

11. Шилин, А.А. Стратегия ремонта железобетонных конструкций подземных сооружений с учетом их состояния и требуемого уровня надежности / А.А. Шилин // Сб. избр. трудов ученых Московского государственного горного университета «Научное обоснование подземного строительства» / Под общ. ред. Б.А. Картозии. – М: издательство Академии горных наук, 2001. – С. 301-344.
12. Кологривко, А.А. Применение способа взрывоуплотнения горных пород в промышленности / А.А. Кологривко // Горная механика. – 2003. – №1. – С.79-81.
13. Кологривко, А.А. Прогнозирование параметров шурфов, проводимых способом взрывоуплотнения и одновременного крепления / А.А. Кологривко // Сб. трудов 8-ой междунар. конф. «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» / Под общ. ред. Р.А. Ковалева. – Тула: ТулГУ, 2012. – С. 113-117.
14. Картозия, Б.А. Горная наука – строительная геотехнология / Б.А. Картозия // Сб. избр. трудов ученых Московского государственного горного университета «Научное обоснование подземного строительства» / Под общ. ред. Б.А. Картозии. – М.: издательство Академии горных наук, 2001. – С. 8-35.
15. Протосеня, А.Г. История кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений Санкт-Петербургского государственного горного университета / А.Г. Протосеня, Ю.Н. Огородников. СПб: СПГТУ, 2012. – 224с.
16. Литвинский, Г.Г. Концепция новой классификации проявлений горного давления / Г.Г. Литвинский // Технология и проектирование подземного строительства: Вестник. – Харьков: РИП «Оригинал», 2000. – С.17-21.
17. Богатов, Б.А. Моделирование и обоснование решений в горном производстве / Б.А. Богатов, Ю.А. Шпургалов. – Минск: ОО БГА, 2002. – 367 с.
18. Шпургалов, Ю.А. Компьютерное моделирование принятия решений в производственных задачах / Ю.А. Шпургалов. – Минск: БНТУ, 2009. – 217 с.
19. Булычев, Н.С. Механика подземных сооружений в примерах и задачах / Н.С. Булычев. – М.: Недра, 1989. – 198 с.
20. Булычев, Н.С. Крепь вертикальных стволов шахт / Н.С. Булычев, Х.И. Абрамсон. – М.: Недра, 1987. – 301 с.

УДК 622.693.2.004.4

ФОРМИРОВАНИЕ СОЛЕОТВАЛА ИЗ ГАЛИТОВЫХ ОТХОДОВ СПОСОБОМ ГИДРОНАМЫВА

**Журавков М.А.¹, Шемет С.Ф.², Кологривко А.А.³,
Круподеров А.В.¹, Коновалов О.Л.¹**

¹Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

²ОАО «Белгорхимпром», г. Минск, Беларусь

³Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

Изложены технические решения по организации хвостового хозяйства калийного производства, основанные на использовании площадей отработанных шламохранилищ в качестве оснований расширяемых солеотвалов с обеспечением безопасности их эксплуатации. Приведены результаты исследований по формированию способом гидронамыва солеотвала из галитовых отходов на слабом основании.

Представлен анализ технического состояния солеплиты во времени и динамика изменения физико-механических свойств техногенных грунтов. Изложены рекомендации по технологии гидронамыва солеотвала на слабом основании для условий третьего рудоуправления ОАО «Беларуськалий».

Эксплуатация Старобинского месторождения калийных солей ведет к существенному изменению геозкологической ситуации в Солигорском промышленном районе. Содержание хлористого калия в добываемых рудах находится в пределах 24-32 %. При обогащении сильвинитовой руды 65-75 % составляют отходы. Твердые отходы на 92-95 % представлены хлористым натрием, жидкие – глинисто-солевыми шламами. На 1 тонну основной продукции приходится 2,3-5,7 тонн отходов.

Геозкологические последствия эксплуатации месторождения представляют масштабный характер, одним из слагающих элементов которых является проблема складирования твердых отходов обогащения в солеотвалы, жидких – в шламохранилища [1, 2]. Традиционный подход к проблеме складирования и изоляции отходов состоит в том, чтобы задержать твердые отходы и рассол на поверхности земли внутри системы ограждающих дамб с минимизацией изъятия земельных ресурсов и хранить отходы калийного производства в пределах специально подготовленной для этого территории. Количество избыточных рассолов напрямую зависит от объема и площади, занимаемой водорастворимыми отходами. В этой связи особую актуальность приобретают вопросы, связанные с разработкой новых способов складирования отходов калийного производства при организации хвостовых хозяйств, позволяющих сократить рост площадей, используемых для размещения этих отходов, что в свою очередь снизит геозкологическую нагрузку в районе работ рудоуправлений (далее – РУ).

Снизить геозкологическую нагрузку можно за счет уменьшения изъятия дополнительных площадей под солеотвалы, используя при этом отработанные шламохранилища в качестве оснований при расширении солеотвалов. Так, в настоящее время ОАО «Белгорхимпром» продолжает разработку и реализацию проекта опытно-промышленного участка (далее – ОПУ) по складированию галитовых отходов на шламохранилище ЗРУ ОАО «Беларуськалий» способом гидронамыва.

Намыв галитовых отходов на поверхность отработанного шламохранилища предусмотрен до образования угла намыва солеплиты (пласт-плиты) 1,5°. Формирование конечного профиля (с точки намыва) осуществляется с дополнительным использованием бульдозерной техники. Реализация проекта начата в 2005 году и осуществляется по настоящее время.

В течение строительства ОПУ периодически велась топографическая съемка территории, осуществлялись инженерно-геологические изыс-

кания с целью изучения инженерно-геологического состояния формируемой солеплиты, гидрогеологических условий и физико-механических свойств грунтов, слагающих ОПУ.

На октябрь 2008 года на поверхности отработанного шламохранилища сформировалась солеплита, которая делилась на два участка: участок солеплиты, состоящий только из галитовых отходов, и участок, состоящий из смеси галитовых и шламовых отходов.

Площадь участка солеплиты из галитовых отходов ~ 120 тыс.м² (до уреза рассолов) при мощности 2,0-9,5 м. Максимальная мощность – у основания солеотвала. Поверхность центральной зоны солеплиты имела сеть промоин (максимальная ширина 2,5 м, глубина 1,0 м). Вызвано это суффозионными процессами, происходившими в период гидронамыва солеплиты и ее растворения атмосферными осадками. В краевых зонах солеплиты наблюдались трещины, вызванные ее оседанием под собственным весом на слабых шламовых грунтах (слабом основании).

По данным инженерно-геологических изысканий в приконтактной зоне солеплиты и шламовых грунтов отработанного шламохранилища присутствовал рассольный горизонт, тонкий слой 0,5 м рыхлых галитов и текучих шламов.

Площадь участка солеплиты из смеси галитовых и шламовых отходов ~ 7000 м² при средней мощности 4,0 м. Вся поверхность солеплиты была изрезана промоинами максимальной глубиной 0,5 м. В растворимых техногенных грунтах были образованы воронки максимальной глубиной 1,0 м.

С целью принятия решений по технологии формирования солеотвала на отработанном шламохранилище предложены пять технологических схем формирования солеотвала.

Так, согласно первой технологической схеме формирование солеотвала ведется путем отсыпки галитовых отходов насухо на подготовленное ложе – солеплиту. Солеплита создается путем гидронамыва галитовых отходов на поверхность отработанного шламохранилища до достижения расчетной мощности и необходимой прочности солеплиты с целью дальнейшего складирования на ней галитовых отходов насухо. Задача расчета – определение несущей способности намывной солеплиты с учетом ее мощности 10 м и прочностных характеристик при отсыпке на нее солеотвала до отметки +245,0 м при помощи ОШ-110.

Вторая технологическая схема аналогична первой с отличительной особенностью – намыв солеплиты осуществляется из смеси галитовых отходов и шлама на существующее основание, намытого галитовыми отходами. Задача расчета аналогична с задачей расчета первой технологической схемы.

Третья технологическая схема предполагает гидронамыв солеотвала галитовыми отходами на существующую солеплиту из галитовых отходов. Схема предусматривает складирование галитовых отходов путем гидронамыва на существующее основание. Задача расчета – определение возможности гидронамыва для достижения максимальной высоты солеотвала.

Четвертая технологическая схема предполагает гидронамыв солеотвала из смеси галитовых и шламовых отходов на существующую солеплиту из галитовых отходов. Схема аналогична третьей с отличительной особенностью – вместо галитовых отходов складировается смесь галитовых и шламовых отходов. Задача расчета аналогична с задачей расчета третьей технологической схемы.

Пятая технологическая схема предполагает отсыпку солеотвала насухо при помощи ОШ-110 на существующую солеплиту из галитовых отходов с расчетом устойчивости ограждающих дамб шламохранилища. Задача расчета – определение устойчивости ограждающих дамб для установления их возможного разрушения от воздействия системы «солеотвал-шламохранилище».

Разработаны и построены несколько геомеханических моделей и соответствующие им численные расчетные схемы, на базе которых выполнены исследования по изучению прочности и устойчивости системы «солеотвал-шламохранилище».

Исследованиями установлено, что формирование солеотвала предпочтительно осуществлять гидронамывом галитовых отходов (смеси галитовых и шламовых отходов) рассредоточенно по всей поверхности солеплиты до проектной отметки формируемого солеотвала. Гидронамыв предполагает процесс намыва галитовых отходов вместе с рассолом. Угол откоса формируемого отвала не должен превышать 45° , а вдоль ограждающих дамб по периметру формируемого отвала должен быть предусмотрен разрыв («окно») между ними и основанием солеплиты величиной 10-15 м. На участках наращивания дамб необходимо усилить их бермами шириной не менее 10 м. При достижении мощности солеплиты 29 м на всей площади шламохранилища, возможна сухая отсыпка.

Исследованиями ОАО «Белгорхимпром», ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси», БНТУ установлено, что одним из способов складирования отходов может быть обезвоживание шламовых отходов и их складирование всухую, отдельно от галитовых отходов, либо совместно с галитовыми отходами. Исследования показали возможность обезвоживания глинисто-солевого шлама с получением продукта влажностью около 30 %. Обезвоженный продукт имеет физико-химические и механические свойства, дающие возможность транспортировать его и складировать совместно с галитовыми отходами [1, 3].

На ноябрь 2012 года на поверхности отработанного шламохранилища сформировалась солеплита, анализ изучения технического состояния которой на ОПУ во времени показал к настоящему времени незначительную динамику изменения физико-механических свойств техногенных грунтов. Вместе с тем, характер пространственной изменчивости показателей физико-механических свойств грунтов в пределах инженерно-геологических элементов не является закономерным. Шламовый грунт перешел из текучего состояния в текучепластичное и мягкопластичное. Смесь галитовых и шламовых грунтов находится в твердом состоянии. Имеет место наличие малопрочных грунтов (шлама), обладающих низкими прочностными и деформационными характеристиками, что вызывает неблагоприятные физико-геологические процессы. При формировании способом гидронамыва солеотвала будут создаваться благоприятные условия для вертикальной миграции атмосферных осадков (дожди, таяние снега) вглубь массива, что вызвано высокой пористостью верхней части техногенных галитовых образований. Развивающиеся во времени процессы пластической деформации, физико-химические процессы, протекающие в поровом растворе (рост кристаллогидратов при увеличении плотности рапы и изменении температурных условий, частичный переход свободной и рыхлосвязанной воды в химически связанную) будут способствовать формированию дифференцированных зон в солеотвале с различными инженерно-геологическими свойствами.

С целью оценки формирования способом гидронамыва солеотвала из галитовых отходов выбрана геомеханическая модель рассматриваемой прикладной технической задачи, представляющая собой рассмотрение насыпного сооружения на деформируемом основании. При этом возможен учет неоднородности насыпного сооружения по высоте, учитывается последовательность отсыпки в большом временном интервале, учет возможности слоев насыпного сооружения по границе с основанием. В этой связи, механико-математическая модельная задача строилась исходя из существующих положений и допущений [4 - 6].

Вследствие больших линейных в плане размеров насыпного сооружения, решение задачи изучения устойчивости системы «насыпное сооружение – деформируемое основание» рассматривалось в рамках теории упругости в условиях плоско-деформированного состояния ($\varepsilon_{zz} = 0$) или в осесимметричной постановке.

Все объекты исследуемой системы при построении компьютерных расчетных моделей (солеотвал, дамба, шламохранилище и др.) рассматривались как линейно-деформируемые однородные (в среднем) изотропные (усредненные) тела. При этом принимались условия полного сцепления на всех контактных поверхностях за исключением линии контакта правой

дамбы с основанием, где рассматривались условия сцепления (контакта) с различными коэффициентами трения.

В связи с тем, что реальные технологические процессы происходят в большом временном интервале, задачи решались в квазистатической постановке.

В соответствии с принятыми допущениями связь между компонентами напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) для элементов рассматриваемой системы была представлена в виде:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где λ, μ – параметры Ламе. $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$, $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$, здесь

ν – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга.

Механико-математическая модель, описывающая НДС исследуемой системы включала:

- уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} = -\rho g.$$

- уравнение совместности деформаций

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial y \partial x};$$

- уравнение состояния среды (закон Гука) – уравнения (1);

- граничные условия.

В соответствии с описанием геомеханической модельной задачи граничные условия выбирались в следующем виде. Насыпное сооружение располагается на упругом основании. В свою очередь упругое основание по ее нижнему основанию неподвижное (условия жесткого закрепления) и

отсутствует его движение в горизонтальном направлении по левой границе. По правой границе системы в целом принимаются условия на бесконечности, т.е. справа вся конструкция закреплена в горизонтальном направлении. На границе контакта основания и солеотвала (намывной солеплиты) задаются следующие условия:

$$\begin{cases} \sigma_{n1} = \sigma_{n2}, \\ u_{n1} = u_{n2}, \\ u_{\tau1} = u_{\tau2}, |\sigma_{\tau}| < f * \sigma_n, \\ \sigma_{\tau1} = \sigma_{\tau2}, |\sigma_{\tau}| < f * \sigma_n, \\ \sigma_{\tau1} = \sigma_{\tau2} = f * \sigma_n, |\sigma_{\tau}| > f * \sigma_n, \end{cases}$$

где индексами обозначены контактирующие тела, f – коэффициент трения; σ_n, σ_{τ} – соответственно нормальные и касательные усилия.

В качестве критерия разрушения использовался критерий Кулона-Мора:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin(\varphi) - C \cos(\varphi) > 0, \quad (2)$$

где σ_1, σ_3 – соответственно максимальное и минимальное главные напряжения, C – сцепление, φ – угол внутреннего трения.

Схема вычислений представляла последовательность решения нескольких модельных задач. Вначале в расчетной модели рассматриваются все конструкции, составляющие систему, и вычисляется их консолидация (усадка под действием собственного веса). Далее рассматривались расчетные модели с последовательным намывом слоев. Выбрано восемь слоев, мощностью ~10 м каждый.

По результатам численных экспериментов прослеживается критическая отметка солеотвала 228 м. Принимая во внимание время упрочнения галитовых отходов и солеотвальных грунтов, имеет место образование дифференцированных зон с различными инженерно-геологическими свойствами. В этой связи рекомендуется вести намыв до отметки второго этапа намыва, но не ниже отметки 207,25 м. Формирование солеотвала должно вестись послойно с целью обеспечения его общей устойчивости. После второго этапа намыва рекомендуется провести дополнительные исследования по состоянию намывного грунта. При его нарушенном состоянии дальнейший намыв может представлять собой определенную опасность.

При достижении мощности намыва 29-30 м на всей площади шламохранилища в случае нарушенности состояния намывного грунта и опасности дальнейшего его намыва возможно рассмотреть случай сухой отсыпки из галитовых отходов, а также формирование солеотвала из обезвоженных глинисто-солевых шламов.

При формировании способом гидронамыва солеотвала из галитовых отходов на отработанном шламохранилище должен осуществляться постоянный геомеханический мониторинг за состоянием отвала и всех сооружений. Контроль должен быть как визуальный, так и инструментальный с применением инженерно-геологических и геофизических методов.

Важным представляется выполнение дальнейших исследований по изучению поведения шлама как двухфазной среды и поведению жидкой фракции при увеличении нагрузки и консолидации с течением времени с целью определения технологии формирования солеотвала до его верхней проектной отметки.

Литература

1. Шемет, С.Ф. Прогнозирование и предотвращение геэкологических последствий подземной разработки калийных месторождений / С.Ф. Шемет, А.А. Кологривко // Сб. науч. трудов 8-ой междунар. конф. «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» / Под общ. ред. Р.А. Ковалева. – Тула-Донецк-Минск: ТулГУ, 2012. – С. 153-165.
2. Смычник, А.Д. Технологии складирования отходов калийного производства / А.Д. Смычник, С.Ф. Шемет, А.А. Кологривко // Сб. науч. статей X Юбилейной национальной конф. с междунар. участием по открытой и подводной добычи полезных ископаемых. – Варна: 2009. – С. 494-496.
3. Шемет, С.Ф. Изменение влажности обезвоженного глинисто-солевого шлама и смеси обезвоженного глинисто-солевого шлама с галитовыми отходами от времени / С.Ф. Шемет, А.А. Кологривко // Сб. материалов междунар. науч.-техн. конф. «Процессы и средства добычи и переработки полезных ископаемых». – Минск: БНТУ, 2012. – С. 74-77.
4. Журавков, М.А. Математическое моделирование деформационных процессов в твердых деформируемых средах (на примере задач механики горных пород и массивов) / М.А. Журавков. – Минск: БГУ. – 2002. – 456с.
5. Журавков, М.А. Фундаментальные решения теории упругости и некоторые их применения в геомеханике, механике грунтов и оснований. Курс лекций / М.А. Журавков. – Минск: БГУ. – 2008. – 247 с.
6. Журавков, М.А. Компьютерное моделирование в геомеханике / М.А. Журавков, О.Л. Коновалов, С.И. Богдан, П.А. Прохоров, А.В. Круподеров / Под общ. ред. М.А. Журавкова. – Минск: БГУ – 2008. – 443 с.