



## Оценка устойчивости насыпи золошлаконакопителя с использованием геосинтетических материалов армирования методом конечных элементов

<sup>1</sup>ЕНКЕБАЕВА Айгерим Сексембайкызы, докторант, aikowa\_21@mail.ru,

<sup>1\*</sup>ЛУКПАНОВ Рауан Ермагамбетович, PhD, профессор, директор, rauan\_82@mail.ru,

<sup>1</sup>ЕНКЕБАЕВ Серик Бейсенгалиевич, PhD, доцент, главный специалист, Yenkebayev-serik@mail.ru,

<sup>1</sup>ЦЫГУЛЕВ Денис Владимирович, к.т.н., доцент, denis\_riza\_72@mail.ru,

<sup>1</sup>Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Казахстан, Нур-Султан, ул. Сапиева, 2,

\*автор-корреспондент.

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования общей устойчивости насыпи золошлако-накопителя. Объект исследования расположен на объекте функционирующего металлургического комби-ната в г.Темиртау. Исследования выполнены с использованием численного моделирования, методом конеч-ных элементов. Для оценки влияния геосинтетических элементов армирования на устойчивость насыпи было проведено моделирование насыпи без армирования и с армированием. Моделирование выполнено в плоской постановке задачи модели Кулона-Мора. Используемые параметры материалов численного моделирования были определены на основании лабораторных испытаний. На основании исследования на-пряженно-деформированного состояния были получены коэффициенты соотношений, позволяющие дать численную оценку влияния армирования на устойчивость насыпи. Общая тенденция деформирования на-сыпи (как армированной, так и неармированной) заключалась в следующем: проявление деформации насы-пи тем больше, чем больше расстояния от заданного смещения подстилающего основания.

**Ключевые слова:** геосинтетические материалы, георешетка, грунт, армирование, деформация, числен-ное моделирование, метод конечных элементов, нормальная жесткость, насыпь, общая устойчивость.

## Введение

Теоретические разработки, связанные с армированным грунтом, значительно выросли за последние два десятилетия. Однако полное понимание каждого аспекта еще не получено. Для полного понимания системы армированного грунта, совместимости деформаций между грунтом и арматурой и характеристик распределения напряжений в армированном грунте необходим надлежащий учет, который может быть сделан только после проведения детального анализа существующих видов геотекстиля и его характеристик, полученных по результатам испытаний [1].

Согласно определению ASTM D4439, геосинтетика определяется как плоский продукт, изготовленный из полимерного материала, используемого с грунтом или другим геотехническим материалом, как неотъемлемая часть конструкции или системы [2].

Армированные материалы из полимерных материалов производят из полипропилена, полиэтилена или поливинилхлорида [3]. Полимерный материал может быть термопластом и терморезактивом [4]. Термопласт – это полимер, который можно размягчить и заставить течь под действием тепла. Терморезактивный полимер устанавливается один раз и не подлежит повторной формовке. Любое добавление тепла после первого формования приведет только к обугливанию и разрушению материала [5].

На сегодняшний день в мировой практике существует множество различных материалов. Большую часть из них составляют геосинтетические материалы на основе синтетического полимерного волокна, которые изготавливаются из полипропилена (PP), полиэстера (PET) или поливинилхлорида (PVC) [6].

В зависимости от геометрии, типа изготовленного материала и функции геосинтетический материал можно подразделить: на геотекстиль, георешетки, геосетки, геомембраны, геотрубки (или заглубленные пластиковые трубы), геокомпозиаты [7]. В настоящей статье рассматриваются именно георешетки – синтетические материалы, которые по функциональному предназначению относятся к элементам армирования грунтовых сооружений. Георешетки были использованы для обеспечения общей устойчивости насыпи золошлакоотстойника (ЗШО), который расположен на объекте тепловой электростанции ТЭЦ вблизи г.Темиртау. Накопители требуют надлежащего контроля, являясь объектами повышенной опасности [8]. Однако данные геотехнические сооружения периодически исчерпывают свой эксплуатационный ресурс, подвергаясь необратимым деформациям, в результате потери устойчивости. Последнее приводит к тяжелым последствиям, нарушению нормального режима работы электростанции, а также существенному загрязнению окружающей среды [9].

Целью исследования является оценка влияния

элементов армирования на общую устойчивость грунтовой насыпи.

## Методы

Методология исследования включает в себя следующие этапы:

- оценка физико-механических свойств грунтов;
- оценка физико-механических свойств элементов армирования;
- численное моделирование армированной насыпи в программном комплексе Plaxis;
- численное моделирование неармированной насыпи в программном комплексе Plaxis;
- сравнительный анализ результатов армированной и неармированной насыпей.

Для оценки влияния элементов армирования на общую устойчивость золошлакоотстойника было выполнено численное моделирование в реальных грунтовых условиях площадки на основании инженерно-геологических изысканий. Инженерно-геологические условия площадки представлены сложным напластованием расчетно-геологических элементов

В данной статье представлены предварительные исследования, которые направлены на оценку достоверности результатов численного моделирования, а следовательно, оценку надежности его как метода исследования. Валидация метода выполнена в сравнении с результатами лотковых испытаний.

Моделирование георешетки в программном комплексе Plaxis производится при помощи предусмотренной команды «Geotextile», которой задается единственный параметр – нормальная жесткость. Таким образом плоский объект численного моделирования воспринимает только осевые растягивающие усилия и не может воспринимать сжимающие усилия.

Поскольку расчетная ситуация рассматривается в плоской постановке, то нормальная жесткость ( $EA$ ) будет определена из условия сопротивления (прочности) растяжению георешетки ( $F$ ), шириной 1 метр (рисунок 1). Значение прочности на растяжение было получено испытаниями на разрывной машине для одного стержня. Таким образом, заданная в численном моделировании нормальная жесткость определялась следующим образом:

$$EA = \sigma_i \cdot S \cdot n, \text{ кН/м}, \quad (1)$$

где  $EA$  – нормальная жесткость, кН/м;  $\sigma_i$  – прочность на растяжение одного стержня георешетки, кН/м<sup>2</sup>;  $S$  – поперечная площадь одного стержня георешетки, м<sup>2</sup>,  $n$  – количество стержней в георешетке, шириной 1 метр, м<sup>-1</sup>.

Принимаем осевую жесткость элемента армирования  $EA = 14,0$  кН/м (при шаге георешетки 5 см, сечением 1х5 мм) для плоской задачи в Plaxis.

**Результаты и обсуждения**

На рисунке 2 представлены расчетные схемы сравниваемых моделей. Оценка выполнена сравнением напряженно-деформированного состояния армированной и неармированной моделей. Техническое решение по обеспечению устойчивости насыпи представляет собой использование трех слоев георешетки. Смещение грунтовых масс выполнено по аналогии с результатами технического обследования по линии обрушения. Заданное смещение приложено к подстилающему грунтовому основанию. С целью моделирования провала грунтов, линии обрушения был задан интерфейс со значительно заниженным коэффици-

ентом, равным 0,1.

Анализ устойчивости моделей был проведен на основании оценки деформаций определенных локаций: Локация А – в непосредственной близости от излома основания, на расстоянии 6 м от подошвы насыпи, Локация В – подошва насыпи, Локация С – в средней части откоса, Локация D – бровка насыпи (рисунок 3).

На рисунках 4 и 5 представлены масштабированные деформации сетки конечных элементов и полные перемещения в виде цветовых изолиний.

Качественно в обоих случаях наблюдается схожее перемещение грунтового основания и схожая деформация насыпи, однако сравнение количе-

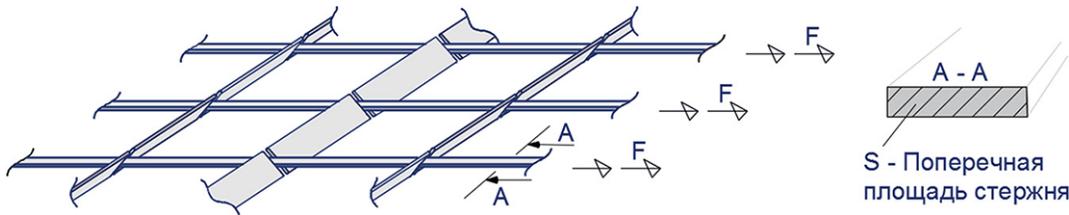
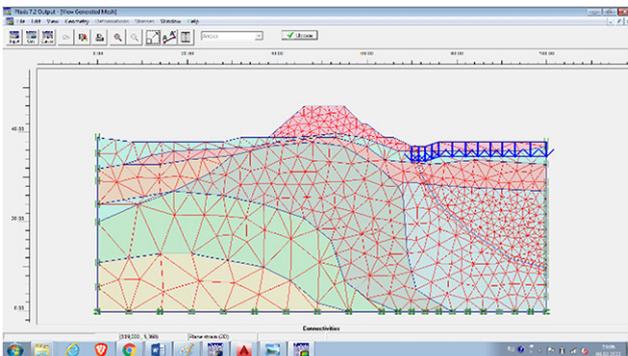
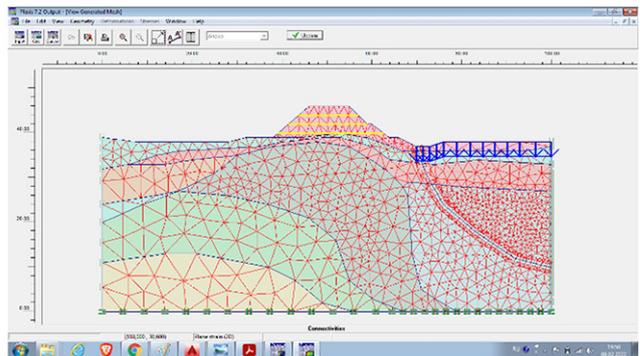


Рисунок 1 – Геометрия георешетки



А – неармированная насыпь



Б – армированная насыпь

Рисунок 2 – Расчетная модель золошлакоотвала

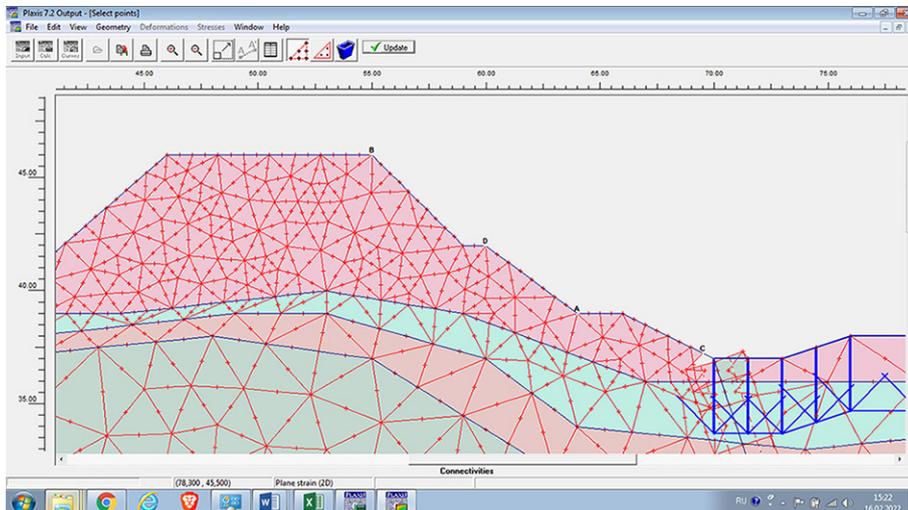


Рисунок 3 – Локации для оценки устойчивости

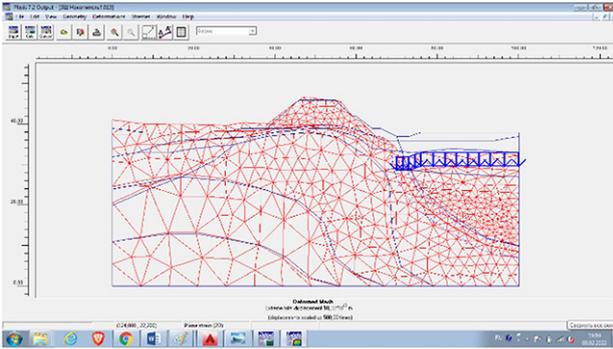
ственных показателей деформации насыпи показал существенное отличие.

Согласно результатам сравнения, средние значения результирующих перемещений локация А неармированной модели лотковых испытаний составили 14,08 мм, тогда как те же значения в Plaxis составили 15,63 мм. Разница в процентном соотношении составила 11%. Значения локация В тех же показателей составили 3,13 мм и 3,81 мм, разница в процентном соотношении составила 22%. Для локация С показатели составили 1,79 мм и 2,81 мм, разница составила 57%. Для локация D

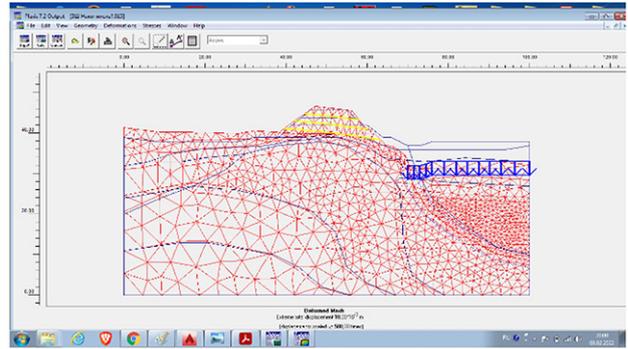
– 1,58 мм и 2,54 мм, разница 135%. Аналогичная тенденция наблюдается и для армированной насыпи: локация А – 13,50 мм и 14,71 мм (лотковые и численные модели), разница 9%; локация В – 2,12 мм и 2,50 мм, 18%; локация С – 0,26 мм и 0,56 мм, 117%; локация D – 0,03 мм и 0,11 мм, 289%.

В обоих случаях наблюдается тенденция увеличения процентного расхождения данных по мере удаления от источника возбуждения.

Сравнительный анализ может быть выражен кривыми, представленными на рисунках 6-8, где на рисунке 6 представлены коэффициенты кор-

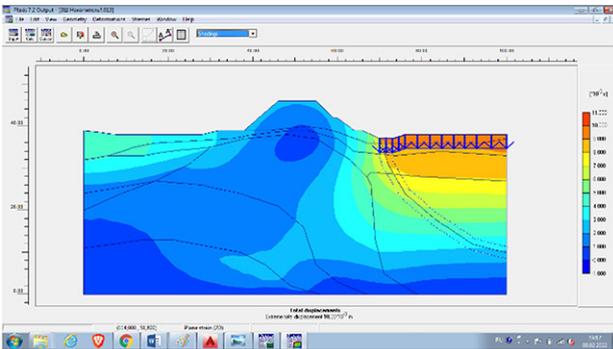


А – неармированная насыпь

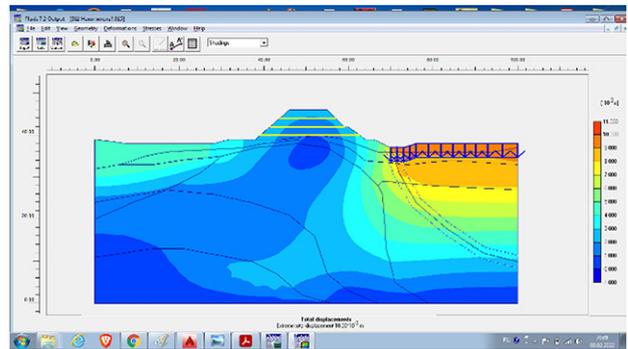


Б – армированная насыпь

Рисунок 4 – Деформация сетки конечных элементов



А – неармированная насыпь



Б – армированная насыпь

Рисунок 5 – Деформация сетки конечных элементов

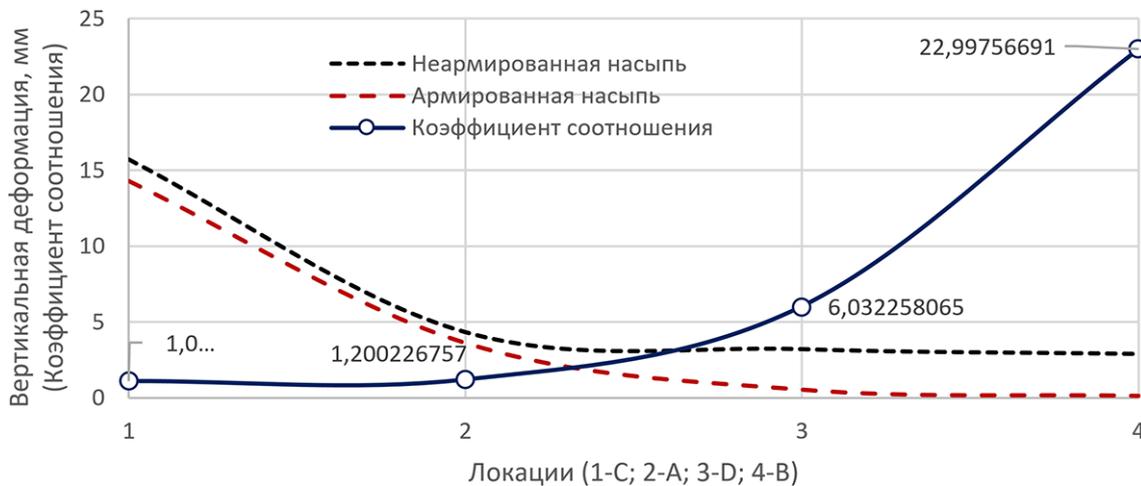


Рисунок 6 – Коэффициенты корректировки вертикальных деформаций

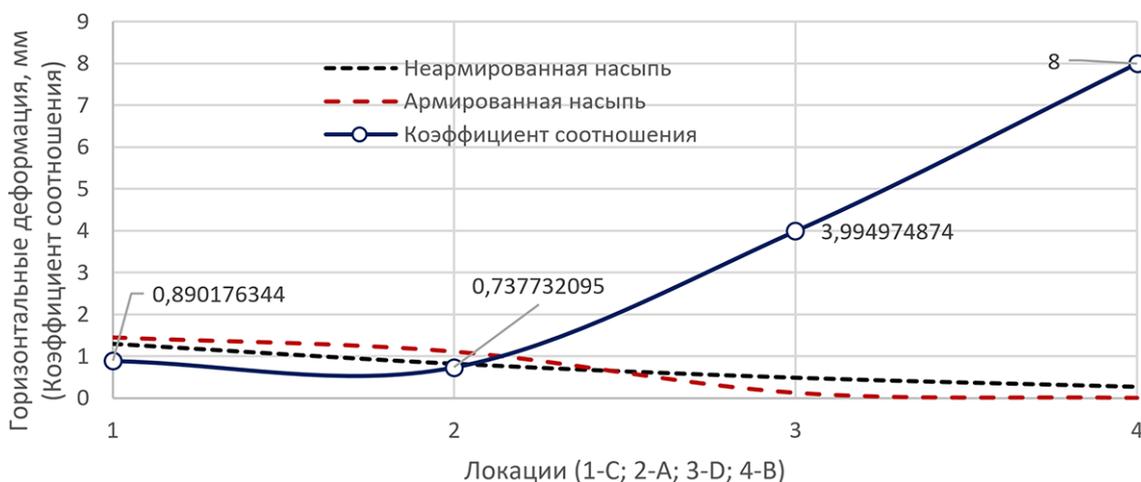


Рисунок 7 – Коэффициенты корректировки вертикальных деформаций

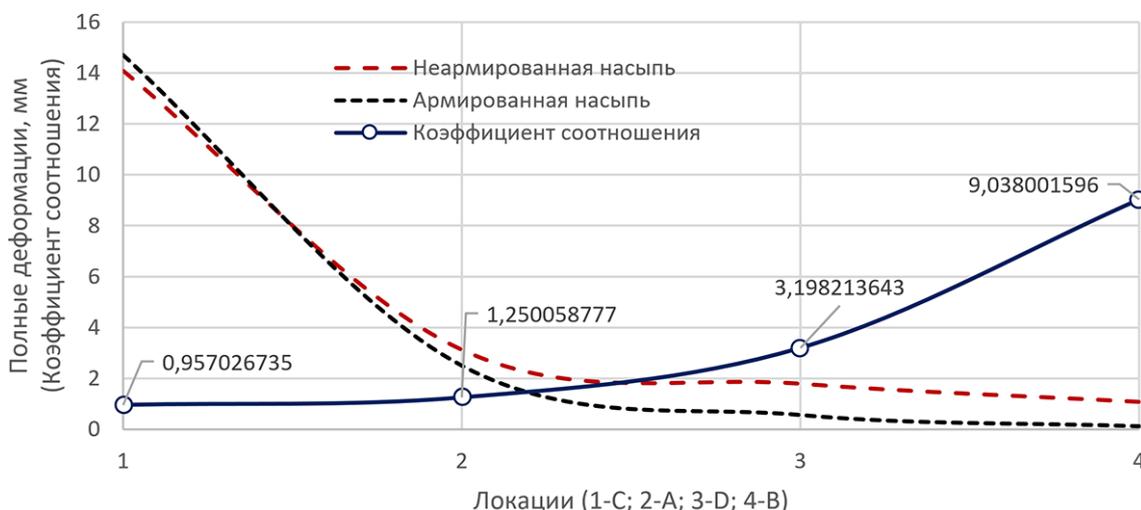


Рисунок 8 – Коэффициенты корректировки вертикальных деформаций

ректировки вертикальных деформаций, на рисунке 7 горизонтальных, а на рисунке 8 – результирующих. Полученные соотношения можно принять за корректирующие показатели вертикальных, горизонтальных и результирующих деформаций, зависящих от расстояния до источника заданного смещения или в реальности от смещения грунтов подстилающего основания.

Характерное влияние армирования наблюдается в локациях В, где коэффициент соотношения вертикальной деформации неармированной насыпи к армированной (далее коэффициент соотношения) составляет 22,9, горизонтальной составляет бесконечность (поскольку горизонтальных деформаций армированной насыпи не выявлено, но на графике условно показано 8 мм), а общей деформации – 9,03. Относительно меньшее, но также существенное влияние выявлено в локации Д: корректирующий коэффициент вертикальной деформации составляет 6,03, горизонтальной – 3,99, общей – 3,19. Очевидно, что минимальное влияние было выявлено в точках А и С, где не

предусматривалось армирования: корректирующий коэффициент вертикальной деформации составляет 1,01 и 1,20 (соответственно), горизонтальной – 0,89 и 0,73, а результирующей (полной) – 0,95 и 1,25.

### Выводы

- Для оценки влияния элементов армирования из геосинтетических материалов на общую устойчивость существующей грунтовой насыпи было выполнено численное моделирование в разностной постановке задач.

- Результаты численного моделирования представлены зависимостями между заданным смещением грунта и деформациями насыпи выбранных локаций. В целом была выявлена тенденция деформированного поведения насыпи: максимальные вертикальные перемещения в обоих случаях (на армированной и неармированной насыпи) наблюдаются в точках С, минимальные – в точках В.

- Согласно сравнениям результатов лотковых

испытаний и численного моделирования, получены сравнительные коэффициенты, характеризующие степень влияния элементов армирования на устойчивость насыпи. Коэффициенты имеют тенденцию увеличения (отклонений) по удалению от источника заданного смещения. Полные

деформации армированной насыпи в локации гребня насыпи в 9 раз меньше деформаций неармированной насыпи, а в локации откоса насыпи в 3,2 раза, что подтверждает эффективное влияние армирования на устойчивость насыпи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhussupbekov, A. Z., Tulebekova, A. S., Lukpanov, R., & Zhumadilov, I. T. (2016). Comparison analysis of features in eurocode and kazakhstan norms requirements. Paper presented at the Challenges and Innovations in Geotechnics – Proceedings of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conference, 8AYGEC 2016, 251-255.
2. ASTM D4439-18 «Standard terminology for geosynthetics».
3. Tang, H. (2020). Application of geosynthetics in highway engineering doi:10.1007/978-981-15-2349-6\_59.
4. Zhang, J., Li, X., Ding, L., & Xiao, Y. (2022). Reinforcement effect investigation of geogrids in the junction between new and existing subgrades in highway widening. Journal of Testing and Evaluation, 50(5) doi:10.1520/JTE20210223.
5. Zhaksybekova, Z., Lukpanov, R., Shakhmova, Z., & Yenkebayev, S. (2018). Test of ground embankment model with the use of geosynthetic elements of reinforcement to static external load. Paper presented at the 11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018, , 1 544-549.
6. Lukpanov, R. E. (2016). Laboratory modelling of soil testing embankment reinforced by geosynthetic elements. Paper presented at the GA 2016 – 6th Asian Regional Conference on Geosynthetics: Geosynthetics for Infrastructure Development, Proceedings, 392-398.
7. Malicki, K., Górszczyk, J., & Dimitrovová, Z. (2021). Recycled polyester geosynthetic influence on improvement of road and railway subgrade bearing capacity – laboratory investigations. Materials, 14(23) doi:10.3390/ma14237264
8. Thamer, L., & Shaia, H. (2021). The effect of geotextile layers and configuration on soil bearing capacity. Mathematical Modelling of Engineering Problems, 8(6), 897-904. doi:10.18280/mmep.080608
9. Lukpanov, R. E. (2016). Laboratory modeling of soil dam reinforced by geosynthetic material. Paper presented at the Challenges and Innovations in Geotechnics – Proceedings of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conference, 8AYGEC 2016, 159-162.

### **Соңғы элементтер әдісімен арматуралаудың геосинтетикалық материалдарын пайдалана отырып, күл-қож жинағыш тұрақтылығын бағалау**

<sup>1</sup>ЕНКЕБАЕВА Айгерим Сексембайқызы, докторант, aikowa\_21@mail.ru,

<sup>1\*</sup>ЛУКПАНОВ Рауан Ермагамбетович, PhD, профессор, директор, rauan\_82@mail.ru,

<sup>1</sup>ЕНКЕБАЕВ Серик Бейсенғалиевич, PhD, доцент, бас маман, Yenkebayev-serik@mail.ru,

<sup>1</sup>ЦЫГУЛЕВ Денис Владимирович, т.ғ.к., доцент, denis\_riza\_72@mail.ru,

<sup>1</sup>Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан, Нұр-Сұлтан, Сәтпаев көшесі, 2,

\*автор-корреспондент.

**Аңдатпа.** Мақалада күл-қоқыс жинағыш үйіндісінің жалпы тұрақтылығын зерттеу нәтижелері келтірілген. Зерттеу нысаны Теміртау қаласындағы жұмыс істеп тұрған металлургия комбинатының объектісінде орналасқан. Зерттеулер сандық модельдеуді қолдана отырып, ақырлы элементтер әдісімен жүргізілді. Геосинтетикалық арматуралау элементтерінің үйінділердің тұрақтылығына әсерін бағалау үшін арматурасыз және арматурамен жағалау модельдеуі жүргізілді. Модельдеу Кулон-Мора моделінің міндетін тегіс қояда жүзеге асырылады. Сандық модельдеу материалдарының пайдаланылған параметрлері зертханалық зерттеулер негізінде анықталды. Кернеулі-деформацияланған күйді зерттеу негізінде арматуралаудың үйіндінің орнықтылығына әсерін сандық бағалауға мүмкіндік беретін арақатынас коэффициенттері алынды. Жалпы үрдісі деформациялау үйінді ретінде арматураланған емес, арматураланған) қатысушыларды келесі: көрінісі деформация үйіндінің соғұрлым көбірек арақашықтық берілген ығысу бойынша.

**Кілт сөздер:** геосинтетикалық материалдар, геогрид, топырақ, арматура, деформация, сандық модельдеу, ақырлы элементтер әдісі, қалыпты қаттылық, жағалау, жалпы тұрақтылық.

### **Assessment of Ash-storage Embankment Stability Using Geosynthetic Reinforcement Materials by Finite Element Method**

<sup>1</sup>YENKEBAYEVA Aigerim, doctoral student, aikowa\_21@mail.ru,

<sup>1\*</sup>LUKPANOV Rauan, PhD, Professor, Director, rauan\_82@mail.ru,

<sup>1</sup>YENKEBAYEV Serik, PhD, Associate Professor, Chief Specialist, Yenkebayev-serik@mail.ru,

<sup>1</sup>TSYGULYEV Denis, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, denis\_riza\_72@mail.ru,

**Abstract.** The article presents the results of the study of the overall stability of the ash-storage embankment. The object of the study is located at the site of a functioning metallurgical plant, in Temirtau. The studies were carried out using numerical simulation, the method of finite elements. To assess the impact of geosynthetic reinforcement elements on the stability of the embankment, simulation of the embankment without and with reinforcement was carried out. The simulations were performed in the flat formulation of the Coulomb-More model problem. The used material parameters of the numerical simulation were determined on the basis of laboratory tests. Based on the study of the stress-strain state, ratio coefficients were obtained to give a numerical assessment of the effect of reinforcement on the stability of the embankment. The general trend of embankment deformation (both reinforced and unreinforced) was as follows: the manifestation of embankment deformation was the greater the greater the distance from the given displacement of the underlying base.

**Keywords:** geosynthetics, geogrid, soil, reinforcement, deformation, numerical simulation, finite element method, normal stiffness, embankment, overall stability.

## REFERENCES

1. Zhussupbekov, A. Z., Tulebekova, A. S., Lukpanov, R., & Zhumadilov, I. T. (2016). Comparison analysis of features in eurocode and kazakhstan norms requirements. Paper presented at the Challenges and Innovations in Geotechnics – Proceedings of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conference, 8AYGEC 2016, 251-255.
2. ASTM D4439-18 «Standard terminology for geosynthetics».
3. Tang, H. (2020). Application of geosynthetics in highway engineering doi:10.1007/978-981-15-2349-6\_59.
4. Zhang, J., Li, X., Ding, L., & Xiao, Y. (2022). Reinforcement effect investigation of geogrids in the junction between new and existing subgrades in highway widening. Journal of Testing and Evaluation, 50(5) doi:10.1520/JTE20210223.
5. Zhaksybekova, Z., Lukpanov, R., Shakhmov, Z., & Yenkebayev, S. (2018). Test of ground embankment model with the use of geosynthetic elements of reinforcement to static external load. Paper presented at the 11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018, , 1 544-549.
6. Lukpanov, R. E. (2016). Laboratory modelling of soil testing embankment reinforced by geosynthetic elements. Paper presented at the GA 2016 – 6th Asian Regional Conference on Geosynthetics: Geosynthetics for Infrastructure Development, Proceedings, 392-398.
7. Malicki, K., Górszczyk, J., & Dimitrovová, Z. (2021). Recycled polyester geosynthetic influence on improvement of road and railway subgrade bearing capacity – laboratory investigations. Materials, 14(23) doi:10.3390/ma14237264
8. Thamer, L., & Shaia, H. (2021). The effect of geotextile layers and configuration on soil bearing capacity. Mathematical Modelling of Engineering Problems, 8(6), 897-904. doi:10.18280/mmep.080608
9. Lukpanov, R. E. (2016). Laboratory modeling of soil dam reinforced by geosynthetic material. Paper presented at the Challenges and Innovations in Geotechnics – Proceedings of the 8th Asian Young Geotechnical Engineers Conference, 8AYGEC 2016, 159-162.