

О поверхностном закреплении лёссовых склонов

С.А. Федоров¹, Г.О. Николаева²

¹Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

²Северо-Восточный федеральный университет, Якутск

Аннотация: В статье исследуются методы поверхностного закрепления лёссовых склонов, подверженных эрозии и оползням. Авторы рассматривают применение грунтобетона на основе шлакощелочного вяжущего с использованием местных лёссов в качестве заполнителя. Проведены эксперименты с различными составами вяжущих, включая жидкое стекло с разными модулями и гидроокись натрия, что позволило определить оптимальные параметры для достижения высокой прочности и морозостойкости. Для декоративных целей предложено использование природных пигментов, таких как сидериты, обеспечивающих устойчивость цвета. Практическая часть работы включает описание технологии пневматического набрызга грунтобетона для создания монолитных решетчатых конструкций.

Ключевые слова: лёссовые склоны, грунтобетон, шлакощелочное вяжущее, жидкое стекло, морозостойкость, пневматический набрызг, декоративные пигменты.

В пределах Хабаровского и Приморского краев часть территории занимают лёссовые грунты [1, 2]. Лёссовые склоны подвержены значительной эрозии и разрушению мелкими оползнями. Попытки поверхностного закрепления лёссов силикатизацией [3], получившей широкое распространение при глубинном их закреплении, смолизацией и другими способами не дали положительных результатов [4, 5]. В этом случае необходимо более устойчивое вяжущее.

Известны бетоны на основе шлаков и щелочного компонента, в которых заполнителем могут служить не только пески, но также супеси и суглинки [6]. Возможность использования в бетонах грунтов с содержанием пылеватых частиц около 80–90 % не выявлена [7]. Положительное решение этого вопроса позволит использовать местные грунты (лёссы) при закреплении склонов в качестве заполнителя.

Для проведения опытов были отобраны лёссы на наиболее характерных участках Приморского края. Эти лёссы содержат в своем составе 75–90 % пылеватых и 8–15 % глинистых частиц. Все лёссы имеют примерно

одинаковый химический состав. Преобладающими компонентами являются 77,69–79,40 % SiO_2 ; 6,21–6,64 % Al_2O_3 и 3,86–4,88 % CaO . Анализ состава грунта показал, что лёссы представлены кварцем, гидрослюдой, известью и примесью гипса.

Ниже приведены результаты испытания бетонов на основе шлакощелочного вяжущего с использованием в качестве заполнителя лёсса.

Вяжущее представляет собой молотый доменный гранулированный шлак (модуль основности 1,18; тонкость помола 3500 $\text{см}^2/\text{г}$), затворенный натриевым жидким стеклом с модулем 1; 1,7; 2,8 (плотность растворов 1,3 $\text{г}/\text{см}^3$) или раствором гидроокиси натрия. Приведенные вяжущие в количестве 25 % вводились в грунтовую смесь следующего состава: 25 % лёсса + 75 % овражного песка.

Наибольшей прочностью при сжатии обладают образцы на вяжущем – одномодульное стекло + шлак (27,0/14,5 МПа). В знаменателе приведены прочности образцов в водонасыщенном состоянии. При увеличении модуля стекла прочность грунтобетона снижается. Так, составы, приготовленные на стекле с модулем 1,7, имеют прочность 25,0/12,3 МПа. Наиболее низкая прочность у составов на стекле с модулем 2,8 (7,3/4,2 МПа). Такую большую разницу в прочности (27,0 и 7,3 МПа) можно объяснить еще и тем, что составы, приготовленные на стекле с модулем 2,8, обладают чрезвычайно быстрыми сроками схватывания, поэтому образцы могут быть недостаточно уплотнены.

Прочность бетона на шлакощелочном вяжущем (15,0/11,3 МПа) ниже прочности бетона, приготовленного на жидком стекле с модулем 1,7 [8].

При наличии в грунтовых смесях щелочного компонента глинистый минерал вступает с ним во взаимодействие с образованием щелочных гидроалюмосиликатов, которые, в свою очередь, могут служить структурообразующими элементами.

Наиболее стабильную прочность в процессе испытания на морозостойкость имеют составы на стеклошлаковом вяжущем (жидкое стекло с модулем 1 и 1,7). После 200 циклов замораживания и оттаивания коэффициент морозостойкости составляет 0,88–0,99, а потери в массе не превышают 1 %.

Образцы на вяжущем с добавлением гидроокиси натрия (каустическая сода) после 100 циклов начали разрушаться, наблюдалось шелушение и отслаивание поверхности.

Для определения стойкости материала против атмосферного воздействия, в частности воздействия углекислого газа воздуха, образцы выдерживались в углекислой среде 28, 60 и 150 суток. Контрольные образцы хранились в воздушно-влажной среде. Результаты испытания образцов, приведенные на рис.1, показывают, что прочность образцов, содержащихся в углекислой и воздушной среде, со временем возрастает.

Образцы грунтобетона на шлакощелочном вяжущем, хранившиеся в воздушной и углекислой среде, имеют близкие по величине значения прочности: 13,3 – 13,5 МПа; 14,3 – 14,8 МПа; 16,2 – 16,8 МПа (кривые 1).

Несколько больше разница в значениях прочности находившихся в воздушной и углекислой среде образцов, изготовленных на вяжущем шлак + $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$: 13,6 – 15,0 МПа; 15,7 – 16,8 МПа (кривые 2).

В грунтобетоне на вяжущем шлак + $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_{1,7}$ (кривые 3) прочность образцов, хранившихся в углекислой среде, превышает прочность грунтобетона, находящегося в воздушной среде, на 3,0 – 4,8 МПа (12,7 – 16,0; 14,3 – 17,3; 15,1 – 19,9).

Образцы грунтобетона, приготовленные на вяжущем шлак + $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_{2,8}$ и помещенные в углекислую среду, имеют прочность в 1,5–1,8 раза больше, чем образцы, находившиеся в нормальных условиях.

Следовательно, грунтобетон на стеклошлаковом и шлакощелочном

вяжущем при воздействии на него углекислой среды разрушений не претерпевает, а наоборот, набирает прочность. Относительная прочность возрастает с увеличением модуля стекла (кривые 3 и 4).

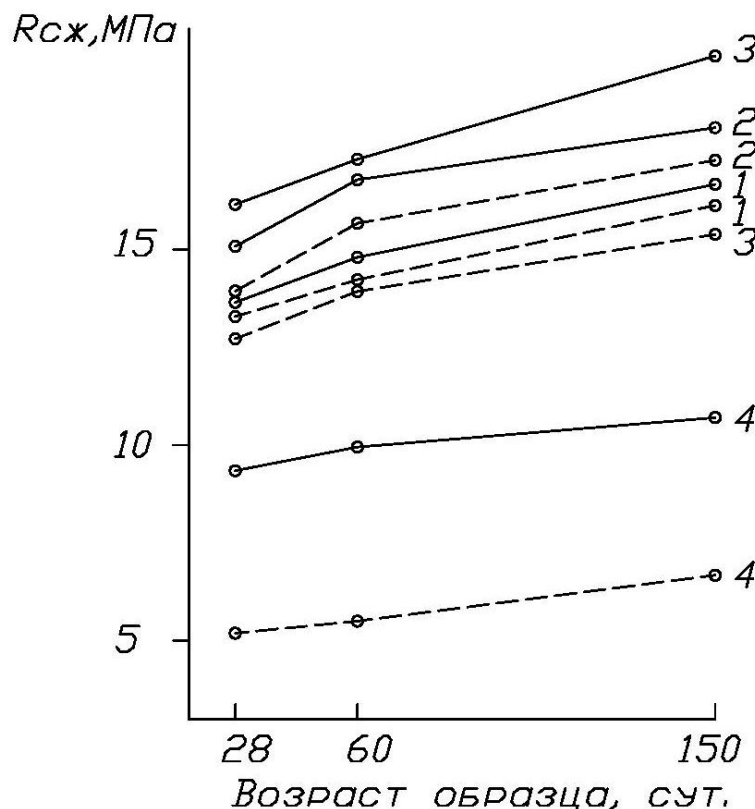
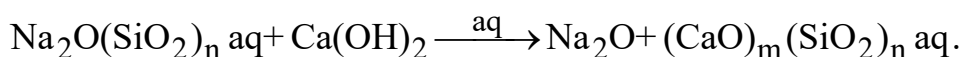
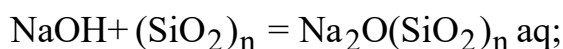


Рис. 1. – Изменение прочности образцов грунтобетона на различном вяжущем в углекислой (сплошная линия) и воздушно-влажной среде (пунктирная линия):

1 – шлак + NaOH; 2 – шлак + Na₂O(SiO₂); 3 – шлак + Na₂O(SiO₂)_{1,7};
4 – шлак + Na₂O(SiO₂)_{2,8}

При использовании шлакощелочного вяжущего прочность грунтобетона возрастает в результате появления структурообразующих элементов (гидросиликатов кальция) при переходе в раствор за счет интенсивного разрушения шлакового стекла и щелочных гидроалюмосиликатов:



При взаимодействии шлакогрунтовой массы с жидким стеклом кроме

указанных выше реакций происходит также цементация геля кремневой кислоты, что приводит к дополнительной прочности. Причем увеличение прочности грунтобетона за счет цементации геля кремневой кислоты более существенное, чем в результате образования гидросиликатов кальция (рис. 1, кривые 3 и 4).

Таким образом показано, что при поверхностном закреплении склонов возможно использование местных лёссовидных грунтов в качестве заполнителей в грунтобетоне (20–30 %). Лучшие показатели имеет грунтобетон на основе шлака и жидкого стекла с модулем 1 и 1,7.

Испытаниям подвергались также бетоны содержащие в своем составе пигменты в количестве 4–8 % массы вяжущего. Для получения бетона красного цвета добавляли окись железа Fe_2O_3 . Окись хрома придавала бетону зеленую окраску. В качестве природных пигментов использованы сидериты и отсевы цветных известняков.

После 200 циклов замораживания и оттаивания цвет бетонов с добавкой пигментов не изменился. При испытании образцов в климатической камере на светостойкость оказалось, что окраску сохраняют составы, содержащие природный пигмент (сидериты, известняки). Образцы, содержащие окись железа и хрома, со временем окраску теряют. Наименее светостойчивыми являются образцы на шлакощелочном вяжущем. Цветной бетон в сочетании с соответствующим архитектурно-планировочным решением позволит создать композиции, повышающие уровень благоустройства городов.

Одним из вариантов поверхностного закрепления склонов и откосов от эрозии или от неглубоких оползней типа оплывин является применение сборных решетчатых конструкций или объемных геосеток [9]. Нами был проверен вариант устройства решетчатого крепления из монолитного грунтобетона на основе стеклошлакового вяжущего. Изготовление конструкций

крепления откосов методом пневматического набрызга смеси [10] позволяет выполнять крепления не только с диагональным или прямоугольным расположением элементов, возможным для сборных конструкций, но и в виде различных рисунков.

Проверка и отработка основных положений технологии пневматического набрызга материала применительно к цветному грунтобетону на основе стеклошлакового вяжущего производилась на опытном участке (автомобильная дорога «Сибирцево-Жариково-Комиссарово» в Приморском крае). Ниже описана конструкция крепления.

На поверхности спланированного откоса выемки располагаются в двух направлениях; несущие полосы набрызгиваются в канавки заподлицо с поверхностью склона по направлению основного ската, поперечные полосы устраиваются непосредственно над несущими полосами. Сечение канавок и площадь арматуры полос определяются расчетом. Размер площади, околонтуренной двумя поперечными полосами, должен быть не более 3 м. В точках пересечения указанных полос арматура несущей полосы и конструктивная арматура поперечных полос связываются свайкой из арматурной стали. Последняя забивается в грунт откоса глубже возможного смещения грунта на 20–40 см.

В верхней части склона арматура несущих полос крепится за сваи, размеры которых уточняются расчетом. В нижней части откоса из сплошного набрызг-бетона устраивается лоток для сбора поверхностных вод. Такой же лоток устраивается в верхней части откоса для перехвата поверхностного стока на подходе к склону. Толщина стенок лотка 4–5 см.

Устройство конструкций монолитного решетчатого крепления откоса осуществлялось в следующем порядке. После установки арматуры несущих и поперечных полос бетонировали несущие (продольные) полосы. Затем по рисунку устанавливали одностороннюю металлическую опалубку для

поперечных полос. Бетонную смесь с добавкой окиси железа или окиси хрома наносили сразу на всю высоту поперечной полосы, которая контролировалась высотой формы. Образовавшуюся сетку из поперечных полос заполняли растительным грунтом и засеивали травой.

Откос и конструкции его крепления находятся в хорошем состоянии. Красные и зеленые поперечные полосы подчеркивают декоративность крепления. Образцы, выпиленные из конструкции крепления откоса, имели прочность при сжатии $\sigma_{сж}^{28} = 14,5 \text{ МПа}$, на растяжение при изгибе $\sigma_{из}^{28} = 4,8 \text{ МПа}$.

Таким образом, лабораторными исследованиями и проверкой в натуральных условиях подтверждается возможность поверхностного закрепления склонов и откосов методом пневматического набрызга грунтобетона на основе местных лёссовидных грунтов и стеклошлакового вяжущего. Для получения светостойчивых декоративных составов следует использовать природные пигменты типа сидеритов.

Литература

1. Астахов В.И., Пестова Л.Е., Шкатова В.К. Лёссоиды Российской Федерации: распространение и возраст // Региональная геология и металлогения. 2021. № 87. С. 42-60.
2. Muhs D. R. Loess deposits, origins and properties // Encyclopedia of Quaternary Science. – Elsevier, 2007. – Pp. 1405–1418.
3. Бекова Г., Рахманова А., Бабаева Б. Закрепление грунтов методом силикатизации // Научные исследования XXI века. 2023. № 3. С. 10-13.
4. Абрамян С.Г., Варданын С. Технологии закрепления грунтов на склонах // Инженерный вестник Дона, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/381.

5. Rasouli, R., Hayashi, K., Zen, K. Controlled Permeation Grouting Method for Mitigation of Liquefaction. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Volume 142, Issue 11 (November 2016) DOI: 10.1061/ (ASCE) GT.1943-5606.0001532.

6. Шингужиева А.Б., Курманиязова Н.Ж., Уразова А.Ф. Исследование структуры пористых заполнителей на основе лессовидного суглинка с добавлением органической смеси // Труды университета. 2022. № 2. С. 169-174.

7. Сальникова О.Н., Оноприенко Н.Н., Логвинов П.Р. Особенности строительства автомобильных дорог на лёссовых грунтах // Современные тенденции в кадастре, землеустройстве и геодезии. Сборник докладов Международной научно-практической конференции. Белгород, 2024. С. 50-54.

8. Абу Махади М.И., Безбородов А.В. Применение шлакощелочных вяжущих в строительстве // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2017. Т. 18. № 2. С. 212-218.

9. Дежина И.Ю. Выбор метода преобразования лессовых грунтов Ростовской области с учетом различных факторов // Инженерный вестник Дона, 2013, №13 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1945.

10. Сокорнов А.А., Коньков А.Н., Филонов Ю.А. Набрызг-бетон: эволюция строительной техники // Путевой навигатор. 2022. № 51 (77). С. 30-34.

References

1. Astahov V.I., Pestova L.E., Shkatova V.K. Regional'naja geologija i metallogenija. 2021. № 87. pp. 42-60.
2. Muhs D. R. Loess deposits, origins and properties. Encyclopedia of Quaternary Science. Elsevier, 2007. Pp. 1405–1418.

3. Bekova G., Rahmanova A., Babaeva B. Nauchnye issledovaniya XXI veka. 2023. № 3. pp. 10-13.
4. Abramjan S.G., Vardanjan .S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2016, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/381.
5. Rasouli, R., Hayashi, K., Zen, K. Controlled Permeation Grouting Method for Mitigation of Liquefaction. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Volume 142, Issue 11 (November 2016) DOI: 10.1061/ (ASCE) GT.1943-5606.0001532.
6. Shinguzhieva A.B., Kurmanijazova N.Zh., Urazova A.F. Trudy universiteta. 2022. № 2. pp. 169-174.
7. Sal'nikova O.N., Onoprienko N.N., Logvinov P.R. Sovremennye tendencii v kadastre, zemleustrojstve i geodezii. Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Belgorod, 2024. pp. 50-54.
8. Abu Mahadi M.I., Bezborodov A.V. Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Serija: Inzhenernye issledovaniya. 2017. T. 18. № 2. pp. 212-218.
9. Dezhina I.Ju. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №13 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1945.
10. Sokornov A.A., Kon'kov A.N., Filonov Ju.A. Putevoj navigator. 2022. № 51 (77). pp. 30-34.

Дата поступления: 3.06.2025

Дата публикации: 25.07.2025