© Ф.Г. Атрощенко, Ю.П. Горбатов, 2006

УДК 622.693.2:621.796.2

*Ф.Г. Атрощенко, Ю.П. Горбатов*

# *МНОГОЦЕЛЕВОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАМЫВНЫХ МАССИВОВ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ПРИ РАЗРАБОТКЕ АЛМАЗОНОСНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЯКУТИИ*

**Семинар № 1**

## 1. Предварительные сведения

При разработке предприятиями ЗАО «АЛРОСА» трубок Мир, Удачная, Айхал, Юбилейная и др. требуется создавать крупные хвостохранилища (гидротехнические сооружения для складирования отходов обогащения рудной массы) вместимостью 120 млн $м^3$ и более, высотой до 50-60 м, занимающие значительные площади (до 600 и более га). При объеме перерабатываемой обогатительной фабрикой рудной массы 5-15 млн т в год хвостохранилища заполняются с учетом поступающих объемов технологических вод и атмосферных осадков за 10-15 лет. При освоении алмазоносных месторождений Якутии открытым и подземным способами в течение 80-100 лет таких хвостохранилищ потребуется до десяти на одно месторождение. Трудно оценить негативные последствия создания многочисленных хвостохранилищ лишь от нарушения земной поверхности в зонах распространения многолетне-мерзлых пород с учетом высокой чувствительности сезонно-талого слоя и биоты.

Своевременная постановка и решение задач многоцелевого использования техногенных намывных массивов хвостохранилищ позволяет сократить негативное воздействие на окружающую среду за счет минимизации нарушенных площадей при вторичной переработке техногенных отложений, а также применения хвостов в качестве закладочного материала при подземной разработке, получения на их основе стройматериалов и компонентов буровых и тампонажных растворов. С экологических позиций следует иметь в виду дополнительную опасность загрязнения прилегающих территорий, связанную с фильтрационными утечками солоноватых вод хвостохранилищ.

Ниже рассматриваются результаты предпроектных проработок по переформированию законсервированного хвостохранилища Удачнинского ГОКа, выполненных авторским коллективом представителей СПбО ИГЭ РАН, МГГУ, треста «Энергогидромеханизация» при участии сотрудников института «Якутнипроалмаз».

В настоящее время хвостохранилище на руч. Новом законсервировано. Так как под термином «консервация» понимается временная остановка в эксплуатации данного объекта, то она должна быть выполнена таким образом, чтобы при необходимости территорию хвостохранилища можно было вновь использовать для складирования хвостов или для других нужд с минимальными затратами. В случае же когда такие отходы производства (все хвостохранилище

или его часть) представляют собой техногенное месторождение полезных ископаемых, то заранее необходимо создавать условия (удобные в техническом и выгодные в экономическом отношениях) для их повторной разработки. В частности, нужно следить за сохранностью и чистотой хвостов, а также поддержанием необходимых условий для удобного подхода к отвалу, выемки техногенных отложений и транспортировки их к месту переработки.

Реконструкция хвостохранилищ проводится, как правило, после их заполнения до проектных отметок при продолжающейся отработке месторождения. Применительно к условиям действующего предприятия, предлагается решение ряда вопросов, связанных с эксплуатацией хвостового хозяйства ОФ №12. В частности, рассмотрен комплекс мероприятий по экологически безопасному увеличению сроков эксплуатации хвостохранилища на руч. Новом. При этом, с одной стороны, массив уложенных отвальных хвостов сохраняется в кАчестве техногенного месторождения, а с другой, емкость хвостохранилища освобождается от отходов производства и может вновь быть использована для укладки хвостов.

Вопрос возвращения в процесс эксплуатации хвостохранилища на руч. Новом связан с увеличением сроков эксплуатации хвостохранилища на руч. Правый Киенг (в частности снижением требований к срочности возведения ограждающей дамбы) и снижения дебаланса воды в целом по хвостовому хозяйству ОФ №12. При принятии предлагаемых мероприятий вопросы организации емкости для приема аварийных сбросов ОФ №12 на территории хвостохранилища на руч. Новом сами по себе отпадают.

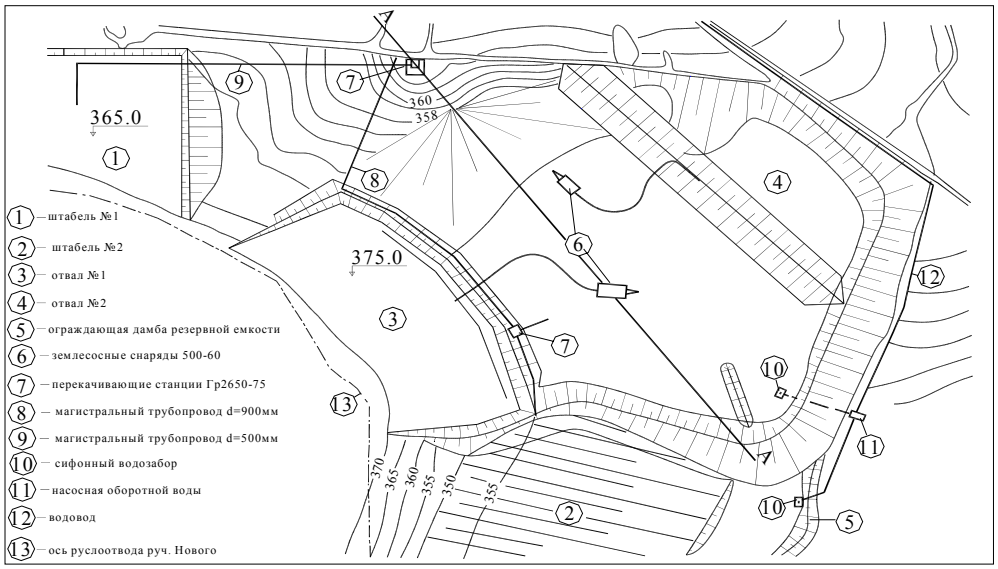
**2. Краткая характеристика объекта и инженерно-геологичес-ких условий**

Климат района суровый, резко континентальный с малым количеством осадков - 335 мм в год. Средняя температура января – 41,7 ºС, при абсолютном минимуме – 65 ºС. Средняя температура июля +14,8 ºС, при максимуме +35 ºС. Суточные амплитуды колебаний воздуха достигают 34 ºС. Продолжительность периода с отрицательными температурами 235 дней. Средняя годовая температура воздуха –13,2 ºС. Испарение с водной поверхности составляет в среднем около 270 мм в год.

Долина ручья Новый (правый приток р. Далдын) на участке сооружений (рисунок) имеет корытообразную форму. Крутизна склонов незначительна, уклон бортов составляет 0,027. Дно долины занято плоской пойменной террасой шириной 200-250 м. Поверхность террасы до строительства хвостохранилища была значительно заболочена и покрыта густой осоковой растительностью. Ручей Новый представляет собой водоток полугорного типа с крутыми уклонами. Средний взвешенный уклон русла – 0,014.

Хвостохранилище ОФ №12, выведенное из эксплуатации в 1989 году, расположено в Республике Саха (Якутия), г. Удачный Мирнинского района, в долине ручья Новый, правого притока реки Далдын. Расстояние от ОФ №12 до хвостохранилища 1 км, от карьера – 1 км.

Хвостохранилище эксплуатировалось с 1975 по 1989 гг. Интенсивность возведения менялась от 10 м/год в первый сезон, далее в течении 5 лет – в среднем 5,5 м/год, далее в течении 5 лет – в среднем 4,0 м/год, в последние три года – 2,0 м/год. В настоящее время в хвостохранилище уложено 117,0 млн $м^3$ хвостов обогащения. Остаточная емкость хвостохранилища используется




для аварийных сбросов пульпы ОФ. Общая площадь хвостохранилища 3,80 км$^2$.

Хвостохранилище овражного типа, до 1989 года – намывное. Емкость образована путем перекрытия долины руч. Новый ограждающей дамбой, которая относится к гидротехническим сооружениям II класса. Высота ограждающей дамбы 62 м. Длина по гребню 4150 м. Отметка гребня 358,0 м. Минимальная длина надводного пляжа 50 м. Пионерная дамба, дамбы обвалования и дополнительная пригрузочная призма выполнены из насыпного щебенистого грунта. Среднее заложение низового откоса ограждающей дамбы m = 3.

Горизонт воды в отстойном пруде в течение 10 последних лет колеблется в диапазоне 355,0÷353,0м. На 4 августа 2000 г. отметка горизонта воды отстойного пруда 352,72 м. Объем воды в пруде 2,15 млн м$^3$.

Хвостохранилище является бессточным. Ниже хвостохранилища возведена не фильтрующая дамба с суглинистым ядром и системой замораживающих колонок.

Весь фильтрат, с помощью насосной станции, возвращается в прудок хвостохранилища. Минерализация воды в нем колеблется от 5 г/л (в летний период) до 8 г/л (в зимний период).

В нижнем бьефе хвостохранилища расположена маневровая емкость, которая также эксплуатировалась до 1989 г. Фильтрационные воды из пруда хвостохранилища, поступающие в маневровую емкость возвращаются на фабрику насосной станцией.

В систему оборотного водоснабжения входят следующие сооружения:

- дренажная насосная станция (перекачивает в хвостохранилище воду из маневровой емкости);
- насосная станция оборотной воды первой очереди;
- сифонный водозабор, для оборотного водоснабжения и регулирования воды в пруду отстойнике хвостохранилища;
- водовод оборотной воды.

В состав системы отвода паводковых вод входит руслоотвод ручья Новый на

правому борту хвостохранилища и нагорные канавы - для перехвата и отвода паводковых и поверхностных вод в обход хвостохранилища.

Тело хвостохранилища сложено в основном песками: от крупнозернистых в зоне прилегающей к ограждающей дамбе до пылеватых в переходной зоне. Отложения прудковой зоны, особенно глубоководной части, должны быть сформированы супесями и суглинками. Полноценных инженерно-геологических изысканий по хвостохранилищу не проводилось. Сведения о прудковой зоне отсутствуют. Гранулометрические составы хвостов исходной пульпы, приведенные в табл. 1, имеют большой разброс, и не позволяют дать надежную оценку характеристик намытых почти 15 лет назад грунтов.

Минеральный состав исходного материала (серпентин, карбонаты, доломит, магнетит, флюорит, хлорит, гипс, халькопирит) позволяет предположить некоторое количество мелкодисперсных частиц в составе складируемого материала. Мелкодисперсные частицы – пылеватые и глинистые по крупности и минеральному составу могут осаждаться как в прудковой и переходной зонах, так и в пляжной зоне, формируя отложения пылеватых песков, супесей и суглинков.

Известно, что в результате действия межмолекулярных сил притяжения, мелкодисперсные частицы способны к агрегации. Еще в большей степени это относится к новым образованиям, какими являются мелкораздробленные частицы руды. В результате активного взаимодействия с водой, частицы мелкораздробленных горных пород обладают достаточно большой агрегативной устойчивостью. В виде агрегатов мелкодисперсные частицы осаждаются даже в пляжной зоне. Агрегатный состав исходного материала определяет процесс осаждения частиц, а дисперсионный состав позволяет оценить дисперсность породы и характер структурных связей. И тот и другой состав определяют физико-механические свойства отложений грунтов.

Инженерно-геологические изыскания, проведенные в 1990 году в зоне хвостохранилища, расположенной в верховьях у пульпонасосной I подъема, выявили из намытых отложений только пески среднезернистые и пески пылеватые. Изыскания 1998 года, проведенные по трассе водоводов, в том числе по ограждающей дамбе хвостохранилища, выявили пески крупнозернистые, гравелистые и пылеватые супеси дресвяные.

На основании вышеизложенного, для модели хвостохранилища намывные отложения приняты однородными: состоящими из пылеватых песков и легких супесей.

В геологическом строении района хвостохранилища принимают участие карбонатные породы нижнего ордовика. В кровле они сильно выветрелые, разработанные до дресвы и щебня. Коренные породы – мергели, известняки, в незначительной степени песчаники и глины перекрыты чехлом четвертичных отложений, представленных по бортам и пойме аллювиальными и делювиальными глинистыми, преимущественно суглинистыми и щебенистыми грунтами, у русловой части ручья – аллювиальными галечниковыми и гравийными грунтами. Мощность четвертичных образований на бортах от 1 до 5 м, в пойме 3÷6 м и до 10 м. Четвертичные породы, щебенистые суглинки, характеризуются

умеренной льдистостью 5÷20 %. Сильной льдистостью характеризуются сильноразрушенные (до щебня и дресвы) коренные породы (20÷40 %).

Криогенное состояние хвостохранилища в процессе его эксплуатации контролировалось температурными скважинами по ограждающей дамбе хвостохранилища вплоть до 1991 г. В 2000 году возобновлены измерения температуры в отдельных скважинах.

Анализ имеющихся материалов показал, что как до 1991 г., так и в настоящее время значительный сектор хвостохранилища, протяженностью по дамбе около 1км в районе старого русла ручья Новый, практически весь, исключая насыпной щебенистый грунт, находится в талом состоянии. Основная часть отепляется подрусловым потоком и фильтрационным потоком из отстойного пруда хвостохранилища. Ввиду достаточного короткого пляжа, кривая депрессии располагается высоко и не дает промерзнуть намытым песчаным отложениям. Здесь талик достигает мощности 45 м.

Базируясь на данных инженерно-геологические изысканий, можно выделить три основные разновидности грунтов, из которых сложено тело хвостохранилища и его основание.

**Основание сооружения** – дресвяный грунт с суглинистым заполнителем до 40 %.

**Пионерная дамба и дамбы обвалования** – насыпной щебенистый грунт (известняки) с супесчано-суглинистым заполнителем 13÷29 %.

**Намывные отложения хвостохранилища** – пылеватые пески и супеси.

В табл. 1 и 2 приведены гранулярный состав намывных отложений и физико-механические характеристики указанных разновидностей грунтов.

В имеющихся материалах инженерно-геологических изысканий данные по фильтрационным характеристикам отсутствуют. Фактически коэффициент фильтрации грунтов основания хвостохранилища может меняться в широком диапазоне, в зависимости от местоположения участков основания: от аллювиальных в русле ручья до делювиальных на склонах, а также от содержания в крупнообломочных грунтах супесчаного или суглинистого заполнителя. В зависимости от свойств намытых хвостов, такое основание может быть как водоупором так и дренажем. Коэффициенты фильтрации намывных песчаных и супесчаных грунтов могут также меняться в достаточно широком диапазоне: от (1–10) м/сут - для мелкозернистых песков рыхлого сложения ($e$ = 0,9÷1,0) до 0.1 м/сут - для пылеватых песков плотного сложения ($e$ = 0,5÷0,6). Супеси имеют $K_ф$ от 0.5 м/сут до 0.01 м/сут (при изменении $e$ от 1,5÷1,0 до 0,5÷0,4).

Грунты хвостохранилища, согласно данным изысканий относятся к незасоленным грунтам: приводятся значения Z = 0,02÷0,03 %. Однако, проведенные нами исследования в 1999-2002 гг. показали, что минерализация воды в отстойном пруде хвостохранилища на руч. Новый – 6 г/л, а в пруде хвостохранилища на руч.Новый Киенг – 15,8 г/л. Тогда, при пересчете на засоленность, при средней пористости n = 0,5 и $\rho_d$ = 1,5 г/см$^2$, для хвостохранилища на руч. Новый: Z = 0,2 %, а для хвостохранилища на руч. Правый Киенг засоленность составляет 0,5 %.

В соответствии со СНиП 2.02.04-88 "Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах" к вечномерзлым грунтам относятся все виды грунтов, имеющие отрицательную температуру и содержащие в своем составе лед, находящиеся в мерзлом состоянии в течение

многих лет (от трех и более). Среди вечномерзлых грунтов выделяют сильнольдистые, засоленные и с примесью растительных остатков (заторфованные).

К сильнольдистым относятся грунты, льдистость которых за счет включений льда более 0,4.

К засоленным вечномерзлым грунтам относятся грунты, содержащие легкорастворимые соли в количестве, превышающем следующие проценты: пески – 0,1 %, супеси – 0,15 %, суглинки – 0,2 %, глины – 0,25 %.

Вечномерзлые грунты по степени цементации их льдом и по реологическим свойствам подразделяются на твердомерзлые, пластично-мерзлые и сыпучемерзлые.

К твердомерзлым грунтам относятся прочно сцементированные льдом и практически несжимаемые под нагрузкой (коэффициент уплотнения $a<0,001$ $см^2/кг$). К твердомерзлым относят обычно грунты, если их температура ниже значения, характеризующего переход из пластичного в твердомерзлое состояние и равного $t^т$:

для песков крупных и средних – минус 0,1 ºС, для песков мелких и пылеватых – минус0,3 ºС, для супесей – минус 0,6 ºС, для суглинков – минус 1,0 ºС, для глин – минус 1,5 ºС.

К пластичномерзлым относят грунты сцементированные льдом, но обладающие коэффициентом сжимаемости большим, чем $a = 0,001$ $см^2/кг$. К пластичномерзлым грунтам относят песчаные и глинистые грунты со степенью заполнения пор льдом и незамерзшей водой $G > 0,8$ , если их температура находится в пределах от температуры начала замерзания до температуры $t^т$. При этом следует учитывать, что засоление грунта увеличивает содержание незамерзшей воды и его большую пластичность.

Интересные опыты приведены в монографии А.Б. Лолаева с суглинками Норильского района. Образцы одинаковой плотности, но с различной засоленностью (от 0 до 15 %), замороженные до температуры -10 ºС разрушались при этой же температуре. По данным анализа результатов испытаний можно построить кривую зависимости модуля деформации от засоленности грунта.

Разрушение образцов принималось при относительной деформации $\varepsilon_z = =$ 0,15. Значения модуля приведены ниже:

| Z, % | 0,0 | 2,5 | 5,0 | 15,0 |
|---|---|---|---|---|
| E, МПа | 86,7 | 22,0 | 10,0 | 2,67 |

Таким образом, даже при температуре -10 ºС, коэффициент уплотнения при засоленности $Z = 0,2$ % будет больше $a = 0,001$ $см^2/кг$, т.е. грунт будет находиться в пластичномерзлом состоянии.

В соответствии со СНиП 2.02.04-88, количество незамерзшей воды в мерзлых грунтах (влажность) для всех грунтов, включая и засоленные, определяется по формуле:

$$W_н = k_w \cdot W_p + 0,9(k_{пр}/k_p) \cdot W_г,$$

где $W_p$ - влажность грунта на границе раскатывания, в долях единицы; $k_w$ – коэффициент, зависящий от числа пластичности и температуры грунта; $k_{пр}$ – концентрация порового раствора, в зависимости от засоленности и влажности грунта; $k_p$ - равновесная концентрация порового раствора в засоленном грунте; $W_г$ - влажность грунта.

Принимая засоленность $Z = 0,2$ % для хвостов и супесей основания с соответствующей влажностью грунта $W_г = 0,24$ (хвосты) и $W_г = 0,33$ (основание), влажностью на границе раскатывания $W_p = 0,18$, получим зависимость содержания незамерзшей воды от температуры грунта. В этом случае для супесей (хвостов) при температуре грунта - 2,8

ºС, практически вся вода, за исключением воды ледяных включений, будет находится в не замерзшем состоянии. Для супесей основания вся вода, до температуры - 2,1 ºС , также будет находиться в не замерзшем состоянии.

Таким образом следует ожидать, что до температуры минус 2÷3 ºС супеси хвостохранилища и его основания будут находиться в пластично-мерзлом состоянии.

**3. Инженерные решения по переформированию хвостохранилища Удачнинского ГОКа**

Переформирование отработанного хвостохранилища овражно-балоч-ного типа, сооруженного на ручье Но-вом, осуществляется с целью его дальнейшего использования. При этом инженерные решения по переформированию хвостохранилища, преследующие задачу увеличения сроков его эксплуатации, базируются на трех основных принципах: **технической простоте исполнения, высокой экономической эффективности** и экологической безопасности. В частности, предлагаемые инженерные решения обеспечивают: 1) увеличение сроков эксплуатации хвостохранилища на руч. Новом до 10 лет; 2) экономию водно-земельных ресурсов за счет исключения нарушения земель при строительстве новых хвостохранилищ и 3) экономию энергоресурсов, благодаря сокращению дальности гидротранспорта по сравнению с существующей схемой примерно в 2 раза.

Суть предлагаемых инженерных решений заключается в следующем.

Дополнительно в состав существующих на хвостохранилище ГТС включаются 2 перекачивающие станции, к которым пульпа подается через специальные сгустители и 2 земснаряда 500-60М. При этом перекачивающие станции используются для дополнительной транспортировки пульпы с фабрики № 12 с укладкой крупнозернистых хвостов в штабеля 1 и 2 землесосной установкой типа ГРУТ-2650-75, а земснаряды - для переукладки мелкозернистых хвостов в отвалы на бортах хвостохранилища (см. рисунок).

Намыв первой очереди штабеля № 1 в верховьях хвостохранилища объемом до 12 млн м$^3$ (до отм. 365 м) ведется по односторонней схеме. Вторая очередь штабеля до отм. 375 м намывается по двухсторонней схеме (с двухсторонним обвалованием). В том и другом случае намыв осуществляется круглогодично. К перекачивющей станции хвосты от фабрики № 12 подаются от пульпонасосной станции 1-го подъема

Первая очередь штабеля № 2 объемом 15 млн м$^3$ намывается в пределах существующей резервной емкости (старое хвостохранилище 11-ой фабрики) по пионерно-торцевой схеме со свободным растеканием пульпы. Вторая очередь до отм. 355 м намывается по односторонней схеме. К перекачивающей станции хвосты от фабрики №12 подаются самотечным гидротранспортом.

Фракционирование хвостов достигается с помощью специальных сгустителей, устанавливаемых перед землесосной станцией. В целях максимального упрощения технологии выбран горизонтальный сгустительный аппарат гравитационного типа, состоящий из трубы диаметром 900 мм, которая через переходник соединяется с трубами диаметром 800 мм (верхняя) и 500 мм (нижняя). Крупнозернистые хвосты, концентрируясь в нижней части магистральной трубы, будут попадать в нижнюю трубу (Д = 500 мм), а зачем землесосом подаются в штабель. Остальная масса воды и мелкие фракции хвостов через трубу диаметром 800 мм сбрасываются в хвостохранилище.

Отвал № 1 предполагается расположить на правом борту хвостохранилища. Пионерная дамба намывается из среднезернистых хвостов до отм. 358 м с помощью земснаряда 500\60М, оборудованном класификаторами по пионерно-торцевой схеме. На пионерной дамбе бульдозерами формируется первичное обвалование и потом по односторонней схеме первая очередь отвала объемом 9 млн м$^3$ намывается до отм. 370 м. Вторая очередь (объем 11 млн м$^3$) намывается по двухсторонней схеме до отм. 385 м.

Отвал № 2 предполагается расположить на левом борту хвостохранилища. Пионерная дамба намывается из среднезернистых хвостов до отм. 375 м с помощью земснаряда 500\60М по пионерно-торцевой схеме двухсторонним способом. Вторая очередь намывается до отм. 385 м. Объем отвала 19 млн м$^3$.

Таким образом при переформировании хвостохранилища в нем можно будет дополнительно уложить 71-85 млн м$^3$, а с учетом рекультивационно-планировочных работ - до 100 млн м$^3$. При этом штабеля крупнозернистых хвостов являются по своей сущности техногенным месторождениями, прошедшими первичную отсортировку и готовыми к отработке. Заметим, что использование реконструируемого хвостохранилища под укладку отходов фабрики № 12 может быть начато с момента начала работы земснарядов.

Складирование хвостов по фракциям в штабелях и отвалах не требует дополнительных затрат на сооружение водоотводных капав, так как гравитационная жидкость будет самопроизвольно стекать в существующий руслоотвод и чашу хвостохранилища. Сезонный намыв хвостов в отвалы с последующим их самопроизвольным обезвоживанием в зимнее время будет сопровождаться промораживанием, что предотвратит возможное пыление отвалов. Более того, промерзание поровой жидкости в отвалах будет способствовать безвозвратному извлечению части избыточных вод и снижению уровня воды в хвостохранилище. В этом же направлении (снижение уровни воды в хвостохранилище) работает и решение об использовании земснарядной техники: процесс углубления и выемки хвостов будет сопровождаться снижением уровня воды в прудке, что создаст условия для глубокого промораживания плотины хвостохранилища. А это автоматически будет вызывать снижение фильтрационных утечек из хвостохранилища и тем самым уменьшать отрицательное влияние утечек соленых вод на окружающую среду.

Оставшиеся избыточные воды, накапливаемые в зоне перехвата предлагается закачивать в массив мерзлых пород в 1 км от хвостохранилища. Проведенные исследования по захоронению стоков в ММП показали, что за сезон может быть захоронено до 1.5-2 млн м$^3$ через 10-15 скважин, глубиной до 100 м.

Заключение

Выполнены предпроектные проработки по экологически безопасной технологии дальнейшего формирования законсервированного хвостохранилища Удачнинского ГОКа АК «АЛРОСА» на руч. Новый, предусматривающие селективную укладку и частичную вторичную переработку хвостов. Эти проработки обеспечивают экономию водно-земельных ресурсов за счет исключения нарушения земель новым хвостохранилищем и использования подлежащих утилизации стоков в технологическом процессе реконструкции хвостохранилища на руч. Новый, а также существующей на нем системы возврата оборотной воды. Установлены объемы и параметры намывных сооружений, до-

полнительно размещаемых в пределах контуров хвостохранилища. Размещение в этих сооружениях более 100 млн. м$^3$ хвостов (с учетом рекультивационно-планировочных объемов) обеспечивает увеличение срока эксплуатации хвостохранилища на 10-15 лет. Благодаря сокращению дальности гидротранспорта, достигается экономия энергоресурсов (примерно в 2 раза) по сравнению с существующей схемой.


***Коротко об авторах***

*Атрощенко Ф.Г.* – Санкт-Петербургское отделение ИГЭ РАН,
*Горбатов Ю.П.* – ФГУП трест «Энергогидромеханизация».



**© С.Н. Жилин, 2006**



УДК 622.693



***С.Н. Жилин***


# *ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОСЛЕДУЮЩЕГО МНОГОЦЕЛЕВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАМЫВНЫХ ТЕРРИТОРИЙ В РЕГИОНЕ КМА*

**Семинар № 1**

Количество горнопромышленных отходов, накопленных в России, по экспертным оценкам составляет более 30 млрд т. Выход отходов в РФ в виде вскрышных и вмещающих пород, отходов обогащения полезных ископаемых, шлаков металлургического производства в последние годы превышает 4,0 млрд т в год.

ГОКи черной металлургии России в настоящее время эксплуатируют свыше 35 крупных хвостохранилищ, в которые уложено более 2,5 млрд м$^3$ хвостов. В гидроотвалы горных предприятий намыто свыше 1,5 млрд м$^3$ вскрышных пород.

Площадь намывных массивов КМА свыше 5000 га. Разработка и внедрение безопасных и эффективных технологий формирования намывных сооружений Лебединского ГОКа и повышение их вместимости представляет важную научно-практическую задачу. Она решается, прежде всего, с помощью специальных способов формирования намывных массивов, управления устойчивостью

дамб при наращивании, за счет усиления откосных сооружений в сочетании с проведением дренажных мероприятий, максимального использования особенностей рельефа овражно-балочной сети.

При этом в качестве основных направлений инженерно-геологического и гидрогеомеханического обеспечения возведения и последующего использования намывных горнотехнических сооружений рассматриваются [1]:

- инженерно-геологическая схематизация, выбор методов исследования вещественного состава, прочностных и деформационных характеристик техногенных отложений, изменяющихся во времени и в пространстве;
- разработка расчетных схем уплотнения намывных массивов, учитывающих инженерно-геологические свойства техногенных отложений и грунтов оснований, этапы формирования гидросооружений и направления дальнейшего использования их территорий;
- совершенствование технических средств и методов определения механических свойств техногенных отложений в массиве;
- инженерно-геологическое районирование, предусматривающее выделение в намывном массиве однородных по гранулярному и минеральному составам участков и оценку их уплотняемости и несущей способности;
- изыскание новых способов ускорения процесса консолидации тонкодисперсных намывных отложений;
- определение рациональной конструкции дамб гидросооружений;
- установление рациональной формы техногенного рельефа намывных территорий с учетом остаточных осадок;
- контроль состояния возводимых объектов, включающий стационарные и мобильные устройства, наземную и аэрофотограмметрическую съемку для систематической оценки устойчивости дамб, степени уплотнения и несущей способности внутренних зон намывных сооружений.

Формирование намывных массивов гидроотвалов и хвостохранилищ следует осуществлять с учетом возможных направлений их последующего использования:

- консервации;
- разработки как техногенных месторождений стройматериалов (песка, цементного сырья и др.) или - на перспективу – рудно-минерального сырья;
- дальнейшего наращивания как гидротехнических сооружений;
- строительства различных малоэтажных зданий, не содержащих оборудование, вызывающего дина-мические нагрузки;
- лесо- и сельскохозяйственная рекультивации;
- создания рекреационных зон;
- отсыпки «сухих» отвалов рыхлой и скальной вскрыши.

На Лебединском ГОКе решаются следующие задачи освоения намывных территорий:

1) Продолжается формирование сухого отвала рыхлой вскрыши на территории гидроотвала № 1, эксплуатация которого была прекращена после аварии в 1963 г.;

2) С 1999 г. по заданию ЛГОКа кафедрой геологии МГГУ выполняются работы по комплексным геологическим исследованиям намывных массивов на различных стадиях их формирования (включая гидрогеомеханический мониторинг и геолого-геохимическое изучение техногенных намывных отложений);

3) Развитие объединенного гидроотвально-хвостового хозяйства для экономии водноземельных ресурсов;

4) Обоснование мероприятий по повышению вместимости заполненных к 1988 г. гидроотвалов «Березовый Лог» и «Балка Чуфичева».

По заданию Лебединского ГОКа в МГГУ проводятся инженерно-геологические исследования намывного массива заполненного к 1988 г. гидроотвала «Балка Чуфичева». Установлена принципиальная возможность наращивания этого сооружения примерно на 30 м и размещения дополнительного объема гидровскрыши (преимущественно меловых пород) в объемеоколо 60 млн. $м^3$ с использованием для возведения ограждающих дамб скальной вскрыши.

В связи с дефицитом на КМА земельных площадей для размещения отвалов вскрышных пород и отходов рудообогащения (при стоимости изъятия из сельскохозяйственного оборота 1 га в Центральном Черноземье – около 1.8 млн руб.) необходимо широкое внедрение разработанной МГГУ технологии формирования намывных горнотехнических сооружений. Эта технология внедрена на гидроотвале «Березовый Лог» и хвостохранилище Лебединского ГОКа. Она предусматривает создание с применением существующей гидромехани-зированной технологии в намывных слабоводопроницаемых массивах системы дренажных элементов (призм, линз и подушек), ускоряющих уплотнение и отжатие воды из намывного массива. Применение данной технологии обеспечивает увеличение вместимости сооружений на 10-15 %, ускорение водооборота и сокращение сроков ввода территории заполненных гидроотвалов для последующего использования на десятки лет (например, для гидроотвала «Березовый Лог» стала возможна его поэтапная рекультивация, начиная с первого года после завершения его намыва). При наращивании гидроотвалов «Балка Чуфичева» и «Балка Суры» («Безымянная») до отм. 230 м следует создавать в намывном массиве дренажные элементы из песка или крупных фракций отходов рудообогащения.

Для подготовки документов о консервации гидроотвала «Березовый Лог» как ответственного гидротехнического сооружения выполнены следующие основные работы: оценка устойчивости дамб гидроотвала; определение осадок намывного массива; зондирование прудковой зоны комбинированными зондами МГГУ-ДИГЭС для определения сопротивления намывных отложений сдвигу и пенетрации, а также величины порового давления в намывном массиве.

Деформации (осадки) намывного массива мощностью до 75 м определялись с помощью инструментальных наблюдений по продольному и поперечным профилям. Установлено, что за период 1988-2005 гг. осадки стабилизировались практически на всей территории гидроотвала. Данные зондирования позволили установить несущую способность намывного массива и уточнить характеристики сжимаемости техногенных отложений. Комплекс маркшейдерских и инженерно-геологических работ обеспечил получение необходимой информации для составления проекта консервации гидроотвала и его рекультивации. В третьей секции гидроотвала, где намывной массив сложен наиболее тонкодисперсным материалом ($d<0.005$ мм), осадки техногенной толщи общей мощностью ($h_я$) до 30 м (7-10 м – пористый штамп из хвостов обогащения, 20-23 м – глинисто-меловые намывные грунты) за этот период составили около 2,5 м.

Зондирование намывного массива 3-й секции гидроотвала «Березовый Лог» показало, что на 2005 г. избыточное поровое

давление в глинисто-меловых техногенных отложениях близко к нулю, а степень уплотнения слоя тонкодисперсных отложений – к единице.

В настоящее время рассматривается вопрос о размещении в 3-й секции гидроотвала «Березовый Лог» площадью около 200 га отвала скальной вскрыши в объеме около 50 млн. м$^3$. Работы по обоснованию этого мероприятия выполняются кафедрой геологии МГГУ в составе проекта консервации гидроотвала.

По заданию Лебединского ГОКа в МГГУ выполняется с 2000 г. комплексная НИР по гидрогеомеханическому мониторингу намывных сооружений ЛГОКа, включающая оперативную оценку устойчивости ограждающих дамб с помощью системы стационарных датчиков порового давления, инструментальные измерения деформаций намывных массивов, комплексное зондирование внутренних зон и оценку их несущей способности, лабораторные исследования намывных грунтов.

Эффективный контроль за состоянием откосных сооружений осуществляется путем комплексного зондирования приоткосных зон и использованием стационарных датчиков-пьезодинамометров, заложенных по расчетным профилям в теле и основании дамбы на различных этапах формирования намывного массива.

Подобные системы контроля функционируют на Лебединском ГОКе (гидроотвалы № 1 и «Балка Суры», головная дамба хвостохранилища) и на хвостохранилище Михайловского ГОКа.

На кафедре геологии МГГУ разработана программа оперативного определения коэффициента запаса устойчивости $\eta$ в зависимости от измеренного пьезодинамометрами давления воды по вероятным поверхностям скольжения. Программа позволяет после ввода даты измерений и выбора файла с данными о геометрии и материале дамб и градуировочными характеристиками датчиков производить расчет положения депрессионной кривой и автоматически выбирать линию скольжения с наименьшим коэффициентом запаса устойчивости. Расчет устойчивости дамб производится методом алгебраического суммирования и многоугольника сил. Определение текущего коэффициента запаса устойчивости производится в зависимости от площади эпюры давления воды, определяемой путем снятия замеров величин $P_w$ или $h_w$ (высота столба воды) по вероятной поверхности скольжения.

В настоящее время кафедрой геологии МГГУ совместно со специалистами ЛГОКа проводятся работы по автоматизации дистанционных замеров порового давления с накоплением информации и передачей ее на большие расстояния.

Материалы инженерно-геологического районирования позволяют установить режим рекультивационных и отвальных работ при создании новых форм техногенного ландшафта на намывных территориях.

Комплекс показателей, полученных при полевых и лабораторных исследованиях техногенных отложений, позволяет выполнить инженерно-геологичес-кое районирование намывных территорий. Материалы районирования, наряду с инженерно-геологическими картами и разрезами, включают также для различных по мощности и составу зон намывного массива таблицы значений во времени осадок и допустимых внешних нагрузок на намывное основание. Инженерно-геологи-ческое районирование выполняется с целью решения следующих основных практических задач: повышения вместимости сооружения при гидравлической укладке складируемых материалов; формирования на территории заполненного

гидроотвала «сухих» отвалов; рекультивации намывных территорий.

Создание объединенных гидроотвально-хвостовых хозяйств рассматривается как важное направление снижения техногенной нагрузки на окружающую среду, так как становится возможным комплексное решение вопросов гидрозащиты территорий, рекультивации, формирования ограждающих дамб для наращивания гидросооружений с использованием скальной вскрыши, размещения сухих отвалов на намывных основаниях. Формирование в объединенных контурах гидроотвалов и хвостохранилища Лебединского ГОКа обеспечило сохранение около 2000 га плодородных земель от затопления водохранилищем и увеличение общей вместимости гидросооружений до 750 млн м$^3$ (вместо 300 млн м$^3$), а также поэтапную рекультивацию отдельных секций при внедрении мероприятий по гидрозащите прилегающего заповедника и пылеподавлению [2].

Ускорение сроков рекультивационных работ также влечет за собой позитивные эколого-экономические последствия, так как сокращается пылевыделение и восстановленные территории начинают давать сельско-хозяйственную продукцию. При этом сокращение сроков рекультивации крупных гидроотвалов и хвостохранилищ, благодаря применению спецтехнологии, достигает 30 и более лет.

Выполнение эколого-геохимичес-ких исследований хвостохранилищ позволяет получать исходную информацию для оценки их как техногенных месторождений рудно-минераль-ного сырья, определения порядка разработки этих месторождений и эффективности мероприятий по рекультивации намывных массивов. Для отходов рудообогащения на рекультивированном участке хвостохранилища Лебединского ГОКа установлена их экологическая безопасность при эффективной работе суглинисто-меловых экранов.

***СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ***

1. *Гальперин А.М., Зайцев В.С., Кириченко Ю.В.* Инженерно-геологическое и геотехническое обеспечение возведения, консервации и рекультивации гидроотвалов и хвостохранилищ (анализ 30-летнего опыта)// Геоэкология. 2000. № 4. С. 307-315.

2. *Гальперин А.М., Тищенко Т.В., Жилин С.Н.* Технологии экологически безопасного освоения намывных техногенных массивов на горных предприятиях)// Геоэкология. 2005. № 2. С. 99-110.

***Коротко об авторах***

*Жилин С.Н.* – ОАО «Лебединский ГОК».

**© З. Агиотантис, Е. Стиакакис, И. Калогиру, С. Коркотис, 2006**

УДК 622.271

***З. Агиотантис, Е. Стиакакис, И. Калогиру,***

*С. Коркотис*

# *ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ДЕФОРМАЦИИ БОРТА ГЛУБОКОГО БУРОУГОЛЬНОГО КАРЬЕРА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ*



Введение

Западномакедонский буроугольный центр (ЗМБУЦ), управляемый Греческим Общественным Энергосоюзом, расположен в северной части Греции, приблизительно 110 км к западу от города Салоники. Разрабатываемые залежи бурого угля занимают территорию 120 км$^2$, включают 4000 мегатонны разведанных геологических запасов и 2700 мегатонны бурого угля, добываемого с учетом принятых экономических и технологических критериев. Расположение всех бассейнов бурого угля и энергостанций на территории ЗМБУЦ показано на схематической диаграмме на рис. 1.

В последние годы производство бурого угля на территории ЗМБУЦ составило более 65 % от общего производства энергии в Греции. Установлено, что бурый уголь из бассейна Птолемаис-Амидеон будет сожжен для производства электроэнергии в течение 50 лет. Средние характеристики добываемого бурого угля в Западной Македонии сведены в табл. 1. Эти свойства говорят о том, что залежи бурого угля в Греции одни из самых низкокачественных в мире углей, используемых для производства энергии, где приблизительно 2 кг бурого угля дает 1 киловатт в час энергии.

Поточная технология добычи (которая также называется Германский метод), использующий роторные экскаваторы, конвейеры и отвалообразователи является главным методом добычи угля, примняемый на всех карьерах в Западной Македонии. Сочетая высокую скорость добычи угля роторными экскаваторами (когда работают с мягким материалом) и непрерывный поток материала через систему конвейеров, а также механические укладчики для отвалов, можно достичь высокой интенсивности производства. В табл. 2 представлено основное оборудование, используемое в горных работах в Западной Македонии.

Геологические формации в бассейне Птолемаис-Амидеон характеризуются удовлетворительной прочностью и позволяют создавать высокий угол откосов на карьере, тем самым способствуя экономичной эксплуатации месторождения. Очевидно, что тектоника играет решающую роль в развитии горных работ. Однако, тектоника определяет местные особенности, которые следует особенно

Таблица 1

***Характеристики бурого угля***

| Свойства | Птолемаис-Амидеон бассейн |
|---|---|
| Содержание влаги (%) | 54-60 |
| Зольность (% на месте добычи бурого угля) | 12-18 |
| Зольность (% сухого бурого угля) | 28-32 |
| Теплотворная способность (kcal/kg) | 1250-1450 |

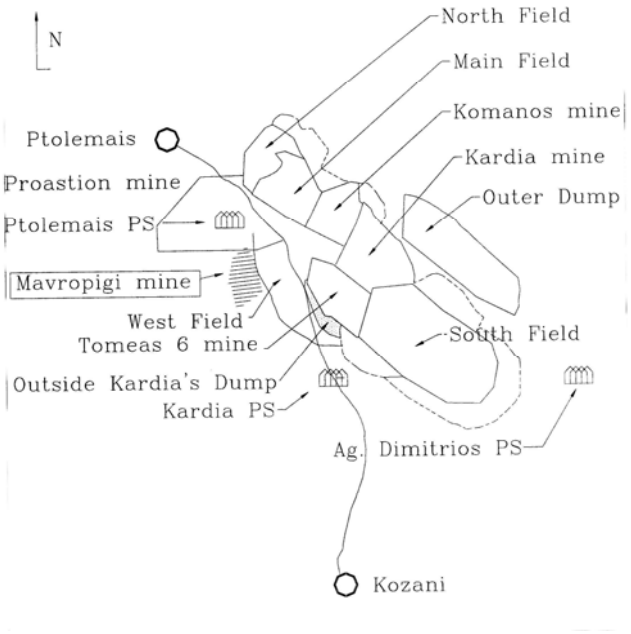



***Рис. 1. Карта территории Буроугольного центра в Западной Македонии, показывающая расположение бассейнов бурого угля, внешние отвалы и энергостанции***

тщательно изучать при планировании или эксплуатации карьеров.

*Место исследования*

В настоящее время Греческий Общественный Энергосоюз планирует карьер «Мавропиги». Карьер будет создан к северо-западу от Западного карьера (рис. 1). Топография этого региона ровная, средняя высотная отметка местности 650 м. над уровнем моря и нижняя предельная граница карьера (техническая высота) спроектирована приблизительно у отметки 540 м. над уровнем моря. Территория карьера составит порядка 2 км$^2$ (в продольном направлении 2 км и в поперечном направлении 1,7 км). По сравнению с другими карьерами на этой территории «Мавропиги» более узкий и глубокий.

*Геология*

Буроугольный бассейн Птолемаис – часть континентальной вытянутой рифтовой долины третичного периода на Западно-Македонском плато. Осадочные отложения бассейна, мощ-ность которых в некоторых местах может превышать 900 м., включают Неогеновые отложения (мергель, глины, песчаник, бурый уголь) и Четвертичные отложения. Недавние и более поздние Четвертичные отложения, средняя мощность которых несколько десятков метров, покрывают почти полностью более старые образования в нижней части долины. Верхние слои нижележащих Неогеновых отложений, о которых пойдет речь в данной работе, включают три литофазы (серии):

а) верхняя серия (максимальная толщина 100 м) с глинисто-мергеле-выми обломочными отложениями;

в) продуктивные серии, содержащие бурый уголь (средняя мощность 135 м) с нижним (80 м) и верхним (40 м) многопластовым буроугольным рядом и промежуточной пачкой пустой породы (15 м);

с) нижние серии, где самые верхние 40 м состоят из суглинистого мергеля, местами песчаного с линзообразными прослойками известняка с мергелем.

Эти образования являются частью местного грабена, протянувшегося с северо-запада на юго-восток и перехваченного поперечными сдвигами, которые делят карьерное поле на отдельные тектонические блоки. Средний уклон Неогеновых формаций в этом районе субгоризонтальный.

Таблица 2

***Основное оборудование в ЗМБУЦ***

| Тип оборудования | Количество | Производительность |
|---|---|---|
| Большой роторный экскаватор | 34 | 1600-10000 $m^3$/час * |
| Малый роторный экскаватор | 11 | 900-1300 $m^3$/час * |
| Отвалообразователи | 16 | 800-11000 $m^3$/час * |
| Ленточный конвейер | 220 km | 1200-2400 mm |

В регионе «рудник Мавропиги» геологическая колонка имеет следующий вид:

- аллювий (песок и/или глина), мощность 45 м;
- серии, содержащие бурый уголь общей мощностью 200 м. (слой 2);
- глинистые отложения мощностью 32 м (слой 3);
- нижележащий мергель (от 540 м над уровнем моря и ниже) – (слой 4).

В 1 речны 6 раницах карьера также представлен известняк и сланец. Слои 1-2 включают вскрышу, удаляемую во время горных работ.

*Моделирование развития горных работ*

Моделирование выемки осуществлялось на образце геологического профиля, расположенного вкрест продольной оси карьера в том месте, которое теоретически не подвержено влиянию подвижности поперечных блоков и т.о. делает возможным упрощение метода конечных элементов. Кинетический режим экскавации был исследован с применением Plaxis software (версия 7.2) и модели Мора-Кулона (Plaxis, 1988).

Предположили, что карьер окружен изотропными упруго-пластичны-ми отложениями и что фронт горных работ имеет значительную протяженность (требования анализа конечных элементов). В поперечном сечении модель (рис. 2) в 10 раз превосходит конечную глубину выемки, а общая высота модели была примерно в 10 раз больше реальной глубины карьера. Такая геометрическая модель гарантировала, что граничные условия не повлияют решающим образом на давление и деформации вокруг места выемки.

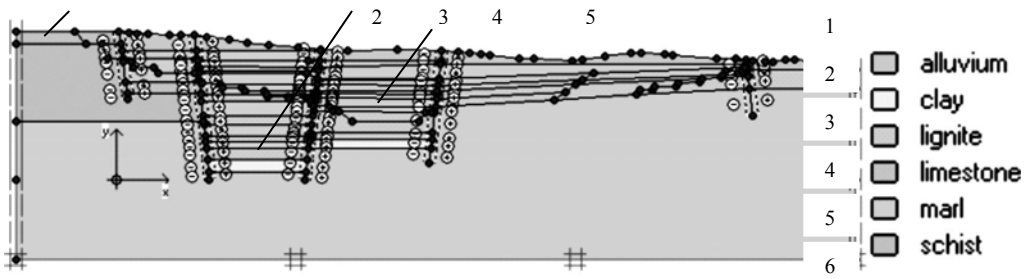



***Рис. 2. Модельные измерения и приграничные условия***

Таблица 3

***Геотехнические параметры, которые были использованы для опытной проверки разработки карьера***

| Геотехнические параметры | Аллювий | Мергель | Бурый уголь | Глина | Известняк | Сланец |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Плотность сухого вещества γсух (kH/m$^3$) | 17 | 12 | 12 | 18 | 25 | 25 |
| Вес насыщенного вещества γвлаж (kH/m$^3$) | 19.5 | 15 | 15 | 20 | 30 | 26 |
| Коэффициент Пуассона ν | 0.3 | 0.3 | 0.18 | 0.25 | 0.25 | 0.15 |
| Модуль деформации Eref (kH/m$^2$) | 60,000 | 150,000 | 50,000 | 70,000 | 40,000,000 | 35,000,000 |
| Сцепление cref (кг/cm$^2$) | 1,2 | 2,5 | 2,0 | 1,1 | 50 | 35 |
| Угол трения φ (о) | 22 | 30 | 35 | 23 | 35 | 33 |

Геометрическая модель (рис. 2) включала границы геологических образований и стадии разработки карьера в соответствии с предварительным изучением, в то время как разломы были смоделированы как вклинивающиеся элементы. После установления геометрии, были применены граничные условия. Вертикальные границы были зафиксированы в горизонтальном направлении, в то время как нижняя граница была зафиксирована в обоих направлениях.

Геотехнические параметры для каждой геологической формации, используемые при моделировании, приведены в табл. 3.

Данные этих параметров основаны на литературных источниках и предшествующих исследовательских работах по этой теме (Ауф 1998; Кавадас и др., 1993, 1994; Стиакакис, 2002). В частности, оценки геотехнических параметров в нарушенных зонах были в пределах 70 % от параметров прилегающих слоев в ненарушенных зонах, которые делятся на части разломами.

Следуя исходным данным параметров, с использованием трехгранных элементов была создана итоговая элементарная решетка (рис. 3). Эта решетка была усовершенствована в тех участках, где ожидалась значительная концентрация напряжений и большие деформации (например, сдвиги и проникновение одного слоя в другой). Полученная в результате этого решетка с 10942 точками пересечения двух линий и 5173 конечными элементами была принята как приемлемая для проведения надежного анализа.

*Определение начальных условий и стадий расчета*

Расчеты производились в 8 стадий. Первая стадия связана с начальной (весовой) загрузкой модели; в то время как остальные стадии относятся к последующей дезактивации скоплений решеток (удаление материала) для того, чтобы смоделировать развитие работ на карьере.

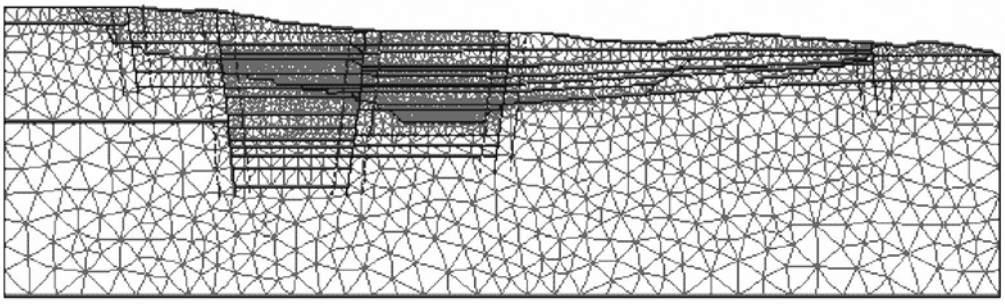


***Рис. 3. Итоговая элементарная решетка карьера***

4o stadio
Horizontal displacements

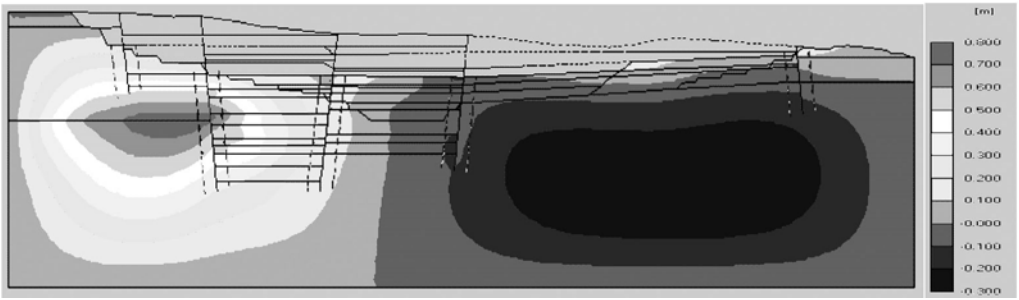



***Рис. 4. Установленное смещение (горизонтальные движения Ux) до конца 4-й стадии экскавации (максимальная величина 0,77м)***

8o stadio

Horizontal displacements

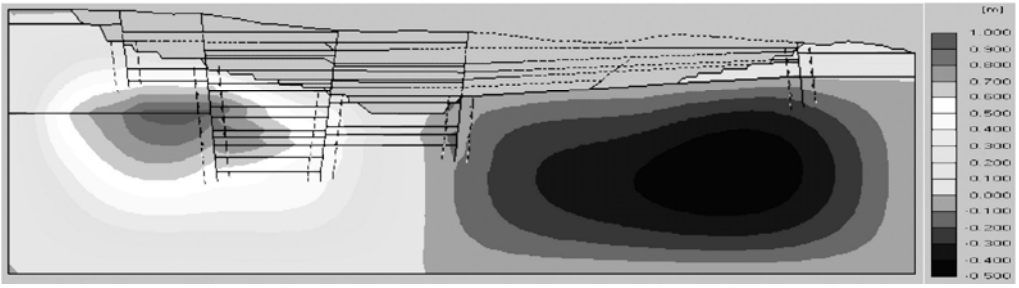



***Рис. 5. Установленное смещение (горизонтальные движения Ux) до конца 8-й стадии экскавации (максимальная величина 0,94м)***

Горизонтальные смещения не сильно увеличиваются до конечной глубины и в основном наблюдаются в верхнем слое подстилающего мергеля (рис. 4, 5). Установленные горизонтальные смещения в конце 8-й стадии варьируются между максимальной положительной величиной 0,94 м на левом борту карьера (в

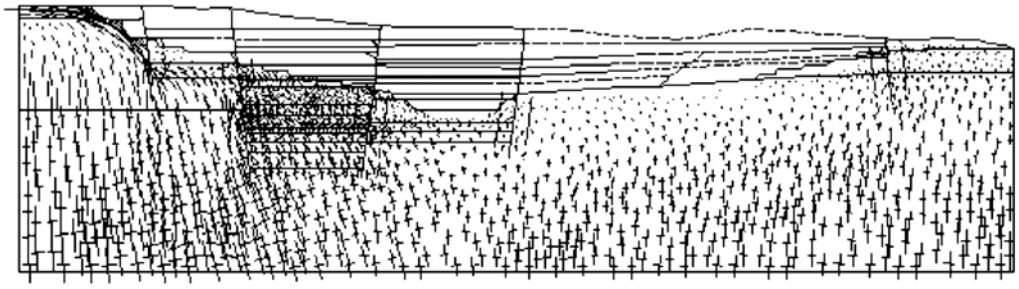


***Рис. 6. Установленное эффективное напряжение до конца 8-й стадии (максимальная величина 19,5x10 KN/m )***

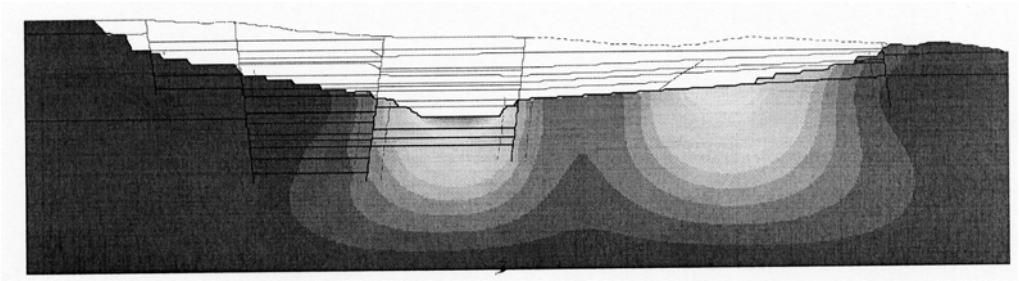


***Рис. 7. Локализация (затемнения) общего смещения, возрастающего к концу 8-й стадии***

формации подстилающего мергеля) и минимальной отрицательной величиной (-0,6 м) на правом борту (рис. 5). Отрицательное значение подразумевает движение по направлению развития выемки.

Поле эффективных напряжений, производимых выемочными работами, показано на рис. 6. Максимальные значения (приблизительно 20000 КРа) были получены на левом борту карьера. Данный рисунок позволяет определить зоны, где ожидаются большие давления и деформации (к 8-й стадии).

В итоге затемнения увеличений общего смещения показывают наиболее вероятную зону обрушения откоса на конечной стадии работ.

Следует заметить, что результаты моделирования и полевые наблюдения во время начальных стадий экскаваторных работ следует использовать для калибровки модели. Эта процедура позволит использовать методологию (и ее параметры) для установления кинетического режима карьера на последующих стадиях горных работ.

*Анализ устойчивости*

Анализ устойчивости был выполнен для всех уровней выемочных работ и был получен коэффициент запаса устойчивости с помощью процедуры анализа конечных элементов. Во время этой процедуры параметры прочности геоматериалов (tanφ и *C*) поэтапно снижаются, при этом фиксируются соответствующие нагрузки на каждом этапе до момента обрушения откоса.

Рис. 8 показывает выполненную компьютером кривую смещения устойчивости для точки в середине вы-

| Стадия экскавации | Фактор устойчивости |
|---|---|

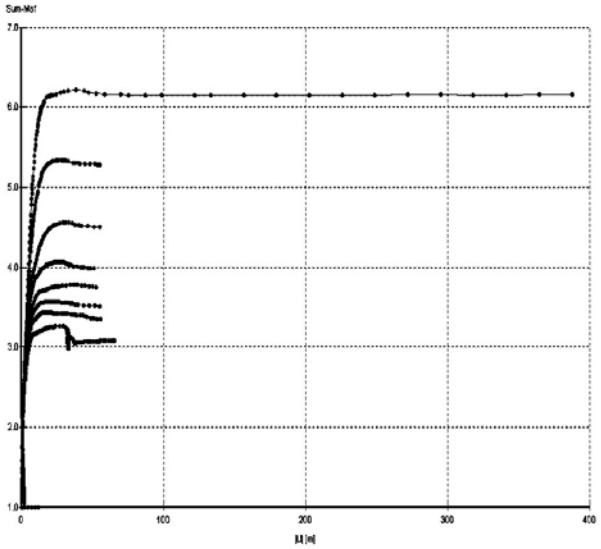



***Рис. 8. Оценка фактора безопасности для восьми стадий процесса экскавации***

| | |
|---|---|
| 1 | 6.16 |
| 2 | 5.28 |
| 3 | 4.50 |
| 4 | 3.98 |
| 5 | 3.75 |
| 6 | 3.51 |
| 7 | 3.35 |
| 8 | 3.08 |

соты склона. ΣMsf представляет коэффициент запаса устойчивости, а U-это смещение определенного узла. Установленный коэффициент запаса устойчивости на 8-м уровне выемки равен 3,08, из чего следует необходимость тщательного проектирования карьера. Угол наклона откосов может быть изменен для достижения более экономичной разработки бурого угля.

*Заключение*

Моделирование процесса выемки дает удовлетворительные результаты, учитывая ожидаемое кинетическое состояние карьера и фактор устойчивости. Основываясь на результатах конца 4-й стадии выемки, максимальное ожидаемое горизонтальное смещение равно 0,8 м, которое увеличивается до 1 м к финальной стадии выемки. Эти смещения сосредоточены в верхних отложениях подстилающего мергеля. Коэффициент запаса получен с помощью метода конечных элементов. Он достаточно высокий (3,08 на последней стадии выемки), так что угол откоса уступов может быть изменен с целью более экономичной разработки бурого угля.

Однако следует отметить, что для лучших результатов необходимы более полные и точные данные, относительно начальных условий и геотех-нических параметров. Более того, от применения модели жесткого клина вместо модели Мора-Кулона, ожидаются более надежные показатели, принимая во внимание деформации дна.

Далее для более надежной проверки выемки предлагается составить точные структурные карты, которые будут уточняться в ходе горных работ. Также следует применить систематическую и комплексную программу буровых работ, дополненную лабораторными исследованиями геотехнических параметров.

Исследования следует продолжать на стадии разработки, включая мониторинг и оценку геодезических наблюдений, инклинометрических отклонений и нарушений, фиксацию уровня подземных вод и деформаций дна карьера для того, чтобы стандартизировать модель в соответствии с реальными условиями. Таким образом будет достигнута более точная

оценка ожидаемых смещений на последующих стадиях выемки.

Благодарности

*Авторы хотели бы поблагодарить Греческий Общественный Энергосоюз за предоставление исходных данных для этого исследования.*

## *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. *Auth* (Aristotle University of Thessaloniki), Department of Civil Engineers, Laboratory of Soil Mechanics and Foundations Engineering (1998). Effect of the Southern Field extension to westwards - at the Kardia Power Station site. Report of Research Project (in Greek).

2. *Kavvadas, M., B. Papadopoulos and N. Kalteziotis,* (1994). Geotechnical properties of the Ptolemais lignite. Geotechnical and Geological Engineering, 12 (2).

3. *Monopolis, D., E. Stiakakis, Z. Agioutantis and C. Kavouridis,* (1999). Geotechnical Investigation at Lignites Mines. Mineral Resources Engineering, Vol 8, No 4, pp. 405-418.

4. *Plaxis,* (1998). Finite Element Code for Soil and Rock Analyses V7, Manual. Edited by R.B.J. Brinkgreve, P.A. Vermeer, A.A. Balkema, Rotterdam.

5. *Stiakakis, E.,* (2002). Behavior of deep excavations. An Investigation of Geotechnical Parameters and the kinetic behavior of a deep excavation in the Ptolemais-Amydeon lignite field. Doctoral Thesis, Technical University of Crete, Department of Mineral Resources Engineering (in Greek).

6. *Agioutantis Z., E. Kalogirou, E. Stiakakis* (2003). Comparison of slope stability factors obtained via Finite Element Methods and Limit Equilibrium Methods. Proceedings of the International Workshop on Prediction and Simulation Methods in Geomechanics. Technical Committee 24 of ISSMGE. Athens 2003.

7. *Stiakakis, E., Z. Agioutantis and D. Monopolis* (2004). An investigation of the kinetic behavior of a deep excavation at an open pit mine using finite elements analysis. Advances in Mineral Resources Management and Environmental Geotechnology, Hania 2004.

## *Коротко об авторах*

*Агиотантис З., Стиакакис Е., Калогиру И., Коркотис С.* – Технический университет Крита, Ханиа, Греция.