

колеблются от 100 до 300мм. Разрушение бортов отвалов и карьеров происходит в результате действия касательных напряжений. Деформация разрушения проходит по линии действия максимальных касательных напряжений τ_{xy} (в нашем случае S_{xy}). Анализ результатов моделирования при разносе борта и сооружении отвала показывает, что максимальные касательные напряжения наблюдаются на горизонтах с отметками +135м, +115м, +100м, +40м, +25м, +10м, -5м, -20м.

Размещение отвала на подработанной территории (в центре мульды сдвижения), приводит, к улучшению геомеханической обстановки, как для отвала, так и для борта карьера.

Проектный контур отвала и борта карьера имеет устойчивое положение. Минимальные расчетные коэффициенты запаса устойчивости больше нормативных и соответственно равны: для отвала 1,22; системы отвал-карьер 1,52.

Список литературы

1. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987, 221с.
2. Правила охраны сооружений природных объектов от вредного влияния подземных горных работ в Криворожском железорудном бассейне /ВНИМИ-Л.,1975. - 66с.
3. Сдвижение горных пород и земной поверхности при разработке рудных залежей Криворожского бассейна / К.К. Бойчук, А.Л. Монахов, В.Н. Романенко, А.В. Сазонов. В кн.: IX международный конгресс по маркшейдерскому делу, Чешская республика, Прага. 18-22 июня 1994г. Том-доклады, 1994г. С.542-544.
4. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. – Л.:ВНИМИ, 1972.- 165с.
5. Методичні вказівки з визначення оптимальних кутів нахилу бортів, укосів уступів і відвалів залізорудних та флюсових кар'єрів // Під ред. проф. А.Г. Шапаря // -К: - 2009. – 201с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОТВАЛА НА ПОДРАБОТАННОЙ ТЕРРИТОРИИ

Е.К. Бабец, А.А. Сова, А.В. Сазонов, М.И. Русаков, Научно-исследовательский горнорудный институт ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Украина

Геомеханическое обоснование возможности расширения склада окисленных кварцитов (автоотвал №4) ПАО "АрселорМиттал Кривой Рог" на подработанной территории. Проведено геологическое описание основания склада, анализ расчёта деформаций и напряжений методом конечных элементов в основании и конструкции склада окисленных руд, выполнены расчеты по определению коэффициента запаса устойчивости на участке расширения и в южной части склада окисленных кварцитов, описание системы контроля устойчивости склада.

Дальнейшая разработка месторождения магнетитовых кварцитов карьером №3 ПАО "АрселорМиттал Кривой Рог" приводит к необходимости складирования попутно добываемых окисленных кварцитов.

Окисленные кварциты из карьера №3 ПАО "АрселорМиттал Кривой Рог" отсыпаются в специальный склад (отвал №4), который формируется вблизи северного и северо-восточного борта карьера. Проектные решения по формированию склада окисленных кварцитов выполнялись ООО "Южгипроруда" в 2010г. и НИГРИ ГВУЗ "КНУ" в 2013-14гг. В связи с корректировкой графика объемов складирования и сохранения производительности карьера возникла необходимость в расширении площади склада окисленных кварцитов. Площадь складирования увеличивается в западном и в северном направлениях от существующего

положения склада, на территорию ранее подработанную подземными горными работами.

Для расчёта деформаций склада окисленных кварцитов (отвал № 4) ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» было выполнено моделирование методом конечных элементов (МКЭ, FEM). Данный метод начал применяться в 60-70 годах прошлого века в связи развитием ЭВМ. Основная концепция МКЭ состоит в том, что искомую непрерывную величину, будь то напор фильтрационного потока или перемещения точек деформированного тела, аппроксимируют кусочным набором простейших функций, заданных ограниченными конечными подобластями (элементами). С помощью такой процедуры интегрирование дифференциальных уравнений аналитической постановки задачи сводится к решению системы линейных уравнений. В настоящее время существует значительное количество программных комплексов позволяющих решать значительный круг задач по определению деформаций, фильтрации, теплопереносу и разрушений.

В 2015 году решением сессии городского совета г. Кривой Рог ПАО "АрселорМиттал Кривой Рог" была расширена граница земельного отвода в северо-западном направлении от существующего земельного отвода НКГОКа. Часть отведенной земной поверхности подработана подземными горными работами шахты "Валявко". В связи с этим, встал вопрос оценки вредного влияния подземных горных работ на склад окисленных кварцитов и оценка устойчивости откосов склада окисленных кварцитов на подработанной территории.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

геомеханическое обоснование возможности размещения склада окисленных кварцитов на подработанном подземными горными работами участке земной поверхности;

обоснование максимально допустимых результирующих угловых параметров откоса склада и высоты ярусов.

При отработке залежей системами с обрушением руды и вмещающих пород в 1955-1973 процесс сдвижения развивался по классической схеме. Многолетние инструментальные натурные наблюдения показали, что процесс сдвижения проявился достаточно полно в виде провалов (на выходах залежи под наносы и от отработки верхних горизонтов), воронок, трещин, террас и плавного оседания земной поверхности. Максимальные величины оседания были равны 1,5-2,0м. Наибольшие годовые скорости оседаний, согласно наблюдениям приходится на 1979-1981г.г. В эти же годы образовались последние воронки. После этого процесс сдвижения перешел в стадию затухания.

Между отвалами (по ЛСП+100) и современной границей земельного отвода карьера №3 НКГОКа (в осях +128...+168, 241...209) суммарные максимальные деформации земной поверхности достигали величины 100мм. В настоящее время, согласно "Правил охраны..." [1], процесс сдвижения закончился. На это указывают и ранее выполненные исследования института ВИОГЕМ [2, 3].

На основании вышеизложенного участок между отвалами (по ЛСП+100) и современной границей земельного отвода карьера №3 ГОКа (в осях +128...+168, 241...209) и отвала шахты "Валявко" можно использовать под складирование пустых пород и окисленных кварцитов, согласно требованиям нормативных документов по размещению горнотехнических объектов и ведению открытых горных работ.

До 2010 года детальное изучение инженерно-геологических условий рассматриваемой территории не производилось. В 2010г. на территории склада окисленных руд, ГП КИИЗИ "Энергопроект" выполнены инженерно-геологические изыскания [4] путем бурения и исследования образцов по 9 инженерно-геологическим скважинам, результаты которых позволили определить основные показатели физико-механических свойств пород основания отвала. Дополнительные инженерные изыскания проведены ООО «ГЕОАСПЕКТ» (июль — сентябрь 2015г.) [5]. Разведочные инженерно-геологические скважины размещались вблизи и на участке расширения склада окисленных руд.

Кроме этого, в расчетах устойчивости отвала №4 использовались материалы изучения рыхлых пород в обнажениях (по уступам восточного борта карьера №3 НКГОКа) и результаты бурения разведочных скважин по залежам богатых железных руд Валявкинской синклинали.

В геологическом строении района четко прослеживаются два структурных этажа: нижний, сложенный докембрийскими образованиями, и верхний, представленный практически горизонтально залегающими осадочными отложениями кайнозоя (палеоген-неогенового и четвертичного возраста). Практически повсеместно кристаллический фундамент покрыт корой выветривания различной мощности.

На инженерно-геологические условия формирования всего склада окисленных руд оказывает влияние техногенная деятельность, а именно, наличие засыпанных воронок, провалов, зоны трещин и плавных сдвижений, наличие на территории техногенных образований (отработанного хвостохранилища, отвала суглинка, отвала глины). Природные песчано-глинистые отложения, на которых расположены техногенные образования характеризуются относительно большей несущей способностью, чем техногенные образования.

В пределах изучаемого участка, а также прилегающей территории, при проведении буровых работ обводненных грунтов не встречено.

Проектируемый склад окисленных руд (отвал №4) является отвалом скальных пород на слоистом песчано-глинистом основании. В таких условиях основной причиной нарушения устойчивости отвала является несоответствие параметров откосов отвала несущей способности его основания [6].

Формирование первого яруса (отм.+120м) склада окисленных кварцитов под углом естественного откоса равным 36° , как показывает практика (уже отсыпанный участок отвала высотой 25-30м и по фронту 1200м), не приводит к потери устойчивости и оползневым явлениям. Это указывает на достаточно высокие физико-механические свойства и отсутствие обводненности пород основания. Кроме этого, положительным опытом формирования отвала на данной территории является существующий более 30 лет отвал скальных пород шахты "Валявко" (высота отвала 30-40м, угол откоса — 33° [7].

Для оценки устойчивости отвала окисленных кварцитов на участке расширения склада были выполнены расчеты по пяти разрезам, с использованием программы "Расчет устойчивости земляных откосов" v.5.01 (Slope) [8].

Расчет устойчивости выполнялся по кругло цилиндрическим поверхностям скольжения В программе реализованы следующие инженерные методы расчета:

метод Г. Крея (иначе - метод А.В. Бишопа);

метод К. Терцаги;

метод "Весового давления" (метод Р.Р. Чугаева);

Конечным результатом расчета являлось получение коэффициента запаса устойчивости (по трем вышеперечисленным методам).

В результате выполненных расчетов получены следующие значения коэффициента запаса устойчивости 1,18-1,46 при результирующих углах наклона борта склада $18,5-28^\circ$

Для определения деформаций и напряжений, которые возникнут в породах основания и в самом теле склада окисленных при формировании склада, был использован один из численных методов расчета - метод конечных элементов (МКЭ). Сущность метода конечных элементов заключается в представлении сплошной линейно-деформируемой неоднородной среды (прибортовой горный массив) в виде набора треугольников (хотя могут быть четырехугольники и шестиугольники) соединенных между собой в отдельных точках (узлах) [9].

Основными показателями при определении напряженного состояния и устойчивости борта карьера являются: объемный вес пород, угол внутреннего трения, сцепление, модуль упругости (Юнга), коэффициент Пуассона. Для условий Криворожского бассейна эти показатели определялись различными организациями и авторами. Наиболее полно упругие параметры горных пород (γ , μ , E) представлены в монографии академика Г. М.Малахова [10]. Значения физико-механических свойств для наносов выбраны из рукописи [11].

Стадии решения включают в себя установление соотношений между узловыми силами и перемещениями элементов, формирование единой матрицы жесткости всей элементов, связанных системы уравнений относительно узловых перемещений с учетом граничных условий.

Решение системы уравнений выполнено на персональном компьютере с использованием программы ED-Elas2D.

При построении геомеханической модели расчетной области выбраны геометрические размеры области, выделены в ее пределах структурные элементы породного массива, приняты действующие нагрузки, показатели деформируемости горных пород и граничные условия, рассматриваемая область разбита на треугольные конечные элементы.

Расчетная область массива составлена по разрезу 1сз-1юв. Было выполнено моделирование геомеханического состояния трех положений склада (отвала) окисленных руд:

исходное состояние земной поверхности без склада (отм.+80м...+95м);

современное положение склада (отм.+80м...+125м);

проектное положение склада до отметки +180м (отм.+80м...+180м).

Наиболее мелкая сетка представлена на границах слоев и в слоях небольшой мощности. В среднем размеры сторон треугольников равны 5-9м (рис. 1).

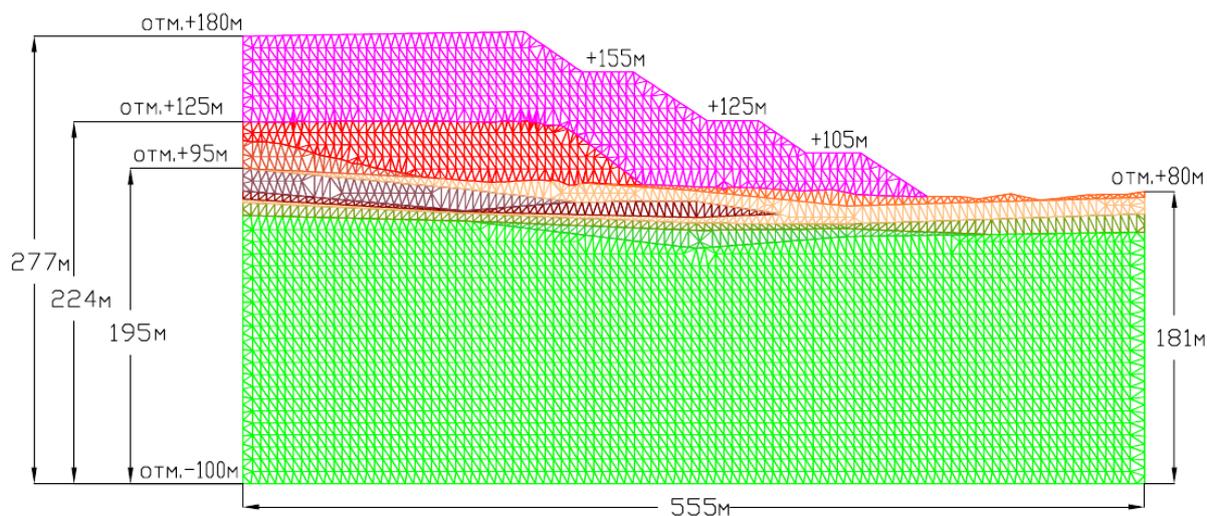


Рис. 1. Геометрические размеры моделируемой области горного массива и склада окисленных кварцитов на разрезе 1сз-1юв

В качестве граничных условий принято запрещение горизонтальных смещений на вертикальных границах области и вертикальных смещений на нижней границе области. Силовое воздействие на массив обусловлено только собственным весом пород.

Решение задачи выполнялось в плоской постановке. Это привело к некоторому завышению полученных результатов расчета, что позволило получить дополнительный запас надежности. Фактор времени в расчетах отсутствует, поэтому все полученные результаты являются максимальными за весь период формирования склада.

Программа позволяет представлять полученные результаты в виде изолиний величин, а также в виде изолиний главных наибольших и наименьших напряжений и углов наклона (к горизонту) главных площадок по которым действуют наибольшие и наименьшие нормальные и касательные напряжения. На рисунках 2-7 представлены основные результаты моделирования и положения поверхностей скольжения полученных по результатам расчета устойчивости откоса склада.

Результаты выполненных исследований условий формирования склада окисленных руд (на участке расширения) и геомеханические расчеты по оценке устойчивости склада (отвала №4) позволяют сделать следующие выводы.

Процесс сдвижения на данном участке развивался по классической схеме, на земной поверхности наблюдались значительные деформации в виде провалов, отдельных воронок, террас и трещин. Выработанное пространство полностью заполнено. Процесс сдвижения в горном отводе шахты "Валявко" закончился.

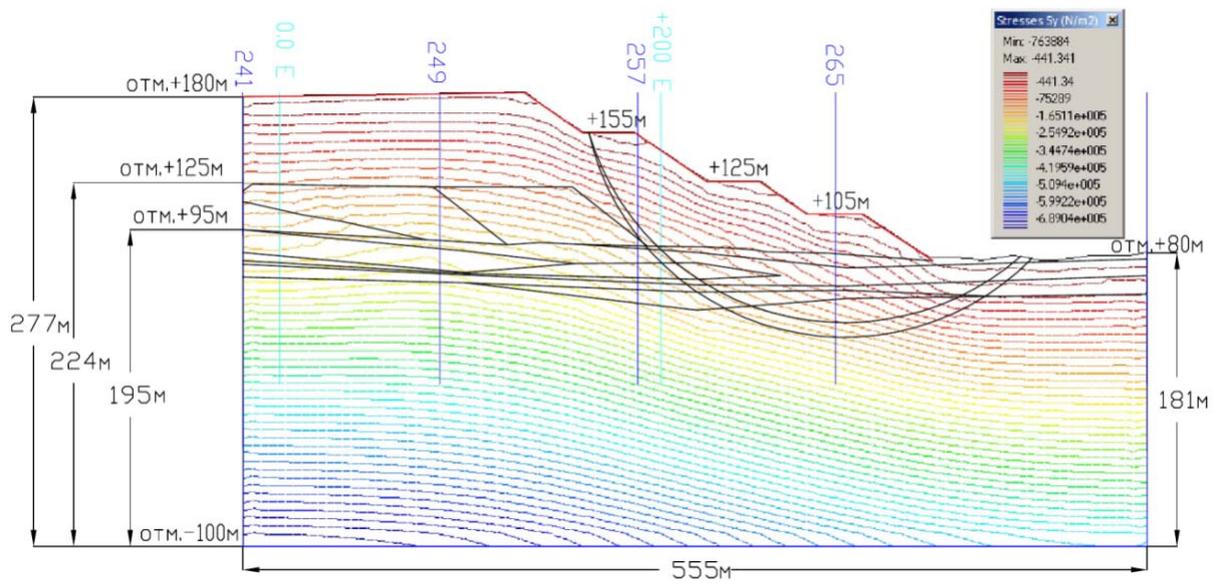


Рис. 2. Изолинии нормальных σ_y напряжений

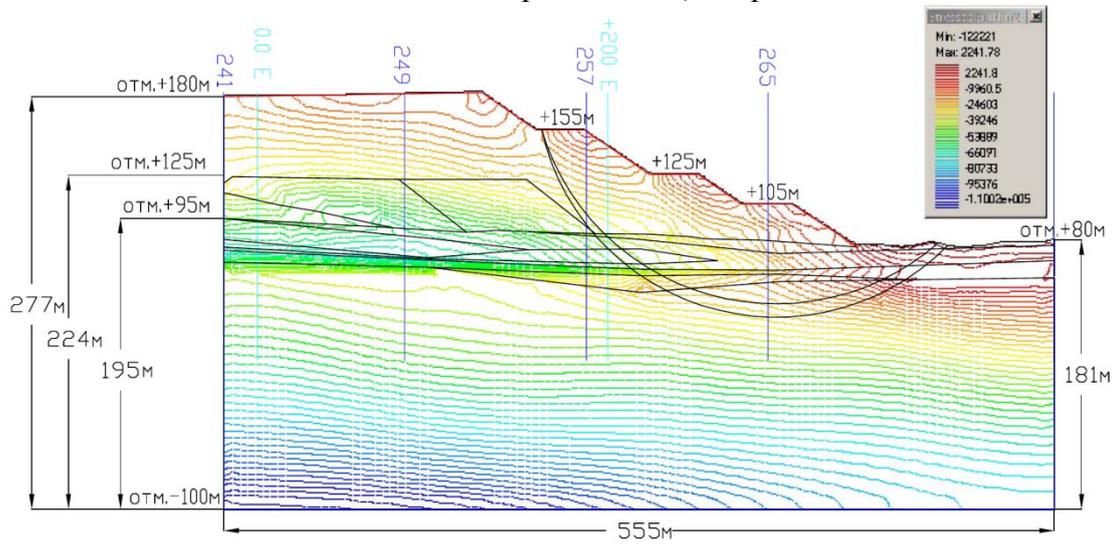


Рис. 3. Изолинии нормальных σ_x напряжений

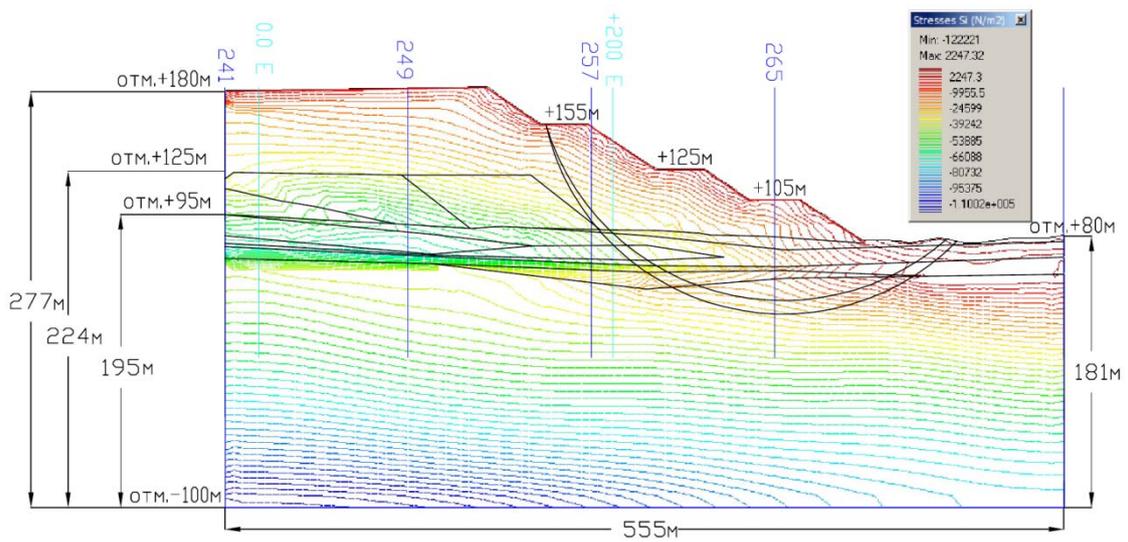


Рис. 4. Изолинии наибольших главных σ_1 напряжений

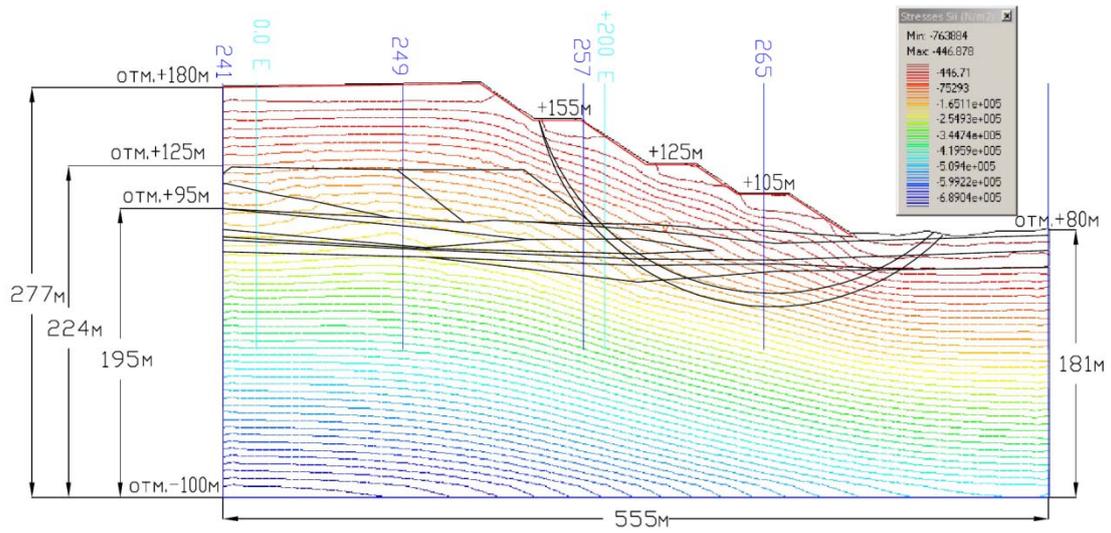


Рис. 5. Изолинии наименьших главных σ_2 напряжений

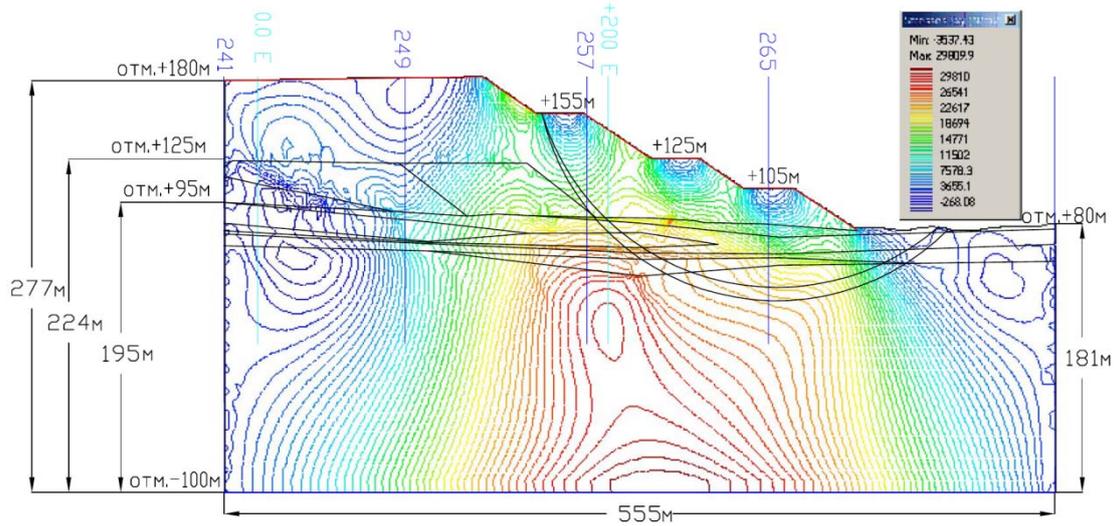


Рис. 6. Изолинии касательных τ_{xy} напряжений

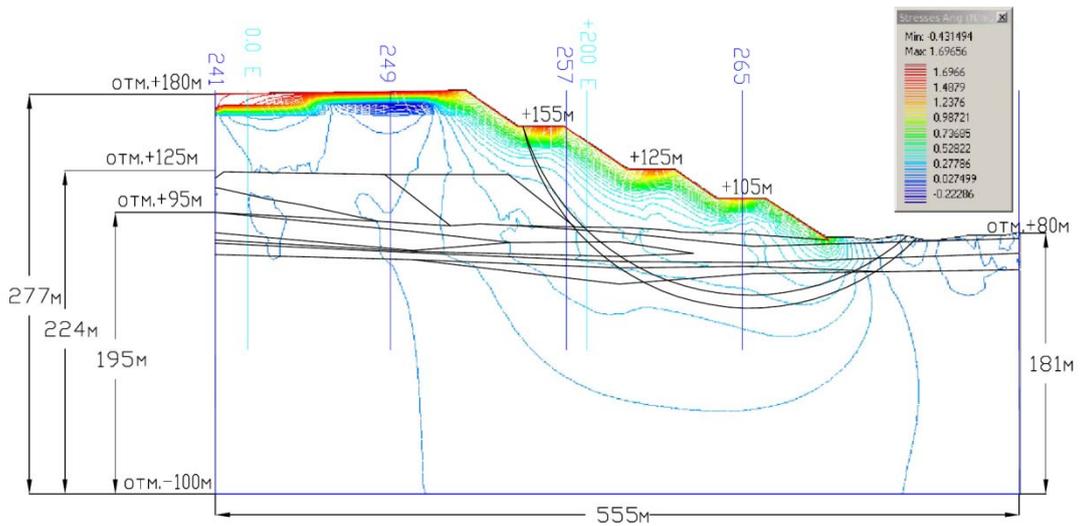


Рис. 7. Изолинии углов наклона площадок по которым действуют наибольшие и наименьшие главные и касательные напряжения

При формировании первого яруса склада на отметке +120м кратность подработки становится больше 15, т.е. даже теоретическая зона возможного образования воронок (зона ВОВ) отсутствует. Поэтому, на ярусе склада +120м, расположенном в зоне прямой подработки земной поверхности подземными горными работами, можно размещать склад окисленных кварцитов. Это касается участка склада окисленных кварцитов в районе балки Царева и существующего отвала пустых пород шахты "Валявко".

Склад окисленных кварцитов отсыпается на слоистое основание, часть слоев имеет техногенное происхождение (отработанное хвостохранилище, отвалы суглинка и глины).

Выполнены геомеханические расчеты по определению коэффициента запаса устойчивости откосов склада. Величина коэффициента запаса устойчивости колеблется от 1,18 до 1,46, при нормативном 1,2.

Анализ результатов математического моделирования методом конечных элементов (МКЭ) показывает, что вблизи откоса изолинии значений $\sigma_y = \gamma H$ параллельны откосу, изолинии $\sigma_x = m\gamma H$ выходят в откос под углами близкими к 90° (m - коэффициент бокового распора, γ - объемный вес пород, H - высота столба пород).

Наибольшее главное напряжение σ_1 по всему сечению откоса сжимающее и только вдоль верхней бермы равно нулю. Наименьшее главное напряжение σ_2 по всему сечению сжимающее. Вблизи откоса изолинии значений σ_2 практически параллельны откосу, а σ_1 выходят на откос. В сечении склада изолинии имеют плавный характер, так как склад представлен однородными породами. В основании склада залегают разнородные породы, поэтому в основании склада наблюдается концентрация напряжений и резкое изменение направления изолиний.

В связи с тем, что разрушение откоса происходит главным образом за счет среза (сдвига), большой интерес представляет собой анализ распределения тангенциальных напряжений τ_{xy} . Анализ распределения и величин напряжений показывает, что наиболее слабыми элементами конструкции являются суглинка (сцепление - $C=2\tau/m^2$) и песок (сцепление - $C=0\tau/m^2$) залегающие в основании. Максимальные величины тангенциальных напряжений τ_{xy} по линии скольжения составляют 12000-22000Н/м² (1,2-2,2τ/м²).

Представляет интерес положение тех площадок по которым действуют наибольшие (σ_1) и наименьшие (σ_2) главные и касательные (τ_{xy}) составляющие напряжений. В графическом виде получены изолинии углов наклона (в радианах) таких площадок к горизонту. На рисунке линии скольжения проходят по изолиниям со значениями 0,25-0,35 (14-20°). Согласно результатам моделирования, линия скольжения выходит в точку на земной поверхности, где меняется направление (изгиб) изолинии оседания (У). Кроме этого, анализ полученных данных показал, что влияние склада фиксируется на глубинах (2-2,5) от его высоты.

Проектное положение склада окисленных руд обеспечивает устойчивое состояние откосов. При этом высота яруса колеблется от 25м до 35м. Ширина берм колеблется от 28м до 32м.

Список литературы

1. Правила охраны сооружений природных объектов от вредного влияния подземных горных работ в Криворожском железорудном бассейне /ВНИМИ-Л.,1975. -66с.
2. Заключение о возможности строительства выездной дороги на отвал в осях 105-110 ЛСП+0 — ЛСП +100 шх. "Северная" им. Валявко, РУ им. Дзержинского. - Криворожская территориальная лаборатория ВИОГЕМ, от 26.06.89.
3. Заключение о возможности рекультивации с последующим использованием под коллективные сады участка земной поверхности в осях 124-162 ЛСП+0 — ЛСП +500 шахты им. Валявко. - Криворожская территориальная лаборатория ВИОГЕМ, от 05.08.91.
4. Расширение склада окисленных руд на восточном борту карьера №3 горного департамента ОАО "АрселорМиттал Кривой Рог" для поддержания производительности карьера №3 по добыче сырой руды 20млн.т в год. Рабочий проект. Научно технический отчет

по инженерным изысканиям. Книга 2. Инженерно-геологические изыскания. 31-20/10-08-507, ГП КИИЗИ "Энергопроект" - Киев, 2010-28с.

5. Отчет о разведочном бурении на участке бывшей шахты им. Валявко/ ООО "Фирма ИНТОРГ", Кривой Рог - 2015. -19с.

6. Расширение склада окисленных руд на восточном борту карьера №3 горного департамента ОАО "АрселорМиттал Кривой Рог" для поддержания производительности карьера №3 по добыче сырой руды 20млн.т в год. Рабочий проект. Рекомендации по формированию отвала склада окисленных руд и защите подземной гидросферы в зоне его влияния (Заключ. в 2 книгах). Книга 2. Рекомендации по максимально допустимым параметрам откосов отвала склада окисленных руд на конечных контурах и мероприятиям по обеспечению его устойчивости "НОВОТЕК-2" рук. Будков В.П. 2010-54с.

7. Корректировка рабочей документации по складу окисленных кварцитов на восточном борту карьера № 3 (автоотвал № 4). анализ и корректировка проектных решений по складу окисленных руд на восточному борту карьера № 3. разработка рабочей документации на стадии "рабочая документация". Отчет о НИР, руков. Сова А.А.,НИГРИ ГВУЗ "КНУ", Кривой Рог, 2014г. - 130с.

8. Программа расчета устойчивости земляных откосов по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения, Александров А.В., Русинов В.Ю. © Дедовск - Москва, 1990-1999г.

9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.:Недра, 1987.-221с.

10. Малахов Г.М. Управление горным давлением при разработке рудных месторождений Криворожского бассейна - Киев: Наук. думка, 1990. - 204с.

11. "Разработка рекомендаций по обеспечению устойчивости откосов в рыхлых отложениях и безопасному ведению горных работ при разnose "восточного" борта карьера №3 НКГОКа в зоне возможного воронкообразования", отчет о работе КО ОАО "ВИОГЕМ", Кривой Рог-1992г.,17с.