

## Теоретические основы укрепления грунтов портландцементом

Н.А. Слободчикова<sup>1</sup>, С.В. Ключев<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия,

<sup>2</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Россия

<sup>3</sup>Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

<sup>4</sup>ООО «СТРОЙБЛОКТЕХНОЛОГИЯ», Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация:** Применение методов укрепления грунтов портландцементом позволяет повысить физико-механические свойства грунтов: прочность, морозостойкость, водопроницаемость и др. Техническое понимание процессов структурообразования в укрепленных грунтах позволяет регулировать конечные свойства и качество слоев автомобильных дорог. Для описания процессов структурообразования возможно использовать теорию контактных взаимодействий и теорию Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека. На конечные свойства укрепленного грунта оказывают влияние следующие факторы: минералогия и удельная поверхность грунта, содержание воды, количество цемента, время затвердевания и способ уплотнения.

**Ключевые слова:** укрепленные грунты, структурообразование укрепленных грунтов, укрепление портландцементом, свойства укрепленных грунтов.

При строительстве автомобильных дорог широко применяется технология укрепления грунтов путем введения в грунт неорганических вяжущих материалов. Это повышает прочностные характеристики, придает грунтам морозостойкие и водостойкие свойства [1]. Для эффективного применения укрепленных грунтов необходимо техническое понимание процессов структурообразования.

Процессы структурообразования в грунтах, укрепленных/стабилизированных цементом исследуются различными учеными [2-4]. В настоящее время для описания процесса структурообразования в грунтах, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, существует несколько теорий.

**Теория контактных взаимодействий.** В основе теории контактных взаимодействий лежит утверждение П.А. Ребиндера: *если прочность самих частиц выше прочности контактов между ними, то прочность грунта (P) в*

целом определяется прочностью единичных контактов между структурными элементами ( $P$ ) и количеством контактов в единице площади разрушения ( $Nk$ ).

При укреплении грунтов различными неорганическими вяжущими материалами возможно образование контактов различных типов. Прочность при сжатии или при расколе образцов укрепленного грунта определяется величиной силы сцепления в контактах, количеством контактов и типом контактов [5]:

$$R_t = f_{cp} \cdot \chi, \quad (1)$$

где  $f_{cp}$  – средняя сила сцепления частиц в контактах;  $R_t$  – прочность укрепленного грунта на разрыв;  $\chi$  – количество контактов на единице площади поверхности разрушения.

Контакты подразделяются на типы в зависимости от условий образования и прочности.

*Цементационные контакты.* В процессе схватывания и твердения грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, происходит выделение из растворов новой твердой фазы, которая прочно срастается с поверхностью частиц в монолит. С течением времени прочностные характеристики этой фазы увеличиваются (рис. 7).

На процесс формирования цементационных контактов оказывают влияние различные факторы: величина пресыщения раствора; водопроницаемость грунта; значение межфазной свободной энергии; величина напряжений в контактной зоне; температура и т. д.

Цементационные контакты могут обладать высокой прочностью, водостойкостью и морозостойкостью. При небольших внешних нагрузках деформирование цементационных контактов носит упругий характер. При увеличении внешних нагрузок свыше критических развиваются пластические деформации, и контакты разрушаются.

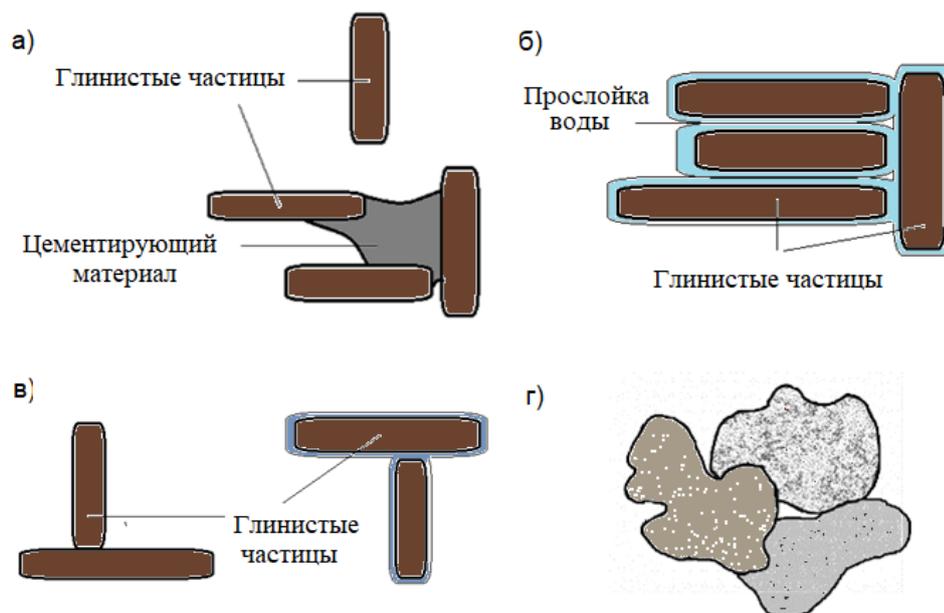


Рис. 7. – Виды контактов: а) цементационные; б) коагуляционные; в) переходные; г) зацепления

*Коагуляционные контакты.* Эти контакты появляются в не схватившихся смесях за счет дальнедействующих молекулярных, электростатических и магнитных взаимодействий. Для коагуляционных контактов характерно наличие между частицами тонкой прослойки жидкой фазы через которую действуют силы межмолекулярного взаимодействия (рис. 7) [6].

Для коагуляционных контактов свойственно относительно малая прочность, тиксотропность, пластичность и способность к ползучести, а также высокая эластичность [6].

Коагуляционные структуры, образованные данным типом контактов, представляют собой неустойчивые системы, которые могут уплотняться при снижении влажности и, наоборот, набухать при ее увеличении. Свойства коагуляционной структуры определяют плотность, однородность и дисперсность конечной структуры укрепленного грунта после завершения

кристаллизации. В этот период можно эффективно управлять процессом структурообразования.

*Переходные (точечные).* Данный тип контактов характерен для маловлажных хорошо уплотненных пылевато-глинистых грунтов. При малых значениях влажности происходит уменьшение толщины пленки связанной воды и разрушение этой пленки на отдельных участках контакта (рис. 7).

Для переходных контактов характерна способность гидратироваться и переходить в коагуляционные контакты при разуплотнении и увеличении влажности.

Переходные контакты проявляют упругое сжатие, а при достижении предельных нагрузок – хрупкое необратимое разрушение, но при этом обладают меньшей прочностью особенно в водонасыщенном состоянии, чем цементационные контакты, и склонны к набуханию и усадке.

*Контакты зацепления.* При определенной влажности в крупнообломочных и песчаных грунтах могут возникать капиллярные силы, которые увеличивают структурную связность. Контакты зацепления образуются при непосредственном соприкосновении крупных обломков (рис. 7). На контактах зацепления возможно образование незначительной связности, что объясняется зацеплением неровностей контактируемых поверхностей обломков. Количество контактов зацепления обычно незначительно, и они обладают низкой прочностью.

На основе теории контактных взаимодействий разработаны различные модели грунтов: глобулярные модели (моно-, би- и полидисперсные), модели типа «перекашивающегося карточного домика» и др. Однако оценка и прогнозирование прочностных характеристик укрепленных грунтов только на основе теории контактных взаимодействий не дает достоверных результатов.

**Теория Дерягина, Ландау, Фервея, Овербек** заключается в том, что на контактах коллоидных частиц грунта происходят взаимодействия, обусловленные силами притяжения (Ван-дер-Ваальсовы силы) и электростатические силы отталкивания, препятствующие слипанию частиц [6]. Эти силы имеют место быть только на очень малых расстояниях, соответствующих радиусу частиц.

При незначительных электрических потенциалах и расстояниях суммарная энергия взаимодействующих частиц обратно пропорциональна квадрату расстояния между частицами:

$$U(h) = 2\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot n \cdot \varphi_\delta^2 \cdot e^{-nh} - \frac{A}{12\pi h^2}, \quad (2)$$

где  $\varphi_\delta$  – электрический потенциал диффузного слоя;  $n$  – величина, обратная толщине диффузного слоя;  $h$  – расстояние между частицами;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость дисперсионной среды;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $A$  – константа Гамакера.

Следует отметить, что удельная поверхность грунта определяет число контактов и, соответственно, прочность сцепления его с цементом [7].

Процессы структурообразования в грунтах, укрепленных/стабилизированных цементом имеют отличия в сыпучих и связных грунтах.

### **Структурообразование в сыпучих грунтах, укрепленных цементом**

Структурообразование в несвязных грунтах, укрепленных портландцементом, развивается в две стадии.

**Стадия 1.** Гидратация портландцемента. Процессы, развивающиеся при гидратации цемента, широко описаны в научно-технической литературе. Общее представление процесса гидратации цемента можно охарактеризовать несколькими периодами [3, 4].

*Схватывание.* При введении в грунтоцементную смесь воды молекулы воды обволакивают частицы цемента. Затем происходит переход ионов из кристаллической решетки цемента в воду. Силикаты кальция при контакте с водой преобразуются в гидросиликаты кальция и гидроксид кальция. Эти соединения обладают большой цементирующей способностью. Уравнения реакций для основных клинкерных минералов широко описаны в литературе [8].

По прошествии 1 часа происходит образование иглообразных кристаллов. Эти кристаллы с течением времени растут и притягиваются друг к другу силами Ван-дер-Ваальса. Возникает кратковременная коагуляционная структура, которая характеризуется низкой прочностью и тиксотропностью.

При приложении вибрационной нагрузки произойдет разрушение коагуляционной структуры, уплотнение и как следствие повышение прочности и морозостойкости укрепленного грунта.

*Твердение.* Через 8–10 часов во всем объеме смеси образуется каркас пространственной кристаллизационной алюминатной структуры из алюминатов  $C_3A$  ( $3CaO \cdot Al_2O_3$ ).

Далее происходит застывание и набор прочности, которые сопряжены с образованием силикатной структуры, образующейся в процессе гидратации клинкерных минералов  $C_3S$  ( $3CaO \cdot SiO_2$ ) и  $C_2S$  ( $2CaO \cdot SiO_2$ ) [9]. В результате образуются очень небольшие кристаллы, которые соединяют частицы грунта и образуют цементные связи. Наличие этих связей между цементом и частицами улучшает гранулометрический состав грунта путем образования больших агрегатов из мелкозернистых частиц.

Примерно через 1 сутки силикатная структура начинает вытеснять алюминатную. Через 28 суток силикатная структура вытесняет алюминатную полностью. Сформированная структура определяет итоговую прочность укрепленного грунта.

---

На процессы гидратации может оказывать влияние наличие посторонних веществ или примесей; водоцементное соотношение; температура отверждения; наличие добавок; удельная поверхность смеси.

Реакция гидратации медленно протекает с поверхности частиц цемента, при этом центральная часть зерен цемента может оставаться негидратированной.

**Стадия 2.** На второй стадии происходит химическое взаимодействие глинозема и кремнезема глинистых минералов с гидроксидом кальция или оксидом кальция в присутствии воды.

В дополнение к образованию двух- и трехкальциевых силикатов и алюминатов ( $C_2A$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_3S$ ) при гидратации цемента также образуется высокоактивный гидроксид кальция  $Ca(OH)_2$ , который вступает в реакцию с углекислым газом атмосферного воздуха, в результате чего образуются карбонаты кальция  $CaCO_3$ .

Процесс карбонизации сопровождается образованием кристаллических сростков из кристаллов карбоната кальция и срастанием мелких песчаных частиц с кристаллическими образованиями. Этот процесс протекает медленно, распространяется на небольшую глубину в твердеющем материале, образуя густую переплетающуюся сетку кристаллических сростков.

### **Структурообразование в глинистых грунтах, укрепленных портландцементом**

Глинистые грунты содержат большое количество глинистых и коллоидных частиц, что обуславливает их пластичность и высокую способность к набуханию и усадке. Эти явления зависят особенно сильно развиваются, когда предел текучести и число пластичности превышают 50% и 30% соответственно [10].

Основные процессы структурообразования в глинистых грунтах зависят от характера взаимодействия портландцемента с глинистыми частицами. Укрепление портландцементом грунтов, содержащих большое количество глинистых частиц, включает четыре стадии:

**Стадия 1.** Характеризуется катионным обменом. Глинистый грунт/заполнитель обладает пластичностью, которая обуславливается количеством экспансивных минералов, например, монтмориллонита. Этот глинистый минерал образует связанную кристаллическую структуру посредством укладки слоев оксида кремния и оксида алюминия (рис. 1).

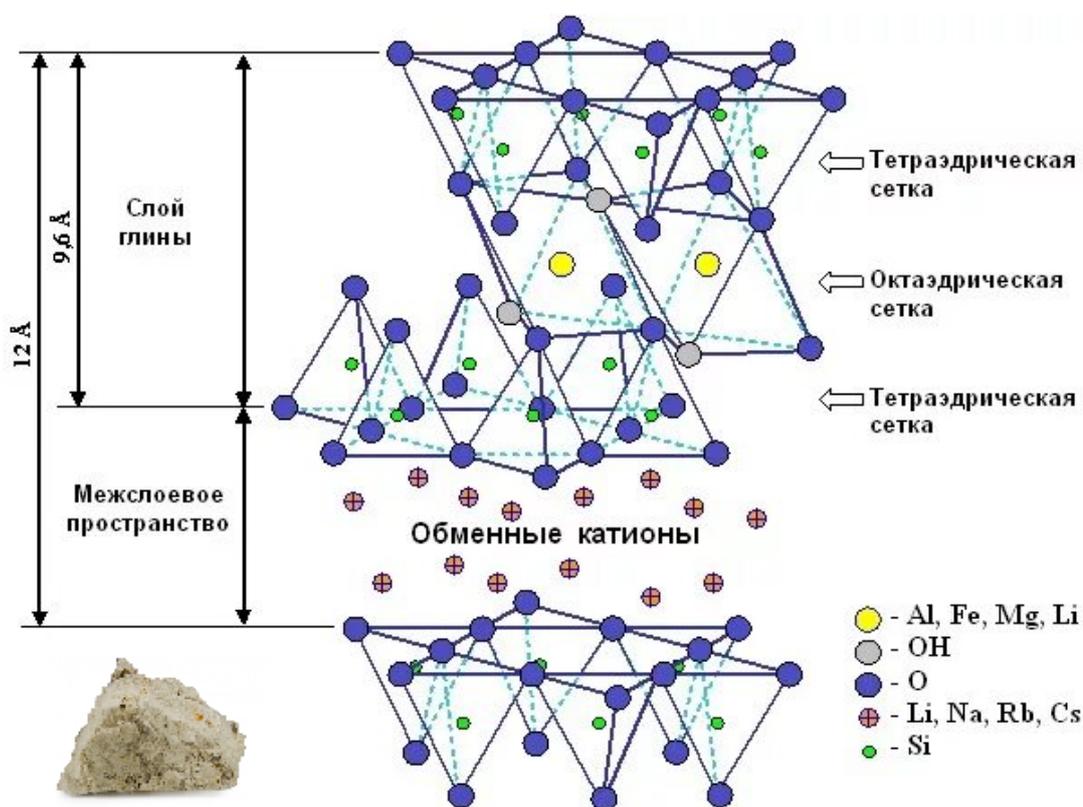


Рис. 1. – Структура монтмориллонита [11]

При попадании в водную среду глинистые частицы формируют вокруг себя двойной электрический слой и образуется дисперсная система [12, 13]. Одновалентные катионы в двойном слое можно обменивать на другие катионы. Портландцемент содержит достаточное количество ионов кальция

$\text{Ca}^{+}$  для замены одновалентных катионов на поверхности и уменьшения толщины двойного слоя [4].

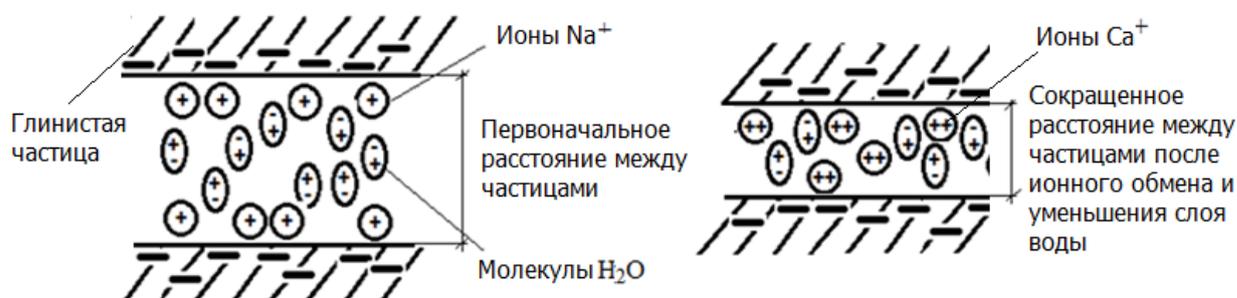


Рис. 2. – Катионный обмен

Этот процесс ионного обмена происходит в течение нескольких часов.

**Стадия 2.** На второй стадии происходит флокуляция и агрегация. Флокуляция развивается в результате катионного обмена. Благодаря флокуляции изменяется расположение глинистых частиц от плоской параллельной структуры до более случайной ориентировки на «грань к лицу» (рис. 3).



Рис. 3. – Реструктуризация частиц

При этом глинистые частицы склеиваются поверхностями между собой, образуя более крупные агрегаты. В результате изменяется текстура грунта. Грунт становится рыхлый, гранулированный.

Уменьшенный размер двойного слоя из-за катионного обмена, а также повышенное внутреннее трение глинистых частиц из-за флокуляции и

агрегации приводят к уменьшению пластичности, увеличению прочности на сдвиг и улучшению текстуры грунта.

Процесс реструктуризации частиц происходит быстро. Наиболее значительные изменения происходят в течение нескольких часов после смешения.

**Стадия 3.** Цементная гидратация. Процесс гидратации в глинистых грунтах протекает так же, как и в сыпучих грунтах. Кроме того, в стадии твердения в результате химической реакции силикатов и воды образуются очень небольшие кристаллы, которые соединяют флокулированные глинистые частицы и образуют глино-цементные связи. Эти связи улучшает гранулометрический состав глинистого грунта/заполнителя путем образования больших агрегатов из мелкозернистых частиц (рис. 4).

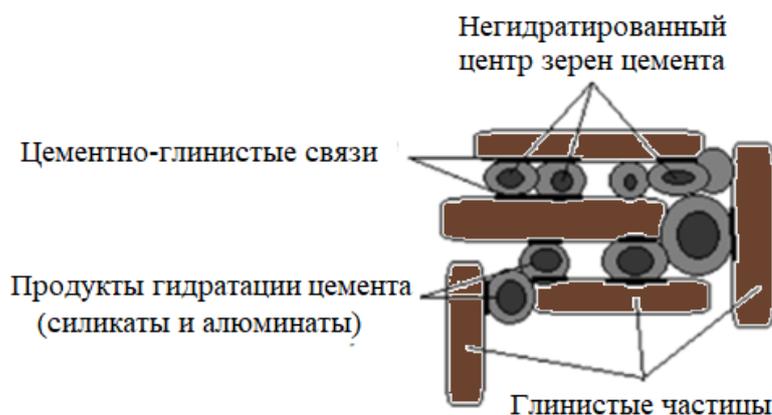


Рис. 4. – Гидратация цемента в глинистых грунтах

**Стадия 4.** Образование гидроксида кальция в процессе гидратации повышает pH смеси. В результате глинозем и кремнезем, поверхности частиц грунта, растворяется и вступают в реакцию с ионами кальция, образуя вяжущие продукты, состоящие в основном из гидратов силиката кальция или гидратов алюмината кальция, или из обоих. Растворившиеся глинозем и кремнезем могут образовывать с ионами кальция, поступившими из

портландцемента, дополнительный цементирующий материал ( $C_2A$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_3S$ ), который дополнительно связывает глинистые частицы (рис. 5).

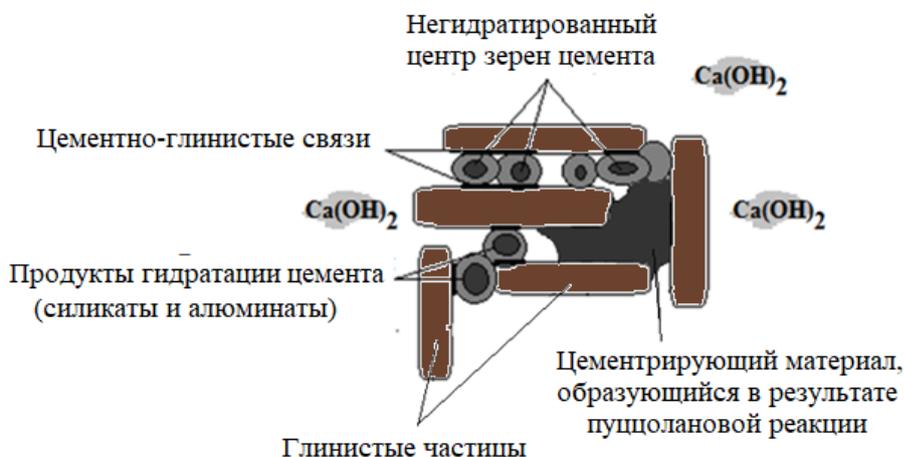


Рис. 5. – Пуццолановая реакция

Эти реакции протекают медленно, в течение нескольких месяцев и лет, и могут дополнительно увеличивать прочность укрепленного грунта, а также уменьшать его пластичность и улучшать его гранулометрический состав.

На конечные свойства укрепленного грунта оказывают влияние следующие факторы: минералогия и удельная поверхность грунта, содержание воды, количество цемента, время затвердевания и способ уплотнения.

### Литература

1. Лофлер М., Слободчикова Н.А. Методики подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость, 2018. №2 (25). С. 141-147.

2. Zhou Y., Huo M., Zhang L., Guan Q. Strength development and solidification mechanism of soils with different properties stabilized by cement-slag-based materials // Case Studies in Construction Materials. 2024. P. 21.

3. Лофлер М., Слободчикова Н.А., Плюта К.В. Получение неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. №2 (21). С. 62-67.

4. Makusa, G.P. State of the art review soil stabilization methods and materials in engineering practice // Department of Civil, Environmental and Natural resources engineering Division of Mining and Geotechnical Engineering Luleå University of Technology. – Sweden Luleå. 2012. P. 35.

5. Balagosa J., Navea I.J., Lee M.J., Choo Y.W., Kim H.-S., Kim J.-M. Dynamic property growth of weathered granite soils stabilized with wood pellet fly ash based binders // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2024. P. 180.

6. Чудинов С.А. Повышение эффективности укрепления грунтов портландцементом со стабилизирующей добавкой // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. С. 8.

7. Курочка П.Н., Гаврилов А.В. Соотношение размера частиц в полидисперсных структурах как первый шаг к оптимизации составов композиционных вяжущих // Инженерный вестник Дона. 2013. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1596.

8. Райхель В. Бетон: В 2-х ч. Ч. 1. Свойства. Проектирование. Испытание. Москва. Стройиздат. 1979. С. 111.

9. Mohamed A.A.M.S. Improvement of expansive soil characteristics stabilized with sawdust ash, high calcium fly ash and cement // Case Studies in Construction Materials. 2023. P. 18.

10. Tanyıldızı M., Uz V.E., Gökalp İ. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review // Construction and Building Materials. 2023. P. 398.

11. U. S. Geological Survey Open-File Report 01-041. URL: images.slideplayer.com/16/4926062/slides/slide\_20.jpg.

---



12. Хмелевцов А.А. Формирование структурных связей в аргиллитоподобных глинах сочинской свиты в г. Сочи // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2037.

13. Dmitrieva T.V., Strokova V.V., Bezrodnykh A.A. Influence of the genetic features of soils on the properties of soil-concretes on their basis. Construction Materials and Products. 2018. 1 (1). pp. 69 – 77.

14. Sinitsin D.A., Elrefaei A.E.M.M., Glazachev A.O., Kuznetsov D.V., Parfenova A.A., Volokitina I.E., Kayumova E.I., Nedoseko I.V. Study of the characteristics of pavement elements made of rein-forced soil with the use of secondary resources. Construction Materials and Products. 2023. 6 (6). URL: bstjournals.ru/archives/11767.

### References

1. Lofler M., Slobodchikova N.A. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost. 2018. №2 (25). pp. 141-147.

2. Zhou Y., Huo M., Zhang L., Guan Q. Case Studies in Construction Materials. 2024. P. 21.

3. Lofler M., Slobodchikova N.A., Pljuta K.V. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost. 2017. №2 (21). pp. 62-67.

4. Makusa, G.P. Department of Civil, Environmental and Natural resources engineering Division of Mining and Geotechnical Engineering Luleå University of Technology. Sweden Luleå. 2012. P. 35.

5. Balagosa J., Navea I.J., Lee M.J., Choo Y.W., Kim H.-S., Kim J.-M. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2024. P. 180.

6. Chudinov S.A. Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2014. № 5. P. 8.

7. Kurochka P.N., Gavrilov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1596.



8. Rajhel' V. Beton: V 2-h ch. Ch. 1. Svoystva. Proektirovanie. Ispytanie [Features. Designing. Test] Moskva. Strojizdat. 1979. P. 111.
9. Mohamed A.A.M.S. Case Studies in Construction Materials. 2023. P. 18.
10. Tanyıldızı M., Uz V.E., Gökalp İ. Construction and Building Materials. 2023. P.398.
11. U. S. Geological Survey Open-File Report 01-041. URL: [images.slideplayer.com/16/4926062/slides/slide\\_20.jpg](https://images.slideplayer.com/16/4926062/slides/slide_20.jpg).
12. Hmelevcov A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2037](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2037).
13. Dmitrieva T.V., Strokova V.V., Bezrodnykh A.A. Construction Materials and Products. 2018. 1 (1). P. 69 – 77.
14. Sinitsin D.A., Elrefaei A.E.M.M., Glazachev A.O., Kuznetsov D.V., Parfenova A.A., Volokitina I.E., Kayumova E.I., Nedoseko I.V. Construction Materials and Products. 2023. 6 (6). URL: [bstu-journals.ru/archives/11767](http://bstu-journals.ru/archives/11767).

**Дата поступления: 11.12.2024**

**Дата публикации: 26.01.2025**