

**Михалов Роман Алексеевич**,  
магистрант, Рязанский институт (филиал),  
Московский политехнический университет  
Mikhailov Roman Alekseevich,  
Master's Student, Ryazan Institute (Branch),  
Moscow Polytechnic University

**МИНЕРАЛЬНАЯ КОМПОЗИЦИЯ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННЫХ  
ОТХОДОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СЛАБЫХ ОРГАНОГЕННЫХ  
ГРУНТОВ НА ПРИМЕРЕ МЕЩЕРСКОЙ НИЗМЕННОСТИ  
MINERAL COMPOSITION BASED ON MAN-MADE WASTE  
FOR STABILIZING WEAK ORGANOGENIC SOILS USING  
THE EXAMPLE OF THE MESHCHERSKAYA LOWLAND**

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема использования слабых органогенных грунтов в дорожном строительстве на примере Мещерской низменности. Рассмотрены теоретические механизмы структурообразования в системе «торф – минеральная композиция». Предложена технологическая схема стабилизации и даны прогнозные оценки прочностных характеристик укрепленного грунта.

**Abstract.** The article discusses the problem of using weak organogenic soils in road construction using the example of the Meshchera Lowland. The theoretical mechanisms of structure formation in the "peat-mineral composition" system are considered. A technological scheme for stabilization is proposed, and predictive estimates of the strength characteristics of reinforced soil are given.

**Ключевые слова:** Минеральная композиция, техногенные отходы, стабилизация грунтов, торф, молотый шлак, Мещерская низменность, дорожное строительство.

**Keywords:** Mineral composition, technogenic waste, soil stabilization, peat, ground slag, Meshchera Lowland, road construction.

Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года предусматривает ускоренное технологическое развитие дорожно-строительной отрасли на основе внедрения прогрессивных и высокоэффективных технологий. Одним из магистральных направлений является использование местных грунтов, обработанных стабилизирующими добавками, что позволяет отказаться от применения более дорогостоящих привозных материалов и снизить стоимость строительства на 10-30% [1].

Параллельно с задачей снижения стоимости дорожного строительства стоит не менее важная проблема утилизации техногенных отходов промышленности. Ежегодно в Российской Федерации накапливаются миллионы тонн металлургических шлаков, зол тепловых электростанций, отходов горнорудной промышленности, значительная часть которых складывается в отвалах, занимая ценные земли и создавая экологическую нагрузку [2].

Особую сложность для дорожного строительства представляют регионы с широким распространением слабых органогенных грунтов. Мещерская низменность, расположенная на территории Московской, Рязанской и Владимирской областей, является классическим примером территории с преобладанием болотных геосистем. Торфяные грунты здесь обладают комплексом неблагоприятных для строительства свойств: высокой естественной влажностью, низкой плотностью скелета, высокой пористостью и исключительно высокой сжимаемостью под нагрузкой [3].

Торфяные почвы Мещерской низменности представлены преимущественно низинными торфяниками различной мощности, подстилаемыми минеральными грунтами –



суглинками, песками. Выработанные торфяники и мелкозалежные месторождения занимают значительные площади, но их вовлечение в хозяйственный оборот сдерживается мелиоративной необустроенностью и отсутствием эффективных технологий освоения.

Традиционный подход к строительству на болотах предполагает либо полную выторфовку (замену слабого грунта минеральным), либо устройство насыпей на плаву, что требует значительных объемов привозных материалов и не всегда экономически оправдано.

В этой связи крайне актуальной является задача разработки минеральных композиций на основе техногенных отходов, позволяющих стабилизировать торфяные грунты и использовать их в качестве конструктивных слоев дорожных одежд. Теоретической базой для решения этой задачи служат современные представления о структурообразовании в укрепленных грунтах [4], а также прикладные исследования по применению молотых шлаков и комплексных вяжущих [5].

В пределах Рязанской Мещеры по-прежнему сохраняются значительные площади маломощных торфяных месторождений. В масштабах Российской Федерации общая площадь земель торфяного мелиоративного фонда – включающего выработанные, мелкозалежные и зазоленные торфяники – достигает порядка 10,5 млн га. При этом степень вовлеченности данных угодий в хозяйственный оборот не превышает 9% от общего фонда.

Влажность торфов может достигать 500-1000% и более. Исследования показывают, что влажность торфяных почв в слое 0-25 см составляет 63-74% пористости, а глубина грунтовых вод варьирует от 0,58 до 0,85 м в зависимости от сезона и уровня шлюзования.

Плотность скелета торфа обычно составляет 0,07-0,2 г/см<sup>3</sup>, что на порядок ниже, чем у минеральных грунтов. Торфяные грунты характеризуются пористостью до 95-96% и, как следствие, исключительно высокой сжимаемостью. Под нагрузкой 0,1-0,2 МПа осадка торфа может составлять 30-50% от первоначальной мощности слоя. Процесс уплотнения торфа под нагрузкой протекает во времени крайне медленно из-за низкой фильтрационной способности и реологических свойств органической матрицы.

Торф содержит гуминовые и фульвокислоты, которые могут оказывать агрессивное воздействие на традиционные минеральные вяжущие, замедляя процессы их гидратации и твердения.

Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие требования к минеральной композиции для стабилизации торфяных грунтов:

1. Нейтрализация кислотности – компоненты композиции должны обеспечивать повышение pH до значений 8-10, благоприятных для гидратации цемента и активности пуццолановых реакций.

2. Ионообменная активность – способность поставлять двух- и трехвалентные катионы (Ca<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>) для замещения одновалентных катионов в двойном электрическом слое органических коллоидов, что инициирует их флокуляцию и агрегацию [4].

3. Вяжущие свойства – способность к гидратации и образованию прочных цементационных контактов между частицами.

4. Пуццолановая активность – способность аморфного кремнезема и глинозема вступать в реакцию с гидроксидом кальция с образованием гидросиликатов и гидроалюминатов кальция.

5. Экологическая безопасность – компоненты не должны выделять токсичных веществ и должны быть совместимы с грунтовыми водами.

Сформулированные требования могут быть реализованы только при использовании многокомпонентной системы, где каждый компонент выполняет специфическую функцию. Ниже рассматриваются основные составляющие такой композиции и обосновывается их роль с учетом особенностей торфяных грунтов Мещерской низменности.



Портландцемент является традиционным вяжущим для укрепления грунтов. При гидратации цемента образуются гидросиликаты и гидроалюминаты кальция, обладающие высокой цементирующей способностью, а также гидроксид кальция, необходимый для активации пуццолановых реакций [4]. Однако прямое применение цемента в торфах ограничено из-за замедления схватывания органическими кислотами.

Молотый гранулированный шлак – это техногенный отход металлургического производства, применение которого позволяет решать одновременно две задачи: утилизацию промышленных отходов и повышение эффективности стабилизации. Применение молотых граншлаков «Граунд» и «Граунд-М» в составе грунтобетонных обеспечивает более высокие показатели прочности на сжатие и изгиб по сравнению с чисто цементными составами, а также повышает морозостойкость.

Механизм действия шлаков объясняется их высокой удельной поверхностью (1800-3500 см<sup>2</sup>/г), обеспечивающей большое количество активных центров, и способностью к быстрой гидратации. Щелочной активатор гидроксид кальция, образующийся при гидратации цемента или введенный дополнительно, взаимодействует с алюмосиликатами шлака, в результате чего синтезируются низкоосновные гидросиликаты кальция, гидроалюмосиликаты и гидрогранаты, обладающие высокой связующей способностью и устойчивостью в агрессивных средах [2].

Негашеная известь нейтрализует кислую среду торфа, создавая благоприятные условия для гидратации цемента и обеспечивает катионный обмен – ионы кальция Ca<sup>2+</sup> замещают одновалентные катионы (K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) в двойном электрическом слое органических коллоидов, уменьшая его толщину и способствуя флокуляции и агрегации частиц [4].

В естественном состоянии торф характеризуется преимущественно коагуляционными и переходными контактами, которые обеспечивают незначительную структурную связность и сильно зависят от влажности. Задача стабилизации – трансформировать их в цементационные контакты, обладающие высокой прочностью, водостойкостью и морозостойкостью.

На основе теоретических положений, разработанных для глинистых грунтов [4], и с учетом специфики органогенных грунтов выделяются несколько стадий структурообразования в системе «торф – минеральная композиция».

При введении извести и цемента происходит резкое повышение pH среды до 10-12. Ионы кальция Ca<sup>2+</sup> замещают одновалентные катионы в двойном электрическом слое органических коллоидов. Уменьшение толщины двойного слоя снижает силы электростатического отталкивания и способствует сближению частиц.

В результате катионного обмена и нейтрализации поверхностных зарядов происходит флокуляция органических коллоидов – их объединение в более крупные агрегаты. Структура торфа трансформируется из дисперсной в коагуляционную с образованием пространственной сетки из флокул. На этой стадии формируются коагуляционные контакты, обладающие тиксотропными свойствами.

Внесение минеральных добавок (песка, глины) в торфяные почвы существенно изменяет их агрофизические свойства: плотность сложения увеличивается с 0,25-0,30 до 0,45-0,60 г/см<sup>3</sup>, пористость снижается с 85-90% до 70-75%, улучшаются водно-физические характеристики. Эти данные косвенно подтверждают возможность формирования более плотной структуры при введении минеральных компонентов.

Параллельно с процессами коагуляции начинается гидратация клинкерных минералов цемента. Образующиеся иглообразные кристаллы этtringита, гидросиликатов и гидроалюминатов кальция прорастают через коагуляционную структуру, формируя цементационные контакты между частицами. Высокощелочная среда, созданная известью, активизирует гидратацию шлака, ускоряя этот процесс.



Гидроксид кальция, образующийся при гидратации цемента и введенный с известью, вступает в реакцию с аморфным кремнеземом и глиноземом, содержащимися в шлаке и минеральной части торфа (глинистые примеси, диатомиты, опоки). Образуются низкоосновные гидросиликаты и гидроалюминаты кальция, которые дополнительно цементируют структуру, повышая долговременную прочность и устойчивость.

При оптимальных составах и уплотняющей нагрузке 500-650 кПа прочность стабилизированного грунта может достигать 8,8-9,8 МПа (для суглинков). Для торфяных грунтов прогнозируются более низкие значения (2,0-4,0 МПа) ввиду высокого содержания органики, но этого достаточно для использования в нижних слоях оснований.

Введение ПАВ (стабилизатора «350-Пен») модифицирует поверхность органических частиц, снижая их гидрофильность и способность к водопоглощению. Это предотвращает обратное набухание стабилизированного грунта при увлажнении и повышает его водостойкость. Кроме того, ПАВ улучшает смачиваемость частиц цемента и шлака, способствуя более полной гидратации.

На основе теоретического анализа и аналогий с результатами стабилизации суглинков прогнозируются улучшенные показатели укрепленного торфяного грунта [5].

Прогнозируемый предел прочности на сжатие стабилизированного торфяного грунта составляет 2,0-4,0 МПа. Исследования показали, что при оптимальном подборе состава (цемент, известь, молотый шлак) и уплотняющей нагрузке 500–650 кПа прочность стабилизированных суглинков достигает 8,8–9,8 МПа. Учитывая высокое содержание органического вещества в торфе, которое замедляет процессы структурообразования и снижает конечную прочность, целесообразно прогнозировать более низкие, но вполне достаточные для оснований значения. Предел прочности на сжатие укрепленных грунтов для оснований должен составлять не менее 1,0–1,5 МПа в зависимости от категории дороги и типа вяжущего. Предлагаемый диапазон 2,0–4,0 МПа с запасом перекрывает эти требования, что позволяет рассматривать стабилизированный торф как пригодный материал для нижних слоев оснований дорог III–V категорий.

Ожидаемая морозостойкость укрепленного торфяного грунта составляет F25–F50. Данный показатель соответствует требованиям, предъявляемым к материалам для оснований дорожных одежд в климатических условиях средней полосы России, включая Мещерскую низменность. Достижение такой морозостойкости становится возможным благодаря формированию прочных цементационных контактов [4] и гидрофобизации органических частиц под действием ПАВ [2], что снижает водопоглощение и, как следствие, риск морозного разрушения.

Прогнозируется снижение коэффициента фильтрации укрепленного грунта на 2–3 порядка по сравнению с исходным торфом – с значений порядка  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  см/с до  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  см/с и менее. Такое снижение объясняется заполнением крупных порового пространства торфа продуктами гидратации вяжущих и формированием более плотной и связной структуры. Это принципиально меняет поведение грунта: из сильносжимаемого, водонасыщенного основания он превращается в относительно водоупорный и стабильный слой.

Ожидается повышение модуля деформации укрепленного грунта в 5–10 раз по сравнению с исходным торфом. Если для естественного торфа модуль деформации составляет единицы мегапаскалей [3], то для стабилизированного материала прогнозируются значения 50–150 МПа. Это обеспечит значительно более равномерное распределение напряжений в основании дорожной одежды и снижение величины неравномерных осадок.

Ожидаемый коэффициент размягчаемости (отношение прочности в водонасыщенном состоянии к прочности в сухом состоянии) составляет не менее 0,7. Это означает, что даже после длительного водонасыщения материал сохранит не менее 70% своей исходной прочности, что гарантирует стабильность конструкции в периоды повышенного увлажнения.



В результате исследования установлено, что торфяные грунты Мещерской низменности, характеризующиеся высокой влажностью (до 500-1000%), пористостью (до 96%), сжимаемостью и кислой средой (рН 3,5-5,5), могут быть стабилизированы с применением многокомпонентных минеральных композиций на основе техногенных отходов.

Определена рецептура комплексного вяжущего, включающая портландцемент (30-40%), молотый гранулированный шлак (40-50%), негашеную известь (10-15%) и ПАВ-стабилизатор (2,5-12,0 л/м<sup>3</sup>). Каждый компонент выполняет специфическую функцию: известь нейтрализует кислотность и инициирует катионный обмен, цемент и шлак обеспечивают гидратационное твердение, ПАВ гидрофобизирует органику и улучшает структурообразование.

Прогнозируемые показатели укрепленного грунта (прочность на сжатие 2,0-4,0 МПа, морозостойкость F25-F50, снижение фильтрации на 2-3 порядка, повышение модуля деформации в 5-10 раз, коэффициент размягчаемости не менее 0,7) соответствуют требованиям нормативных документов [6] для оснований дорожных одежд III-V категорий.

Предлагаемая технология позволяет решать две взаимосвязанные задачи: вовлечение в хозяйственный оборот слабых органометаллических грунтов и утилизацию техногенных отходов металлургического производства, что соответствует принципам ресурсосбережения и снижает стоимость строительства на 15-30%.

*Список литературы:*

1. Суфиянов Р.Ш. ТЕХНОЛОГИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ // Вестник науки №1 (34) том 3. С. 151 - 156. 2021 г. ISSN 2712-8849 // Электронный ресурс: <https://www.вестник-науки.рф/article/4030>
2. Романенко И. И., Пинт Э. М., Петровнина И. Н. СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТА ДОРОЖНОГО ОСНОВАНИЯ // Форум молодых ученых. 2018. №6-2 (22). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/stabilizatsii-grunta-dorozhnogo-osnovaniya>.
3. Носков И.В., Ананьев С.А., Основы искусственного уплотнения торфяных оснований. (статья ВАК, РИНЦ) / Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 6. – URL: <https://esj.today/PDF/22SAVN622.pdf>
4. Н. А. Слободчикова, С. В. Ключев, А. В. Горелов Теоретические основы укрепления грунтов портландцементом // ИВД. 2025. №2 (122). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskie-osnovy-ukrepleniya-gruntov-portlandtsementom>.
5. М. Б. Каддо, Б. А. Ефимов, Е. А. Михайлик Минеральная композиция для стабилизации грунта // ИВД. 2024. №3 (111). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mineralnaya-kompozitsiya-dlya-stabilizatsii-grunta>.
6. ГОСТ 30491-2012. Смеси органоминеральные и грунты, укрепленные органическими вяжущими, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2013. 16 с.

