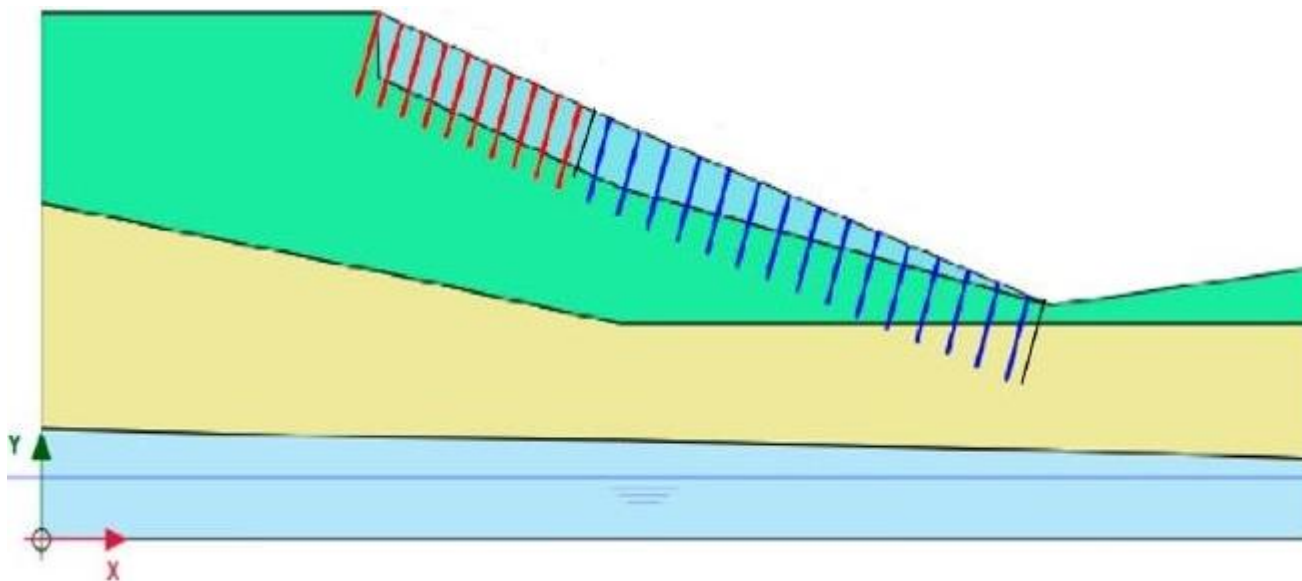


Анализ в PLAXIS укрепления глиняного откоса нагелями из переработанного пластика



Предлагаем вниманию читателей адаптированный и немного сокращенный перевод статьи «Численное исследование стабилизации откоса с использованием нагелей из переработанного пластика в язусской глине». Авторы этой работы Мохаммад Садик Хан, Масуд Нобахар и Джон Ивоук – представители факультета гражданского строительства и инженерной защиты окружающей среды Государственного университета Джексона (г. Джексон, штат Массачусетс, США). Указанная работа была опубликована в 2021 году в специальном выпуске «Геоматериалы для транспортной инфраструктуры» рецензируемого журнала *Infrastructures* («Инфраструктура»), который выпускается интернет-издательством MDPI (г. Базель, Швейцария). Статьи на сайте MDPI находятся в открытом доступе и распространяются по лицензии Creative Commons Attribution (CC BY), которая разрешает их неограниченное использование, воспроизведение, распространение, перевод, редактирование и использование в своей работе (даже в коммерческих целях) при условии наличия ссылки на первоисточник.

Географически в центре штата Миссисипи залегает основное количество такого высокопластичного грунта, как язусская глина (Yazoo Clay). (Соответствующая глинистая геологическая формация в штатах США Миссисипи, Алабама и Луизиана была названа по обрывистому берегу реки Язу в городе Язу штата Миссисипи. Этот грунт состоит в основном из монтмориллонита, имеющего способность к сильному набуханию при поглощении влаги, что делает его плохим основанием для зданий и сооружений. В нем также присутствуют песок, пирит и мергель. – *Ред.*) На откосах насыпей, сложенных с поверхности этим грунтом, часто возникают неглубокие оползни из-за насыщения их влагой во время дождей. Традиционные методы устранения таких нарушений требуют больших затрат денег и времени. Однако использование нагелей из переработанного пластика (НПП) для стабилизации строящихся или ремонтируемых пологих откосов дает значительную экономию. В представленной работе изучается эффективность применения НПП на откосах, построенных с использованием язуССкой глины, в программном комплексе PLAXIS 2D на основе метода конечных элементов (МКЭ). Рассматривались три случая однородных шагов нагелей и три случая их расстановки с разным шагом для укрепления откосов с уклонами 1:2, 1:3 и 1:4. Для изучения применимости НПП для укрепления откоса, сложенного с поверхности язуССкой глиной, был проведен анализ его устойчивости в PLAXIS 2D. Во всех исследованных случаях нагели из переработанного пластика обеспечили достаточное сопротивление откоса сдвигу, значительно увеличив коэффициент

его устойчивости ( $K_y$ ), то есть запас прочности. Но для самого крутого откоса (с уклоном 1:2) горизонтальное смещение нагелей у бровки откоса было заметно больше, чем в остальных случаях.

Сокращенный адаптированный перевод выполнен при поддержке партнера журнала «ГеоИнфо» – компании «НИП-Информатика».

### **ХАН МОХАММАД САДИК (KHAN MOHAMMAD SADIK)**

Факультет гражданского строительства и инженерной защиты окружающей среды  
Государственного университета Джексона, г. Джексон, штат Массачусетс, США  
j00797693@jsums.edu

### **НОБАХАР МАСУД (NOBANAR MASOUD)**

Факультет гражданского строительства и инженерной защиты окружающей среды  
Государственного университета Джексона, г. Джексон, штат Массачусетс, США

### **ИВОУК ДЖОН (IVOKE JOHN)**

Факультет гражданского строительства и инженерной защиты окружающей среды  
Государственного университета Джексона, г. Джексон, штат Массачусетс, США

*Ключевые слова: разрушения пологих откосов; язусская глина (глина реки Язу); нагели из переработанного пластика (НПП); метод конечных элементов (МКЭ).*

## **Введение**

В штате Миссисипи (США) большинство пологих откосов насыпей автомобильных дорог (и других насыпей), построенных с использованием язуССкой глины (глины реки Язу), регулярно подвергается процессам потери местной устойчивости (локальным сплывам, оплывинам, неглубоким оползням и оползаниям). Такие повреждения, как правило, вызываются насыщением откосов водой из-за дождей, а их устранение может быть дорогостоящим. Обычно постоянное увлажнение поверхностных слоев грунта приводит к увеличению в них порового давления и снижению их прочности [1, 2] (согласно теории эффективных напряжений К. Терцаги. – *Ред.*). Опасность разрушений может усугубляться колебаниями влажности из-за сезонных погодных условий, которые приводят к циклическим усадкам-набуханию язуССкой глины. Причиной разрушения пологого откоса, возможно, является проникновение дождевой воды в трещины, что образует в поверхностном слое зону разупрочнения [3]. Сообщалось, что склоны, сложенные с поверхности глинистым грунтом, подвергались повреждениям (сплывам и др.) из-за продолжительных дождей [2]. Сообщалось также, что со временем из-за верховодки, накапливающейся во время дождей, грунт достигает предела прочности на сдвиг, что является основной причиной разрушений пологих склонов [1, 4].

Глубина повреждений (сплывов и др.) откосов насыпей, построенных из язуССкой глины, как правило, находится в пределах 0,91–1,82 м, а поверхность скольжения в зоне разрушения остается параллельной поверхности откоса [1].

При глубине смещений на пологих откосах менее 5 м одним из эффективных методов восстановления считается армирование этих откосов. На практике типичные решения в этом отношении до сих пор включали укрепление грунта с помощью нагелей, буронабивных свай-столбов и микросвай. По сравнению с другими доступными методами стабилизации откосов

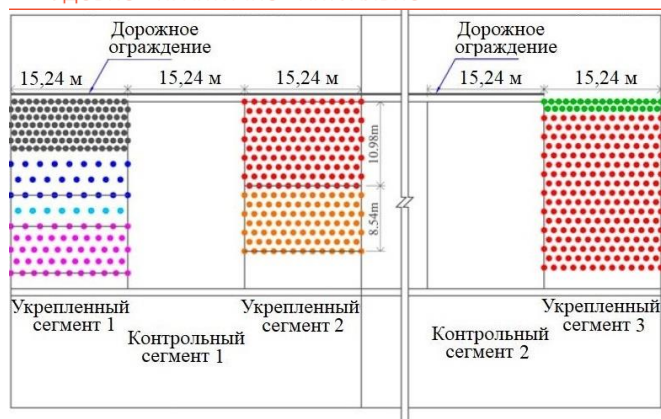
экономически наиболее эффективным можно считать применение нагелей из переработанного пластика (НПП) [1, 3, 5]. Они вбиваются перпендикулярно поверхности откоса для улучшения сопротивления сдвигу и коэффициента устойчивости ( $K_y$ ) вдоль потенциальной или имеющейся плоскости скольжения. Основными источниками для изготовления НПП являются переработанный пластик и другие отходы, такие как полимеры, опилки и зольная пыль [6]. Преимущества НПП заключаются в том, что они сделаны из легкого материала и не подвержены биологической деградации. Благодаря использованию таких нагелей на свалки попадает меньше отходов, а рынки переработанного пластика растут [1]. Типичный состав материала НПП: полиэтилен высокой плотности (< 70%), полиэтилен низкой плотности (< 10%), полистирол (< 10%), полипропилен (< 7%), лавсан (полиэтилентерефталат) (< 5%) и некоторые добавки (< 5% зольной пыли и др.) [7].

Сообщалось, что после следующих один за другим дождей естественные склоны и откосы испытывали разрушения, особенно если они были сложены с поверхности глинистыми грунтами [8–10]. Зона неводонасыщенного грунта может рассматриваться как фактор воздействия на предотвращение таких разрушений. Было замечено, что низкая способность приповерхностных грунтов поглощать воду может сохранять приемлемый коэффициент их устойчивости и морфологию склонов и откосов [11]. Более того, из-за наличия приповерхностных грунтов в неводонасыщенном состоянии их проницаемость остается низкой и они могут не полностью насыщаться водой даже при сильных дождях.

Следует отметить, что особняком стоят ситуации для высокопластичных глинистых грунтов.

В большинстве случаев при наличии растительного покрова испарение воды в атмосферу приводит к тому, что верхний слой грунта теряет влагу в периоды между дождями. При этом интенсивный непродолжительный дождь после продолжительного дождя может привести к тому, что грунт станет полностью водонасыщенным, что приведет к оползню [4, 11].

Хан (Khan) с соавторами [12] представили полевое исследование откоса насыпи автомагистрали US 287 около эстакады Святого Павла (St. Paul overpass) в городе Мидлоттиан штата Техас. Этот откос был построен из высокопластичной глины. На нем наблюдались смещения и возникли трещины растяжения в грунтовой обочине. При ремонте три сектора откоса (1, 2 и 3) были укреплены с помощью нагелей из переработанного пластика. На участке 1 использовались различные шаги между центральными осями нагелей (0,91; 1,52 и 1,82 м). А секторы 2 и 3 были стабилизированы с использованием одинакового шага (1,21 м) (рис. 1). Мониторинг эффективности таких мер показал, что суммарное оседание бровки обочины/откоса на укрепленном участке 1 составило 6 см, тогда как осадки на укрепленных участках 2 и 3 были равны 12 и 8 см соответственно. Осадка в первом секторе была небольшой из-за меньшего шага НПП (0,9 м) около бровки откоса. В исследовании [12] сделан вывод, что меньший шаг НПП около бровки, где трещина растяжения может инициировать возникновение оползня на откосе, обеспечит более высокую эффективность, чем одинаковый, но **б**ольший шаг по всей длине откоса.



Длина/шаг нагелей из переработанного пластика, м

- 3,05/0,91
- 3,05/1,21
- 3,05/1,82
- 2,44/1,21
- 2,44/1,82
- 2,44/1,21
- 2,44/1,52

**Рис. 1.** Схема расположения нагелей из переработанного пластика на укрепленных участках насыпи автомагистрали US 287 (по [11])

В настоящей статье представлено численное исследование применимости нагелей из переработанного пластика на откосах, построенных с поверхности из язусской глины, в конечноэлементном программном комплексе PLAXIS 2D. Анализировалось влияние конфигурации системы нагельного крепления на коэффициент устойчивости ( $K_y$ ) и на деформирование (горизонтальные смещения) нагелей.

Рассматривались уклоны 1:2, 1:3 и 1:4 (отношения вертикальной проекции поверхности откоса к ее горизонтальной проекции) укрепленных откосов с равномерным и меняющимся шагом НПП (по три случая). Длина нагелей составляла 3,04 м.

Для равномерных шагов нагелей 0,91; 1,21 и 1,52 м за основу было взято несколько полевых исследований, проведенных в штатах Миссури, Айова и Техас (США) [13].

Для изучения влияния меняющегося шага НПП каждый откос был разделен на две части – верхнюю (1/3 длины откоса от бровки) и нижнюю (оставшиеся 2/3 длины). В верхней части использовался шаг 0,91 м, а в нижней – 1,21; 1,52 и 1,82 м.

## О свойствах и поведении язусской глины и построенных из нее откосов

Как уже отмечалось, для представленного в настоящей статье исследования был выбран откос насыпи автомагистрали, построенный с поверхности с использованием язусской глины и имеющий признаки начала разрушения. В лаборатории были установлены физические и механические свойства образцов этого выветрелого грунта. Предел текучести составил 108, число пластичности – 84, а процент прохождения через сито № 200 при определении гранулометрического состава – 90% [1]. Предел прочности на сдвиг определяли в соответствии с методикой для набухающего грунта, разработанной Инженерным корпусом армии США. Удельное сцепление составило 5,22 кПа, а угол внутреннего трения – 18,7 град. [1, 2].

Хан (Khan) с сотрудниками [1] изучали влияние дождя на всасывающее давление и устойчивость откоса, построенного с поверхности из язусской глины. Их исследование показало, что изменчивость всасывающего давления имеет тенденцию влиять на стабильность. При идущих один за другим дождях влага просачивается через поверхность откоса, что, как правило, устраняет давление всасывания и формирует условия для образования верховодки.

Накопление воды в грунте приводит к его разупрочнению и вызывает разрушение пологого откоса, сложенного набухающим грунтом [2]. (Поэтому при конечноэлементном исследовании

схемы стабилизации откоса с помощью НПП, представленном в настоящей статье, в качестве критического условия рассматривалось влияние образования верховодки вместе с достижением предела прочности на сдвиг.)

Хан (Khan) с коллегами [2] испытали образцы язусской глины на прямой сдвиг и рассчитали величины ее удельного сцепления и угла внутреннего трения после 0; 3; 5 и 7 циклов увлажнения-высушивания. Было замечено, что удельное сцепление этого грунта значительно снижалось по мере увеличения количества указанных циклов. Сцепление 18,44 кПа для 0 циклов уменьшилось до 4,31 кПа после 7 циклов (на 77%). Наблюдалось также снижение угла внутреннего трения, но оно было незначительным. Например, с 20,34 град. для 0 циклов он упал до 18,42 град. после 7 циклов увлажнения-высушивания (на 10%). По результатам выполненных Ханом (Khan) с сотрудниками [2] испытаний можно сделать вывод, что после 7 циклов увлажнения-высушивания (при удельном сцеплении грунта 4,31 кПа и угле внутреннего трения 18,42 град.) на откосе возникает первичный оползень.

Результаты исследования Хана (Khan) с коллегами [2] хорошо согласуются с наблюдениями Райта (Wright) и Зорнберга (Zornberg) [14, 15]. А в работах Зорнберга (Zornberg) и Скемптона (Skempton) [15, 16] на основе многочисленных случаев из практики сообщалось, что прочность на сдвиг мобилизовалась по поверхности скольжения. Это можно скоррелировать с пределом прочности, а также ознакомиться с предложенными рекомендациями по анализу устойчивости откосов с точки зрения прочности на сдвиг до возникновения каких-либо оползней.

С помощью испытаний Нобахар (Nobahar) с сотрудниками [17] исследовали изменения сдвиговой прочности язусской глины и ее прочности на остаточный сдвиг и получили предельную прямую Мора – Кулона. Выполненные ими испытания на предельное сопротивление грунта сдвигу дали самую большую прочность (удельное сцепление 18,4 кПа и угол внутреннего трения 20,2 град.), тогда как испытания на остаточный сдвиг (аналога метода «плашка-по-плашке». – **Ред.**) дали наименьшую прочность (удельное сцепление 5,45 кПа и угол внутреннего трения 12,8 град.).

Стоит упомянуть, что в исследовании, представленном в настоящей статье, были приняты следующие результаты испытаний: удельное сцепление 10,8 кПа и угол внутреннего трения 18,6 град.

## Конечноэлементное моделирование

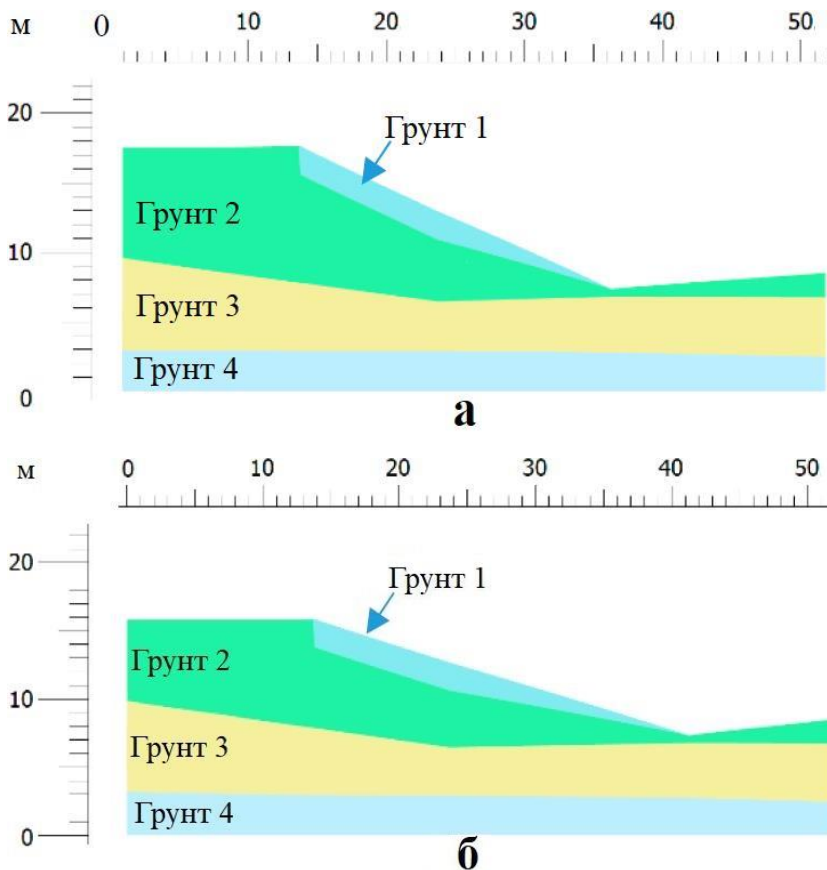
Как уже отмечалось, анализ устойчивости и деформаций был выполнен с помощью моделирования в конечноэлементном программном комплексе PLAXIS 2D. При этом для анализа устойчивости в качестве комплексной геомеханической модели грунта использовалась идеально-упругопластическая модель с критерием прочности Мора – Кулона и 15-узловые треугольные конечные элементы. Были приняты такие граничные условия, чтобы границы по сторонам исследуемого откоса оставались неподвижными [18]. Коэффициент устойчивости ( $K_y$ ) оценивали методом снижения прочности (снижения удельного сцепления и угла внутреннего трения).

Исследуемый откос насыпи автодороги имел высоту 9,15 м и уклон 1:3. При достижении  $K_y$  значения 1,0 откос начнет разрушаться. Расчетная схема была создана на основе имевшихся данных бурения (инженерно-геологического разреза) и результатов испытаний грунтов. Физические и механические свойства язусской глины были определены с помощью лабораторных испытаний [16, 19]. Для самого верхнего слоя грунта использовалась предельная прочность на сдвиг, определенная с помощью испытаний. По результатам анализа стабильности коэффициент устойчивости откоса с уклоном 1:3 составил 1,27, то есть данный откос получился устойчивым и не требовал восстановления. Был также проведен дополнительный обратный анализ при учете условий образования верховодки в верхнем слое грунта из-за дождя. В этом случае коэффициент устойчивости рассматриваемого откоса снизился до 1,18. Параметры грунта и нагелей для анализа методом конечных элементов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры грунта и нагелей для конечноэлементного анализа

Материал		Угол внутр. трения $\phi$ , град.	Удельное сцепление $c$ , кН/м <sup>2</sup>	Удельный вес $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	Модуль упругости $E$ , кН/м <sup>2</sup>	Коэффициент Пуассона $\nu$	Продольн. жесткость $EA$ , кН/м	Изгибная жесткость $EI$ , кН*м <sup>2</sup> /м	Диаметр $d$ , мм
Грунт	1	18,6	10,8	21	4788	0,35	-	-	-
	2	23	23,94	21	7183	0,30	-	-	-
	3	25	47,89	22	9576	0,25	-	-	-
	4	35	143,64	22	11 970	0,20	-	-	-
Нагели из переработанного пластика		-	-	-	-	-	$21,4 * 10^3$	$1,31 * 10^6$	27,1

Для откоса насыпи рассматриваемой автомагистрали были смоделированы три типа геометрии с тремя различными уклонами (1:2, 1:3 и 1:4) (рис. 2), которые затем использовались для конечноэлементного анализа. На основе расчета коэффициенты устойчивости откоса с уклонами 1:2, 1:3 и 1:4 до установки нагелей из переработанного пластика составили 1,093; 1,277 и 1,62 соответственно. Поверхности скольжения для каждого из них (в сухом состоянии и в условиях верховодки) показаны на рисунке 3.



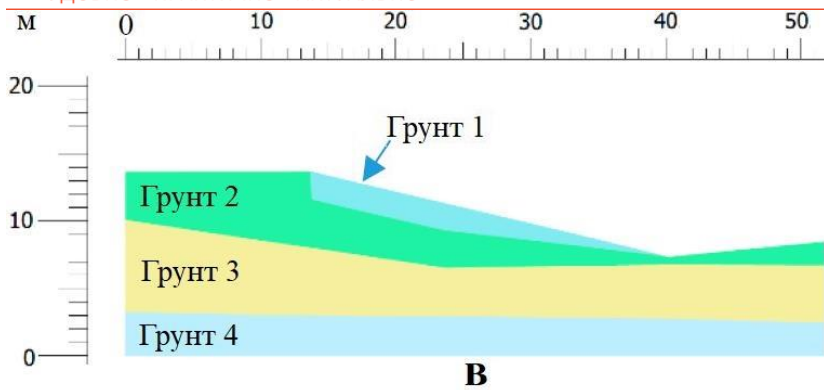


Рис. 2. Геометрия откосов с уклонами 1:2 (а), 1:3 (б) и 1:4 (в)

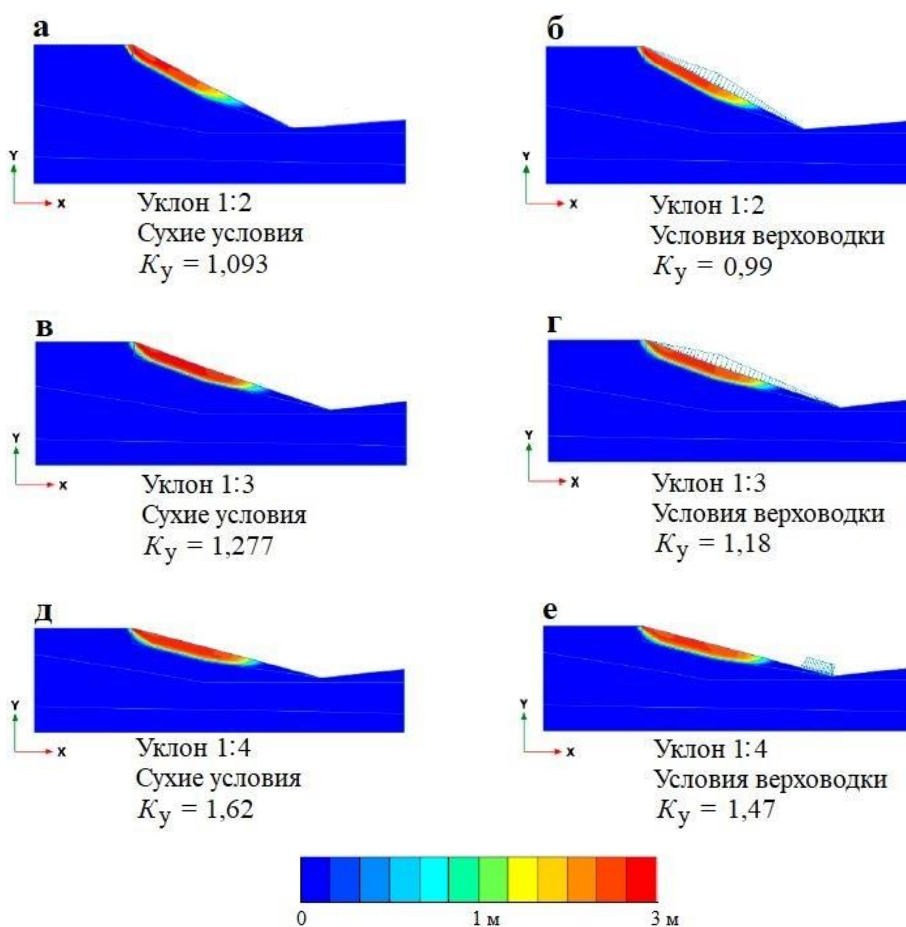


Рис. 3. Анализ устойчивости неукрепленного откоса

При моделировании наихудшего сценария следующие один за другим дожди образовали в верхнем слое грунта временную верховодку, которая обычно вызывает локальные разрушения пологих откосов в штате Миссисипи [2]. Ее глубина у бровки откоса составила 2,13 м. Чтобы иметь возможность аналогичным образом учитывать поровое давление внутри откоса, были определены условия образования верховодки. Для оценки коэффициента устойчивости ( $K_y$ ) откоса был проведен анализ методом снижения прочности с учетом этих условий. Результаты конечноэлементного анализа показали, что величины  $K_y$  неукрепленных откосов с уклонами 1:2, 1:3 и 1:4 в условиях верховодки уменьшились до 0,99; 1,18 и 1,47 соответственно (см. рис. 3). Уменьшенные коэффициенты устойчивости для уклонов 1:2 и 1:3 очень близки к условиям

разрушения откоса. Поэтому такие неукрепленные откосы с учетом предела прочности на сдвиг в верхнем слое грунта при наличии условий верховодки и были использованы для исследования вариантов их стабилизации нагелями из переработанного пластика.

Хан (Khan) с коллегами [20] изучали влияние воды на изменения прочности язусской глины на сдвиг с помощью лабораторных испытаний образцов этого грунта диаметром 76,2 мм и высотой 25,4 мм, отобранных из скважины на откосе насыпи шоссе в городе Джексон штата Миссисипи. Образцы были подвергнуты 3, 5 и 7 циклам замачивания-высушивания, а затем испытаны и исследованы для определения коэффициента пористости, микроструктуры, объемной деформации и прочности на сдвиг. В итоге Хан (Khan) с сотрудниками [20] сообщили об осевой деформации язусской глины при различных состояниях. Кроме того, также был проведен совместный анализ инфильтрации и устойчивости с учетом изменений давления всасывания неводонасыщенным грунтом и изменений его степени влажности. Смешанные уравнения деформации и фильтрации решались совместно в нестационарной постановке. С помощью конечноэлементного анализа были рассмотрены два периода выпадения дождевых осадков в количестве 126,2 мм (за 2 ч) и 271,7 мм (за 3 сут), что подтвердило влияние 3, 5 и 7 циклов верховодки в верхнем слое грунта. Коэффициент устойчивости ( $K_y$ ) откоса в результате уменьшился с 1,7 до 1,2 (для 126,2 мм осадков за 2 ч) и с 1,68 до 1,02 (для 271,7 мм осадков за 3 сут). По результатам численного анализа, наблюдалась критическая величина  $K_y$ , которая коррелировала с результатами лабораторных испытаний на седьмом цикле и объемом атмосферных осадков, влияющих как на изменения прочности на сдвиг, так и на водонасыщение.

Нобахаром (Nobahar) с коллегами [19] для оценки влияния выпадения дождевых осадков на откос, построенный из язусской глины в штате Миссисипи, был использован конечноэлементный фильтрационный анализ. В ходе исследования [19] были отобраны и испытаны репрезентативные образцы язусской глины из откоса насыпи автодороги в штате Миссисипи. Были использованы физические и механические свойства образцов грунта, определенные при более раннем исследовании Нобахара (Nobahar) с сотрудниками [16]: предел текучести 108, число пластичности 84, удельный вес сухого грунта (скелета грунта)  $12,8 \text{ кН/м}^3$ , относительный удельный вес 2,68, вертикальная проницаемость  $k_v = 0,034 \text{ см/с}$ . Для определения изменений сдвиговой прочности образцов проводились испытания на прямой сдвиг.

При исследовании, представленном в настоящей статье, предел прочности на сдвиг и остаточная прочность определялись на основе данных Нобахара (Nobahar) с коллегами [19] с помощью условия прочности Мора – Кулона: удельное сцепление получилось равным 10,8 кПа, а угол внутреннего трения составил 18,6 град. Фильтрационный анализ был расширен для оценки влияния различной интенсивности и продолжительности дождя на основе ряда частичной обеспеченности, основанного на так называемой кривой интенсивности-продолжительности-частоты дождевых осадков (математической функции, связывающей интенсивность осадков с их продолжительностью и частотой возникновения). Подробности фильтрационного анализа будут представлены в следующем разделе. При параметрическом исследовании использовался 100-летний период для указанного ряда на основе «Атласа Национального управления океанических и атмосферных исследований Министерства торговли США 2014 года для города Джексон (штат Миссисипи)». На основе данных этого атласа и вышеупомянутой кривой «интенсивности-продолжительности-частоты» было выбрано разное количество дождевых осадков (70,8 и 271,7 мм) с разной продолжительностью (от 2 ч до 3 сут).

Чтобы выполнить анализ результатов совместного фильтрационно-деформационного расчета, были рассмотрены различные варианты задания общего количества осадков (от 70,8 до 312,4 мм). Принимая, что дожди продолжались 0,5; 1; 2; 6; 12; 24 и 72 ч, для каждой интенсивности осадков оценивалась инфильтрация в верхний слой грунта, слагающего откос. В качестве фильтрационной модели была выбрана модель Ван Генухтена (Van Genuchten). Использовалась кривая водоудерживающей способности (Soil Water Retention Curve – SWRC) язусской глины, разработанная Нобахаром (Nobahar) с коллегами [17] для штата Миссисипи.



Во время численного анализа применялись подгоняемые параметры Ван Генухтена (Van Genuchten) для этого грунта. (Программа PLAXIS позволяет выполнять совместные фильтрационно-деформационные расчеты в нестационарном режиме, т. е. во времени с заданными граничными условиями, соответствующими периодичности, времени и количеству атмосферных осадков. При этом гидравлическая модель Ван Генухтена обеспечивает возможность расчета увлажнения и высыхания грунта в зависимости от заданных граничных условий, а расчет эффективных напряжений по теории Бишопа позволяет учесть изменения прочности при увлажнении. – **Ред.**)

### Исследованные конфигурации системы нагельного крепления откоса

Как уже упоминалось, в настоящей работе изучаются эффективность и безопасность укрепления откоса, сложенного с поверхности язууской глиной, с использованием нагелей из переработанного пластика.

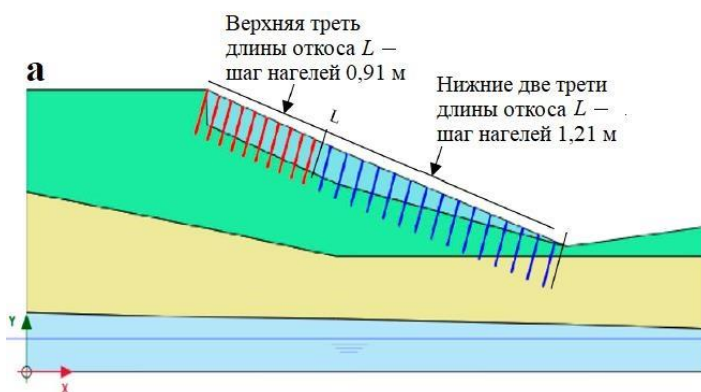
Нагель из переработанного пластика моделируется как плитный элемент. Всего было рассмотрено шесть различных конфигураций системы нагельного крепления откоса для каждого уклона [11] – А, Б, В, Г, Д и Е.

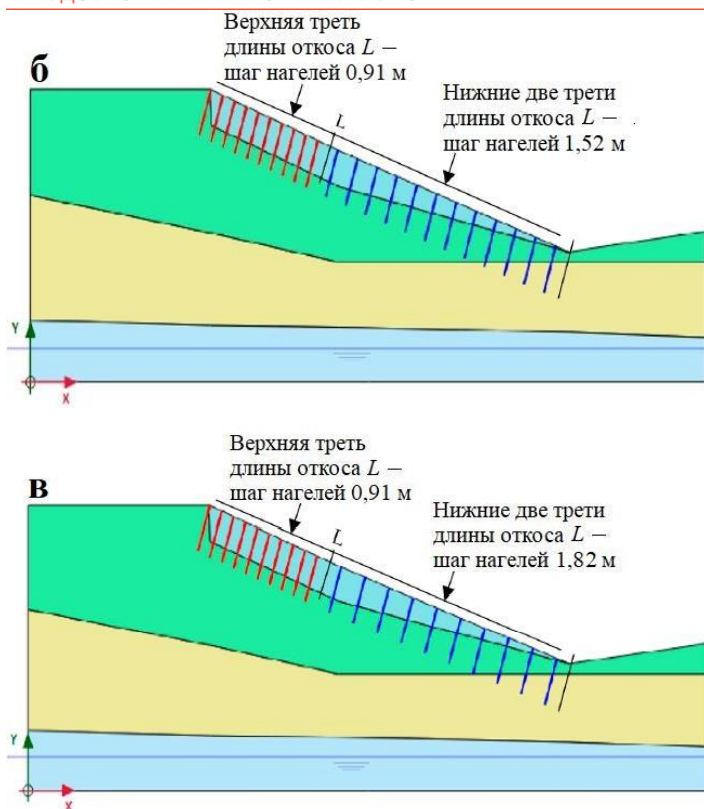
Конфигурации А, Б и В были смоделированы с равномерным шагом НПП по всему откосу, равным 0,91; 1,21 и 1,52 м соответственно (таблица 2).

В конфигурациях Г, Д и Е использовались меняющиеся шаги НПП. Напомним, что в этих случаях откос с тем или иным уклоном условно делился на верхнюю (1/3 длины откоса от его бровки) и нижнюю (оставшиеся 2/3 длины откоса) части. В верхней части шаг все время составлял 0,91 м. А в нижней части рассматривались шаги 1,21; 1,52 и 1,82 м (таблица 2, рис. 4)

Таблица 2. Матрица для численного моделирования

Уклон	Размещение нагелей (конфигурация)	Шаг нагелей по всей длине откоса, м	Шаг нагелей в верхней трети длины откоса, м	Шаг нагелей в нижней трети длины откоса, м
1:2; 1:3 м 1:4	А	0,91	-	-
	Б	1,22	-	-
	В	1,52	-	-
	Г	-	0,91	1,22
	Д	-	0,91	1,52
	Е	-	0,91	1,82





**Рис. 4.** Размещение нагелей из переработанного пластика (НПП) в верхней и нижней частях склона для случаев с изменяющимся шагом нагелей: а – конфигурация Г; б – конфигурация Д; в – конфигурация Е

### Анализ устойчивости укрепленного откоса

Коэффициент устойчивости ( $K_y$ ) откоса был оценен с использованием метода снижения прочности. Результаты конечноэлементного анализа с учетом условий верховодки показаны на рисунке 5 и в таблице 3.

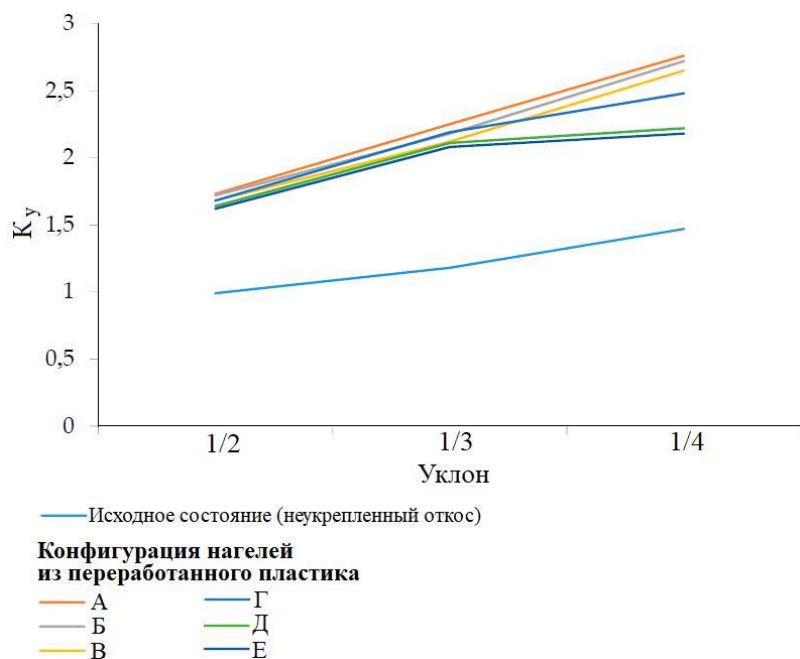


Рис. 5. Зависимости коэффициентов устойчивости ( $K_y$ ) откоса от его уклона для различных конфигураций системы нагельного крепления

Таблица 3. Коэффициенты устойчивости ( $K_y$ ) откосов с разными уклонами для различных шагов армирующих нагелей из переработанного пластика

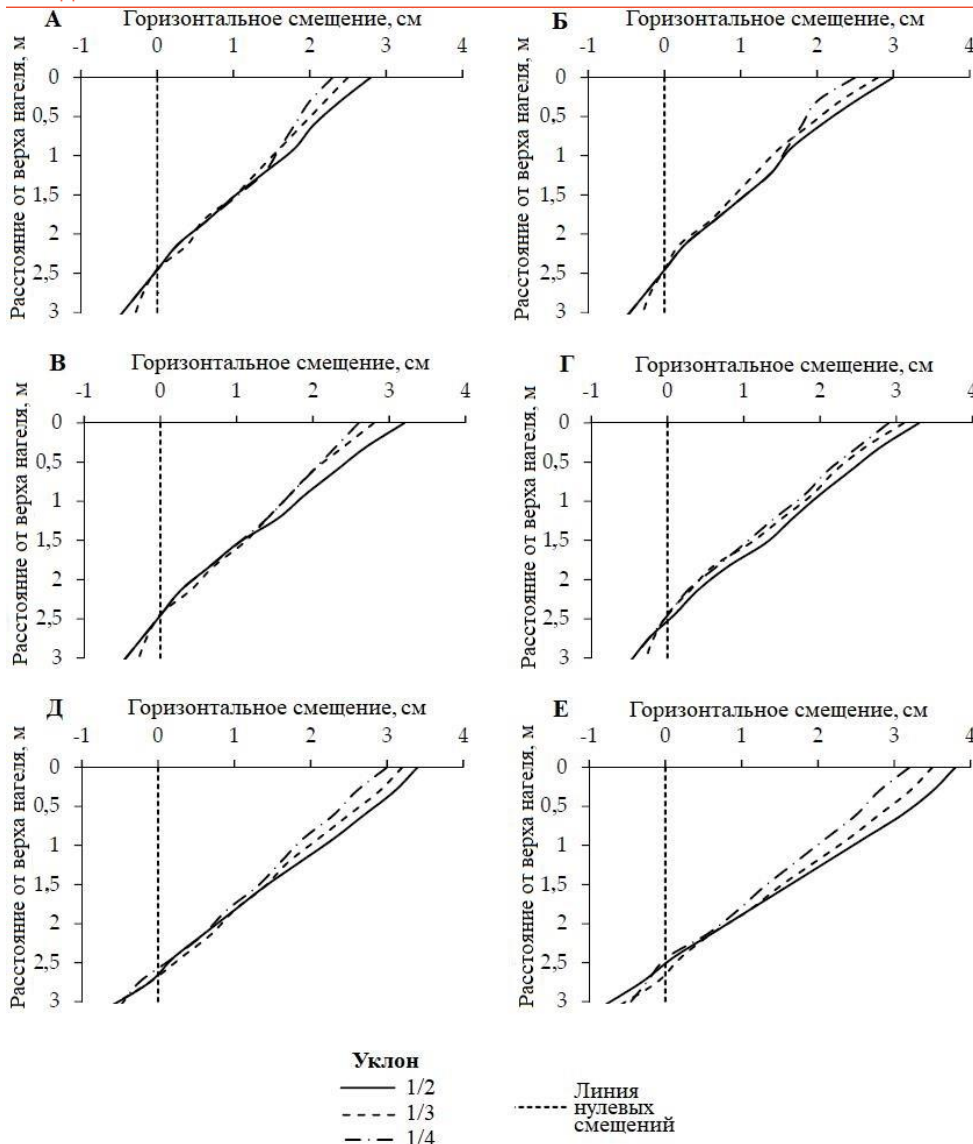
Уклон	Исходн. $K_y$ (для неукр. откоса)	Конфигурация системы нагельного крепления откоса					
		А	Б	В	Г	Д	Е
		Шаг нагелей 0,91 м	Шаг нагелей 1,21 м	Шаг нагелей 1,52 м	Шаги нагелей 0,91 и 1,21 м	Шаги нагелей 0,91 и 1,52 м	Шаги нагелей 0,91 и 1,82 м
1:2	0,99	1,73	1,72	1,68	1,68	1,64	1,62
1:3	1,18	2,25	2,18	2,12	2,19	2,11	2,08
1:4	1,47	2,76	2,72	2,65	2,48	2,22	2,18

Эти результаты показывают, что значения  $K_y$  после укрепления откоса увеличились по сравнению с исходным состоянием от 0,99; 1,18 и 1,47 до величин более 1,5, что соответствует ряду государственных и федеральных требований к усилению откосов. Таким образом, все рассмотренные конфигурации НПП для всех рассмотренных уклонов обеспечили при моделировании достаточный запас устойчивости откоса, сложенного с поверхности язууской глиной.

### Деформирование бровки откоса насыпи автодороги

В PLAXIS 2D был выполнен анализ пластических деформаций рассматриваемого откоса. Его начальное состояние было смоделировано с учетом гравитационного нагружения (использовался вариант расчета начальной фазы – Gravity loading), что рекомендуется для негоризонтальных поверхностей, таких как склоны и откосы. Вначале рассчитывалось вертикальное напряжение, а затем горизонтальные напряжения в зависимости от коэффициента бокового давления грунта в состоянии покоя  $k_0$ . Позже был проведен анализ напряженно-деформированного состояния путем активации в модели нагелей из переработанного пластика.

Максимальные горизонтальные деформации НПП длиной 3,04 м у бровки при различных конфигурациях системы крепления представлены на рисунке 6. Графики горизонтальных смещений показали, что НПП испытывали вращательное движение, а также поступательное движение в основании, поскольку они не были достаточно заглублены. Эти смещения были аналогичны смещениям коротких свай, которые недостаточно хорошо зафиксированы в грунте, слагающем склон. Следует отметить, что глубина слабого грунта при анализе методом конечных элементов составила 2,13 м. В результате нагели длиной 3,04 м только на 1/3 своей длины были заглублены в более жесткое основание. Однако деформирование откоса все же было незначительным. Отметим, что деформации средней и нижней его частей были меньше по сравнению с верхней частью, поэтому здесь не представлены результаты их оценки.



**Рис. 6.** Горизонтальные смещения нагелей из переработанного пластика на бровке откоса насыпи автодороги для конфигураций систем нагельного крепления А, Б, В, Г, Д и Е (см. рис. 4, табл. 2, 3)

По результатам анализа пластических деформаций, равномерные шаги нагелей 0,91 м (конфигурация А), 1,21 м (конфигурация Б) и 1,52 м (конфигурация В) обеспечили достаточное сопротивление смещениям на бровке откоса с уклоном 1:2.

Однако при разных шагах НПП в верхней трети и нижних двух третях откоса (0,91/1,21 м; 0,91/1,52 м; 0,91/1,83 м для конфигураций Г, Д и Е соответственно) горизонтальные смещения нагелей в верхней части были больше, чем в случаях А, Б и В, особенно для самого большого уклона 1:2 (поэтому для него не рекомендуется использовать конфигурации Г, Д и Е).

Для всех конфигураций системы нагельного крепления (А–Е, см. рис. 4, табл. 2, 3) наблюдались схожие тенденции смещений бровки откоса при уклонах 1:3 и 1:4 – и эти смещения были небольшими и вполне приемлемыми. Кроме того, все конфигурации имели большой запас устойчивости при уклонах 1:3 и 1:4 (см. табл. 3). Поскольку при изменении шага НПП от 0,91 м в верхней части до 1,21; 1,52 и 1,82 м в нижней требуется все меньше нагелей для укрепления откоса, то и стоимость его ремонта будет все меньше. Следовательно, конфигурации Г, Д и Е подходят для уклонов 1:3 и 1:4.

## Выводы

Пологие откосы насыпей шоссе, построенные с поверхности из набухающей глины реки Язу, типичны для штата Миссисипи (США). Полезным методом для укрепления таких откосов является установка на них нагелей из переработанного пластика (НПП). В исследовании, представленном в настоящей статье, численно анализировались устойчивость и деформирование откосов с уклонами 1:2, 1:3 и 1:4 при различных конфигурациях систем нагельного крепления. Основной целью была оценка применимости НПП в язуской глине. На основе выполненного анализа в конечноэлементном программном комплексе PLAXIS 2D можно сделать следующие выводы.

1. НПП обеспечили сопротивление грунта откоса смещениям и запас устойчивости. Поскольку были исследованы нагели длиной 3,04 м, все они работали аналогично коротким сваям, устанавливаемым для повышения стабильности откосов и склонов.

2. При самом крутом уклоне (1:2) равномерный шаг НПП (при конфигурациях А, Б, В – см. таблицу 3) обеспечил хороший запас устойчивости откоса и совсем небольшие деформации его бровки. Разные шаги НПП в верхней трети и нижних двух третях откоса (для конфигураций Г, Д, Е – см. таблицу 3) тоже дали достаточно высокие коэффициенты устойчивости, но заметно более высокие деформации бровки откоса. Поэтому для уклона 1:2 лучше всего подходят рассмотренные однородные шаги нагелей.

3. При уклонах 1:3 и 1:4 шаги НПП в верхней части откоса оказали значительное влияние на его деформации. При меньшем расстоянии между нагелями в верхней части деформирование бровки было низким, а влияние шага НПП в нижней части не было значительным в отношении безопасности, хотя с увеличением шага в нижней части запас устойчивости уменьшался. И все же в целом разные интервалы между нагелями в верхней и нижней частях откоса (для конфигураций Г, Д, Е) дали примерно такую же эффективность работы системы крепления, как и равномерный шаг НПП (для конфигураций А, Б, В). А поскольку при увеличении шага нужно меньшее количество нагелей и требуется меньше затрат на строительство, то для уклонов 1:3 и 1:4 желательно использовать конфигурации с большими (из исследованных) шагами между нагелями в нижних двух третях откоса.

*Это исследование было финансово поддержано Министерством транспорта США (грантом № DTRT13-G-UTC50). Работа проводилась под эгидой Исследовательского и образовательного центра морского транспорта Университета Арканзаса. Авторы выражают благодарность Министерству транспорта США. Полученные данные, выводы и рекомендации, изложенные в этой статье, принадлежат авторам и не обязательно выражают точку зрения Министерства транспорта.*

## Источник для адаптированного перевода

Khan M.S., Nobahar M., Ivoke J. Numerical investigation of slope stabilization using recycled plastic pins in Yazoo clay // Infrastructures. Special Issue “Geomaterials for Transportation Infrastructures”. MDPI, 2021. Vol. 6. Issue 3. P. 47. URL: [mdpi.com/2412-3811/6/3/47/html](https://www.mdpi.com/2412-3811/6/3/47/html).

## Список литературы, использованной авторами переведенной статьи

1. Khan M.S., Nobahar N., Ivoke J. Development of a design protocol: sustainable stabilization of slope using recycled plastic pin in Mississippi. Fayetteville, AR, USA: Maritime Transportation Research and Education Center (MarTREC), University of Arkansas, 2017.
2. Khan M.S., Nobahar M., Ivoke J., Amini F. Effect of rainfall on slope made of Yazoo clay soil in Mississippi // Proceedings of the Transportation Research Board (TRB) 97th Annual Meeting,

- Washington, DC, USA, 7–11 January 2018. Washington, DC, USA: The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, 2018. P. 18-02964. Accession Number 01657868.
3. Day R.W., Axten G.W. Surficial stability of compacted clay slopes // *J. Geophys. Eng.* 1989. Vol. 115. P. 577–580.
  4. Hossain J., Hossain M.S., Hoyos L.R. Effect of rainfall on the stability of unsaturated earth slope 518 constructed on expansive clay // *Geocongress*. San Diego, CA, USA: American Society of Civil Engineers, 2013.
  5. Loehr J.E., Fennessey T.W., Bowders J.J. Stabilization of surficial slides using recycled plastic reinforcement // *Transportation Research Record – 1989*. Washington, DC, USA: Transportation Research Board, 2007.
  6. Longarini N., Crespi P., Zucca M., Giordano N., Silvestro G. The advantages of fly ash use in concrete structures // *Inżynieria Mineralna*. 2014. Vol. 15. P. 141–145.
  7. Hossain M.S., Kibria G., Khan M.S., Hossain J., Taufiq T. Effects of backfill soil on the expansive movement of MSE wall // *J. Perform. Constr. Facil.* 2012. Vol. 26. P. 793–802.
  8. Rahimi A., Rahardjo H., Leong E.C. Effect of hydraulic properties of soil on rainfall-induced slope failure // *Eng. Geol.* 2010. Vol. 114. P. 135–143.
  9. Conte E., Troncone A. Simplified approach for the analysis of rainfall-induced shallow landslides // *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2011. Vol. 138. P. 398–406.
  10. Tiwari B., Upadhyaya S. Influence of antecedent rainfall on stability of slopes // *Proceedings of the Geo-Congress 2014*, Atlanta, GA, USA, 23–26 February 2014. P. 3243–3251.
  11. Damiano E., Mercogliano P. Potential effects of climate change on slope stability in unsaturated pyroclastic soils // *Landslide Science and Practice*. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2013. P. 15–25.
  12. Khan M.S., Hossain M.S., Ahmed A., Faysal M. Investigation of a shallow slope failure on expansive clay in Texas // *Eng. Geol.* 2016. Vol. 219. P. 118–129.
  13. Hossain S., Ahmed A., Khan M.S., Aramoon A., Thian B. Expansive subgrade behavior on a state highway in North Texas // *Proceedings of the Geotechnical and Structural Engineering Geo-Congress – 2016*, Phoenix, AZ, USA, 14–17 February 2016.
  14. Wright S.G. Evaluation of soil shear strengths for slope and retaining wall stability analyses with emphasis on high plasticity clays. Washington, DC, USA: Federal Highway Administration, 2005. FHWA/TX-06/5-1874-01-1.
  15. Zornberg J.G., Kuhn J., Wright S. Determination of field suction values, hydraulic properties and shear strength in high PI clays: Research Report 0-5202-1. Austin, TX, USA: Center for Transportation Research, the University of Texas at Austin, 2007.
  16. Skempton A.W. Slope stability of cuttings in brown London clay // *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Japan, 6–11 May 1984. Vol. 3. P. 261–270.
  17. Nobahar M., Khan M.S., Ivoke J. Combined effect of rainfall and shear strength on the stability of highway embankments made of Yazoo clay in Mississippi // *Geotech. Geol. Eng.* 2020. Vol. 38. P. 2787–2802.
  18. Zucca M., Valente M. On the limitation of shallow multi-propped underground structures embedded in granular soils // *Eng. Struct.* 2020. Vol. 211. P. 110497.
  19. Nobahar M., Khan M.S., Ivoke J., Amini F. Impact of rainfall variation on slope made of expansive Yazoo clay soil in Mississippi // *Transp. Infrastruct. Geotechnol.* 2019, Vol. 6. P. 318–336.
  20. Khan M.S., Ivoke J., Nobahar M. Coupled effect of wet-dry cycles and rainfall on highway slope made of Yazoo clay // *Geosciences*. 2019. Vol. 9. P. 341.