



Модельные испытания насыпи золошлакоотстойника для оценки влияния геосинтетических материалов армирования на общую устойчивость

¹ЕНКЕБАЕВА Айгерим Сексембайкызы, докторант, aikowa_21@mail.ru,

^{1*}ЛУКПАНОВ Рауан Ермагамбетович, PhD, профессор, директор, rauan_82@mail.ru,

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

¹ЦЫГУЛЕВ Денис Владимирович, к.т.н., доцент, denis_riza_72@mail.ru,

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

*автор-корреспондент.

Аннотация. Исследования, представленные в статье, направлены на оценку влияния элементов армирования на общую устойчивость золошлаковой насыпи. Армирование представлено геосинтетическими материалами в виде полиэтиленовых георешеток. Объект исследования расположен на территории функционирующего металлургического комбината в г. Темиртау. Основным методом исследования является модельное испытание в масштабе 1:30 к натуральной насыпи. Модельные испытания выполнены как для армированной, так и неармированной насыпи. Эквивалентный материал модельных испытаний подбирается на основе лабораторных исследований и закона динамического подобия. По результатам исследований напряженно-деформированного состояния были получены коэффициенты соотношений, позволяющие дать численную оценку влияния армирования на устойчивость насыпи. Выявленная закономерность заключалась в следующем: проявление деформации насыпи тем больше, чем больше расстояния от заданного смещения подстилающего основания.

Ключевые слова: модельные испытания, насыпь, армирование, грунт, геосинтетические материалы, георешетка, общая устойчивость, эквивалентный материал, деформация, золошлакоотстойник.

Введение

История армирования грунтов берет свое начало с древних времен. Современное использование геосинтетических материалов для улучшения свойств грунтов берет свое начало с середины 60-х годов XX столетия в Соединенных Штатах Америки [1]. Что касается казахстанских производителей геосинтетического материала, то первой на себя эту функцию возложила компания «Каз-ГеоСинтетика», которая с 2009 года занимается производством геосинтетических материалов широкого ассортимента [2]. Также, с намерением перехода Казахстана в 2019 году на Еврокод, были выпущены нормативные документы Республики Казахстан, определяющие требования к расчету, проектированию и технологии устройства геосинтетических материалов армирования в строительстве, геотехнике [3, 4].

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 [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].

Современное применение геосинтетического материала в строительстве весьма широкое, как и велик спектр его функционального использования [7]. Так, геосинтетический материал может быть использован в подпорных стенках, основаниях фундаментов (грунтовых подушек), в дорожной одежде и, конечно, в конструкциях грунтовых насыпей (например, автомобильных дорог) [8]. Последнее представляет собой механически устойчивую структуру (MSE) [9]. Именно данная геотехническая конструкция будет рассмотрена

в настоящей статье совместно с функциональной особенностью применения геосинтетика в качестве элемента армирования.

В статье рассматривается вопрос оценки устойчивости грунтовой дамбы (далее насыпи) золошламонакопителя (ЗШН) тепловой электрической централи ТЭЦ, металлургического комбината в г.Темиртау (Казахстан). 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;
- модельные испытания насыпи ЗШН без использования элементов армирования;
- модельные испытания насыпи ЗШН с использованием элементов армирования;
- сравнительный анализ результатов армированной и неармированной насыпей.

Лотковые испытания выполнены в масштабе 1:30, в лабораторных условиях, с использованием металлического лотка. Металлический лоток представляет собой емкость, с радиально смещающимися элементами, эмитирующими перемещение грунтовых масс, в результате их вымывания. Таким образом, моделируется не сам процесс вымывания, а его последствие – перемещение грунтовых масс, в результате чего происходит потеря устойчивости насыпи (рисунок 1).

При проведении масштабных испытаний, к которым относятся лотковые испытания, для моделирования грунта часто используют метод динамического подобия Ньютона, где корректировка физико-механических характеристик проводится пропорционально масштабу модели. Несомненно, для получения достоверных результатов необ-

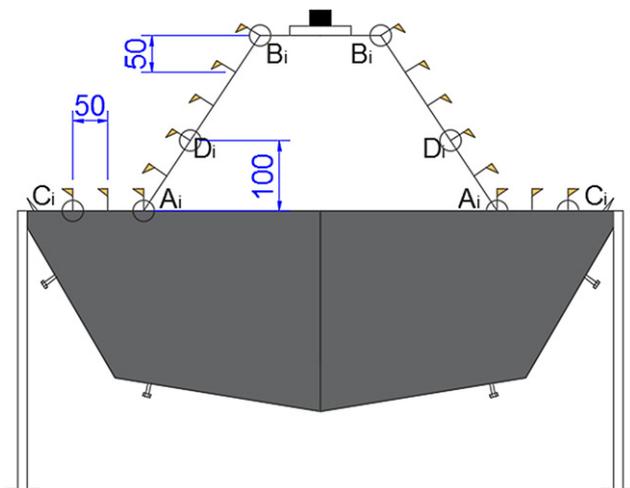


Рисунок 1 – Модельные испытания

ходима масштабная корректировка всех элементов испытаний, в том числе грунта, однако вопрос допущений при подборе состава, эквивалентного грунту слоя, остается открытым. Насколько данные допущения и приближения могут повлиять на результат исследования? Принимая во внимание сложную по своему составу структуру грунта (в большинстве случаев осадочных отложений), не ухудшим ли мы условия исследования, заменив его эквивалентным материалом? Может искажения результатов от масштабирования будут меньше погрешности, которая возникнет при использовании эквивалентных материалов. В любом случае это в большей степени зависит от типа грунта, например, для несвязанного грунта погрешность использования эквивалентного материала будет меньше, нежели для связанного. Классический закон динамического подобия приводится к виду (1), по которому подбираются прочностные и деформационные характеристики эквивалентных материалов:

$$N_m = \frac{I}{J} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_r} \cdot N_r. \quad (1)$$

Зная параметры E ; φ ; C ; ν моделируемых объектов, выбрав масштаб моделирования γ_m/γ_r , равный 1:30, рассчитываем требуемые параметры эквивалентного материала, таблица 1.

Для определения осевой жесткости элементов армирования модели воспользуемся законом динамического подобия на 1 м натурной дамбы или

1/30 м моделируемой дамбы. Таким образом, осевая жесткость модельного элемента армирования (при плотности натурной георешетки 970 кг/см² и плотности эквивалентного материала армирования 750 кг/см²) составляет $E_A = 0,36$ кН/м. То есть полоса эквивалентного материала шириной 3,3 см должна выдержать груз массой 36,7 кг. Если переходить к геометрии эквивалентного материала, то получим следующие пропорции, таблица 2.

В качестве элемента армирования была использована геосинтетическая сетка из полиэстера, шагом 0,5 см. Прочность волокна модельной геосетки определена методом разрыва на испытательном оборудовании – термомеханическом анализаторе ТМА-1000, предназначенном для испытаний термических и механических характеристик малых образцов. Главным критерием оценки было удовлетворение требованиям осевой жесткости 360 кН/м и более.

Результаты и обсуждения

На рисунке 2 представлены результаты модельных испытаний зависимостями между заданным смещением грунта (вызванным перемещением боковых стенок лотка) и деформациями насыпи (результатирующими). На рисунке 2а представлены результирующие общие деформации армированной насыпи, а на рисунке 2б – общие деформации насыпи без использования элементов армирования. На рисунке 3 показаны результаты сравнений результирующих деформаций.

Таблица 1 – Параметры грунта и эквивалентного материала

№	Параметр	Грунт	Эквивалентный материал	
1	Удельный вес, кН/м ³	16	17	-
2	Удельный вес в водонасыщенном состоянии, кН/м ³	18	20	-
3	Модуль общей деформации, МПа	18	0,64	$E_m = \frac{I}{J} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_r} \cdot E_r$
4	Удельное сцепление, кПа	7	0,25	$C_m = \frac{I}{J} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_r} \cdot C_r$
5	Угол внутреннего трения, градус	23	20	$\varphi_m = \varphi_r$
6	Угол дилатансии	0,0	0,0	$\psi_m = \psi_r$
7	Коэффициент Пуассона	0,35	0,35	$\nu_m = \nu_r$
	Проницаемость в горизонтальном направлении, м ³ /сут	0,001	0,1	-
	Проницаемость в вертикальном направлении, м ³ /сут	0,001	0,1	-

Таблица 2 – Требуемые характеристики модели георешетки

Шаг сетки, см	Количество в 1 масштабном метре (3,3 см)	Нагрузка на 1 стержень, кг	Нагрузка на стержень, Н	Площадь сечения, м	Радиус, мм
0,5	7,67	4,78	46,95	6,70807E-07	0,46
0,75	5,44	6,74	66,12	9,44606E-07	0,55
1,0	4,33	8,47	83,08	1,18681E-06	0,61

На рисунке 3а – сравнения вертикальных деформаций, на рисунке 3б – сравнения горизонтальных деформаций, на рисунке 3в – сравнения результирующих деформаций (где НН – неармированная насыпь, АН – армированная насыпь, Кс – коэффициент соотношения).

Согласно результатам модельных испытаний, были получены численные значения деформируемости грунтовой насыпи при перемещении подстилающего грунтового основания. Максимальные значения деформации очевидно наблюдались в точках С, то есть в локациях, расположенных в максимальной близости к источнику перемещения (или заданного смещения), а минимальные в точках В или локациях на максимальном удалении от источника. Вертикальная максимальная

деформация подстилающего основания в случае неармированной модели составляла от 10,9 до 11,7 мм, при среднем значении 11,4 мм. В случае армированной насыпи те же показатели составили от 10,9 до 11,8 мм, при среднем значении 11,35 мм. Горизонтальная максимальная деформация неармированной модели в пределах 0,68-1,46 мм, для армированной 0,98-1,26 мм, при средних значениях 1,08 и 1,10 мм (для неармированной и армированной модели соответственно). В обоих случаях (армированной и неармированной насыпи) получены максимально схожие значения, наблюдались очень близкие проявления деформации моделей, о чем свидетельствуют значения результирующих деформаций: неармированная модель – в пределах 10,94-11,79 мм, среднее 11,45

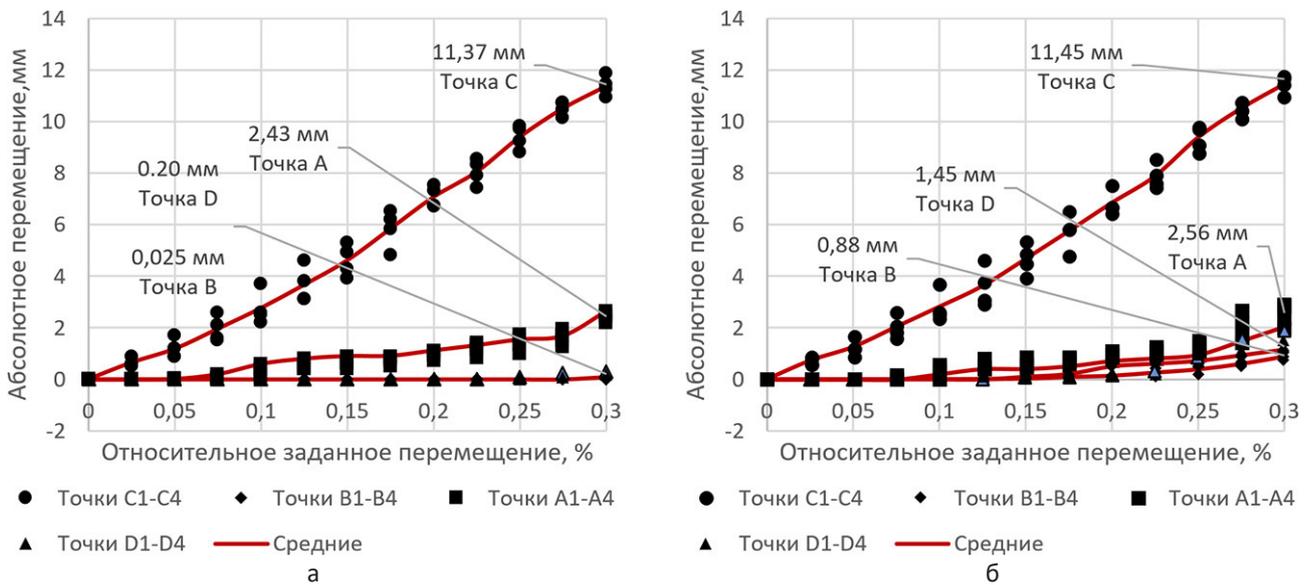


Рисунок 2 – Зависимость между заданным смещением и результирующей деформацией

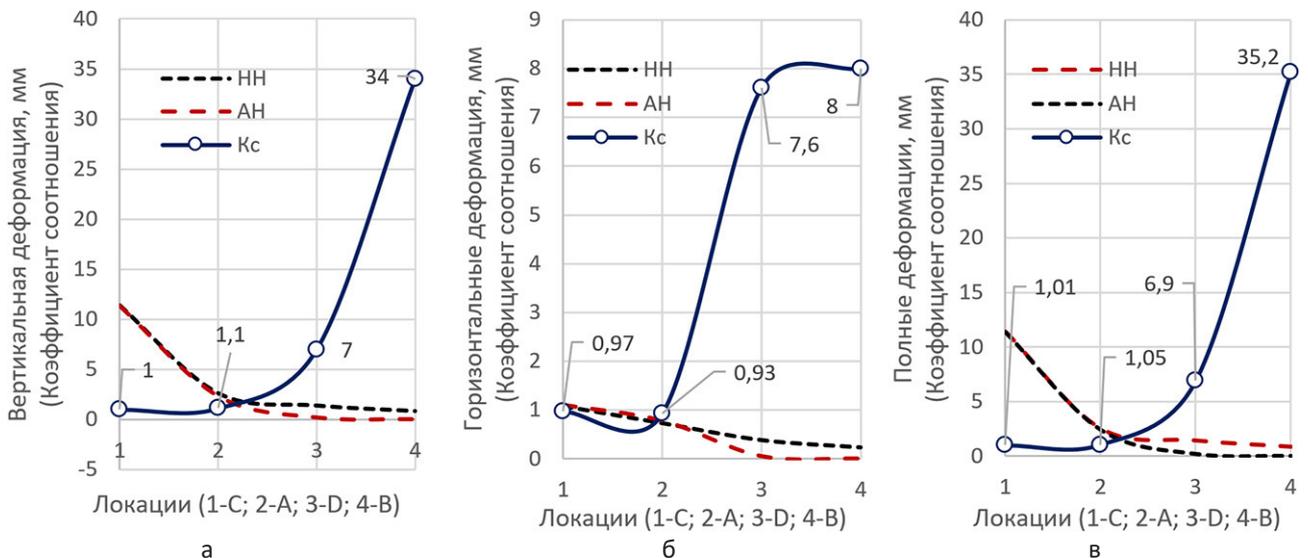


Рисунок 3 – Сравнение результатов деформаций армированной и неармированной насыпей

мм; армированная – 10,95-11,87 мм, среднее 11,38 мм.

Меньшие, чем в точках С, но все же высокие значения вертикальных деформаций наблюдались в точках А – локациях на горизонтальном удалении 10 см от источника задаваемого смещения. Для неармированной модели максимальные горизонтальные деформации лежат в пределах 1,9-2,8 мм, для армированной 2,1-2,5 мм. Все полученные значения имеют тесную связь, средние значения составляют 2,45 и 2,30 мм (для неармированной и армированной модели соответственно). Горизонтальные деформации лежат в пределах 0,58-0,96 мм для неармированной модели и 0,62 0,98 – для армированной. Средние значения также имеют высокую сходимость, составляют 0,74 и 0,78 мм (для неармированной и армированной модели соответственно). Результирующие деформации в пределах 2,03-2,96 мм для неармированной модели и 2,19-2,63 мм для армированной. Средние значения составляют 2,56 мм для неармированной модели и 2,43 мм для армированной. Высокая сходимость значений деформации имеет логическую закономерность и объясняется аналогичными модельными условиями в обоих случаях, без армирования грунтового основания.

Незначительное смещение грунта наблюдалось в точках D, локациях, расположенных на откосе насыпи. Максимальные вертикальные деформации неармированной модели лежат в пределах 1,1-1,8 мм, тогда как те же значения для армированной модели составляют всего 0,1-0,3 мм. При средних показателях 1,4 и 0,2 мм (для неармированной и армированной модели соответственно) эффект армирования составляет 7-кратное снижение деформации в вертикальном направлении, а вертикальная деформация основания насыпи в 11 раз превышает деформацию армированного откоса. Горизонтальные деформации неармированной модели лежат в пределах 1,7-2,2 мм (среднее 1,9 мм), а армированной 0,0-0,1 мм (среднее 0,05 мм). В данном случае эффект армирования проявляется в 7-кратном снижении горизонтальной деформации, а деформация откоса в 16 раз меньше деформации основания насыпи. Результирующая деформация соответственно имеет большое различие между армированной и неармированной моделью: неармированная модель в пределах от 1,15 до 1,83 мм, при среднем значении 1,45 мм; армированная модель в пределах от 0,10-0,31 мм, при среднем значении 0,20 мм. Снижение общей деформации от армирования составляет 90%, а общая деформация откоса в 11 раз меньше общей деформации основания насыпи.

Минимальные значения деформаций наблюдались в локациях верхнего основания насыпи, в точках В. Максимальные вертикальные деформации неармированной модели составляют от 0,7 до 1,0 мм, при среднем показателе 0,85 мм, тогда как те же значения деформаций для армирован-

ной модели составляют 0,0-0,1 мм, при среднем значении 0,025 мм. В данной локации эффект армирования сказывается в 34-кратном уменьшении вертикальной деформации и 92-кратном уменьшении относительно деформации подстилающего основания. Максимальные горизонтальные деформации неармированной модели лежат в пределах 0,16-0,28 мм, при среднем значении 0,23 мм, а горизонтальных деформаций армированной модели не было выявлено. Следовательно, в данном случае получен максимальный эффект армирования с обеспечением высокой степени устойчивости верхнего основания насыпи. Сравнения результирующих показателей деформации показали следующее: неармированная модель в пределах 0,71-1,04 мм, при среднем значении 0,88; армированная модель в пределах 0,0-0,1 мм, при среднем значении 0,025 мм. Таким образом максимальный эффект армирования по отношению обеспечения устойчивости составляет 97,3% относительно подстилающего основания. Кратность снижения общей деформации относительно неармированной модели составляет 35 раз, а относительно подстилающего основания 97 раз.

Анализ статистических показателей полученных результатов свидетельствует о тесной связи частных значений. Полученные коэффициенты вариаций в пределах локаций не превышают 15%, что подтверждает надежность полученных результатов, метода исследования и выявленных закономерностей.

Характерное влияние армирования наблюдается в локациях В, где коэффициент соотношения вертикальной деформации неармированной насыпи к армированной (далее коэффициент соотношения) составляет 35,2. Относительно меньшее, но также существенное влияние выявлено в локациях D, где корректирующий коэффициент общей деформации составляет 6,9. Минимальное влияние было выявлено в точках А и С, где не предусматривалось армирования: корректирующий коэффициент общей деформации составляет 1,00 и 1,01 (соответственно).

Выводы

- Модельные испытания армированной и неармированной модели золошлакоаккумулятора были выполнены с целью оценки влияния элементов армирования из геосинтетических материалов на общую устойчивость.

- Результаты исследований 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 (неармированной и армированной насыпи) наблюдались в точках С, минимальные – в точках В.

- Согласно результатам сравнительного анализа, получены коэффициенты соотношений, характеризующие степень влияния элементов ар-

мирования на устойчивость насыпи. Коэффициенты имеют тенденцию увеличения (отклонений) по удалению от источника заданного смещения. Полные деформации армированной насыпи в ло-

кации гребня насыпи в 35 раз меньше деформаций неармированной насыпи, а в локации откоса насыпи в 7 раз, что подтверждает эффективное влияние армирования на устойчивость насыпи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim, Y., Kotwal, A.R., Cho, B., Wilde, J., & You, B.H. (2019). Geosynthetic reinforced steep slopes: Current technology in the united states. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(10). doi: 10.3390/app9102008.
2. <https://k-g-s.kz/>
3. Lukpanov, R.E. (2015). Comparison of GOST and ASTM as to soil testing by vertically loaded piles. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 52(1), 33-37. doi: 10.1007/s11204-015-9303-2.
4. Lukpanov, R.E., & Awwad, T. (2019). Experimental and numerical modelling of a reinforced structure. doi: 10.1007/978-3-030-01944-0_1.
5. ASTM D4439-18 «Standard terminology for geosynthetics».
6. Ngo, T.P., Likitlersuang, S., & Takahashi, A. (2019). Performance of a geosynthetic cementitious composite mat for stabilising sandy slopes. *Geosynthetics International*, 26(3), 309-319. doi: 10.1680/jgein.19.00020.
7. Guerra-Escobar, P. (2018). Reinforced embankments for the causeway for pont briwet project, penrhyndeaudreath, north wales, UK. Paper presented at the 11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018, 4 2630-2636.
8. Lu, L., Lin, H., Wang, Z., Xiao, L., Ma, S., & Arai, K. (2021). Experimental and numerical investigations of reinforced soil wall subjected to impact loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(11), 5651-5666. doi: 10.1007/s00603-021-02579-9.
9. Özçelik, H., Sadler, J., Kiel, R., Leaf, C., Geier, D., Kapita, T.M., ... Vaciano, G. (2018). Case study on the use of high hybrid MSE walls in mine industry. Paper presented at the 11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018, 4 2958-2966.

Жалпы орнықтылыққа арматуралаудың геосинтетикалық материалдарының әсерін бағалау үшін күл-қож жинағыш үйіндісінің үлгілік сынақтары

¹ЕНКЕБАЕВА Айгерим Сексембайқызы, докторант, aikowa_21@mail.ru,

¹*ЛУКПАНОВ Рауан Ермагамбетович, PhD, профессор, директор, rauan_82@mail.ru,

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

¹ЦЫГУЛЕВ Денис Владимирович, т.ғ.к., доцент, denis_riza_72@mail.ru,

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

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақалада келтірілген зерттеулер арматуралау элементтерінің күл-қож үйіндісінің жалпы тұрақтылығына әсерін бағалауға бағытталған. Арматура полиэтиленді геогридтер түрінде геосинтетикалық материалдармен ұсынылған. Зерттеу нысаны Теміртау қаласындағы жұмыс істеп тұрған металлургия комбинатының аумағында орналасқан. Зерттеудің негізгі әдісі-табиғи үйіндіге 1:30 масштабтағы модельдік сынақ. Модельдік сынақтар арматураланған және арматураланбаған қорғандар үшін жасалды. Модельдік сынақтардың балама материалы зертханалық зерттеулер мен динамикалық ұқсастық заңы негізінде таңдалды. Кернеулі-деформацияланған күйді зерттеу нәтижелері бойынша арматуралаудың үйіндінің орнықтылығына әсерін сандық бағалауға мүмкіндік беретін арақатынас коэффициенттері алынды. Анықталған үлгі келесідей болды: жағалаудың деформациясының көрінісі неғұрлым үлкен болса, төменгі ба-заның берілген ығысуынан қашықтық соғұрлым үлкен болады.

Кілт сөздер: модельдік сынақтар, үйінді, арматуралау, топырақ, геосинтетикалық материалдар, геогрид, жалпы тұрақтылық, балама материал, деформация, күл-қоқыс жинағыш.

Model Tests of Ash-storage Embankment to Assess the Effect of Geosynthetic Reinforcement Materials on Overall Stability

¹YENKEBAYEVA Aigerim, doctoral student, aikowa_21@mail.ru,

¹*LUKPANOV Rauan, PhD, Professor, Director, rauan_82@mail.ru,

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

¹TSYGULYEV Denis, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, denis_riza_72@mail.ru,

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan, Nur-Sultan, Satpayev Street, 2,

*corresponding author.

Abstract. The research presented in the article is aimed at evaluating the influence of reinforcement elements on the overall stability of ash-and-slag embankment. The reinforcement is represented by geosynthetic materials in the form of polyethylene geogrids. The object of the research is located on the territory of the functioning metallurgical plant,

in Temirtau. The main method of research is a model test at a scale of 1:30 to the natural embankment. Model tests are performed for both reinforced and unreinforced embankments. The equivalent model test material was selected based on laboratory studies and the law of dynamic similarity. Based on the results of stress-strain state studies, ratio coefficients were obtained to give a numerical assessment of the effect of reinforcement on embankment stability. The pattern revealed was as follows: the manifestation of deformation of the embankment was the greater the greater the distance from the given displacement of the underlying base.

Keywords: model tests, embankment, reinforcement, soil, geosynthetic materials, geogrid, overall stability, equivalent material, deformation, ash pond.

REFERENCES

1. Kim, Y., Kotwal, A.R., Cho, B., Wilde, J., & You, B.H. (2019). Geosynthetic reinforced steep slopes: Current technology in the united states. Applied Sciences (Switzerland), 9(10). doi: 10.3390/app9102008.
2. <https://k-g-s.kz/>
3. Lukpanov, R.E. (2015). Comparison of GOST and ASTM as to soil testing by vertically loaded piles. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 52(1), 33-37. doi: 10.1007/s11204-015-9303-2.
4. Lukpanov, R.E., & Awwad, T. (2019). Experimental and numerical modelling of a reinforced structure. doi: 10.1007/978-3-030-01944-0_1.
5. ASTM D4439-18 «Standard terminology for geosynthetics».
6. Ngo, T.P., Likitlersuang, S., & Takahashi, A. (2019). Performance of a geosynthetic cementitious composite mat for stabilising sandy slopes. Geosynthetics International, 26(3), 309-319. doi: 10.1680/jgein.19.00020.
7. Guerra-Escobar, P. (2018). Reinforced embankments for the causeway for pont briwet project, penrhyndeaudreath, north wales, UK. Paper presented at the 11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018, 4 2630-2636.
8. Lu, L., Lin, H., Wang, Z., Xiao, L., Ma, S., & Arai, K. (2021). Experimental and numerical investigations of reinforced soil wall subjected to impact loading. Rock Mechanics and Rock Engineering, 54(11), 5651-5666. doi: 10.1007/s00603-021-02579-9.
9. Özçelik, H., Sadler, J., Kiel, R., Leaf, C., Geier, D., Kapita, T.M., ... Vaciago, G. (2018). Case study on the use of high hybrid MSE walls in mine industry. Paper presented at the 11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018, 4 2958-2966.