

Загоруйко Е., канд. техн. наук., доцент,
Ган А., канд. техн. наук., доцент,
Стовпник С., канд. техн. наук., доцент
(Национальный технический университет Украины «Киевский
политехнический институт имени Игоря Сикорского»)

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОЛЗНЕВОГО СКЛОНА УКРЕПЛЕННОГО ГРУНТОЦЕМЕНТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Предложен метод по повышению устойчивости склонов путём изменения прочностных характеристик грунтов, с помощью технологии струйной цементации. Определено влияние грунтоцементных элементов на напряжённо-деформированное состояние оползневого склона. Установлена зависимость коэффициента запаса устойчивости склона от высоты грунтоцементных элементов и расстояния между ними. Проведён анализ лабораторных исследований образцов, с содержанием элементов повышенной структурной прочности.

Ключевые слова: устойчивость склонов, зона пластических деформаций, струйная цементация, коэффициент запаса устойчивости.

We propose a method to improve the stability of slopes by changing the strength characteristics of the soil, using jet-grouting technology. The influence of grouting elements on the stress-strain state of the landslide slope. The dependence of the safety factor of the slope of the height-grouting elements and the distance between them. The analysis of laboratory tests of samples containing elements of increased structural strength.

Keywords: slope stability, the zone of plastic deformation, jet-grouting, the safety factor.

В инженерной практике известно много методов инженерной защиты от оползней, которые предусматривают закрепление оползневых склонов подпорными стенками, осушение водонасыщенных грунтов с помощью электроосмоса, выполнением искусственного замораживания грунтов, посадка растений на склонах и пр.

Одной из современных технологий которая в последние годы получает широкое применение в области геотехники является так называемая технология струйной цементации, за рубежом известна как «Jet-grouting method». Сущность технологии заключается в использовании энергии высоконапорной струи цементного раствора для разрушения и одновременного перемешивания грунта с цементным раствором в режиме «mix-in-place» (перемешивание на месте). После затвердевания раствора образуется новый материал – грунтобетон, обладающий высокими прочностными и деформационными характеристиками [3].

Устойчивость склонов обеспечивается путём повышения прочностных характеристик грунтов, за счёт создания упрочнённых зон по всей толще пластических деформаций в шахматном порядке, как по простиранию склона, так и по его падению, препятствуя таким образом образованию потенциальных поверхностей скольжения, которые могут возникнуть в этой толще, что в свою очередь повышает устойчивость склона. С использованием технологии струйной цементации (jet-grouting) взрыхлённый и перемешанный с водцементной смесью грунт схватывается и затвердевает превращаясь в грунтобетон высокой прочности и жёсткости. Закрепление грунтов склона выполняют в зоне пластических деформаций путём армирования грунтоцементными элементами. За счёт упрочнения структурного сцепления грунтобетона увеличивается сопротивление сдвигу всего массива. Грунтоцементные элементы выполняют не на всю глубину оползневой толщи склона, а лишь в пределах зоны пластических деформаций, мощность которой определяется путём применения современных программных комплексов, расчёт устойчивости в которых базируется на теории пластичности.

Рассмотрим эффективность предложенного метода на примере компьютерной модели склона (рис. 1). Исследования проведены численным методом с использованием пакета конечно-элементного анализа PLAXIS.

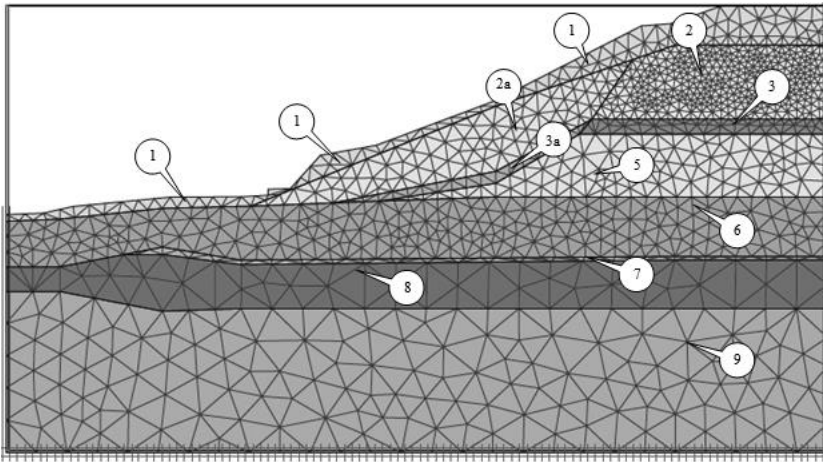


Рис. 1. Конечно-элементная модель грунтового массива

По данным инженерно-геологических изысканий выделено 9 инженерно-геологических элементов с соответствующими характеристиками:

ИГЭ-1 насыпной слой $\gamma = 16,9$ кН/м³, $c = 13$ кПа, $\varphi = 16^\circ$; ИГЭ-2: супесь лёссовидная, твёрдая $\gamma = 17,3$ кН/м³, $c = 35$ кПа, $\varphi = 22^\circ$, $E = 23$ МПа; ИГЭ-2а супесь лёссовидная, твёрдая $\gamma = 17,5$ кН/м³, $c = 28$ кПа, $\varphi = 17^\circ$, $E = 23$ МПа; ИГЭ-3: супесь, пластичная, пылеватая $\gamma = 18,0$ кН/м³, $c = 10$ кПа, $\varphi = 20^\circ$, $E = 16$ МПа; ИГЭ-3а: супесь, пластичная, пылеватая $\gamma = 18,0$ кН/м³, $c = 10$ кПа, $\varphi = 20^\circ$, $E = 16$ МПа; ИГЭ-4: суглинок, мягкопластичный $\gamma = 20,8$ кН/м³, $c = 13$ кПа, $\varphi = 20^\circ$, $E = 16$ МПа; ИГЭ-5: песок мелкий средней плотности $\gamma = 15,8$ кН/м³, $c = 5$ кПа, $\varphi = 27^\circ$, $E = 28$ МПа; ИГЭ-6 супесь, пластичная к текучей $\gamma = 17,4$ кН/м³, $c = 21$ кПа, $\varphi = 21^\circ$, $E = 15$ МПа; ИГЭ-7: суглинок, от мягкопластичного к тугопластичному $\gamma = 18,2$ кН/м³, $c = 45$ кПа, $\varphi = 19^\circ$, $E = 25$ МПа; ИГЭ-8: суглинок, от полутвёрдого до твёрдого $\gamma = 18,6$ кН/м³, $c = 41$ кПа, $\varphi = 22^\circ$, $E = 23$ МПа; ИГЭ-9: глина, твёрдая $\gamma = 18,9$ кН/м³, $c = 73$ кПа, $\varphi = 19^\circ$, $E = 33$ МПа.

Для определения влияния грунтоцементных элементов на коэффициент запаса устойчивости оползневого склона необходимо рассмотреть его напряжённо-деформированное состояние в естествен-

ных условиях и при увлажнении верхних слоёв грунта без воздействия внешних факторов.

Оценка запаса устойчивости склона может определяться как отношение фактической прочности грунта на сдвиг к прочности на сдвиг в предельном состоянии. Если в качестве условия предельного равновесия принято условие прочности Кулона – Мора, то коэффициент запаса устойчивости определяется выражением:

$$\xi = \frac{c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi}{c_r + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi_r}, \quad (1)$$

где c и φ – фактические прочностные характеристики грунтов в основании;

σ_n – фактическое нормальное напряжение;

c_r и φ_r – значение прочностных характеристик грунтов в предельном состоянии [1].

Для оценки запаса устойчивости в PLAXIS реализован метод Phi/c reduction (снижение φ , c), при котором выполняется пропорциональное снижение прочностных характеристик, пока не произойдёт разрушение. Устойчивость при этом определяется коэффициентом $\sum M_{sf}$

$$\sum M_{sf} = \frac{c}{c_r} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_r}, \quad (2)$$

На рисунке 2 (а) показаны изополя полных перемещений грунтового массива при возможном смещении, иллюстрирующие форму поверхности скольжения в склоне. Коэффициент запаса устойчивости в данном случае составляет 1,71. Максимальные значения общих деформаций грунта, в случае полного разрушения, составляют 32,25 м.

На следующем шаге эмитируем увлажнение всей верхней части склона и проверяем устойчивость склона в данных условиях. В результате замачивания значение коэффициента запаса устойчивости снижается до 1,07, но склон остаётся устойчивым. Максимальные значения общих деформаций грунта, в случае полного разрушения,

составляют 63,27 м., что почти в 2 раза больше чем при природной влажности. Величина деформаций является гипотетической и не имеет физического смысла, но позволяет получить общее представление о возможной оползневой поверхности. Результат моделирования показано на рисунке 2 (б).

Учитывая результаты, полученные на предыдущем шаге, задачей следующего есть – подбор оптимального расположения грунтоцементных элементов, выполненных по технологии струйной цементации в зоне пластических деформаций, и исследования изменения напряжённо-деформированного состояния оползневого склона от дискретного размещения грунтоцементных элементов.

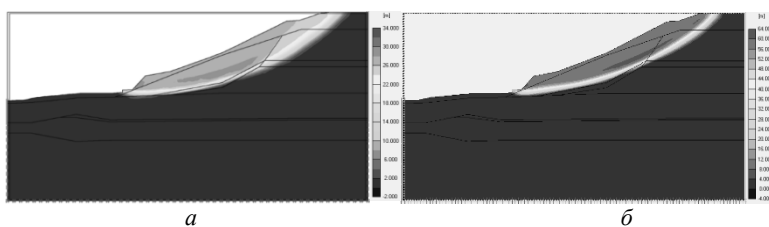


Рис. 2. Изополя полных перемещений грунтового массива при возможном смещении, в случае полного разрушения:
a – природные условия; *б* – водонасыщенном состоянии.

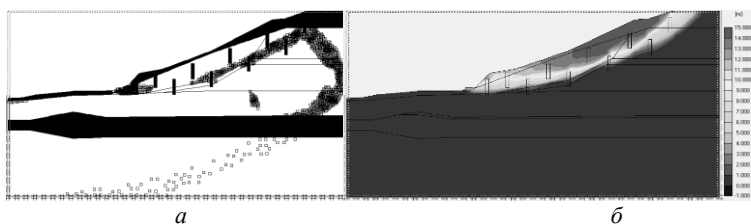


Рис. 3. *a* – дискретное расположение грунтоцементных элементов в зоне развития пластических деформаций грунтового массива; *б* – изополя полных перемещений грунтового массива при возможном смещении, в случае полного разрушения с расположенными грунтоцементными элементами

Сначала были проведены расчёты влияния расположения элементов между собой на склоне, то есть определении минимальные расстояния между ними с учётом целесообразности затрат материала-

лов. При этом необходимо учитывать исходное расположение зоны пластических деформаций, местонахождение которой определены на предыдущем этапе (рис. 3а). Эта задача последовательно решалась в нескольких вариантах, в каждом из них изменялось расстояние между элементами и их высота. На основе полученных данных расстояние между элементами назначено с учётом месторасположения и характера распространения локальных зон пластических деформаций. В данном случае оптимальное расстояние соответствует 6 м, что обусловлено положением толщи в которой могут возникнуть потенциальные поверхности скольжения. На рисунке 3(а) показан вариант дискретного расположения грунтоцементных элементов.

Дополнительное усиление оползневой зоны склона меняет сложившийся напряжённо-деформированное состояние от массовых сил и останавливает дальнейшее развитие деформаций в верхней части склона, приводит к изменению потенциальных поверхностей скольжения, которые могут возникнуть в этой толще, за счёт наличия усиленных зон. Максимальные значения общих деформаций грунта, в случае полного разрушения, составляют 14,96 м, что примерно в 4 раза меньше значения перемещений в увлажненном склоне без грунтоцементных элементов. Наблюдать за изменением напряжённо-деформированного состояния можно на рисунках 3(б) и 4.

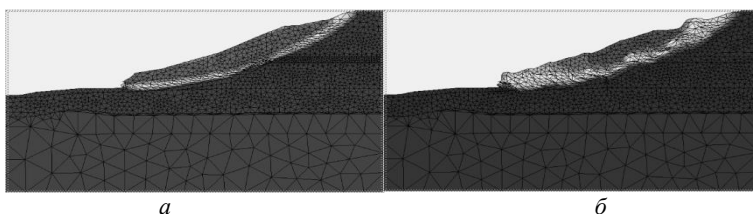


Рис. 4. Суммарные деформации склона:
а – без элементов; *б* – с элементами.

Определение влияния высоты элементов и максимального расстояния между ними на напряжённо-деформированное состояние склона важны геотехническими задачами, решение которых требует детального исследования напряжённо-деформированного состояния

оползневого склона. Размер элементов и расстояние между ними также носят экономический характер.

В результате дальнейших расчётов получено, что в грунтовом массиве формируется зона максимальных общих перемещений, которая уменьшается или увеличивается в зависимости от расстояния между элементами и их расположением в плане и по зоне развития пластических деформаций. С приближением элементов друг к другу поверхности соответственно уменьшается. На рисунке 5 приведена зависимость коэффициента запаса устойчивости от высоты грунтоцементных элементов и расстояния между ними.

Для определения влияния структурно-упрочнённых элементов на общую прочность грунтового массива были проведены лабораторные исследования, в которых объектом исследования были образцы глинистого грунта, как естественной структуры, так и с содержанием элементов повышенной структурной прочности [2].

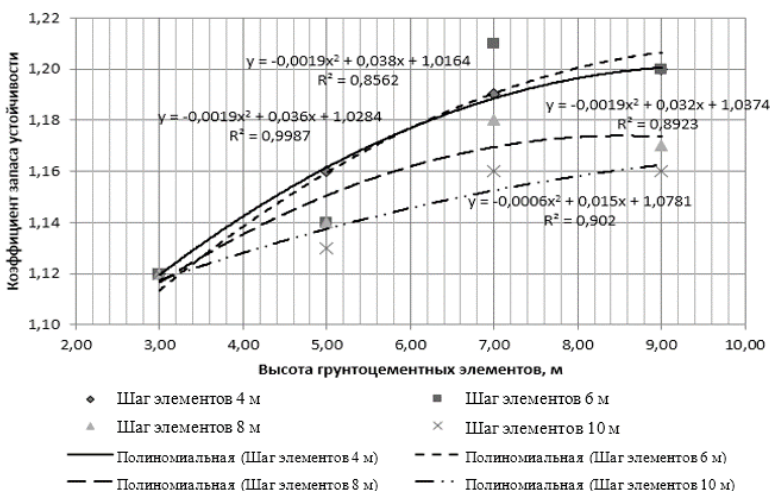


Рис. 5. График зависимости коэффициента запаса устойчивости от высоты грунтоцементных элементов и расстояния между ними

По данным проведённых лабораторных исследований можно отметить тот факт, что введение цементно-силикатных растворов уменьшает относительную просадочность грунтов почти в два раза,

соответственно повышается в два раза модуль общей деформации, как в природном, так и в водонасыщенном состояниях.

В то же время следует отметить значительный рост угла внутреннего трения почти в два раза и существенное повышение в 4,0...4,5 раза удельного сцепления водонасыщенных грунтов. Также установлено, что заинъектированные цементно-силикатным раствором образцы лёссового грунта естественной влажности невозможно сдвинуть при одноплоскостном срезе.

Проведённые исследования позволили назначить рациональный способ инженерной защиты оползневого массива путём устройства упрочнённых зон по плоскости скольжения и уменьшения нагрузки на склон. В данном случае важным этапом является анализ зон пластических деформаций склона и расположения в них грунтоцементных элементов, а именно в местах максимального сосредоточения этих зон. Эта информация предоставляет проектировщику возможность заранее предусмотреть инженерные мероприятия по стабилизации грунтового массива оползневого склона.

Следует также подчеркнуть, что предложенный способ повышения прочностных характеристик грунтов оползневой толще склона обеспечивает возможность учёным и проектировщикам искать безопасные варианты повышения устойчивости склонов с помощью грунтоцементных элементов, а также определить их взаимное расположение и их высоту, которая зависит от расстояния между элементами, влияет на общую стабилизацию всего оползневого склона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леханова К.В., Новодзинский А.Л. / Сравнение численных и аналитических методов расчёта устойчивости грунтовых откосов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2011. 45-50 с.

2. Лычов П.П., Белых С.П., Ган А.Л., Загоруйко Е.А. / Исследование свойств лёссовых грунтов, подвергшихся техногенному воздействию // Вестник НТУУ «КПИ». Серия «Горное дело»: Сб. наук, трудов. – 2003. – Вып. 8. – С. 20-28.

3. Малинин А.Г. / Применение грунтоцементных свай в городском строительстве // Пермские Строительные Ведомости. 2001. № 4.