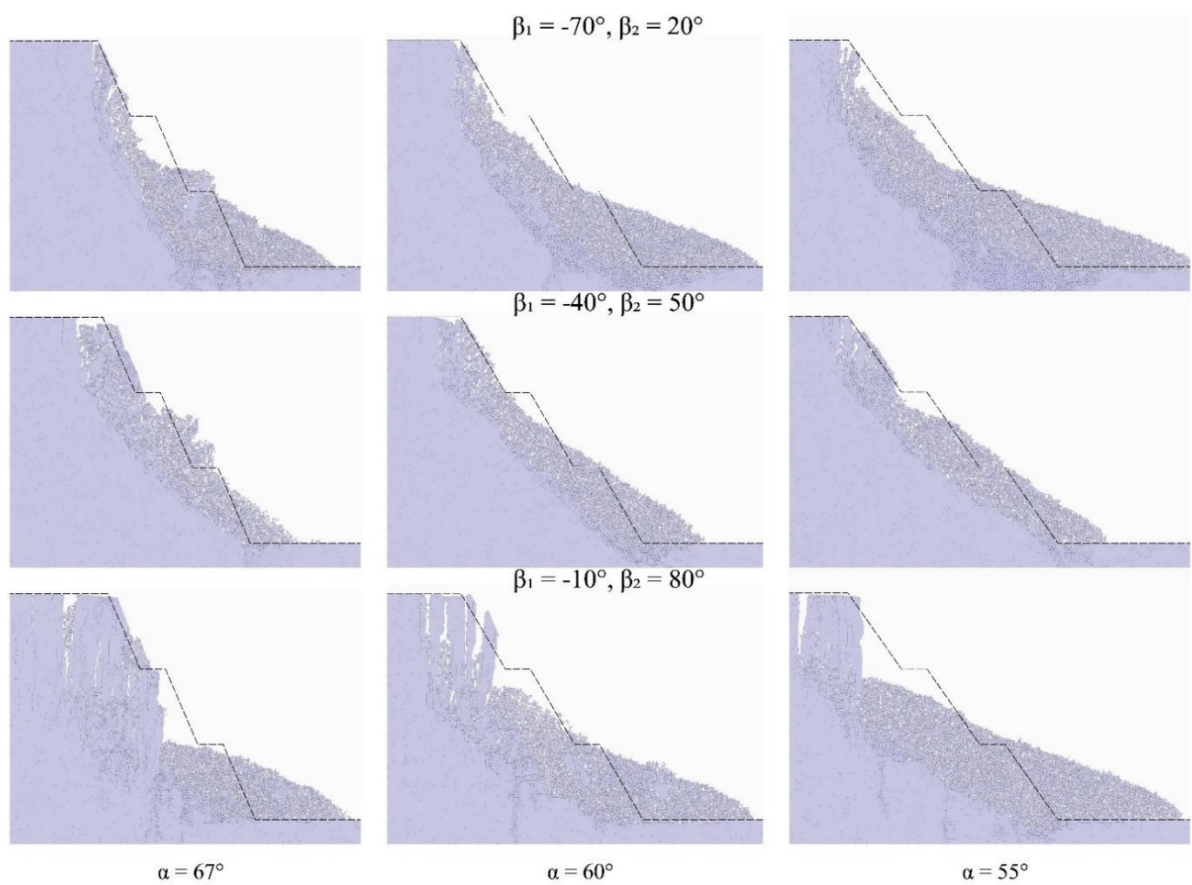


Рис. 7 – Контур уступов в момент обрушения

По рис. 7 можно заметить, что характер движения массива в момент разрушения различается при различном положении трещин. При крутом обратном падении трещин наблюдается опрокидывание слоев (англ. toppling), преобладает вращательное движение в момент разрушения. При отсутствии крутопадающих трещин наблюдается преобладание поступательного движения.

Углы заоткоски уступов (67° , 60° , 55°), выбраны таким образом, чтобы коэффициенты запаса устойчивости участка борта, посчитанные методами предельного равновесия, были равны, соответственно, 1,1, 1,2, 1,3.

Ожидалось, что рассчитанная длительность разрушения группы уступов будет различаться незначительно для моделей с равными коэффициентами запаса устойчивости, однако расчеты показали значительные различия в длительности (максимум на 4 порядка). Кроме того, сильно различается степень изменения длительности разрушения с увеличением коэффициента запаса устойчивости при различных углах падения трещин. При увеличении коэффициента запаса устойчивости на 0,1 длительность разрушения может увеличиться как на 27 %, так и на 780 %.

В работе [8] сделан вывод, что величина предельного смещения борта карьера уменьшается при выполаживании борта карьера. Однако следует заметить, что в гораздо большей степени на величину предельного смещения влияет расположение систем трещин. На рис. 8 показана зависимость величины предельного смещения от длительности разрушения и расположения трещин. На графиках не учтены мгновенные упругопластические деформации, то есть представлены смещения, накопленные в ходе длительного (ползучего) деформирования. Под предельным смещением понимается расстояние, пройденное бровкой участка борта карьера в течение первой и второй стадии ползучести.

По рис. 8 можно также заметить, что предельное смещение имеет наименьшие значения при наиболее неблагоприятном падении трещин, при этом наибольшие предельные смещения наблюдаются при механизме разрушения с опрокидыванием крутопадающих слоев.

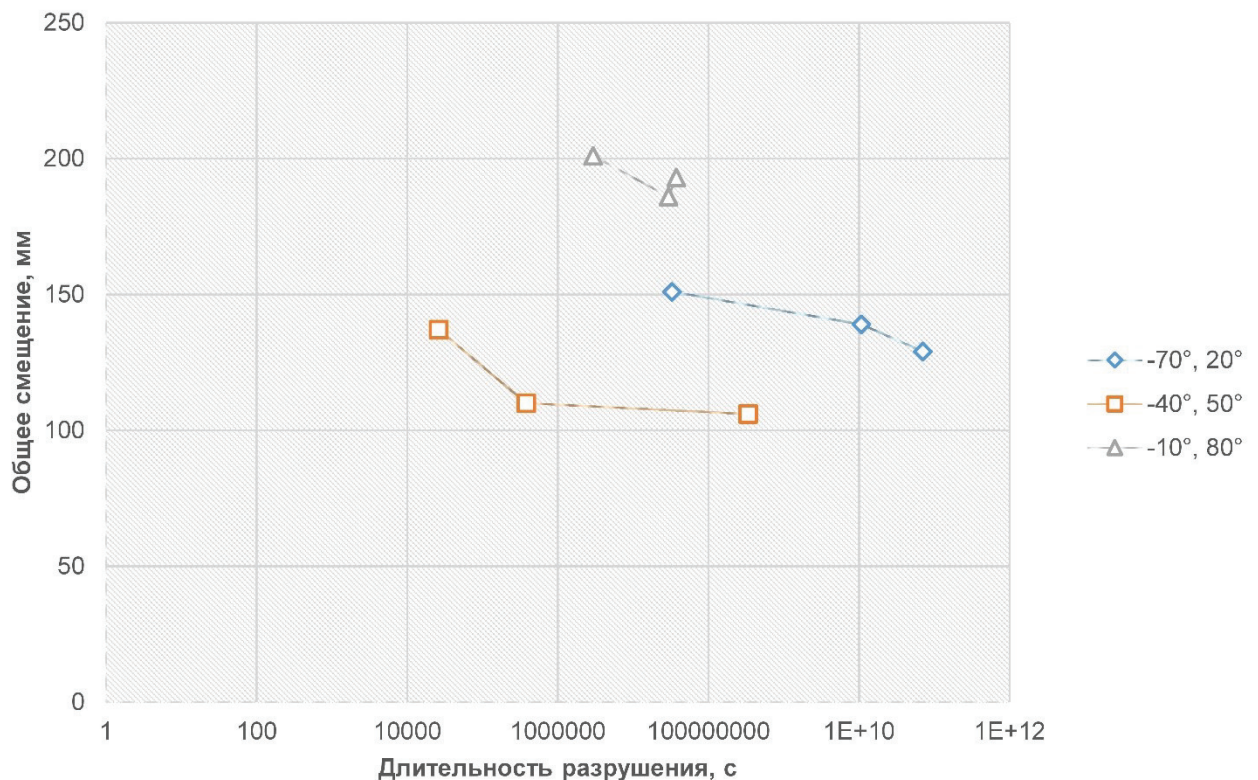


Рис. 8 – Зависимость модуля предельного смещения от длительности разрушения и расположения трещин

По итогам анализа вычислений отмечено, что с началом прогрессирующего разрушения направление смещений не претерпевает изменений [8]. Направление смещений в целом становится ближе к горизонтальному с выполаживанием участка борта карьера (рис. 9). Угол, характеризующий направление смещений, измерен между горизонталью и вектором смещения в плоскости расчетного разреза.

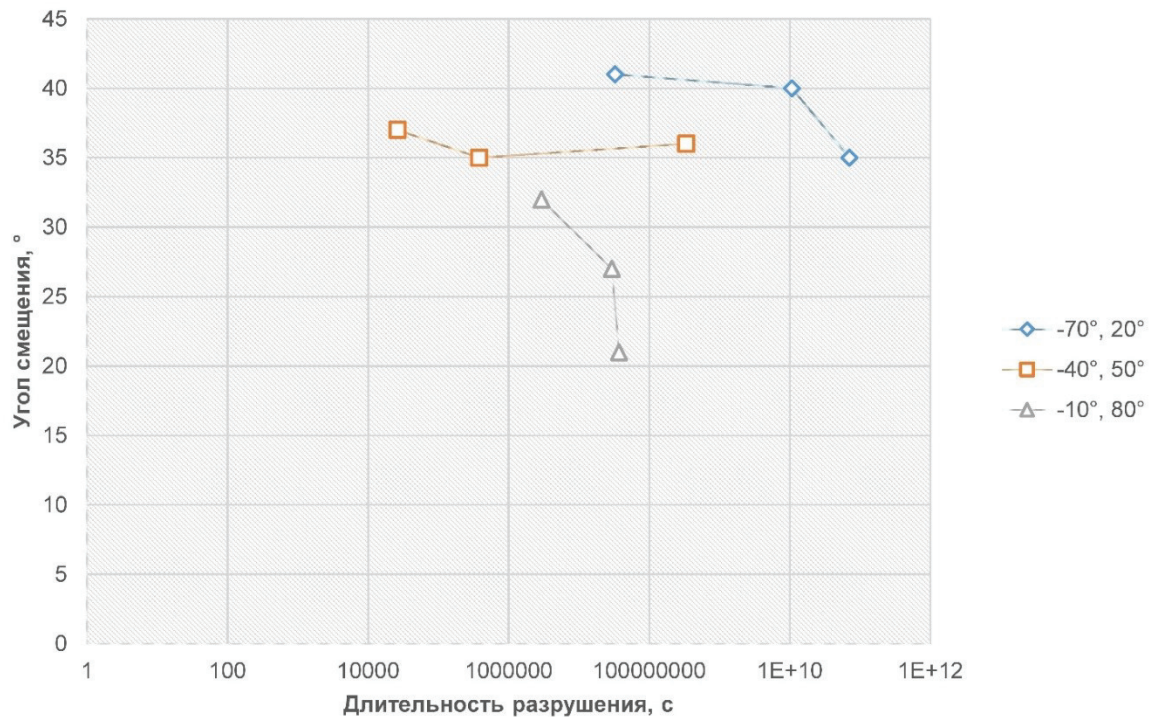


Рис. 9 – Зависимость направления смещений от длительности разрушения и расположения трещин

Рис. 9 показывает, что направление смещений в наибольшей степени зависит от угла падения трещин, в несколько меньшей – от угла заоткоски (и, соответственно, длительности разрушения).

Наличие представленной зависимости показывает, что угол наклона вектора смещений может служить показателем степени опасности наблюдаемых деформаций. Иначе говоря, зная закономерности расположения систем трещин и угол наклона участка борта, можно по измеренному направлению смещений оценить опасность наблюдаемых деформаций. Кроме того, это означает, что с применением моделирования методом конечно-дискретных элементов можно уточнить параметры трещиноватости и прогнозировать механизм разрушения по данным инструментальных наблюдений, что, в свою очередь, необходимо для планирования противодеформационных мероприятий.

Очевидно, что полученные зависимости нельзя экстраполировать на другие горнотехнические и инженерно-геологические условия, так как они характерны для конкретных, достаточно специфичных условий. Для использования данных зависимостей в практике маркшейдерских наблюдений необходимо изучить, как изменяются направление смещений и предельные смещения при других условиях, как на них влияют прочие параметры, например, высота борта, угол внутреннего трения и пр. Кроме того, следует заметить, что использование данных о времени, скорости и ускорениях, полученных в результате численного моделирования описанным способом, невозможно на данный момент, так как для этого необходимы более точные сведения о долговременной прочности пород месторождения, а также, возможно, и более точные и физически обоснованные алгоритмы учета снижения прочности.

Моделирование методом конечно-дискретных элементов, в отличие от других численных методов, позволяет очертить контур прогнозируемого тела обрушения, как

показано на рис. 10, что позволяет оценить объем потенциального тела обрушения в зависимости от горно-геологических условий.

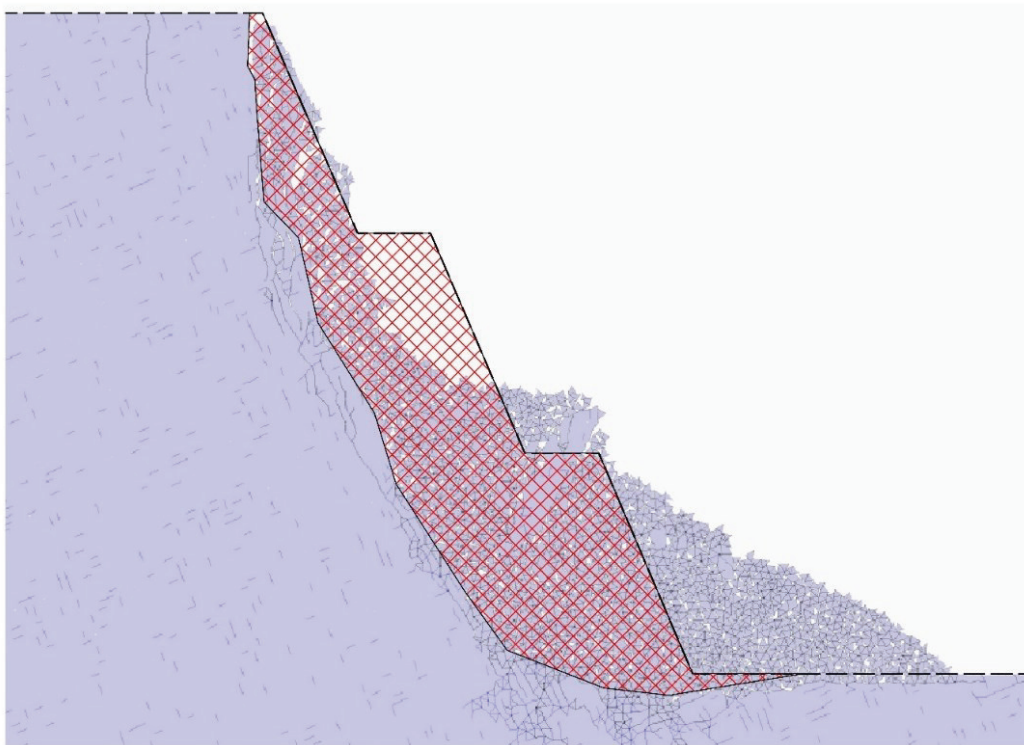


Рис. 10 – Расчет объема обрушения

На рис. 11 приведены рассчитанные по итогам моделирования объемы тел обрушения в зависимости от расположения трещин и длительности разрушения. Толщина тела обрушения, для которого рассчитан объем, по нормали к плоскости разреза составляет 1 м.

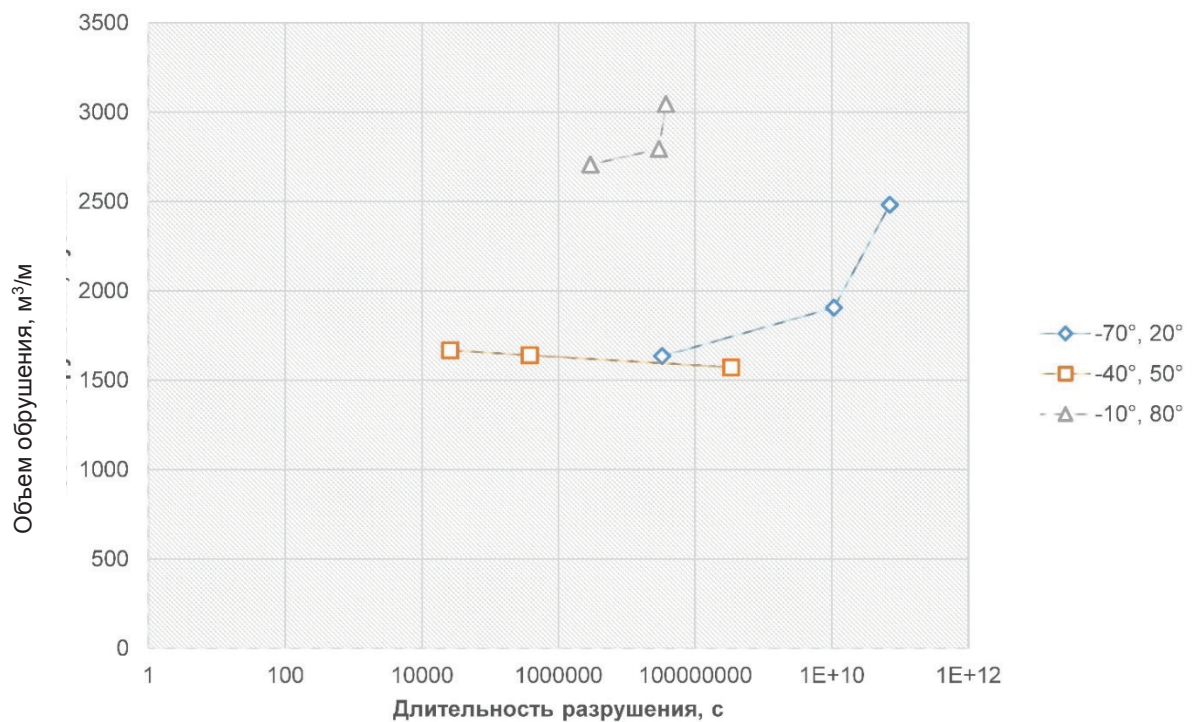


Рис. 11 – Зависимость объема обрушений от длительности разрушения и расположения трещин

Из рис. 11 можно заметить, что с увеличением длительности разрушения в основном происходит рост объема обрушения, однако при наиболее неблагоприятном расположении трещин может наблюдаться и обратный сценарий. В значительной мере объем обрушения зависит также от расположения систем трещин.

Существование представленных на рис. 8, 9, 11 зависимостей означает возможность использования данных о направлении и величинах смещений для прогнозирования формы и объемов обрушений, а также для оценки опасности наблюдаемых деформационных процессов.

Заключение

Полученные результаты исследований показывают, что использование моделирования методом конечно-дискретных элементов позволяет прогнозировать механизм возможных обрушений, который определяется расположением систем трещин.

Применение модели со снижением прочности со временем для моделирования длительного разрушения участка борта карьера позволяет определить кинетические параметры и объем возможных деформаций.

Величина предельного смещения участка борта карьера в основном зависит от расположения систем трещин, в меньшей степени - от угла наклона борта карьера. Предельное смещение имеет наименьшие значения при неблагоприятном падении трещин. Самые большие по модулю предельные смещения характерны для обрушений с опрокидыванием крутопадающих слоев (топлинг).

Направление смещений зависит как от угла падения трещин, так и от крутизны борта. То есть, имея сведения о пространственной ориентировке систем трещин и направлении смещений, можно оценить степень опасности наблюдаемых на карьере деформационных процессов, а также уточнять углы падения трещин и прогнозировать механизм разрушения. Наименьшие углы наклона векторов смещений наблюдаются при механизме разрушения с опрокидыванием крутопадающих слоев.

Результаты моделирования методом конечно-дискретных элементов позволяют определить контуры и объемы тел возможных обрушений, сведения о которых важны для планирования мероприятий по приведению выработок в устойчивое положение. Объем обрушения зависит как от расположения систем трещин, так и от угла наклона участка борта.

Модель, использованная в расчетах, не проходила калибровку по времени, поэтому скорости и ускорения, рассчитанные с ее применением, не следует использовать в качестве предельных кинетических параметров деформаций.

Литература

1. Туринцев Ю.И. Геомеханические основы прогноза устойчивости карьерных откосов / Ю.И. Туринцев // Известия вузов. Горный журнал. – 1992. – № 9. – С. 84 - 87.
2. Макаров А.Б. Разрыхление пород при обрушении и условия образования провалов / А.Б. Макаров, А.И. Ананин, Д.В. Мосякин // Горный журнал. – 2017. – № 3. – С. 32 - 36.
3. Munjiza A. The combined finite-discrete element method. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd. – 2004. – 350 p.
4. Lisjak A., Grasselli G. A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2014. – № 6. – P. 301 - 314.
5. Ильясов Б.Т. Моделирование длительного разрушения массивов горных пород методом конечно-дискретных элементов / Б.Т. Ильясов // Маркшейдерский вестник. – 2016. – № 1. – С. 48 - 51.

6. Kemeny J. Time dependent drift degradation due to the progressive failure of rock bridges along discontinuities // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2005. – № 42. – P. 35 - 46.
7. Damjanac B., Board M., Lin M., Kicker D., Lemm, J. Mechanical degradation of emplacement drifts at Yucca Mountain – A modeling case study // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2007. – № 44(5). – P. 677 - 691.
8. Ильясов Б.Т. Исследование кинетики деформаций массива горных пород с использованием метода конечно-дискретных элементов: дис. ... канд. тех. наук / Б.Т. Ильясов; Ур. гос. гор. ун-т. – Екатеринбург, 2016. – 138 с.
9. Schmidtke R.H., Lajtai E.Z. The long-term strength of Lac du Bonnet granite // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science. – 1985. – № 22. – P. 461 – 465.
10. Nyungu D., Stacey T.R. Time-dependent tensile strengths of Bushveld Complex rocks and implications for rock failure around mining excavations // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2014. – № 114. – P. 765 - 772.
11. Barton N. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice / Barton N., Bandis S. // Rock Joints. – 1990. – P. 603 - 610.