

## ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 625.1 + 06

DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_4\_71

*В. Л. Шаповалов, А. В. Морозов, М. В. Окост, Т. П. Горбачева***ПОРИСТЫЙ ГЕОКОМПОЗИТНЫЙ МАТЕРИАЛ  
ДЛЯ СЛОЖНЫХ УСЛОВИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА \***

**Аннотация.** Настоящая работа посвящена исследованию возможности создания на базе глинистых грунтов, применяемых при строительстве земляного полотна железных дорог, нового геокомпозитного материала, обладающего свойствами, позволяющими использовать его в качестве элемента конструкции грунтовых объектов, строящихся в сложных условиях, где от материалов и конструкций необходимы такие свойства, как пониженный вес и теплопроводность, при этом они должны обеспечить стабильность земляного полотна и его основания. В качестве такого материала в работе предлагается геокомпозит, состоящий из глинистого грунта и полиуретана, который в результате изготовления будет формировать пористую структуру и при этом не потребует дополнительного воздействия высокими температурами.

**Ключевые слова:** глинистый грунт, геокомпозит, земляное полотно, полиуретан, теплопроводность, облегченные конструкции.

**Для цитирования:** Пористый геокомпозитный материал для сложных условий строительства / В. Л. Шаповалов, А. В. Морозов, М. В. Окост, Т. П. Горбачева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 4. – С. 71–80. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_4\_71.

**Введение**

Развитие сети железных и автомобильных дорог связано со строительством в том числе в сложных природных и климатических условиях, на слабом основании или участках с многолетнемерзлыми грунтами. В таких условиях необходимо предусмотреть мероприятия, снижающие вероятность возникновения деформаций при эксплуатации. Для возможности строительства в таких условиях необходимы современные материалы, обладающие свойствами, способными уменьшить нагрузку на слабые основания и снизить влияние термических воздействий на земляное полотно и его основание.

Последнее время все большее распространение получают геополимеры и геокомпозиты, имеющие различные свойства и находящие свое применение в различных областях промышленности, транспорта, строительства и др. Одними из направлений развития материалов, в основе которых лежат геополимеры, являются пористые геополимеры. Основными преимуществами таких материалов являются возможность использования отходов различных производств, их экологичность, повышенные прочностные свойства и улучшенные теплопроводные характеристики. В классическом представлении под геополимерами понимают алюмосиликатные материалы, активированные щелочными или кислотными активаторами [1, 2]. Современные основы исследования создания пористых геополимеров приведены в работах [3–5].

В работе [6] рассмотрены различные варианты изготовления пористого геополимера с твердением при различных температурах, а также при воздействии СВЧ электромагнитного поля на образец. Установлено, что при определенном сочетании температурных воздействий удается добиться прочности образца на сжатие до 10,2 МПа, что является достаточно высоким показателем. При этом при формировании геокомпозита при комнатной температуре прочность составляет всего 0,37 МПа. В работе [7] авторы получили геокомпозит с плотностью 351 кг/м<sup>3</sup>, коэффициентом теплопроводности 0,0782 Вт/(м·К) и прочностью на сжатие 0,62 МПа. Такие свойства получены при использовании 30 %-ного раствора пероксида водорода. Коллективом авторов [8] был проведен комплексный анализ структуры и свойств вспененных геополимеров, их фазовый состав, микроструктура и механические характеристики, что позволило установить взаимосвязь между структурой и свойствами материала. В работе [9] авторы получили образцы геополимера, имеющие низкую плотность и прочность от 0,73 до 1,17 МПа. В работе [10] авторы провели исследования по влиянию добавок CaO, MgO, ZnO, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC и ZrO<sub>2</sub> на

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Федерального агентства железнодорожного транспорта (соглашение № 109-03-2025-007).

характеристики геополимера на основе отходов сжигания угля. Прочность таких образцов составила от 1,35 до 2,03 МПа.

Данное исследование посвящено созданию геокомпозита при температурах окружающей среды, имеющего достаточную прочность для возможности его использования в облегченных конструкциях земляного полотна автомобильных и железных дорог, а также низкую плотность и теплопроводность для использования в качестве теплоизоляционного материала для устойчивого строительства в районах со сложными условиями строительства и эксплуатации. Предлагаемый материал относится к пористым геокомпозитам на основе органических полимерных композиций и матрицы из глинистых грунтов.

#### ***Методы. Оптическая и электронная микроскопия***

Для оценки характеристик пористой структуры геокомпозита и анализа элементного состава глинистого грунта и полученного вспененного материала использованы методы оптической и электронной микроскопии, дополненные применением энергодисперсионного рентгеновского детектора.

Микроизображения образцов в оптическом диапазоне получены с помощью оптического микроскопа ЛОМО БИОЛАМ Р12 с цифровой насадкой DCM-310, цифрового микроскопа Levenhuk DTX90 с камерой 5 МП. Макросъемка выполнена цифровой камерой 64 МП. Поскольку исследуемые образцы имеют микрорельеф, то для данных с оптических микроскопов были выполнены процедуры обработки, обеспечивающие четкость снимков на всех фокусных расстояниях. Для этих же типов микроскопов выполнялась специальная процедура пробоподготовки, которая заключалась в выполнении шлифовки исследуемой плоскости образца. На подготовленных образцах выбирались несколько областей от 3 до 5, где производилась послойная съемка с последующим получением объединенного изображения.

Электронная микроскопия выполнялась с использованием электронного сканирующего микроскопа ZEISS EVO MA 18, оснащенного энергодисперсионным рентгеновским детектором (EDAX) модели X-Max 50N. Ускоряющее напряжение варьировалось от 2 до 10 kV. Съемка осуществлялась при низком вакууме, пробы предварительно не подвергались процедуре напыления.

#### ***Определение теплопроводности***

Теплопроводность исходного грунта и полученного геокомпозита осуществлялась прибором ИТП-МГ4, который создает стационарный тепловой поток, проходящий через плоский образец определенной толщины в определенном направлении с последующим измерением плотности теплового потока и температуры противоположной грани. Размеры образцов составляли 100 на 100 мм, толщина образцов составляла 18 мм.

#### ***Определение прочности***

Прочность подготовленных образцов геокомпозитов на сжатие определялась в лабораторных условиях с использованием автоматизированного вычислительного комплекса «АСИС», обеспечивающего статическую нагрузку на поверхность образца в условиях одноосного сжатия. Подготовленные образцы-кубы с гранями 4 см предварительно осматривались, измерялись, взвешивались. Для обеспечения плоскостности опорных поверхностей и перпендикулярности смежных граней образцов проводилась их торцовка и шлифование. Нагружение образцов проводилось непрерывно с постоянной скоростью нарастания нагрузки 1 мм/мин. При разрушении образца (наличие трещин в образце) либо при отсутствии нарастания разрушающей нагрузки установка разгружалась и фиксировалось значение нагрузки. Прочность образцов рассчитывалась, как отношение предельной разрушающей нагрузки на площадь опирания штока пресса на поверхность образца.

#### ***Материалы. Глинистый грунт***

Одним из компонентов геокомпозита является глинистый грунт, который имеет следующие основные физические характеристики, определенные в лабораторных условиях: влажность на границе раскатывания ( $W_p$ ) – 19,08 %, влажность на границе текучести ( $W_L$ ) – 40,67 %, число пластичности ( $I_p$ ) – 21,59 %, оптимальная влажность ( $W_{opt}$ ) – 19,50 %, плотность частиц грунта ( $\rho_s$ ) – 2,76 г/см<sup>3</sup>. Исследуемый грунт классифицируется, как глина легкая, пылеватая.

#### ***Полиуретан***

В качестве полимера использован двухкомпонентный полиуретан с временем жизни 3–4 минуты и временем полного отверждения 24–48 часов. Твердость полученного пластика по Шор Д составляет 75–80. Полиуретаны – это синтетические полимеры, содержащие в основе цепи макромолекулы уретановых групп, которые в общем виде можно представить следующим выражением  $-\text{HN}-\text{C}(\text{O})-\text{O}-$ .

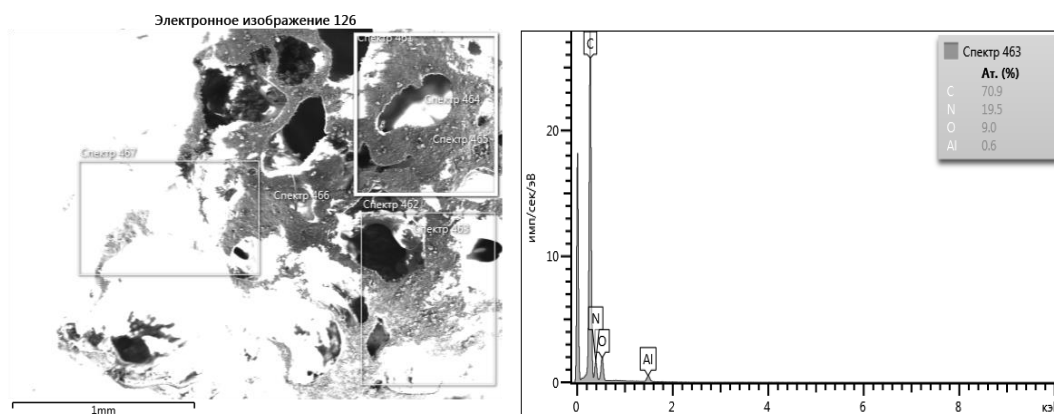


Рис. 1. Расположение участков для элементного анализа и спектр одного из них

Выполненный элементный анализ в затвердевшем полимере показал наличие в составе пробы С (66 %), N (9 %), O (22 %). Всего было проанализировано 7 областей и локальных участков. Области образца, в которых получены спектры и статистические характеристики по выбранным участкам, приведены на рис. 1 и в табл. 1.

Таблица 1

**Статистические характеристики концентраций элементов на выбранных участках пробы портландцемента (%)**

Концентрация	С	N	O
Максимальная	72,87	19,52	31,63
Минимальная	56,28	2,91	9,00
Усредненная	65,73	9,20	21,97
Стандартное отклонение	5,35	5,26	7,38

Экспериментально установлено, что для создания полимера подходят все виды глинистых грунтов, имеющие влажность от 10 до 50 %. Регулирование пористости вспененного геокомпозитного материала осуществлялось изменением соотношения пропорций глинистых грунтов и полиуретанов, а также исходной влажностью глинистого грунта. При изготовлении образцов – производилось смешиванием глинистых грунтов и полиуретана в заданном соотношении, после чего происходила реакция вспенивания и полимеризации (твердения). Смешивание происходило в специальной форме (рис. 2), стенки которой были обработаны для предотвращения прилипания геокомпозита. В зависимости от применяемых компонентов и их свойств скорость протекания реакции может отличаться и составлять от нескольких минут (при двухкомпонентных составах полиуретана с использованием затвердителя), как в рассматриваемом случае, до нескольких часов (при использовании однокомпонентных связующих). Вспенивание и отверждение происходило при естественной влажности грунта, близкой к оптимальным и естественным температурам окружающей среды без дополнительных термических воздействий. Время набора прочности после отверждения зависит от типа связующего и влажности глинистого материалов. В рассматриваемой композиции твердение происходило в течение 2–3 минут.



Рис. 2. Процесс формирования геокомпозита в металлической форме

При формировании геокомпозита протекала достаточно активная химическая реакция с выделением тепла и газов, которые формировали поры в образце в процессе его твердения. Так, например, объем смеси после протекания реакции и формирования геокомпозита с исходной влажностью глинистого грунта 20 % и содержанием полиуретана 50 % увеличился почти в 3 раза. После твердения образец извлекался из формы, с последующим разделением образца на фрагменты для испытаний на теплопроводность и прочность.

#### ***Структура и свойства геокомпозита***

Полученный геокомпозит (рис. 3) представляет из себя матрицу из глинистого грунта, связанную полиуретаном холодного твердения, в которой при затвердевании сформированы закрытые поры.

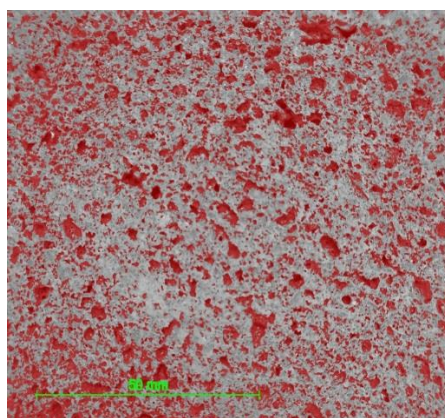


**Рис. 3. Внешний вид пористого геокомпозита**

Геокомпозит после изготовления представляет собой материал, имеющий пористую структуру комбинированного закрытого и открытого типа, обладающего пониженной плотностью и достаточно высокой прочностью на сжатие, что дает возможность применять данный материал для строительства облегченных конструкций земляного полотна.

#### ***Микроструктура***

Фотографии поверхности среза образца были обработаны в программе Gwyddion, с помощью которой были выделены поры на изображении, определена их площадь и их средний размер. Так площадь пор образца, приведенного на рис. 4, составила 33,8 %, а средний размер зерна 0,53 мм.



**Рис. 4. Структура пор образца геокомпозита**

Для оценки влияния концентрации полимера и влажности глинистого грунта на плотность и прочностные характеристики материала была подготовлена серия образцов при двух концентрациях (30 и 50 % полимера) и трех влажностях глинистого грунта (20–40 %). Для каждого сочетания изменяемых параметров получены образцы, которые были подготовлены шлифовкой поверхности с целью дальнейшего микроскопического исследования. Анализировались поры размером более 0,2 мм. Усредненные значения содержания пор приведены в табл. 2 и на рис. 5.

Таблица 2

## Усредненная пористость рассматриваемых образцов геокомпозита

Влажность грунта ( $W$ ), %	Объем пор образца, %	
	Соотношение глинистого грунта и полимера 50 % (глина)/50 % (полимер)	Соотношение глинистого грунта и полимера 70 % (глина)/30 % (полимер)
20	33,46	18,57
30	34,13	1,63
40	1,49	3,56

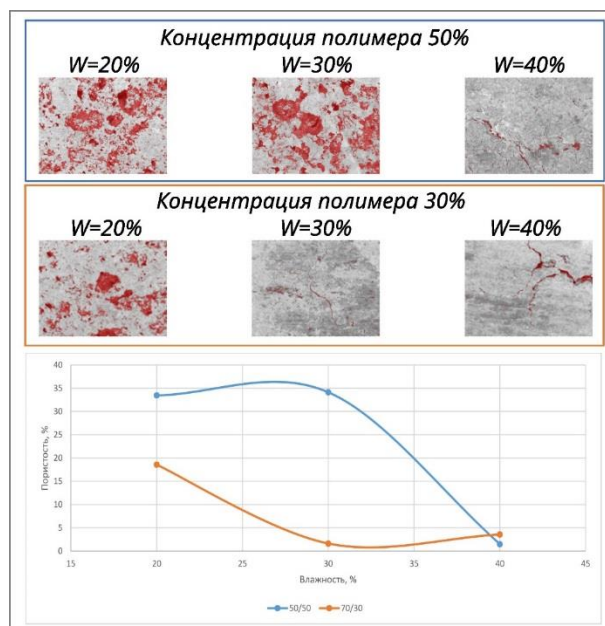


Рис. 5. Внешний вид и размеры пор рассматриваемых образцов геокомпозита

Из изображений видно, что при большей концентрации полимера объем сформированных крупных пор больше, а при высоких влажностях, формирование крупных пор значительно сокращается. Так при влажности более 40 % и большей концентрации полимера, крупные округлые поры практически отсутствуют, а при меньшей концентрации такие процессы происходят уже при влажности более 30 %.

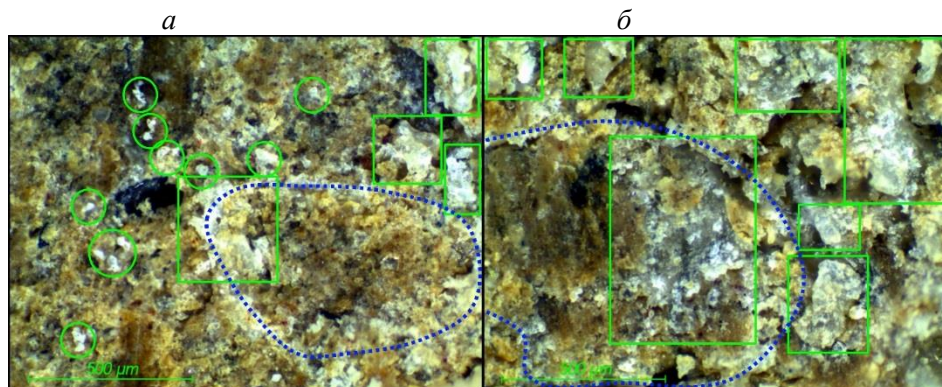
Для этих же образцов определены средние значения размеров пор. Средний размер рассчитывается усреднением стороны эквивалентного квадрата. Под стороной эквивалентного квадрата понимается сторона квадрата с той же площадью проекции, что и у поры. Значения для рассматриваемых образцов приведены в табл. 3. Образцы с влажностью 40 % при обеих концентрациях и образец при влажности 20 % и концентрации полимера 30 % не формируют округлые поры, поэтому данные по этим образцам не включены в табл. 3.

Таблица 3

## Средний размер пор

Влажность грунта ( $W$ ), %	Средний размер пор, мм	
	Соотношение глинистого грунта и полимера 50 % (глина)/50 % (полимер)	Соотношение глинистого грунта и полимера 70 % (глина)/30 % (полимер)
20	0,53	0,48
30	0,56	-

На рис. 6 приведены изображения, полученные на оптическом микроскопе для двух образцов при концентрации полимера 30 (рис. 6 а) и 50 (рис. 6 б) процентов с исходной влажностью глинистого грунта, равной 20 %.



**Рис. 6. Микроизображение геокомпозита с исходной влажностью глинистого грунта  $W = 20 \%$**

Зелеными кругами на рис. 6, а отмечены частички полимера, расположенные на поверхности пробы. Размер мелких частиц составляет в среднем порядка 40 микрон. На рис. 6, б такие частички отсутствуют. Зелеными прямоугольниками выделены большие участки, где визуально можно наблюдать более крупные комки полимера с небольшими примесями глинистых частиц. Синими прерывистыми линиями выделены полимерные жилы, сформированные вокруг агрегаций глинистого грунта.

Выполненный элементный анализ пробы геокомпозита с концентрацией полимера 50 % показал наличие в составе пробы С, О, Mg, Al, Si, S, К, Са, Fe. Наибольший вклад в пробу вносят кислород (33 %), углерод (26 %), кремний (17 %), алюминий (7 %) и кальций (9 %). Остальные элементы вносят незначительный вклад в состав пробы. Всего было проанализировано 12 областей и локальных участков. Статистические характеристики по выбранным участкам приведены в табл. 4.

Таблица 4

#### Статистические характеристики выбранных участков

Статистика	С	О	Mg	Al	Si	S	К	Са	Fe
Максимальная	63,26	55,54	1,89	12,28	40,00	0,17	7,71	45,87	25,21
Минимальная	6,30	12,17	0,28	1,80	4,67	0,10	0,42	0,26	0,14
Усредненная	26,23	33,44	1,05	6,62	17,10	0,14	2,45	8,56	4,41
Стандартное отклонение	14,84	16,66	0,46	2,93	10,55	0,05	2,44	14,77	7,17

#### Теплопроводность

Теплопроводность образцов определялась в соответствии с методикой проведения измерений теплопроводности с использованием прибора, описанного выше. В табл. 5 приведены значения эффективной теплопроводности  $\lambda$  испытуемых образцов. Для определения теплопроводности геокомпозита выбран образец, имеющий высокий процент пористости с исходной влажностью глинистого грунта близкой к оптимальной.

Таблица 5

#### Результаты измерений теплопроводности материалов

Название материала	Эффективная теплопроводность $\lambda$ , Вт/м·К	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Глина в сыпучем сухом состоянии	0,18	1,10
Глина сухая с коэффициентом уплотнения, равным 1	0,91	1,81
Глина при исходной влажности 20 % (50 % по массе образца)+полиуретан (50 % по массе образца)	0,17	0,74

Из табл. 5 видно, что по показателю плотности в сравнении с уплотненным глинистым грунтом у геокомпозита он в 2 раза меньше, а по показателю эффективной теплопроводности – более чем в 5 раз.

### **Прочность на сжатие**

Прочность на сжатие подготовленных образцов из глинистого грунта и геокомпозита определялась в лабораторных условиях с использованием автоматизированного вычислительного комплекса «АСИС» (метод одноосного сжатия).

Образцы кубовидной формы размером 40×40×40 мм изготавливались из образца размером 100×100×100 с последующим выпиливанием образцов нужного размера и их торцовкой. Образцы нагружались со скоростью 1 мм в минуту до тех пор, пока усилие нагрузки не начинало уменьшаться, что свидетельствовало о частичном или полном разрушении образца. По отношению разрушающей нагрузки к площади верхней грани образца определялось значение прочности на сжатие. На начальной стадии нагружения образцы из геокомпозита проявляли упругие свойства и после снятия нагрузки почти в полной мере восстанавливали форму. При нагрузках, разрушающих образец, когда на боковой поверхности образцовывались трещины, образец сохранял целостность и не разрушался, а после снятия нагрузки частично восстанавливал исходную форму. Усредненные значения прочности образцов на сжатие  $R$  (МПа) приведены в табл. 6.

Из табл. 6 видно, что снижение влажности исходного глинистого грунта и увеличение концентрации двухкомпонентного полиуретана приводит к уменьшению плотности полученного геокомпозита. Так снижение влажности исходного глинистого грунта на 20 % приводит к уменьшению плотности на 19 % при 30 % концентрации полимера в смеси и на 35 % – при 50 % концентрации полимера в смеси. В отличие от уплотненного глинистого грунта геокомпозит имеет плотность ниже в 1,4–2,5 раза. Уменьшение влажности сказывается и на прочности на сжатие образца. Так уменьшение влажности исходного глинистого грунта на 20 % приводит к увеличению прочности на сжатие в 2,3 раза при 30 % концентрации полимера в смеси и в 1,3 раза – при 50 % концентрации полимера в смеси. Учитывая достаточно большой диапазон изменения плотности и прочности образцов геокомпозита, материал может иметь достаточно широкий спектр применения, как в качестве теплоизоляционного материала, так и в качестве материала для облегченных грунтовых конструкций.

Таблица 6

### **Результаты измерений прочности на сжатие**

Название материала	Прочность на сжатие $R$ , МПа	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Глина сухая с коэффициентом уплотнения, равным 1	2,20	1,81
Глина при исходной влажности 20 % (50 % по массе)+полиуретан (50 % по массе)	1,18	0,74
Глина при исходной влажности 30 % (50 % по массе)+полиуретан (50 % по массе)	1,28	0,73
Глина при исходной влажности 40 % (50 % по массе)+полиуретан (50 % по массе)	1,39	1,17
Глина при исходной влажности 20 % (70 % по массе)+полиуретан (30 % по массе)	2,98	1,01
Глина при исходной влажности 30 % (70 % по массе)+полиуретан (30 % по массе)	2,33	1,10
Глина при исходной влажности 40 % (70 % по массе)+полиуретан (30 % по массе)	1,29	1,20
Глина при исходной влажности 50 % (70 % по массе)+полиуретан (30 % по массе)	0,60	1,33
Напряжения, возникающие на основной площадке и в основании 16-метровой насыпи, МПа		
Напряжения, возникающие в основании насыпи высотой 16 м, сложенной из глинистого грунта	~0,32	
Допустимые напряжения на основной площадке земляного полотна	0,08–0,12	

### Выводы

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие основные выводы:

– Экспериментально проверена возможность формирования геокомпозита из глинистых грунтов в широком диапазоне исходной влажности. Установлено, что влажность глинистого грунта, близкая к оптимальной, дает наилучшее сочетание плотности и прочности готового геокомпозита.

– Оценена возможность формирования геокомпозита из глинистых грунтов с влажностями на границе текучести и выше. Такая особенность позволяет разработать технологию стабилизации избыточно увлажненных грунтов.

– При повреждении геокомпозитного блока при транспортировке, укладке или эксплуатации, поврежденный блок имеет высокую ремонтпригодность. Восстановление осуществляется тем же полимерным составом, который использовался при изготовлении геокомпозита, путем заполнения полимером поврежденного участка.

– Геокомпозит обладает упругими свойствами и способен практически полностью восстанавливать форму при снятии незначительных нагрузок и частично восстанавливать форму после снятия нагрузок, близких к пределу прочности. При этом даже после разрушения геокомпозит способен воспринимать нагрузку.

– Предел прочности рассматриваемых образцов находится в пределах от 0,60 до 2,98 МПа, что позволяет использовать материал как на основной площадке земляного полотна, так и в основании насыпи.

– По показателю плотности в сравнении с уплотненным глинистым грунтом это значение у геокомпозита в 2 раза меньше, а по показателю эффективной теплопроводности – более чем в 5 раз.

– Пористость геокомпозита регулируется значением влажности исходного глинистого грунта и концентрацией полиуретана в подготовленной смеси. Учитывая большой диапазон изменения плотности и прочности образцов геокомпозита, материал может иметь достаточно широкий спектр применения как в качестве теплоизоляционного материала, так и в качестве материала для облегченных грунтовых конструкций.

Упругие свойства геокомпозита позволяют использовать данный материал для формирования виброгасящего слоя на основной площадке земляного полотна при организации скоростного и высокоскоростного движения.

### Список литературы

1 **Bai, C.** Processing, properties and applications of highly porous geopolymers : a review / C. Bai, P. Colombo // *Ceram. Int.*, 44 (2018). – P. 16103–16118. – DOI 10.1016/j.ceramint.2018.05.219.

2 Porous geopolymer composites : a review / X. Zhang, C. Bai, Y. Qiao [et al.] // *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 150 (2021), Article 106629. – DOI 10.1016/j.compositesa.2021.106629.

3 Porous geopolymer composites: A review / X. Zhang, C. Bai, Y. Qiao [et al.] // *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*. – 2021. – V. 150. – Article 106629. – DOI 10.1016/j.compositesa.2021.106629.

4 **Łach, M.** Geopolymer Foams – Will They Ever Become a Viable Alternative to Popular Insulation Materials – A Critical Opinion / M. Łach // *Materials*. – 2021. – V. 14 (13). – P. 3568. – DOI 10.3390/ma14133568.

5 **Novais, R. M.** Geopolymer foams: An overview of recent advancements / R. M. Novais, R. C. Pullar, J. A. Labrincha // *Progress in Materials Science*. – 2020. – V. 109. – P. 100621. – DOI 10.1016/j.pmatsci.2019.100621.

6 Исследование температурно-временных режимов низкотемпературного синтеза вспененных

### References

1 **Bai, C.** Processing, properties and applications of highly porous geopolymers : a review / C. Bai, P. Colombo // *Ceram. Int.*, 44 (2018). – P. 16103–16118, DOI 10.1016/j.ceramint.2018.05.219.

2 Porous geopolymer composites : a review / X. Zhang, C. Bai, Y. Qiao [et al.] // *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, 150 (2021), Article 106629, DOI 10.1016/j.compositesa.2021.106629.

3 Porous geopolymer composites : a review / X. Zhang, C. Bai, Y. Qiao [et al.] // *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*. – 2021. – V. 150. – Article 106629. – DOI 10.1016/j.compositesa.2021.106629.

4 **Łach, M.** Geopolymer Foams – Will They Ever Become a Viable Alternative to Popular Insulation Materials – A Critical Opinion / M. Łach // *Materials*. – 2021. – V. 14 (13). – P. 3568. – DOI 10.3390/ma14133568.

5 **Novais, R. M.** Geopolymer foams : An overview of recent advancements / R. M. Novais, R. C. Pullar, J. A. Labrincha // *Progress in Materials Science*. – 2020. – V. 109. – P. 100621. – DOI 10.1016/j.pmatsci.2019.100621.

6 Study of temperature-time regimes of low-temperature synthesis of foamed geopolymers based on solid fuel energy waste / L. V. Klimova,

геополимеров на основе отходов твердотопливной энергетики / Л. В. Климова, В. С. Романюк, Ю. А. Бостанов [и др.] // Russian Internet Journal of Industrial Engineering. – 2025. – Т. 12, № 1. – С. 73–79. – DOI 10.24892/RIJE/20250112.

7 **Изварин, А. И.** Исследование порообразования теплоизоляционного геополимера на основе золошлаковых отходов / А. И. Изварин, Е. А. Яценко, Д. Н. Изварина // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 77–82. – DOI 10.17213/1560-3644-2024-2-77-82.

8 Исследование структуры и свойств вспененных геополимерных материалов на основе отходов твердотопливной энергетики / Е. А. Яценко, А. И. Изварин, С. Чаудхари, В. С. Яценко // Вестник современных технологий. – 2023. – № 4 (32). – С. 35–40. – EDN HZYXUC.

9 Study on the Curing and Foaming of Surfactant-Modified Geopolymer Gels Based on Ash and Slag Waste from Coal Combustion / E. A. Yatsenko, S. V. Trofimov, B. M. Goltsman [et al.] // Gels. – 2024. – Vol. 10 (1), No. 19. – DOI 10.3390/gels10010019.

10 Recycling of Coal Combustion Waste through Production of Foamed Geopolymers with Improved Strength / E. A. Yatsenko, B. M. Goltsman, Y. V. Novikov [et al.] // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, No. 23. – P. 16296. – DOI 10.3390/su152316296.

V. S. Romanyuk, Yu. A. Bostanov [et al.] // Russian Internet Journal of Industrial Engineering. – 2025. – Vol. 12, No. 1. – P. 73–79. – DOI 10.24892/RIJE/20250112.

7 **Izvarin, A. I.** Study of pore formation of heat-insulating geopolymer based on ash and slag waste / A. I. Izvarin, E. A. Yatsenko, D. N. Izvarina // Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences. – 2024. – No. 2. – P. 77–82. – DOI 10.17213/1560-3644-2024-2-77-82.

8 Study of the structure and properties of foamed geopolymer materials based on solid fuel energy waste / E. A. Yatsenko, A. I. Izvarin, S. Chaudhary, V. S. Yatsenko // Bulletin of modern technologies. – 2023. – No. 4 (32). – P. 35–40. – EDN HZYXUC.

9 Study on the Curing and Foaming of Surfactant-Modified Geopolymer Gels Based on Ash and Slag Waste from Coal Combustion / E. A. Yatsenko, S. V. Trofimov, B. M. Goltsman [et al.] // Gels. – 2024. – Vol. 10 (1), No. 19. – DOI 10.3390/gels10010019.

10 Recycling of Coal Combustion Waste through Production of Foamed Geopolymers with Improved Strength / E. A. Yatsenko, B. M. Goltsman, Y. V. Novikov [et al.] // Sustainability. – 2023. – Vol. 15, No. 23. – P. 16296. – DOI 10.3390/su152316296.

*V. L. Shapovalov, A. V. Morozov, M. V. Okost, T. P. Gorbacheva*

### POROUS GEOCOMPOSITE MATERIAL FOR CHALLENGING CONSTRUCTION CONDITIONS

**Abstract.** This paper explores the feasibility of developing a new geocomposite material based on clay soils used in railway subgrade construction. This material possesses properties suitable for use as a structural element in earth structures constructed in challenging conditions, where materials and structures require properties such as reduced weight and thermal conductivity while ensuring the stability of the subgrade and its foundation. The proposed material is a geocomposite consisting of clay soil and polyurethane, which, when manufactured, will form a porous structure and will not require additional exposure to high temperatures.

**Keywords:** clay soil, geocomposite, subgrade, polyurethane, thermal conductivity, light-weight structures.

**For citation:** Porous geocomposite material for challenging construction conditions / V. L. Shapovalov, A. V. Morozov, M. V. Okost, T. P. Gorbacheva // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 4. – P. 71–80. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_4\_71.

#### Сведения об авторах

##### **Шаповалов Владимир Леонидович**

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,  
доктор технических наук, доцент,  
e-mail: cpd@rgups.ru

#### Information about the authors

##### **Shapovalov Vladimir Leonidovich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair “Track and Track Facilities”,  
Doctor of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: cpd@rgups.ru

**Окост Максим Викторович**

Ростовский государственный университет путей  
сообщения (РГУПС),  
кафедра «Изыскания, проектирование  
и строительство железных дорог»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: okostmv@rgups.ru

**Морозов Андрей Владимирович**

Ростовский государственный университет путей  
сообщения (РГУПС),  
кафедра «Физика»,  
кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: cpd@rgups.ru

**Горбачева Татьяна Петровна**

Ростовский государственный университет путей  
сообщения (РГУПС),  
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,  
ассистент,  
e-mail: nanami1995@bk.ru

**Okost Maksim Victorovich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair “Railway Survey, Design and Construction”,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: okostmv@rgups.ru

**Morozov Andrey Vladimirovich**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair “Physics”,  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor,  
e-mail: cpd@rgups.ru

**Gorbacheva Tatyana Petrovna**

Rostov State Transport University (RSTU),  
Chair “Track and Track Facilities”,  
Assistant,  
e-mail: nanami1995@bk.ru