

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОЛЕОТВАЛА ИЗ ГАЛИТОВЫХ ОТХОДОВ В УСЛОВИЯХ СКЛАДИРОВАНИЯ ШЛАМОВ ГИДРОНАМЫВОМ НА ТЕЛО СОЛЕОТВАЛА

Николайчик М. А., Климкович Н. М.

*Белорусский Государственный Университет*

**Введение.** Известно, что при формировании солеотвалов используются в основном слабые грунты, которые, в свою очередь, могут использоваться в качестве основания только путем постепенного нагружения слоями отходов небольшой высоты. Наиболее подходящим способом такого нагружения является гидронамыв, поскольку при этом солеотходы растекаются по большим площадям, высота слоя может быть выбрана любая, обеспечивающая безопасность работ [1].

Технология гидронамыва состоит в следующем. Солеотходы на солеотвал попадают через конвейеры и сбрасываются в приемную воронку, расположенную на бровке солеотвала. В эту же воронку попадает рассол из рассолосборника. Образовавшаяся пульпа из воронки по лотку, установленному на откосе солеотвала, попадает в солеотвал. Солеотходы оседают, а рассолы стекают в рассолосборник, откуда снова идут на приготовление следующей пульпы. По мере намыва управление площадью намыва производят с помощью создания вала из намытых солеотходов, для чего обычно привлекаются бульдозеры [2].

На сегодняшний день привлечение численного и компьютерного моделирования при решении задач геомеханики и геотехнологии достаточно распространено, так как это позволяет выполнять большой объем численных операций и визуализировать результат для каждого элемента рассматриваемой математической модели [3]. Например, оценка прочности и устойчивости конструкций шламоохранилищ при складировании жидких отходов и их последующей консолидации является актуальной задачей и нашла решение в области конечно-элементного моделирования [4].

Целью данного исследования являлась оценка возможности ведения работ по гидронамыву галитовых отходов на тело солеотвала без формирования шламоохранилищ, огражденных системой дамб. При оценке напряженно-деформированного состояния исследуемой системы учитывалась консолидация намытых шламов с течением времени, а также фактическое состояние солеотвала на момент начала работ.

**Постановка задачи.** На свободную неровную поверхность упрочненных солеотходов (абсолютные высотные отметки варьируются от 217 до 256 м), расположенных на песке, который, в свою очередь, находится на упругом основании (рисонок 1), послойно намываются жидкие галитовые отходы. Сначала идет заполнение поверхности затвердевших отходов до ее самой высокой отметки 256 м (первый этап). Затем послойно намывается шлам высотой по 1,5 м под углом 45° к поверхности земли до отметки 271 м (второй этап).

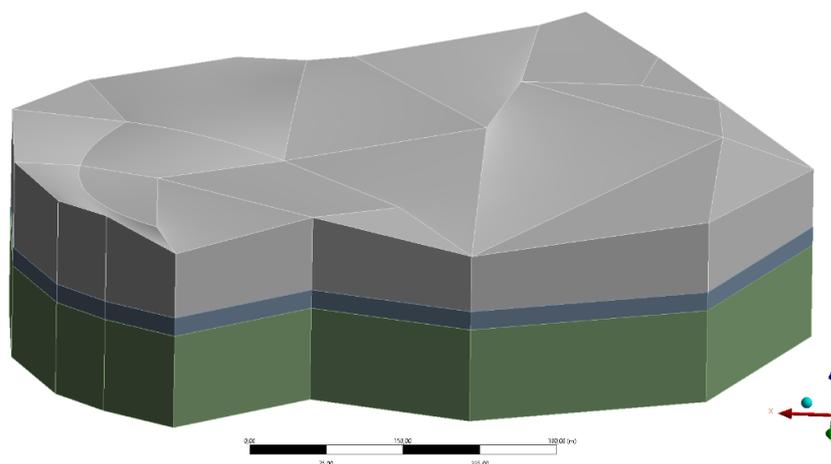


Рис. 1. Трехмерная модель солеотвала до намывки шлама

Геомеханическая модель рассматриваемой задачи сводится к изучению состояния поверхности затвердевших отходов в условиях намывки новых слоев шлама.

Физико-механические свойства намываемого и упрочненного шлама, а также песка и упругого основания отображены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства материалов

Параметр	Намываемый шлам	Упрочненный шлам	Песок	Основание
Время упрочнения $t$ , мес	0	Более 12	–	–
Модуль упругости, МПа	5	500	40,7	1000
Коэффициент Пуассона	0,49	0,3	0,4	0,4
Угол внутреннего трения, град	50	35,3	37,5	–
Структурное сцепление, МПа	0,01	0,764	0,0012	–
Предел прочности на сжатие, МПа	0,25	0,5–3,0	3,5	–
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1300	2000	1840	2300

**Граничные условия.** Итак, основная цель исследования состоит в изучении НДС солеотвала при намывке новых слоев шлама. Все объекты исследуемой системы рассматриваются как линейно-деформируемые однородные тела. При решении предполагалось, что после упрочнения солеотходов имеет место полное сцепление ярусов по всем контактным поверхностям. Области сцепления намываемого шлама с упрочненными отходами также рассматривались в предположении жесткого контакта. Условие полного сцепления также реализуется между упрочненными солеотходами и слоем песка, а также между слоем песка и упругим основанием. Учитывалась последовательность намывки слоев в большом временном интервале и упрочнение предыдущих слоев к моменту намыва следующей партии отходов. Задача решалась в полных напряжениях, т. е. на каждом последующем шаге к напряжениям, вычисленным на текущем шаге, добавлялись напряжения, полученные на предыдущем шаге.

Упругое основание считается неподвижным на его нижней границе (условие жесткого закрепления). Граничные условия на боковой поверхности упругого основания, песка и упрочненных солеотходов принимаются в виде ограничения нормальных перемещений на данных поверхностях. Задача решалась с полем силы тяжести. Граничные условия расчетной модели представлены на рисунке 2.

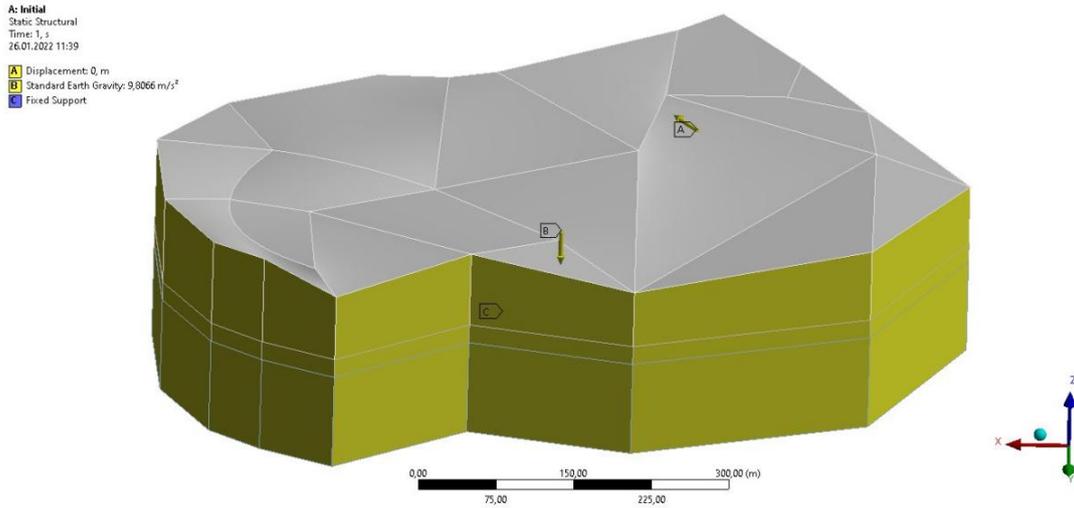


Рис. 2. Граничные условия при расчете начального НДС солевотвала

**Оценка прочности.** В качестве критериев для оценки прочности каждого узла конечно-элементной сетки использовались критерий прочности Кулона-Мора (1) [4] и энергетический критерий прочности (2) [3], которые в главных напряжениях записываются следующим образом:

$$\sigma_1 - (2\lambda + 1)\sigma_3 \leq \sigma_{press}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq \sigma_{press}, \quad (2)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – соответственно максимальное, среднее и минимальное главные нормальные напряжения,  $\lambda = \frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$ ,  $\varphi$  – угол внутреннего трения пород,  $\sigma_{press}$  – предел прочности пород при одноосном сжатии.

**Начальное НДС, заполнение поверхности затвердевших отходов до ее верхней отметки.** При решении задачи на первом этапе необходимо провести расчет первоначального НДС солевотвала, а уже потом намываемых слоев шлама.

Исследовалось состояние солевотвала при намывке на его свободную поверхность шлама до его самой высокой отметки, составляющей 256 м. Оценивать результаты моделирования внутри модели будем в 4 характерных сечениях (рисунок 3).

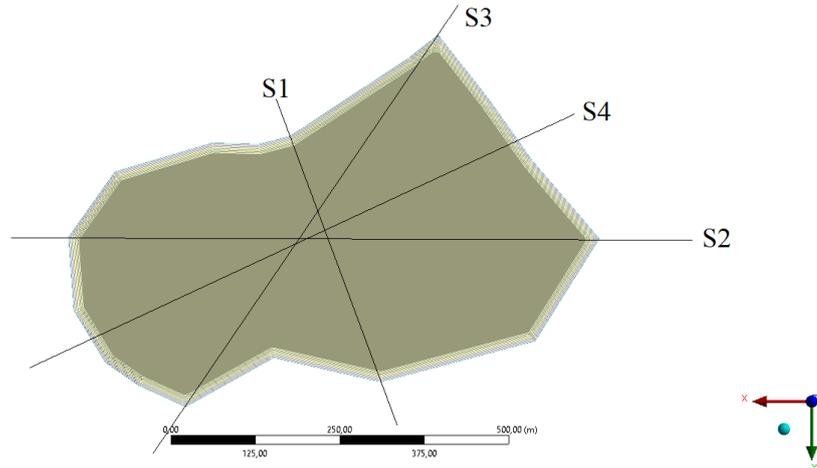


Рис. 3. Разбиение конечно-элементной модели на 4 сечения

На рисунках 4 и 5 в качестве примера приведены результаты моделирования для 1-го и 4-го сечений.

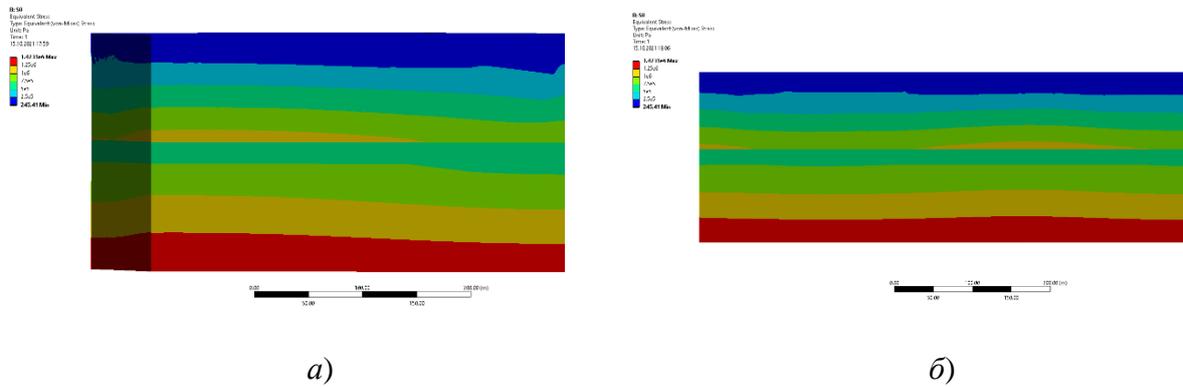


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений после заполнения солеотвала шламом до отметки 256 м: *a* – для 1-го сечения; *б* – для 4-го сечения

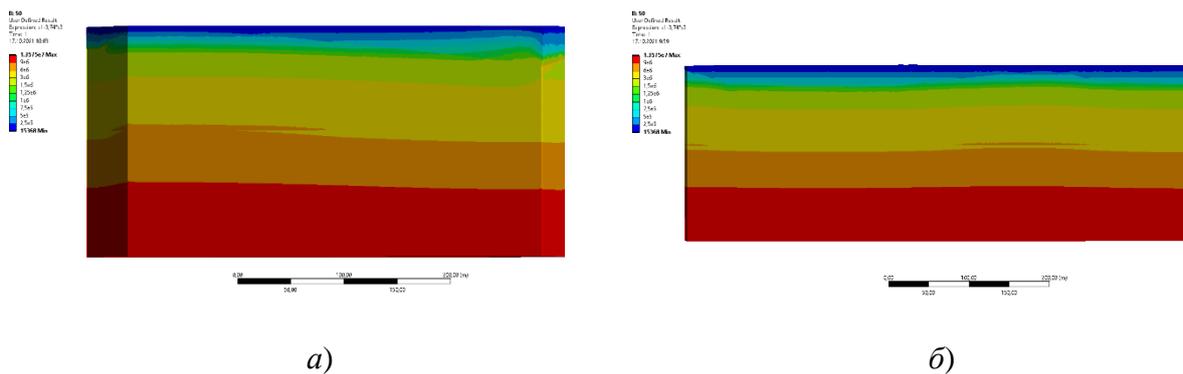


Рис. 5. Распределение характеристик прочности по критерию Кулона-Мора после заполнения солеотвала шламом до отметки 256 м: *a* – для 1-го сечения; *б* – для 4-го сечения

Результаты моделирования начального НДС солеотвала и после намывки на него шлама до его самой высокой абсолютной отметки 256 м. представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты моделирования начального НДС солеотвала и после его заполнения шламом до отметки 256 м

Параметр	До намыва	После выравнивания
Максимальное значение интенсивности напряжений, МПа	1,431	1,473
Максимальное значение характеристик прочности по Кулону-Мору, МПа	13,182	13,575
Максимальные вертикальные перемещения, м	0,74	1,36

На данном этапе моделирования видно, что, по принятым критериям для оценки прочности, в теле солеотвала зон предельного состояния не формируется.

**Намывка до 5-го слоя шлама.** Исследовалось состояние солеотвала при последовательной намывке на его верхний затвердевший слой отходов 5-ти слоев шлама высотой по 1,5 м. каждый до отметки 263,5 м. На рисунках 6 и 7 приведены результаты моделирования после намывки 5-го слоя для сечений 2 и 3.

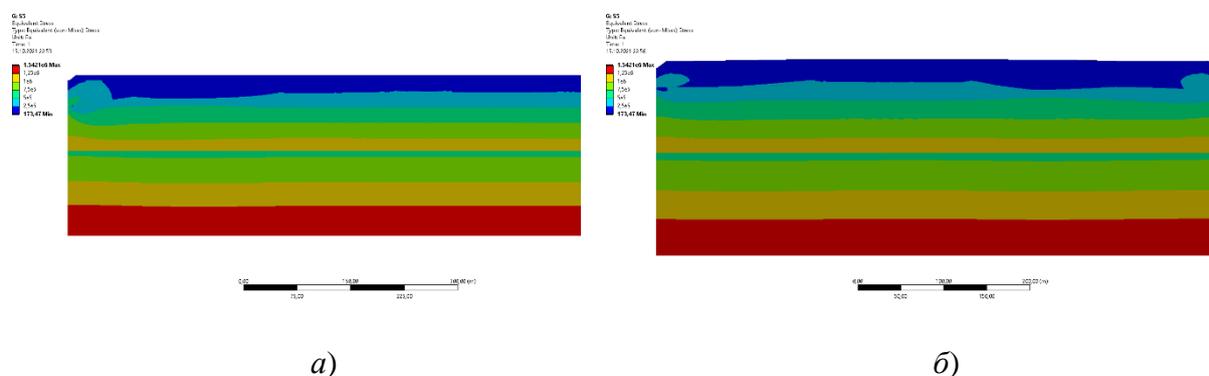


Рис. 6. Распределение интенсивности напряжений после намывки 5-го слоя шлама на солеотвал до отметки 263,5 м: а – для 2-го сечения; б – для 3-го сечения

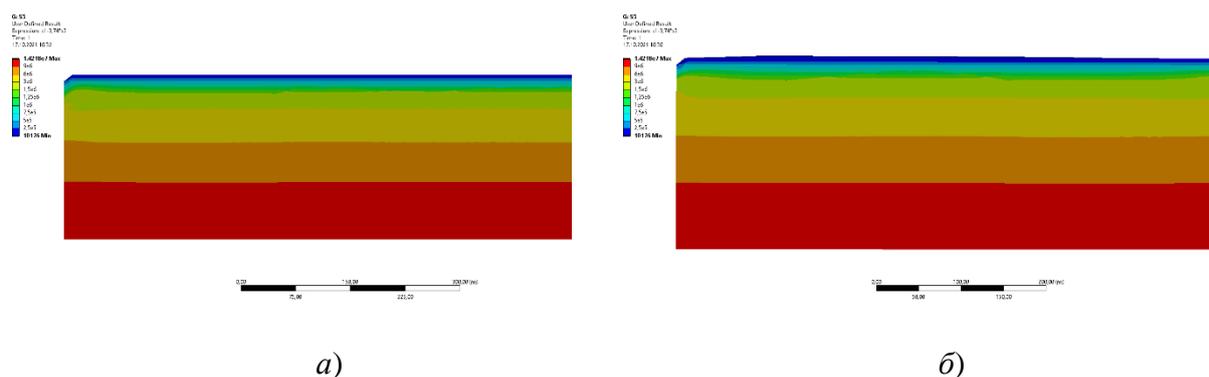


Рис. 7. Распределение характеристик прочности по критерию Кулона-Мора после намывки 5-го слоя шлама на солеотвал до отметки 263 м: а – для 2-го сечения; б – для 3-го сечения

Результаты моделирования намывки на солеотвал каждого из 5-ти слоев шлама приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты моделирования намывки до 5-го слоя шлама включительно

Параметр	1-ый слой	2-ой слой	3-ий слой	4-ый слой	5-ый слой
Максимальное значение интенсивности напряжений, МПа	1,5039	1,5138	1,5234	1,5328	1,5421
Максимальное значение характеристик прочности по Кулону-Мору, МПа	13,866	13,957	14,046	14,133	14,218
Максимальные вертикальные перемещения, м	0,11	0,014	0,014	0,013	0,013

Как следует из расчетов, максимальные значения интенсивности напряжений и характеристик прочности Кулона-Мора в солеотвале не достигают предела прочности, а значит можно говорить о том, что на данном этапе моделирования солеотвал способен выдержать вес вышележащих слоев шлама.

**Намывка до 10-го слоя шлама.** Рассмотрим состояние солеотвала при последовательной намывке на его поверхность еще 5-ти слоев шлама высотой по 1,5 м каждый до отметки 271 м. На рисунках 8 и 9 приведены результаты модельных расчетов после намыва и затвердевания на поверхности солеотвала 10-го слоя шлама для сечений 1 и 3.

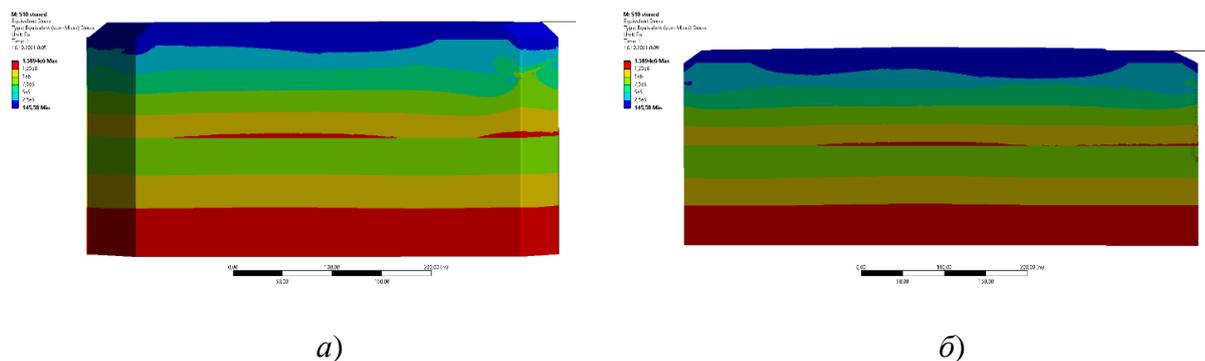


Рис. 8. Распределение интенсивности напряжений после затвердевания 10-го слоя шлама в солеотвале на отметке 271 м: *а* – для 1-го сечения; *б* – для 3-го сечения

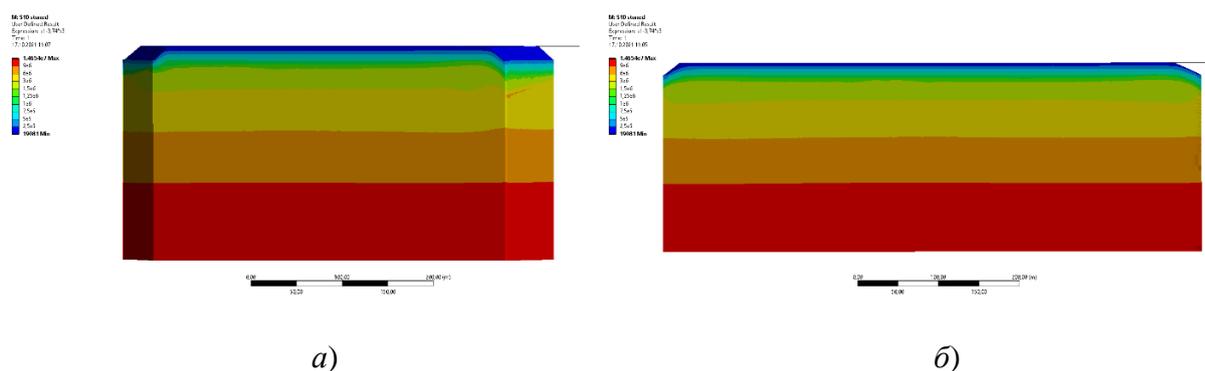


Рис. 9. Распределение характеристик прочности по критерию Кулона-Мора после затвердевания 10-го слоя шлама в солеотвале на отметке 271 м:  
*а* – для 1-го сечения; *б* – для 3-го сечения

Результаты моделирования намывки на солеотвал 5-ти слоев шлама, начиная с 6-го по 10-ый, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты моделирования намывки с 6-го по 10-ый слой шлама включительно

Параметр	6-ой слой	7-ой слой	8-ой слой	9-ый слой	10-ый слой
Максимальное значение интенсивности напряжений, МПа	1,5511	1,5599	1,5686	1,5771	1,5862
Максимальное значение характеристик прочности по Кулону-Мору, МПа	14,301	14,383	14,462	14,54	14,624
Максимальные вертикальные перемещения, м	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что после намыва 10-ого слоя шлама на поверхности солеотвала предельное состояние не достигается. Рассмотрим динамику роста максимальных значений характеристик прочности Кулона-Мора, так как их значения наиболее близки к предельным значениям на сжатие, каждое значение отличается от предыдущего приблизительно на 0,08 МПа, откуда следует, что для достижения предела на сжатие необходимо намывать на поверхность солеотвала еще не менее 50 слоев шлама. Значит, на данном этапе моделирования, модель солеотвала будет иметь устойчивое неопредельное напряженно-деформируемое состояние.

**Заключение.** Рассмотрена задача исследования прочности солеотвала из галитовых отходов при последовательном гидронамыве на него 10-ти слоев шлама. Обобщенная оценка напряженно-деформируемого состояния системы «шлам-затвердевшие солеотходы-слой песка-упругое основание» определялась путем изучения максимальных значений интенсивности напряжений и характеристик прочности по Кулону-Мору в соответствии с энергетическим критерием прочности и Кулона-Мора.

Результаты исследования показывают, что данная конструкция солеотвала способна сохранять свое устойчивое состояние при намыве на него 10-ти слоев шлама при условии полного затвердевания намываемых слоев и условия жесткого контакта между всеми составляющими системы с коэффициентом запаса прочности не менее 2. При этом усадка (максимальные вертикальные перемещения) составят примерно 2,33 м.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кологривко А. А. Складирование глинисто-солевых шламов при расширении солеотваов на отработанных шламохранилищах // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2016 – Вып. 2 – С. 23–27.
2. Борзаковский Б. А. Технология гидронамыва солеотвала на калийных предприятиях Верхнекамья // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006 – С. 191–195.
3. Компьютерное моделирование в геомеханике / М. А. Журавков, О. Л. Коновалов, С. И. Богдан, П. А. Прохоров, А. В. Крупоедов // Минск: БГУ, 2008 – С. 188–200.
4. Zhuravkov M. A., Zubovich V. S. Rock mass stability and shifting. People's Friendship University of Russia. Moscow, 2009. – 439 p.

*Поступила: 30.01.2022*