

**УДК 625.7/.8**

**Савенко В. Я.**, д-р техн. наук, **Хаджи Р.**, д-р техн. наук, **Дахуа Л.**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ НА МЕТОДАМИ ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ И КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**Аннотация:** В статье рассмотрен случай устойчивости участка автомагистрали А1 (восток-запад) в Алжире. Настоящее исследование имеет целью оценку стабилизирующего эффекта четырех вариантов усиления, а именно: со слоями нетканого геотекстильного материала; подпорной стенки; сваи и предварительно напряженные анкеры. Авторами выполнено сравнение результатов методами предельного равновесия и конечных элементов всех этих комбинаций для выбора наиболее эффективного укрепления.

**Ключевые слова:** устойчивость откоса, геотекстиль, метод конечных элементов.

**УДК 625.7/.8**

**Савенко В. Я.**, д-р техн. наук, **Хаджі Р.**, д-р техн. наук, **Дахуа Л.**

## **ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ УКОСІВ НА МЕТОДАМИ ГРАНИЧНОЇ РІВНОВАГИ І КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

**Анотація:** У статті розглянуто випадок стійкості ділянки автомагістралі А1 (схід-захід) в Алжирі. Це дослідження має на меті оцінку стабілізуючого ефекту чотирьох варіантів посилення, а саме: з шарами нетканого геотекстильного матеріалу; підпірної стінки; палі і попередньо напружені анкери. Авторами виконано порівняння результатів методами граничної рівноваги і кінцевих елементів всіх цих комбінацій для вибору найбільш ефективного укріплення.

**Ключові слова:** стійкість укосу, геотекстиль, метод кінцевих елементів.

UDC 625.7/.8

**Savenko V. Ya.**, Dr. Tech. Sci., **Hadzhi R.**, Dr. Tech. Sci., **Dahua I.**

## **INVESTIGATION OF SLOPES STABILITY IN THE METHODS OF LIMIT EQUILIBRIUM AND FINITE ELEMENTS**

**Abstract:** The article deals with the case of stability of the highway section A1 (east-west) in Algeria. The present study aims to evaluate the stabilizing effect of the four amplification options, namely: with layers of non-woven geotextile material; Retaining wall; Piles and prestressed anchors. The authors compared the results of all these combinations with the methods of limiting equilibrium and finite elements for choosing the most effective strengthening.

**Key words:** slope stability, geotextile, finite element method.

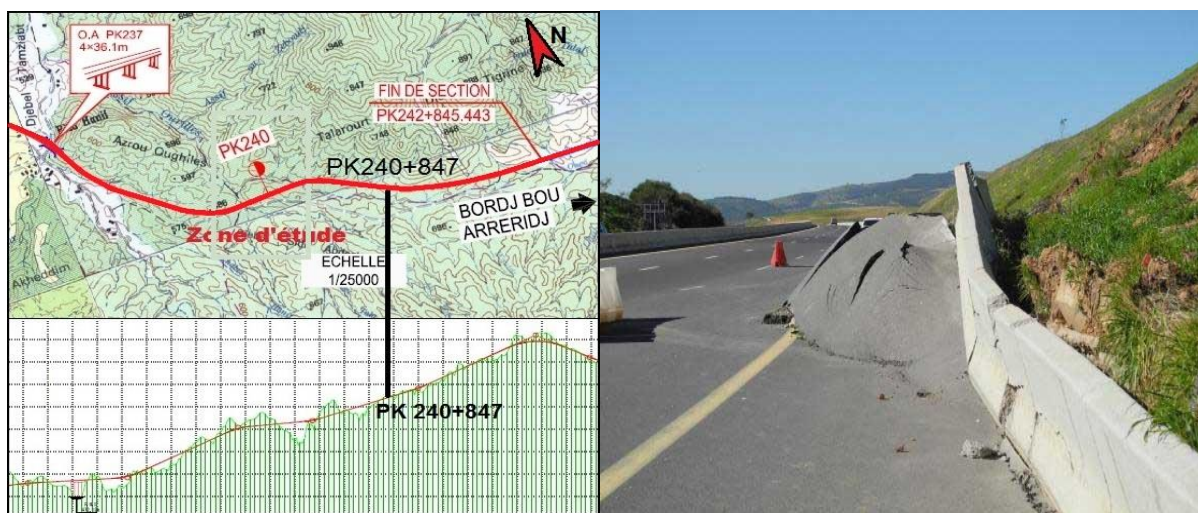
### **Постановка задачи**

Учитывая амбициозные цели Алжира в своей новой стратегии, транспортная инфраструктура являются основным фактором в успехе развитии страны. Однако на отдельных участках автодорожных и железнодорожных насыпей возникают разрушения на уровне их основы и откосов (рис.1, а, б). Область исследования находится в городе Буира на ПК 240 + 847 автомагистрали A1. Первые сдвиги появились в виде продольных трещин на дороге длиной около 200 м с раскрытием в несколько сантиметров. Объем грунта, участвующий в оползне оценивается в 300.000 м<sup>3</sup>. Обследования показали, что грунт состоит из гравелистых глин, покрытых слоем выветрелого. Анализ устойчивости по методу Бишопа (Geoslope/W) показал что поверхность скольжения проходит через подошву откоса. Наиболее вероятными причинами являются геоморфологический характер местности, наличие воды и нагрузки в верхней части откоса. Настоящее исследование имеет целью оценить стабилизирующий эффект четырех вариантов усиления, а именно: со слоями нетканого геотекстильного материала, подпорная стенка, сваи и предварительно напряженные анкеры.

### **Изложение основного материала**

Исследование проводилось на участке автомагистрали A1 (Восток-Запад) с использованием слоев геотекстиля для укрепления насыпи. Изучаемые сдвиги

грунта произошли на ПК (240+847). Согласно выполненному технико-экономическому анализу подтверждено что решение путем включения слоев геотекстиля VidimS72 является наиболее выгодным, особенно в случае воздействий больших нагрузок на дорожную конструкцию [1, 2]. В научной литературе отмечается, что грунт может быть усилен геосинтетическими прослойками, волокнами, георешетками и т.д. [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10].



а) б)  
Рисунок 1 – Общий вид рельефа местности (а), сдвиговые выпирания (б)

Рассматриваемый участок расположен в горной местности, крутизна природного откоса между  $20^{\circ}$  и  $35^{\circ}$ . Высота над уровнем моря колеблется от 530m до 660m, а разница в отметках – между 20m и 60m. Изучаемая местность покрыта слоем илистых пород, толщиной около 5m. Коренные породы трещиноватые, ширина трещины составляет менее 1 мм с глубиной от 20 мм до 100 мм.

Порода относительно мягкая, ее характеристики могут ухудшиться и уменьшиться при контакте с водой. В соответствии с Алжирскими сейсмическими нормами "R.P.A./2003", область исследования классифицируется как зона (II-2), то есть средней сейсмичности. Коэффициент горизонтального ускорения  $A = 0,25g$ .

**Геологические и геотехнические характеристики:** профиль имеет средний уклон  $15^{\circ}$ . Слои грунта состоят из насыпи толщиной 5m, затем слой пластичной глины, толщиной 5m, ниже – слой мергеля сильно выветлого превышает 30 м. Грутовые воды залегают на переменной глубине, в среднем около 9,5 м с тенденцией стока в направлении откоса. Динамические тесты

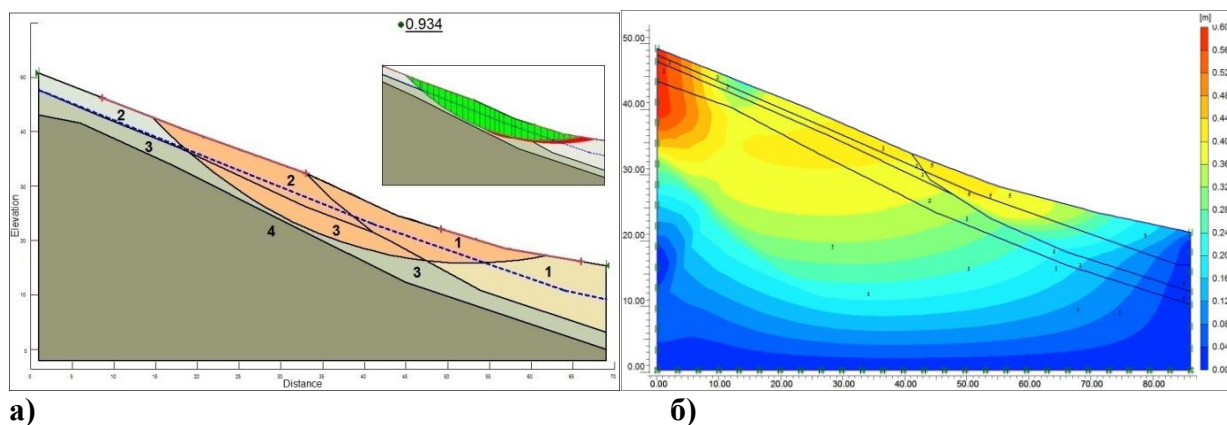
пенетрометра показывают, что поверхностный слой грунта рыхлый. Геотехнические и упругие параметры были определены с помощью тестов сдвига в коробке CASAGRANDE (не дренируемые условия) и сжимающих испытаний на прочность, выполняемых в лаборатории (Таблица 1).

**Таблица 1** – Механические свойства изучаемого откоса

N°	Слой	$\gamma_h$ (KN/m <sup>3</sup> )	C (kPa)	$\phi$ (°)	E (kPa)	$\nu$
1	илистые породы	21,5	5	25	12000	0.30
2	Песчаная глина	19	16	18	15000	0.32
3	Мергель полностью выветрелый	20	25	20	45000	0.35
4	Мергель выветрелый	21,4	30	25	95000	0.36

**3. Анализ устойчивости скольжения откоса** Для исследования устойчивости на скольжение поперечного сечения ПК240+847 мы использовали метод Бишопа, принимая круговые поверхности скольжения. Расчет стабильности проводили с использованием программного обеспечения Geostudio-Slope/W-2012. Выбранные коэффициенты безопасности: долгосрочный -  $F \geq 1,5$  и  $F \geq 1,2$  для случайной комбинации (относящийся к явлениям землетрясения). Землетрясение принимается в расчет через статическое эквиваленты. Горизонтальные и вертикальные коэффициенты:  $K_h = 0,5A$  и  $K_v = \pm 0,5K_h$ .

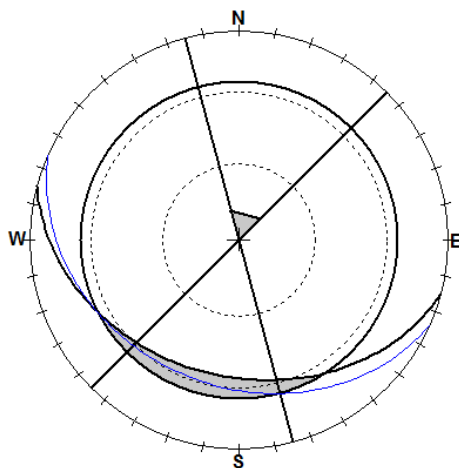
Результаты оценки равновесия указывают, что откос не является устойчивым. Расчетный коэффициент безопасности меньше, чем 1 ( $Fs = 0.932$  по методом Бишопа,  $Fs = 0.934$  по методом Morgenштерна и Приеса Morgenstern and Price,  $Fs = 0.910$  по методу Ямбу,  $Fs = 0.916$  по традиционному методу. Поверхность скольжения проходит вдоль границы раздела мергеля полностью выветлого (рис. 2.а). Сдвиг захватывает площадь около 4000 м<sup>2</sup> и объем около 300000 м<sup>3</sup>. Эти данные дают основания предположить, что основной причиной скольжения, кроме местных геоморфологических и геотехнических условий участка, является наличие грунтовых вод. Для этого же профиля численное моделирование с использованием компьютерной программы по методу конечных элементов (МКЭ) подтверждает результаты, полученные с помощью метода предельного равновесия. Перемещение от 0,4 м до 0,6 м наблюдается вдоль неустойчивого сечения (2.б).



**Рисунок 2** – Оценка устойчивости поперечного сечения ПК 240+847 (Geoslope) (а); общее перемещение (МКЭ) изучаемого откоса на ПК 240+847 (Plaxis) (б)

Мы изучили влияние уклона осадочного слоя на равновесие откоса в соответствии с комбинацией структуры фасадной стороны, полученной с помощью стереографической проекции, а также определили значения благоприятного или неблагоприятного уклона осадочного слоя, а также риск возникновения локальных сдвигов.

Наиболее неблагоприятным (по стереографической проекции) считается уклон изучаемого откоса параллельно к фасадной стороне. То есть локальная устойчивость откоса не гарантируется (рис.3).



**Рисунок 3** – Стереографическая проекция откоса на ПК240 + 847

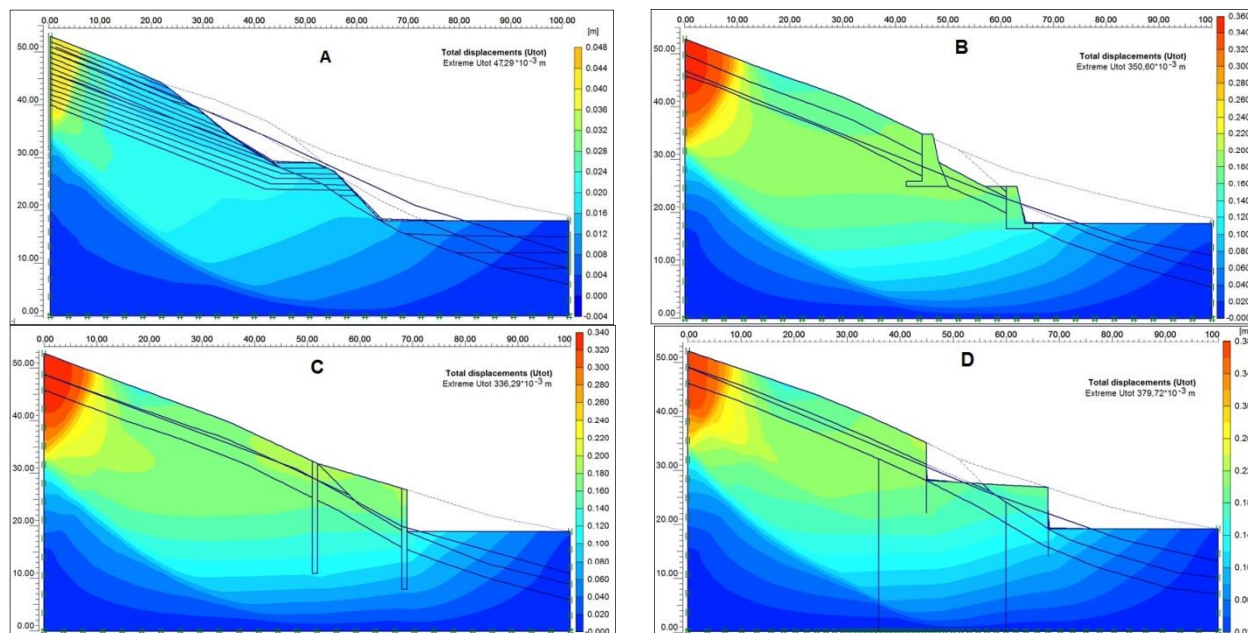
**4. Повышение устойчивости путем укрепления.** Метод конечных элементов, безусловно, является наиболее комплексным подходом к изучению стабильности откоса с использованием анкерных стержней, подпорной стенки, геотекстильных прослоев, свай, так как этот метод одновременно рассчитывает и реакцию грунтовых материалов и устойчивость откосов. Результаты этого моделирования выражаются посредством изображения полного перемещения,

сдвиговых напряжений и деформации сдвига а также точек пластической деформации. Исходные условия: перемещения равны нулю, а начальные напряжения равны тем напряжениям, которые генерируются в грунте под действием собственного веса. В этом случае применяется упруго-пластический закон Мора-Кулона (5 параметров дилатансии  $\psi = \varphi - 30$ ). Анализ поведения откоса берется в дренированном режиме. Двумерная модель рассчитывается при плоских деформациях в поперечном сечении откоса. Он состоит из 4344 треугольных элементов с 15 узлами и 12 точками Гаусса для геотекстиля. В качестве геотекстиля использовались полотна типа VidimS72 из полимерных волокон с начальным введением в откос с интервалом 1 м. Для свай, диаметр принимается равным 1м на глубину 20м. Они расположены на расстоянии 2м друг от друга по ширине и на 17м в продольном направлении. Для распределение нагрузки поверх была установлена бетонная плита. Расчетное сопротивление бетона, используемого для свай составляет 35 МПа, тогда как модуль Юнга  $E = 36000$  МПа. Удельный вес используемого бетона составляет 25 кН /м<sup>3</sup>. Для гравитационных подпорных стен предложены размеры 3м X 8м. Поведение этих стен моделируются упругим, модуль Юнга  $E = 33000$  МПа, коэффициент Пуассона принимается равным 0,3. Номинальное сопротивление бетона 27 МПа. Укрепление анкерами добавляет удерживающие усилия прокалываемым грунтовым массам и, таким образом, изменяет нормальные напряжения и приводит к временной стабильности. Устройство анкерения состоит из 8 обычных арматурных стержней, наклонённых под углом 30° в направлении вверх по течению, по вертикали расстояние 3м, по горизонтали 8 м и закрепленные в грунте до 10 м. Они используются для передачи растягивающих усилий, приложенных к ним путем анкерения в структуру слоя мергеля. Перед установкой их предварительно растягивали при 100кН/м.

Эти четыре варианта укрепления насыпей представляют собой статическое моделирование с использованием программного обеспечения PLAXIS8.6. Эксплуатационные нагрузки от транспортных средств на дороге приняты равными 10 кН / м<sup>2</sup> и расположены на 1,50 м от края проезжей части.

**5. Результаты и обсуждение:** После изучения полученных результатов моделирования (2D) и графики перемещений, можно сделать некоторые замечания. Несмотря на то, что были выполнены различные моделирования, приведем только четыре деформированные конфигурации. Это – данные о деформациях (рис.4.а, б, в, г) и (рис.5.а, б, в, г), также схемы (рис.6.а, б, в, г),

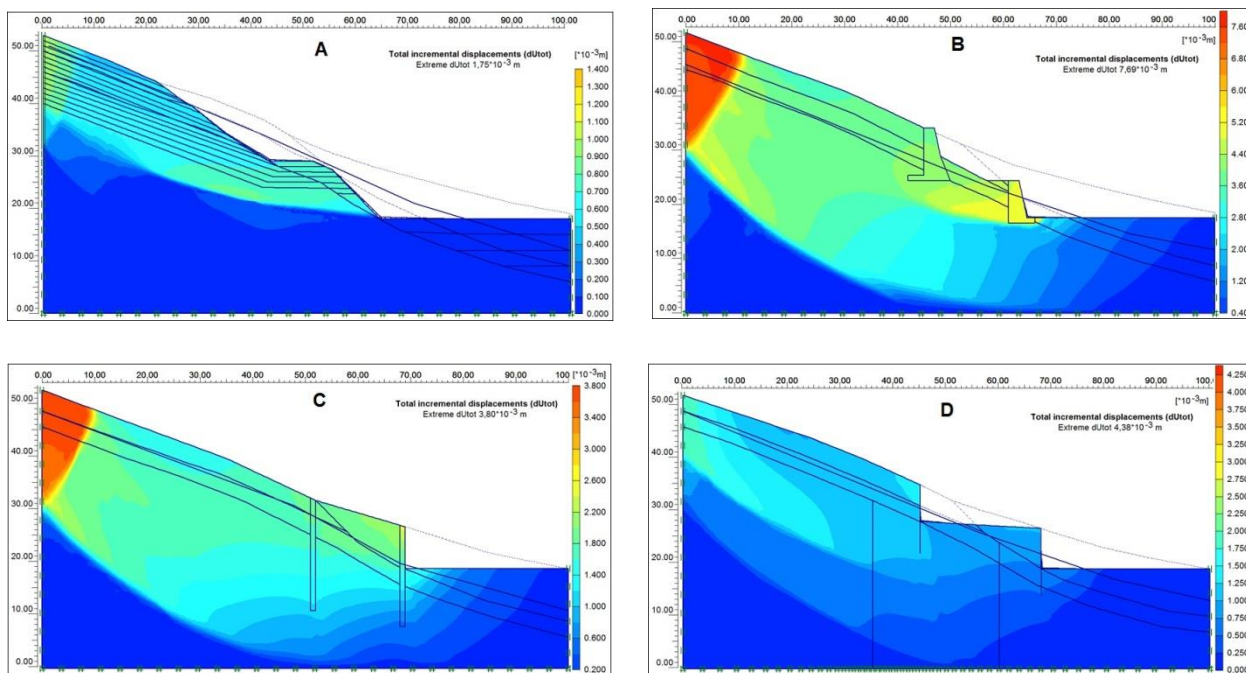
представляющие относительные касательные напряжения. Несмотря на то, что здесь не приведен промежуточный расчёт, тем не менее он показал соответствие максимальных значений перемещений и напряжений.



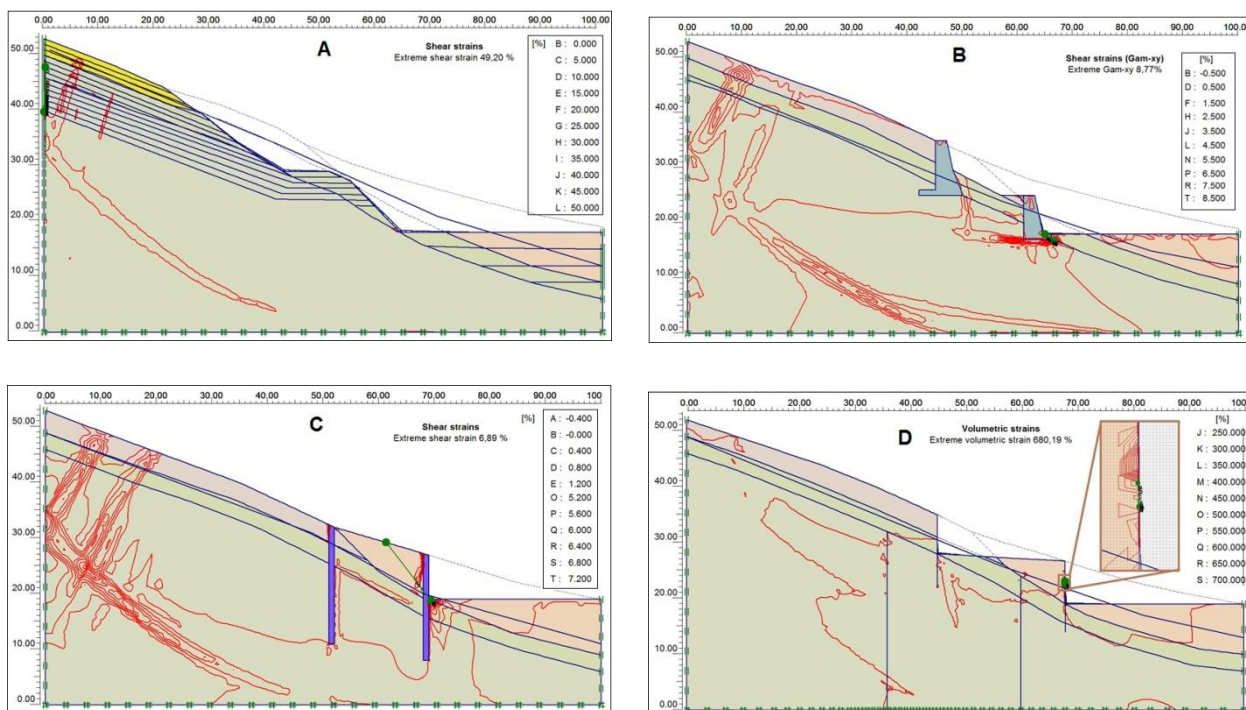
**Рисунок 4** – а) конфигурация общих перемещений откосов, армированных геотекстилем; б) конфигурация общих перемещений подпорной стенки-откоса; в) конфигурация общих перемещений свай-откоса; д) конфигурация общих перемещений откоса с анкерными стержнями.

Заметим, что общее максимальное перемещение составляет  $47,29 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  для конфигурации откосов усиленных геотекстилем (рис.4.а) ; оно увеличивается до  $350,60 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  для откосов, поддерживаемых подпорными стенками (рис.4.б); и до  $336,29 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  для конфигурации склона армированного сваями (рис.4.в); и достигает  $379,72 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  для конфигурации склона, поддерживаемого анкерными стержнями (рис.4.д). Полученные результаты экстремальных перемещений и/или допустимых для конфигурации откосов, армированных геотекстильными материалами. Величины находятся около  $350 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  и являются недопустимыми для строительства.

Предыдущие результаты дополняются полными приращениями перемещений, которые имеют допустимые значения ( $dU_{\text{tot}}=1,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ) для откоса усиленного геотекстилем (рис.6.а), в то время как для остальных трех конфигураций они достигают  $7,69 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ;  $3,80 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  и  $4,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  соответственно (рис.6. б, в, д). Эти значения считаются чрезмерными для обеспечения долгосрочной устойчивости изучаемого склона.



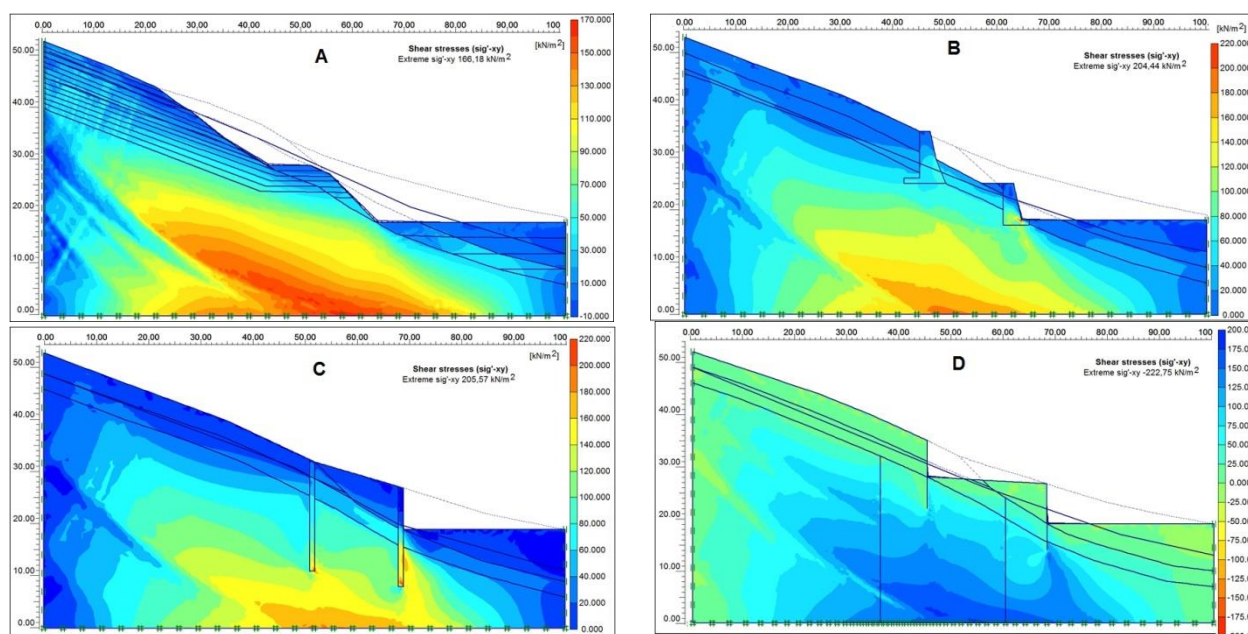
**Рисунок 5** – а) конфигурация приращений деформаций откосов, армированных геотекстилем; б) конфигурация приращений перемещений откосов, укрепленных подпорной стенкой; в) конфигурация приращений деформаций склона, укрепленного сваями д) конфигурация приращений перемещений склона с анкерными стержнями.



**Рисунок 6** – а) конфигурации деформаций растяжения откоса армированного геотекстилем; б) конфигурации деформаций растяжения откоса, укрепленного подпорной стенкой; в) конфигурации деформаций растяжения откоса, армированного сваями; д) конфигурации деформаций растяжения откоса с анкерными стержнями.



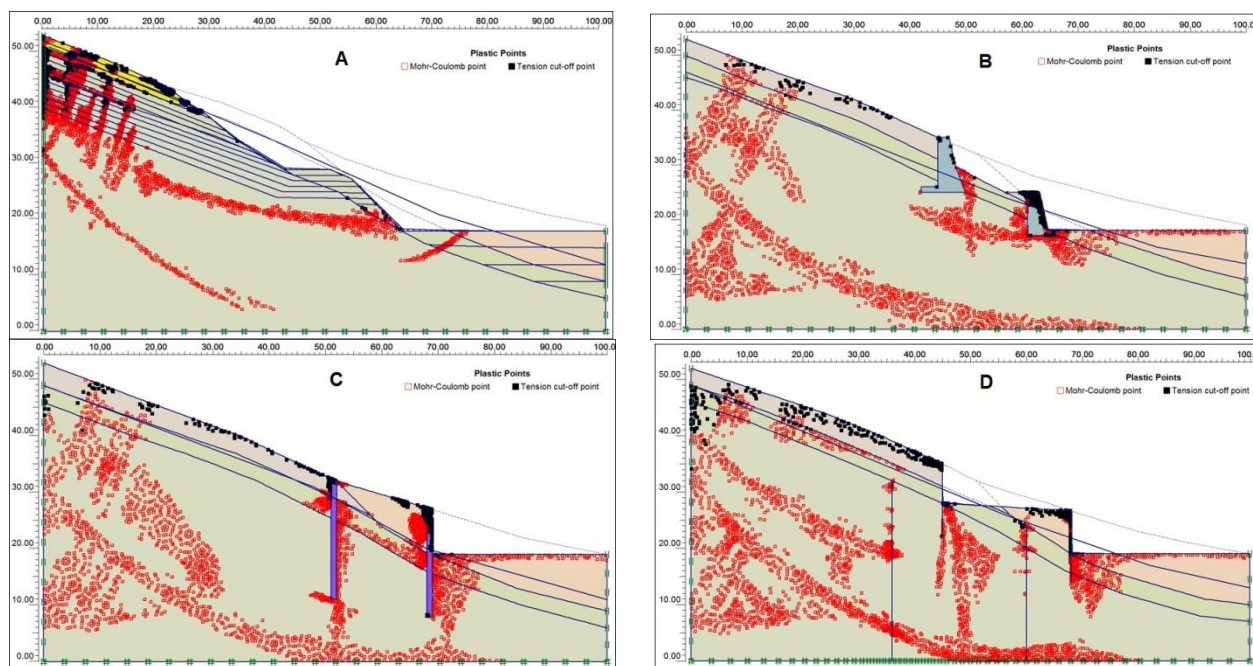
Деформации растяжения также имеют значения более благоприятные против сдвига для геотекстиля, чем в других конфигурациях. Из (рис.6.a.) видно, что геотекстильные прослойки смогли уменьшить силы сдвига вдоль откоса, в отличие от других конфигураций (рис.6. b, c, d). В случае укрепления с подпорной стеной, сваями и анкерными стержнями, касательные напряжения являются очень важными и развиваются по фасаду вниз по склону.



**Рисунок 7** – а) конфигурация касательных напряжений откоса армированного геотекстилем; б) конфигурация касательных напряжений откоса, укрепленного подпорной стенкой; в) конфигурация касательных напряжений откоса, армированного сваями; д) конфигурация касательных напряжений откоса с анкерными стержнями.

Касательные напряжения также имеют более допустимые значения против сдвига для геотекстиля порядка  $166.18 \text{ kN/m}^2$  (рис.7.a). Она достигает  $204.44 \text{ kN/m}^2$  в то время как для остальных трех конфигураций они достигают:  $205.57 \text{ kN/m}^2$  и  $222.75 \text{ kN/m}^2$  соответственно (рис.7.b, c, d). Следует отметить, что геотекстиль уменьшает напряжения сдвига и, как следствие, им соответствуют допустимые значения деформации.

Точки пластичности обозначаются как необратимые разрушения (Рис.8.a, b, c, d). Если они расположены близко к критической линии (предел сдвига от круга Мора-Кулона), значит они подвергаются малым деформациям, которые не всегда ясны. Если они выходят далеко за пределы сдвига, это значит деформации становятся более заметными. Сдвиговые точки пластичности концентрируются в верхней и нижней части склона. Сдвиговые точки пластичности, либо методом точек Мора-Кулона или методом точек прерывания напряжений, имеют более низкие значения для первого случая откоса, армированного геотекстилем.



**Рисунок 8** – а) конфигурации точек пластичности откоса армированного геотекстилем; б) конфигурации точек пластичности откоса, укрепленного подпорной стенкой; в) конфигурации точек пластичности откоса армированного сваями; д) конфигурации точек пластичности откоса с анкерными стержнями.

Остальные конфигурации дают относительно высокие значения деформации. Это связано с тем, что совокупность укрепления и геотекстиля является пассивным сооружением, обладает значительной прочностью на растяжение и высокой инерцией. При изменении расстояния между слоями, мы зафиксировал значительное изменение коэффициента запаса устойчивости и суммарных перемещений на основе метода конечных элементов МКЭ, (Таб.2).

**Таблица 2** – Обобщение результатов анализа.

расстояние (m)*10 <sup>-3</sup>	суммарный перемещений U <sub>tot</sub> (m)*10 <sup>-3</sup>	Сдвиговые напряжения sig'-xy kN/m <sup>2</sup>	Сдвиговые деформации (%)	коэффициента запаса (Fs)
200	06,55	29,21	-2	1,84
400	07,13	71,89	-2	1,71
600	08,17	93,78	-3	1,60
800	19,95	125,60	-3	1,46
1000	47.29	166,18	-5	1,12

### Заключение и рекомендации

Рассматривая средства и методы, доступные для повышения устойчивости откоса, были изучены четыре предложения для поддержки откоса по ПК (240 +

847) автомагістралі А1. Численний розрахунок методом кінцевих елементів показав, що насип, зміцнений геотекстилем забезпечує більшу стійкість порівняно з іншими пропозиціями. Якщо ми додамо переваги цього рішення порівняно з іншими пропозиціями, особливо за вартістю, кількістю використовуваних матеріалів, термінами виконання робіт, зручність реалізації – вибір очевидний. За винятком геотекстиля, очевидно, що зсувні напруження занадто високі в верхній частині відкосу і вздовж запропонованих підпорних споруд (підпорних стін, свай і попередньо напружених анкерів). Максимальні деформації розтягнення виникають в одних і тих же місцях, де ми бачимо первинне утворення тріщин. Вивчення впливу кількості і кроку армування геотекстильних шарів дозволило визначити модель найбільш стабільного відкосу з інтервалом армування не перевищуючим 1 м. Нарешті, за допомогою параметричного дослідження знайдено найкращий механізм для підвищення стійкості відкосу. Запропонована конструкція являє собою поєднання шарів геотекстильного матеріалу-підпорна стіна з інтервалом 0,8 м на глибину 10 м. З урахуванням технічних і фінансових обмежень, найбільш ефективним рішенням для забезпечення стійкості відкосу є використання геотекстильних прошарків.

### **Література**

1. Tang и др. 2007 Tang, C., Shi, T., Gao, W., Chen, F., Cai, Y., 2007. Strength and mechanical behavior of reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotxtiles and Geomembranes* 25 (3), 194-202.
2. Unnikrishnan и др. 2002 Unnikrishnan N., Rajagopal K., Krishnaswamy N.R. (2002). Behavior of reinforced clay under monotonic and cyclic loading. *Geotxtiles and Geomembranes* 20, pp. 117-133.
3. Ling и др. 1993. Ling, H.I., Tatsuoka, F., 1993. Laboratory evaluation of a nonwoven geotextile for reinforcing on site soil. *Proceeding of Geosynthetics* 93(2), 533-546.
4. Vercueil и Billet. 1997, Vercueil D, Billet P. (1997): « Study of the liquefaction resistance of saturated sand reinforced with geosynthetics», *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.16, pp.417-425.
5. Haeri и др. 2000, Haeri, S.M., Noorzad, R., Oskourouchi, A.M., 2000. Effect of geotextile reinforced on the mechanical behavior of sand. *Geotextiles and Geomembranes* 18, 385-402.

6. Boominathan и Hari 2002, Boominathan A, Hari S. (2002): « Liquefaction strength of fly ash reinforced with randomly distributed fibers», Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol.22, pp.1027-1033.

7. Wang и др. 2007 Wang, G-H., Sassa, K., Fukuoka, H., Tada, T., 2007. Experimental study on the shearing behavior of saturated silty soils based on ring-shear tests. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 133 (3), 310-333.

8. Houston и др. 2008, Houston, L.S., Perez-Garcia, N., Houston, W.N., 2008. Shear strength and shear induced volume change behavior of unsaturated soils from a triaxial test program. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 134 (11), 1619-1632.

9. Ministère des travaux publics (Algérie), 2006. Séminaire International sur la géotechnique et l'utilisation des géosynthétiques dans les infrastructures linéaires. 11-12 mars 2006, Alger, Algérie.

10. Ministère des travaux publics (Algérie), 2008. Colloque International sur l'utilisation des produits géosynthétiques. 17-18 novem

**Рецензенти:**

Гамеляк І.П., д-р техн. наук, Національний транспортний університет.

Балашова Ю.Б., канд. техн. наук, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури.

**Reviewers:**

Gameliak I.P., Dr. Tech. Sci., National Transport University.

Balashova Yu.B., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.), Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture.

Стаття надійшла до редакції: **15.03.2017 р.**