

Исследования структурной однородности укрепленных грунтов, применяемых при строительстве лесовозных автомобильных дорог

V.A. Timofeev^{1a}, A.V. Skrypnikov^{1b}, E.G. Bavykina^{1c}, A.S. Karpov^{1d},
A.S. Bezruk^{1e}, P.O. Romanov^{1f}, A.Yu. Zhuk^{2g}

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции, 19, Воронеж, Россия

² Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

^a timofeev.va95@mail.ru, ^b skrypnikovvsafe@mail.ru, ^c bavykina@inbox.ru, ^d binokl-82@yandex.ru,

^e as-bezruk@mail.ru, ^f romanov_pavel@list.ru, ^g lpf@brstu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-4544-9576>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-8462-8094>,

^g <https://orcid.org/0000-0002-1808-245X>

Статья поступила 11.05.2023, принята 12.05.2023

В статье рассмотрены известные модели дорожных конструкций, включающие как составной элемент укрепленные грунты с позиции обеспечения качества. На основе вероятностного подхода рассмотрена двухфазная структура любого укрепленного грунта (УГ) и распределение вяжущего в минеральном скелете. На основе анализа расчетных показателей и оценки надежности дорожных конструкций выявлен определяющий показатель для оценки однородности УГ — прочность на растяжение при изгибе. Предложены теоретические структурные модели (ТСМ) УГ, строящиеся методом статистических испытаний (Монте-Карло). Введено понятие «дефект структуры» и установлена количественная оценка однородности структуры в зависимости от наличия дефектов структуры. На основе ТСМ УГ выполнен анализ изменчивости показателей УГ под воздействием множества факторов, известных в общей теории укрепленных грунтов. Показаны пути повышения однородности показателей УГ. Рассмотрены показатели, определяющие однородность. В первую очередь это показатели, по которым ведется расчет и определяется качество всей конструкции. Таких показателей три — модуль упругости (E), прочность на растяжение при изгибе ($R_{(p.u.)}$) и толщина слоя, или размеры изделия для УГ повышенной прочности. Рассмотрены основные дорожные конструкции с использованием УГ и роль расчетных показателей для этих конструкций. Также представлена роль этих показателей в различных типах дорожных конструкций с применением УГ. Произведены расчет по допускаемому упругому прогибу и проверка слоя из УГ на растяжение при изгибе. Проанализирована прочность конструктивных слоев из УГ и с позиций теории надежности, которая нашла применение в исследовании дорожных конструкций. Основным понятием теории надежности является показатель надежности R , который определяется как вероятность безотказной работы конструкции. Предложено разделить показатели по степени их статической устойчивости на три группы: 1-я группа — очень устойчивые, 2-я группа — устойчивые, 3-я группа — неустойчивые.

Ключевые слова: укрепленные грунты; однородность; качество укрепленных грунтов; вероятностный подход; анализ расчетных показателей.

Studies of structural uniformity of reinforced soils used in the construction of logging roads

V.A. Timofeev^{1a}, A.A. Skrypnikov^{1b}, E.G. Bavykina^{1c}, A.S. Karpov^{1d},
A.S. Bezruk^{1e}, P.O. Romanov^{1f}, A.Yu. Zhuk^{2g}

¹ Voronezh State University of Engineering Technologies; 19, Revolutsii Ave., Voronezh, Russia

² Bratsk State University; 40, Makarenko, Bratsk, Russia

^a timofeev.va95@mail.ru, ^b skrypnikovvsafe@mail.ru, ^c bavykina@inbox.ru, ^d binokl-82@yandex.ru,

^e as-bezruk@mail.ru, ^f romanov_pavel@list.ru, ^g lpf@brstu.ru

^a <https://orcid.org/0000-0003-4544-9576>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-8462-8094>,

^g <https://orcid.org/0000-0002-1808-245X>

Received 11.05.2023, accepted 12.05.2023

The article considers well-known models of road structures, including reinforced soils as an integral element, from the standpoint of quality assurance. Based on the probabilistic approach, the two-phase structure of any fortified soil and the distribution of binder in the mineral skeleton are considered. Based on the analysis of the calculated indicators and the assessment of the reliability of road structures, the determining indicator for assessing the uniformity of the UG is the tensile strength during bending. Theoretical structural models (TSM) of the SG, constructed by the method of statistical tests (Monte Carlo), are proposed. The concept of "structural defect" is introduced and a quantitative assessment of the uniformity of the structure is established depending on the presence of structural defects. On the basis of the TSM of the SG, the analysis of the variability of the indicators of the SG under the influence of many factors

known in the general theory of fortified soils was performed. The ways of increasing the uniformity of the indicators of UG are shown. The indicators determining uniformity are considered. First of all, these are the indicators by which the calculation is carried out and the quality of the entire structure is determined. There are three such indicators: elastic modulus (E), flexural tensile strength ($R_{(R.I.)}$) and layer thickness or dimensions of the product for high-strength UGS. The main road structures using UG and the role of design indicators for these structures are considered. The role of these indicators in various types of road structures with the use of UG is also presented. The calculation of the allowable elastic deflection and the verification of the layer of UG for tension during bending is made. The strength of structural layers made of UG and from the standpoint of the theory of reliability, which has found application in the study of road structures, is analyzed. The basic concept of reliability theory is the reliability index P , which is defined as the probability of failure-free operation of the structure. It is proposed to divide the indicators according to the degree of their static stability into three groups: group 1 – very stable, group 2 – stable, group 3 – unstable.

Keywords: reinforced soils; uniformity; quality of reinforced soils; probabilistic approach; analysis of calculated indicators.

Введение. Высокое качество дорожных конструкций во многом определяется однородностью свойств составляющих элементов. В известных расчетных схемах дорожных конструкций выделены объемы, взятые из элементов, созданных с применением укрепленных грунтов. Однородность свойств такого элементарного объема изучена со структурных позиций [1–3]. На основе вероятностного подхода рассмотрены двухфазная структура любого укрепленного грунта (УГ) и распределение вяжущего в минеральном скелете [5; 6].

На основе анализа расчетных показателей и оценки надежности дорожных конструкций выявлен определяющий показатель для оценки однородности УГ — прочность на растяжение при изгибе [7; 8].

Предложены теоретические структурные модели (ТСМ) УГ, строящиеся методом статистических испытаний (Монте-Карло). Введено понятие «дефект структуры» и установлена количественная оценка однородности структуры в зависимости от наличия ее дефектов [9–12].

На основе ТСМ УГ выполнен анализ изменчивости показателей УГ под воздействием множества факторов, известных в общей теории укрепленных грунтов. Показаны пути повышения однородности показателей УГ.

Качество УГ, оцениваемое по однородности свойств, определяет в конечном итоге качество (однородность) всей конструкции. Рассмотрим известные модели дорожных конструкций, включающие как составной элемент укрепленные грунты, с позиции обеспечения качества (рис. 1).

Модель дорожной одежды для изучения изменчивости показателей различных УГ. Известная модель дорожной одежды [13–16], включающая слой из УГ, представлена на рис. 1. Модель дорожной конструкции из высокопрочного УГ представляет различные конструктивные элементы лесовозной автомобильной дороги (укрепление откосов, обочин, покрытие дорог и т. п.), хотя и модель дорожной одежды может включать слои из высокопрочного УГ. Для изучения изменчивости показателей различных УГ со структурных позиций выделим объем УГ (ΔV) из моделей дорожных конструкций. Размерами элементарного объема могут быть минеральная частица, окруженная вяжущим, или элемент с размерами, сопоставимыми с размерами конструктивного элемента, включающего

множество микроструктурных частиц, или элемент с промежуточными размерами. При изучении структурных особенностей элементов с минимальными размерами трудно выявить роль вяжущего в структуре. Изучение элементов с максимальными размерами также неэффективно, потому что в этом случае роль вяжущего нивелируется, и элемент становится квазиоднородным, поэтому представляется, что элементарные объемы с промежуточными размерами могут быть изучены наиболее полно со структурных позиций. Сказанное не исключает возможности изучения структур в масштабе, сопоставимом с размерами конструкции.

Представленная на рис. 1 квалиметрическая модель качества дорожной конструкции связывает различные показатели качества (K_u — интегральный, K_k — комплексный, K_i — единичный, P_i — простой) между собой. При этом к свойствам выделенного единичного объема предъявляются требования по их однородности; в свою очередь, однородность свойств единичного объема определяет свойства вышележащих показателей.

Показатели однородности укрепленных грунтов. Рассмотрим показатели, интересующие нас в смысле их однородности. В первую очередь, это показатели, по которым ведется расчет и определяется качество всей конструкции. Таких показателей три: модуль упругости (E), прочность на растяжение при изгибе ($R_{p.u.}$) и толщина слоя, или размеры изделия для УГ повышенной прочности. По анализу обзора литературы установлено, что для дорожных одежд наибольшее влияние на ее однородность оказывают вариации толщин слоев и модулей упругости, при этом изменчивость показателей нижних слоев, где чаще всего применяются укрепленные грунты, оказывает большее влияние на однородность в целом, чем изменчивость показателей верхних слоев дорожной одежды. Изменчивость толщин слоев дорожных одежд связана в основном с несовершенством технологических способов укладки этих слоев в настоящее время и в перспективе может быть сведена до минимума (при использовании автоматизированных систем контроля на дорожной технике). Применение высокопрочных УГ в сборном варианте автоматически снимает вопрос об изменчивости геометрических параметров, так как в заводских условиях ликвидировать этот недостаток достаточно просто [17].

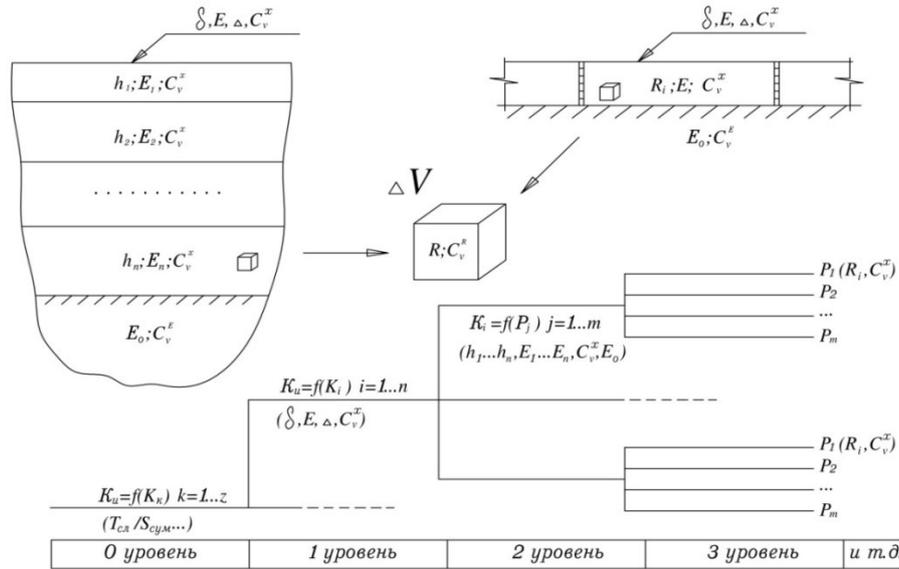


Рис. 1. Модель качества дорожных конструкций

Основными расчетными показателями, за исключением толщины слоев или размеров изделий, являются модуль упругости материала и прочность на растяжение при изгибе.

Основные дорожные конструкции с использованием УГ и роль расчетных показателей для этих конструкций. Высокопрочные УГ индустриального применения имеют высокие прочностные и деформативные характеристики и реализуются в сборных изделиях, для которых основным расчетным и рабочим показателем является $R_{p.и.}$ как в период монтажных, так и эксплуатационных нагрузок [18–22].

Укрепленные грунты обладают, по сравнению с другими монолитными материалами, пониженными прочностными и деформативными характеристиками, т. е. значения $R_{p.и.}$ и E для них обычно ниже, чем для других материалов, однако при этом роль $R_{p.и.}$ и E не одинакова.

Рассмотрим, какова роль этих показателей в различных типах дорожных конструкций с применением УГ. На рис. 2 приведены типичные конструкции, рекомендуемые и применяемые при строительстве лесовозных автомобильных дорог. Произведен расчет по допустимому упругому прогибу и проверка слоя из УГ на растяжение при изгибе. Роль последнего расчета и, следовательно, роль прочности при изгибе $R_{p.и.}$ для этих типов конструкций неодинакова. В многослойных дорожных одеждах дорог высоких категорий требование расчета на растяжение при изгибе обычно выполняется, если выполнены требования расчета по допустимому упругому прогибу — это объясняется большими высотой и моментом сопротивления конструкции. Так для дорожной конструкции № 1 результаты проверки растягивающих напряжений в слое УГ следующие: $\sigma_R = 0,09$ МПа; $R_{p.и.}^p = 0,1$ МПа, здесь σ_R — величина растягивающих напряжений; $R_{p.и.}^p$ — расчетное значение напряжения. Требования расчета выполнены $\sigma_R < R_{p.и.}^p$.

Для одно- или двухслойных дорожных одежд низших категорий расчет конструктивного слоя из УГ на растяжение при изгибе является определяющим, т. е. требования этого расчета труднее всего выполнить. Так для дорожной конструкции № 3 выполнено требование расчета по допустимому упругому прогибу, при этом требование расчета на растяжение при изгибе не выполнено: здесь $\sigma_R = 0,50$ МПа; $R_{p.и.}^p = 0,2$ МПа

Итак, для конструкций дорог низших категорий с применением укрепленных грунтов вопрос прочности УГ на растяжение при изгибе является весьма важным, поэтому в работе главное внимание уделено вопросу однородности прочности УГ по $R_{p.и.}$.

Прочность конструктивных слоев из УГ с позиций теории надежности. Основным понятием теории надежности является показатель надежности P , который определяется как вероятность безотказной работы конструкции [23–25]. Для работы конструктивного слоя из УГ на растяжение при изгибе показатель надежности будет равен:

$$P = p(R_{p.и.} > \sigma_R), \tag{1}$$

где p — вероятность того, что $R_{p.и.}$ будет больше σ_R ; $R_{p.и.}$ — прочность УГ на растяжение при изгибе; σ_R — растягивающее напряжение в слое УГ.

В формуле (1) и $R_{p.и.}$ и σ_R рассматриваются как случайные величины.

Для практических расчетов оценку надежности производят, используя характеристику безопасности γ :

$$\gamma = \frac{\overline{R_{p.и.}} - \overline{\sigma_R}}{\sqrt{\sigma_{R_{p.и.}}^2 + \sigma_{\sigma_R}^2}}, \tag{2}$$

где $\overline{R_{p.и.}}$ и $\overline{\sigma_R}$ — средние значения случайных величин $R_{p.и.}$ и σ_R ; $\sigma_{R_{p.и.}}$ и σ_{σ_R} — средние квадратические отклонения (стандарты) этих величин.

№	Дорожная одежда рассчитанная по допустимому упругому прогибу	Результаты расчета слоя из УГ на растяжение при изгибе
1	2	3
1.		$\bar{\sigma}_R = 0.09 \text{ МПа}$ для III класса прочности $R_{p,и}^p = 0.1 \text{ МПа}$ $\bar{\sigma}_R < R_{p,и}^p$ Требование расчета на растяжение при изгибе выполнено
2.		$\bar{\sigma}_R = 0.69 \text{ МПа}$ $R_{p,и}^p = 0.4 \text{ МПа}$ $\bar{\sigma}_R > R_{p,и}^p$ Требование не выполнено
3.		$\bar{\sigma}_R = 0.50 \text{ МПа}$ $R_{p,и}^p = 0.2 \text{ МПа}$ $\bar{\sigma}_R > R_{p,и}^p$ Требование не выполнено
4.		$\bar{\sigma}_R = 0.13 \text{ МПа}$ $R_{p,и}^p = 0.1 \text{ МПа}$ $\bar{\sigma}_R > R_{p,и}^p$ Требование не выполнено

Рис. 2. Результаты расчета дорожных одежд

Для определения σ_{σ_R} можно использовать метод линеаризации:

$$\sigma_{\sigma_R} = \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma_R}{\partial E_1} * \sigma_{E_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma_R}{\partial E_2} * \sigma_{E_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial \sigma_R}{\partial h_1} * \sigma_{h_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma_R}{\partial h_2} * \sigma_{h_2}\right)^2} \quad (3)$$

Т. е. σ_{σ_R} определяет как функцию стандарты таких случайных факторов, как модули упругости конструктивных слоев дорожной одежды и их толщины. В данном случае предполагается отсутствие корреляционных связей между E и h.

Определив γ по (2), по таблицам функций Лапласа можно найти γ .

На рис. 3 приведены конструкция дорожной одежды и коэффициенты вариации случайных факторов E_1, E_2, E_3, h_1, h_2 .

Для определения частных производных типа $\frac{\partial \sigma_R}{\partial E_i}, \frac{\partial \sigma_R}{\partial h_i}$ были использованы номограммы расчета дорожных конструкций на растяжение при изгибе. При этом были получены следующие результаты:

$$\sqrt{\sigma_{R_{p,и}}^2 + \sigma_{\sigma_R}^2} = \sqrt{\sigma_{R_{p,и}}^2 + \left(\frac{\partial \sigma_R}{\partial E_1} * \sigma_{E_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma_R}{\partial E_2} * \sigma_{E_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma_R}{\partial E_3} * \sigma_{E_3}\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma_R}{\partial h_1} * \sigma_{h_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial \sigma_R}{\partial h_2} * \sigma_{h_2}\right)^2} = \sqrt{(0,25)^2 + (0,01)^2 + (0,1)^2 + (0,078)^2 + (0,14)^2 + (0,16)^2} = 0,35 \quad (4)$$

Среднее значение $\bar{R}_{p,и}$ считали равным нормативному, $R_{p,и} = 1,0$ Мпа (для 1-го класса прочности), $\sigma_{R_{p,и}} = 0,25$ согласно фактическим данным, за среднее значение

σ_R принят результат расчета данного слоя на растяжение при изгибе: $\bar{\sigma}_R = 0,69$ МПа. Тогда, подставив значение в (3), получим:

$$\gamma = \frac{1,0 - 0,69}{0,35} = \frac{0,31}{0,35} = 0,88 \quad (5)$$

По таблицам функции Лапласа для $\gamma = 0,88$ найдем $P = 0,81$.

Произведенная оценка надежности позволяет сделать следующие выводы.

1. Уровень надежности прочности на растяжение при изгибе дорожной одежды с применением УГ при существующей культуре производства невысоок и требует повышения прочности дорожной конструкции.

2. Используя формулу (3), можно ранжировать случайные факторы по степени их взаимодействия на показатель надежности P. Очевидно, что в наибольшей степени понижает надежность конструкции изменчивость фактора $R_{p,и}$ — прочности УГ на растяжение при изгибе, так, $\sigma_{R_{p,и}} = 0,25$, что значительно больше влияния любого другого фактора. Вторым по влиянию на надежность конструкции фактором является изменчивость h — толщины слоя из УГ. Влияет на P и изменчивость модуля упругости УГ. Изменчивость этих величин связана с однородностью УГ и будет снижаться с повышением этой однородности.

8	черный щебень $E_1 = 800 \text{ МПа}$	$C_v^E = 0.19$	$C_v^E = 0.16$
13	цементогрунт $E_2 = 800 \text{ МПа}$	$C_v^E = 0.20$	$C_v^E = 0.20$
	суглинок $E_3 = 30 \text{ МПа}$	$C_v^E = 0.21$	

Рис. 3. Конструкция дорожной одежды и коэффициенты вариации характеристик ее конструктивных слоев

Таким образом, и оценка надежности дорожной конструкции подчеркивает преобладающую роль однородности прочности УГ на растяжение при изгибе. Из расчета следует, что наиболее эффективный путь повышения надежности рассматриваемой дорожной конструкции — повышение однородности укрепленных грунтов (т. е. уменьшение C_V) и повышение их прочности. Этот вывод подчеркивает актуальность настоящих исследований.

Повышение однородности УГ приводит к фактическому повышению минимального значения прочности $R_{\text{пр}}^{\text{min}}$. Такой путь представляется весьма перспективным, так как ведет к увеличению срока службы дорожных конструкций с применением УГ.

В пользу выбора для оценки однородности прочностных показателей свидетельствует и следующее: природа показателей по их изменчивости различна. Замечено, что показатели, связанные с упаковкой частиц, более однородны. С другой стороны, использовать для оценки качества материалов такие показатели, коэффициент вариации которых более 0,3, крайне трудно и иногда невозможно; кроме того, в математической статистике утверждается, что показатели, C_V которых более 0,3, нельзя считать однородными. Для них невозможно использовать закон нормального распределения, достаточно хорошо изученный в методическом плане и удобный в практических расчетах.

Учитывая все перечисленное, предлагается разделить показатели по степени их статической устойчивости на три группы: 1-я группа — очень устойчивые, 2-я группа — устойчивые, 3-я группа — неустойчивые. К 1-й группе можно отнести показатель плотности материалов, изменчивость которого очень мала. Анализ множества данных позволяет назвать границы очень устойчивых показателей C_V до 0,05. 2-я группа — это показатели, изменчивость которых можно считать устойчивой в пределах 0,05...0,30. Сюда относятся все прочностные показатели материалов. Все показатели, изменчивость которых более 0,30, относятся к 3-й группе. К ним можно отнести водонасыщение, набухание, прогибы конструктивных слоев дорожной одежды и другие. В целом показатели, относящиеся к последней неустойчивой группе, можно считать неэффективными и несовершенными в силу многих причин и не применять их для оценки качества.

Таким образом, основное внимание необходимо уделить прочности УГ на растяжение при изгибе, его связи со структурой материала.

Оценка структурных моделей по однородности.

Узлы теоретической модели, оказавшиеся свободными от клея, названы дефектами структуры [26; 27]. Чтобы количественно оценить теоретические структурные модели УГ с позиции их однородности и связать эту оценку в дальнейшем с показателями реальных материалов, введено понятие числа смен однородности на единицу длины S_0 . Под сменой однородности понимается условная граница между дефектом структуры и структурой, объединенной клеем. Подсчет числа S_0 ведется при рассечении картинки ТСМ линиями в любом направлении (в данном исследовании направления линий горизонтальны и вертикальны, совпадают с уз-

лами картинки). Среднее количество таких смен на единицу длины, подсчитанное для каждого случая реализации модели, является некоторым критерием оценки получаемой модели. На рис. 4 представлена кривая изменения числа S_0 в зависимости от числа розыгрышей (количество клея). Десяти случайным розыгрышам соответствует 1 % клея. Таким образом, 100 розыгрышей — 10 % клея. Рассмотрим с точки зрения рабочей гипотезы полученные результаты изменения числа смен однородностей от количества клея. Грунт (песок) без клея представляет собой однородный материал, свойства которого определяются, в основном, углом внутреннего трения (p). В общем случае, грунт имеет свой среднеэффективный диаметр частиц для каждого гранулометрического состава (грансостав). При введении клея (небольших дозировок) частицы грунта склеиваются и образуют агрегаты, размеры которых минимум в два раза больше среднего размера частиц. Поэтому однородность структуры ухудшается. Следующая порция клея приводит к еще более резкой дифференциации агрегатов и частиц материала. Можно сделать вывод, что среднеэффективный диаметр частиц растет, и, хотя растет прочность материала, однородность его ухудшается из-за увеличения разброса размеров частиц, что и отражается фактически на рис. 4 через увеличение показателя S_0 . Такое явление происходит до таких пор, пока агрегаты S_0 не склеиваются между собой все увеличивающимися порциями клея и не образуется сплошной каркас с дефектами внутри этого каркаса. Начиная с таких дозировок вероятнее всего попадание клея в пустые зоны, насыщение порового пространства. Это явление ведет к повышению однородности структуры, что подтверждается и изменением числа S_0 . Ориентировочно, количество клея, после которого начинается устойчивое повышение однородности структуры, составляет 6...8 %.

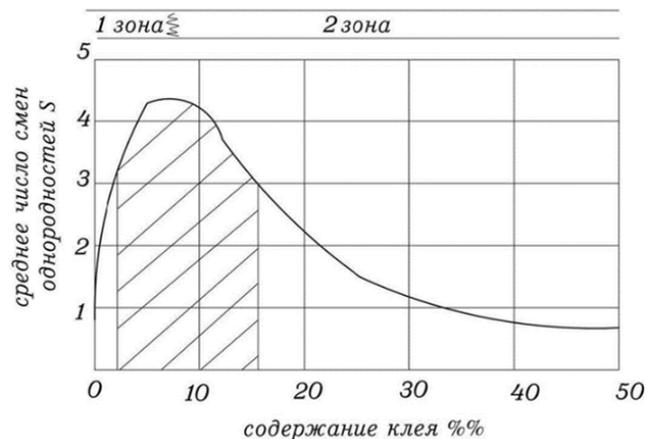


Рис. 4. Изменение числа смен однородности от содержания клея

В связи с различной природой вяжущих можно предположить, что для клея, полученного на основе жидких вяжущих (смолы, битума, нефти), предел дозировки, после которой повышается однородность структуры, смещен в сторону меньшей дозировки, примерно 4...6 %, так как такие вяжущие более активны во взаимодей-

ствии с грунтом и не имеют в своем составе дисперсных частиц.

Таким образом, можно установить два интервала изменения структурных неоднородностей УГ:

– первый, ограниченный дозировками вяжущих до 6...8 %, когда мы имеем практически бесструктурный материал;

– второй, с дозировками более 8 %, когда структура материала начинает и продолжает улучшаться.

Аналогично определяется количественная оценка структурной неоднородности моделей с технологическими дефектами. Среднее число смен однородностей определено по 100 розыгрышам. Изменение числа S_0 в зависимости от числа дефектов показано на рис. 5. Большшему количеству дефектов соответствует большая неоднородность структуры. Ориентировочно выделены зоны для существующих способов изготовления УГ.

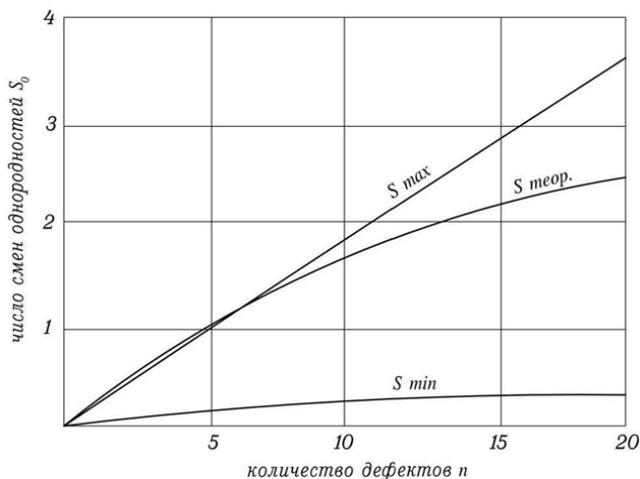


Рис. 5. Изменение числа S в зависимости от числа дефектов структуры

Таким образом, предоставляется возможность изучить структуру укрепленных грунтов, полученных разными способами в реальных дорожных конструкциях, и сравнить производственные данные с теоретическими. В принципе представляется, что по наличию технологических и структурных неоднородностей можно оценивать качество укрепленных грунтов по однородности.

Исследование факторов технологии строительства лесовозных автомобильных дорог, влияющих на изменчивость структуры и прочности укрепленных грунтов. Анализируя классификацию неоднородностей укрепленных грунтов и теоретические предпосылки формирования структуры, можно выявить определяющие факторы, влияющие на однородность показателей укрепленных грунтов. К наиболее важным показателям следует отнести количество вяжущего; степень уплотнения; влажность укрепляемого грунта и смеси; введение добавок ПАВ; время технологического цикла; технологию производства работ.

В производственных условиях, как уже показано выше, неоднородность показателей в 2 раза больше, поэтому основное внимание разумно уделить грубым дефектам структуры укрепленного грунта, причиной которых являются и указанные основные факторы, и несовершенство некоторых технологических способов производства работ, и множество других, иногда не

контролируемых в настоящее время факторов. Знание закономерностей появления и распределения дефектов структуры для различных укрепленных грунтов позволит прогнозировать свойства получаемых материалов, устранять или уменьшать количество дефектов, следовательно, повышать качество применяемых материалов [28–31].

Рассмотрим, каким образом можно объяснить влияние перечисленных выше факторов на однородность структуры УГ по теоретической структурной модели УГ. Основное, решающее влияние на однородность структуры УГ оказывает количество вяжущего, но для каждого материала с оптимальной дозировкой вяжущего есть пути улучшения структуры за счет более равномерного распределения вяжущего. Кроме того, есть факторы, которые препятствуют такому равномерному распределению вяжущего.

Степень уплотнения, получение тонких прочных прослоек означают повышение прочности и однородности, поэтому дополнительное или более интенсивное уплотнение ведет к получению именно таких прослоек, при этом количество клея на единице площади увеличивается, а относительное число дефектов — уменьшается. Повышение плотности упаковки минеральных частиц может при соответствующих условиях привести к перераспределению клея в структуре («переползание» — выдавливание), что ведет к уменьшению числа или размеров дефектов, уменьшению числа S_0 и повышению однородности структуры УГ. Оптимальная влажность смеси, добавки ПАВ способствуют получению высокой степени уплотнения с указанным выше эффектом, кроме того, ПАВ активизирует процессы взаимодействия вяжущего и частиц грунта, что позволяет получить более равномерное распределение клея в структуре УГ (эффект «переползания»).

Качество вяжущего заметно ухудшается при отдельных сроках хранения, поэтому вполне естественно ожидать появление дополнительных структурных дефектов в структуре самого клея, что приведет к увеличению числа S_0 и ухудшению однородности структуры.

Влажность исходного грунта затрудняет процесс распределения минерального вяжущего, способствует образованию агрегатов, мешает равномерному распределению клея в структуре материала, — отсюда увеличение числа дефектов и, следовательно, ухудшение однородности структуры.

Время технологического цикла — один из важнейших факторов в формировании структуры УГ. Увеличение этого времени приводит к затруднению уплотняемости смеси, — отсюда возникновение дополнительных дефектов, кроме того, что дает дополнительные структурные дефекты и, соответственно, большее число S_0 .

В системах (материалах) с небольшим количеством клея вероятность «переползания» клея в поровое пространство минимальна, так как практически нет «сил», которые бы заставили частицу клея перераспределиться. Наиболее реальной «силой», которая бы это сделала, следует считать активизацию поверхности минеральных частиц поверхностно-активными добавками, введение в систему структурообразующих добавок. В системах с большими дозировками вяжущих вероятность эффекта «переползания» максимальна, так как

клея больше, отсюда возможно, например, при дополнительном уплотнении, выдавливание «излишков» клея в пустое поровое пространство.

Заключение. Таким образом, можно сделать вывод о том, что все пути повышения однородности структуры УГ связаны с жизнью дефектов и их размерами и должны быть направлены на уменьшение влияния последних на свойства и однородность свойств УГ.

Количественная оценка воздействия указанных факторов на структурную однородность УГ произведена путем внесения изменений в теоретическую модель в соответствии с теми процессами, о которых сказано выше, на основе метода Монте-Карло. Так добавки ПАВ, модификация частиц грунта, дополнительное уплотнение теоретически оказывают одинаковое воздействие на структуру УГ, уменьшая количество дефектов и снижая число S_0 ; противоположное воздей-

ствие оказывают влажность укрепляемого грунта, качество вяжущего и время технологического цикла.

Теоретические представления, показывающие влияние указанных факторов на изменение в структуре УГ, позволяют на данном этапе исследования количественно уравнивать положительное воздействие таких факторов, как дополнительное уплотнение, модификация частиц грунта и добавки ПАВ. Аналогично уравнивается и влияние отрицательных факторов: влажность грунта, качество вяжущего и время технологического цикла. На данном этапе исследования важно показать, что количественная оценка структуры изменится в большую или меньшую сторону в зависимости от изучаемого фактора. Природа таких явлений многофакторная и вероятностная, поэтому установить порог чувствительности влияния каждого фактора представляется довольно сложной задачей.

Литература

1. Никитин В.В. Математическая модель сети лесовозных автомобильных дорог на основе оптимальных параметров // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы нац. науч.-практической конф. (19-21 апр. 2022 г.). Воронеж, 2022. С. 120-134.
2. Боровлев А.О., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Тюрикова Т.В., Тверитнев О.Н., Никитин В.В. Математическое моделирование трассы лесовозных автомобильных дорог // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2021. № 4 (382). С. 150-161.
3. Абдуллаев В.М. Численное решение задачи параметрической идентификации для дифференциальных уравнений с частными производными // Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. № 2 (22). С. 33-44.
4. Горобцов Д.Н., Попов Ю.А., Коробков Д.А. Бесконтактные измерения тепловых свойств грунтов и промышленных материалов методом оптического сканирования // Инженерные изыскания в строительстве: материалы науч.-практической конф. молодых специалистов. М.: ПНИИИС, 2007. С. 24-27.
5. Дорохин С.В., Скрыпников А.В. Обоснование области применения информационных устройств и их эффективность на участках лесных автомобильных дорог // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. С. 87.
6. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Афоничев Д.Н. Воздействие автомобилей на дорогу // Наука и образование в современных условиях: материалы междунар. науч. конф. (10 марта - 22 апр. 2016 г.). Воронеж: Воронежский гос. аграрный ун-т им. имп. Петра I, 2016. С. 255-258.
7. Козлов В.Г. Результаты исследования колесобразования на грунтовых усах лесовозных дорог // Вестн. Московского гос. ун-та леса. Лесной вестн. 2016. Т. 20. № 2. С. 159-166.
8. Леви Р.В., Комини Дж., Хамфесон К. Применение метода конечных элементов в задачах тепло- и массопереноса в пористых телах // Инженерно-физический журнал. 1975. № 3. С. 483-488.
9. Математические методы в инженерии. Численные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных / сост. Г.Н. Журов. СПб.: СПГУ, 2016. 62 с.
10. Нерсесова З.А. Морозное пучение грунтов и способы защиты сооружений от его воздействия. М.: Транспорт, 1967. 187 с.
11. Popov M.I., Skrypnikov A.V., Chernyshov A.D., Sablin S.Y., Nikitin V.V., Kozlov V.G., Chernyshov A.V., Druzhinin R.A. Application of the fast expansion method in space-related problems // Mathematics and Statistics. 2022. V. 10. № 2. P. 320-328.
12. Nikitin V.V., Skrypnikov A.V., Bryukhovetsky A.N. A Linear Model of the Forest Transport Network and An Algorithm for Assessing the Influence of the Density of Points and the Length of Links in Developing Multi-Forested Areas // SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology. 2021. V. 69. № 12. P. 175-178.
13. Mogutnov R.V. Feasibility study of geometrical parameters of wood transportation roads including prediction of optimum terms of construction and retrofitting sequence Mogutnov R.V. Designing mathematical models of geometric and technical parameters for modern road-building machines versus the main parameter of the system // Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology. Proceedings of the International Symposium «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). 2019. P. 823-827.
14. Korotkov S.A., Makuev V.A., Lopatnikov M.V., Nikitin V.V., Siroto A.V., Stonozhenko L.V. Forest - use issues in Moscow region at the beginning of the 21st century // Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. 2016. V. 9. № 2. P. 17-24.
15. Korobkov E.V., Kozlov V.G., Shalaev A.V., Korolev A.I. Modern state of the production organization of beef cattle breeding in the Russian Federation. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. 659 (1).
16. Kozlov V.G. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. V. 25. № 3. P. 678-694.
17. Kozlov V.G. Mathematical models to determine the influence of road parameters and conditions on vehicular speed // Journal of Physics: Conference Series. The proceedings International Conference «Information Technologies in Business and Industry», 2019. P. 032041.
18. Поляков Ю.А. Оценка транспортно-эксплуатационных качеств горных лесовозных автомобильных дорог в системе автоматизированного проектирования. Воронеж: Воронеж. гос. лесотехн. акад., 2001. 149 с.
19. Сиденко В.М. Расчёт и регулирование водно-теплого режима дорожных одежд и земляного полотна. М.: Автотрансиздат, 1962. 116 с.
20. Чирков Е.В., Высоцкая И.А., Скрыпников А.В., Боровлев А.О., Никитин В.В. Методические рекомендации по автоматизированному проектированию трассы лесовозной

- автомобильной дороги с применением методов оптимизации // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 60-65.
21. Боровлев А.О. Математическое моделирование трассы лесовозных автомобильных дорог // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2021. № 4 (382). С. 150-161.
 22. Мацнев М.В., Денисенко В.В., Левушкин Д.М., Скрыпников А.В., Зеликов В.А., Микова Е.Ю., Казачек М.Н., Берестовой А.А. Использование модели дорожно-строительного потока для решения оптимизационных задач // Строительные и дорожные машины. 2021. № 7. С. 29-33.
 23. Самцов В.В., Саблин С.Ю., Никитин В.В., Горбунов А.А., Боровлев А.О., Прокопец В.С. Теоретические предпосылки дорожно-ландшафтного районирования лесных и сельскохозяйственного автомобильных дорог // Механизация и автоматизация технологических процессов в сельскохозяйственном производстве. материалы нац. науч.-практической конф. (25 сент. 2020 г.). Воронеж, 2020. С. 122-132.
 24. Чирков Е.В., Щербаков Е.Д., Тихомиров П.В., Никитин В.В. Проектирование трасс лесовозных автомобильных дорог // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы междунар. науч.-практической конф. молодых ученых и специалистов (12-13 нояб. 2020 г.). Воронеж, 2020. С. 226-232.
 25. Чирков Е.В., Скрыпников А.В., Боровлев А.О., Саблин С.Ю., Высоцкая И.А. Информационная модель зоны варьирования трассы лесовозной автомобильной дороги // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 12. С. 538-542.
 26. Рябова О.В. Изучение географической среды для целей дорожного проектирования // Науч. журнал строительства и архитектуры. 2020. № 1 (57). С. 84-95.
 27. Тихомиров П.В., Никитин В.В., Саблин С.Ю. Влияние метеорологических условий на системы комплекса водитель-автомобиль-дорога-среда // Молодежный вектор развития аграрной науки: материалы 71-й студ. науч. конф. (1 февр. - 31 мая 2020 г.). Воронеж: Воронежский гос. аграрный ун-т им. имп. Петра I, 2020. С. 144-151.
 28. Чернышова Е.В. Лесовозные автомобильные дороги в транспортной сети лесопромышленного предприятия // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2019. № 2 (368). С. 95-101.
 29. Козлов В.Г. Методы математического моделирования автомобильных дорог и их теоретические основы // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы междунар. науч.-практической конф. молодых ученых и специалистов (14-16 нояб. 2018 г.). Воронеж, 2018. С. 347-355.
 30. Enhancing forest machine efficiency [Electronic resource]: review // Australia Forestand Wood. 2010. 48 p.
 31. Hwang C.L., Masud A. Multiple Objective Decision Making - Methods and Applications: A State of the Art Survey: Lecture Notes in Economics and Mathematical Systema № 164, Springer-Verlag, NewYork, 1979.
 3. Abdullaev V.M. Numerical solution of the parametric identification problem for partial differential equations // Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences. 2018. № 2 (22). P. 33-44.
 4. Gorobcov D.N., Popov YU.A., Korobkov D.A. Contactless measurements of thermal properties of soils and industrial materials by optical scanning // Inzhenernye izyskaniya v stroitel'stve: materialy nauch.-prakticheskoy konf. molodykh specialistov. M.: PNIIS, 2007. P. 24-27.
 5. Dorohin S.V., Skrypnikov A.V. Justification of the field of application of information devices and their effectiveness on sections of forest highways // Modern problems of science and education. 2015. № 1. P. 87.
 6. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Afonichev D.N. Impact of cars on the road // Nauka i obrazovanie v sovremennykh usloviyah: materialy mezhdunar. nauch. konf. (10 marta - 22 apr. 2016 g.). Voronezh: Voronezhskij gos. agrarnyj un-t im. imp. Petra I, 2016. P. 255-258.
 7. Kozlov V.G. Results of the study of track formation on the ground moustaches of logging roads // Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik. 2016. V. 20. № 2. P. 159-166.
 8. Levi R.V., Komini Dzh., Hamfeson K. Application of the finite element method in problems of heat and mass transfer in porous bodies // Journal of Engineering Physics. 1975. № 3. P. 483-488.
 9. Mathematical methods in engineering. Numerical methods for solving partial differential equations / sost. G.N. Zhurov. SPb.: SPGU, 2016. 62 p.
 10. Neresova Z.A. Frost heaving of soils and methods of protecting structures from its effects. M.: Transport, 1967. 187 p.
 11. Popov M.I., Skrypnikov A.V., Chernyshov A.D., Sablin S.Y., Nikitin V.V., Kozlov V.G., Chernyshov A.V., Druzhinin R.A. Application of the fast expansion method in space-related problems // Mathematics and Statistics. 2022. V. 10. № 2. P. 320-328.
 12. Nikitin V.V., Skrypnikov A.V., Bryukhovetsky A.N. A Linear Model of the Forest Transport Network and An Algorithm for Assessing the Influence of the Density of Points and the Length of Links in Developing Multi-Forested Areas // SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology. 2021. V. 69. № 12. P. 175-178.
 13. Mogutnov R.V. Feasibility study of geometrical parameters of wood transportation roads including prediction of optimum terms of construction and retrofitting sequence Mogutnov R.V. Designing mathematical models of geometric and technical parameters for modern road-building machines versus the main parameter of the system // Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology. Proceedings of the International Symposium «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). 2019. P. 823-827.
 14. Korotkov S.A., Makuev V.A., Lopatnikov M.V., Nikitin V.V., Sirotov A.V., Stonozhenko L.V. Forest - use issues in Moscow region at the beginning of the 21st century // Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. 2016. V. 9. № 2. P. 17-24.
 15. Korobkov E.V., Kozlov V.G., Shalaev A.V., Korolev A.I. Modern state of the production organization of beef cattle breeding in the Russian Federation. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021. 659 (1).
 16. Kozlov V.G. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. V. 25. № 3. P. 678-694.
 17. Kozlov V.G. Mathematical models to determine the influence of road parameters and conditions on vehicular speed // Journal of Physics: Conference Series. The proceedings Interna-

References

1. Nikitin V.V. Mathematical model of a network of logging highways based on optimal parameters // Teoriya i praktika innovatsionnykh tekhnologij v APK: materialy nac. nauch.-prakticheskoy konf. (19-21 apr. 2022 g.). Voronezh, 2022. P. 120-134.
2. Borovlev A.O., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Tyurikova T.V., Tveritnev O.N., Nikitin V.V. Mathematical modeling of logging highways // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2021. № 4 (382). P. 150-161.

- tional Conference «Information Technologies in Business and Industry», 2019. P. 032041.
18. Polyakov YU.A. Assessment of transport and operational qualities of mountain logging roads in the computer-aided design system. Voronezh: Voronezh. gos. lesotekhn. akad., 2001. 149 p.
 19. Sidenko V.M. Calculation and regulation of the water-thermal regime of road clothes and roadbed. M.: Avtotransizdat, 1962. 116 p.
 20. CHirkov E.V., Vysockaya I.A., Skrypnikov A.V., Borovlev A.O., Nikitin V.V. Methodological recommendations for automated design of a logging highway route using optimization methods // Automation and modern technology. 2021. V. 75. № 2. P. 60-65.
 21. Borovlev A.O. Mathematical modeling of the route of logging highways // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2021. № 4 (382). P. 150-161.
 22. Macnev M.V., Denisenko V.V., Levushkin D.M., Skrypnikov A.V., Zelikov V.A., Mikova E.YU., Kazachek M.N., Berestovoj A.A. Using the model of road construction flow to solve optimization problems // Construction and Road Building Mashinery. 2021. № 7. P. 29-33.
 23. Samcov V.V., Sablin S.YU., Nikitin V.V., Gorbunov A.A., Borovlev A.O., Prokopec V.S. Theoretical prerequisites for road-landscape zoning of forest and agricultural highways // Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya tekhnologicheskikh processov v sel'skohozyajstvennom proizvodstve. materialy nac. nauch.-prakticheskoy konf. (25 sent. 2020 g.). Voronezh, 2020. P. 122-132.
 24. CHirkov E.V., SHCHerbakov E.D., Tihomirov P.V., Nikitin V.V. Designing logging highways // Innovacionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya APK: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. molodyh uchenyh i specialistov (12-13 noyab. 2020 g.). Voronezh, 2020. P. 226-232.
 25. CHirkov E.V., Skrypnikov A.V., Borovlev A.O., Sablin S.YU., Vysockaya I.A. Information model of the variation zone of the logging highway route // Automation and modern technology. 2020. V. 74. № 12. P. 538-542.
 26. Ryabova O.V. Study of the geographical environment for the purposes of road design // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2020. № 1 (57). P. 84-95.
 27. Tihomirov P.V., Nikitin V.V., Sablin S.YU. The influence of meteorological conditions on the systems of the driver-car-road-environment complex // Molodezhnyj vektor razvitiya agrarnoy nauki: materialy 71-j stud. nauch. konf. (1 fevr. - 31 maya 2020 g.). Voronezh: Voronezhskij gos. agrarnyj un-t im. imp. Petra I, 2020. P. 144-151.
 28. CHernyshova E.V. Logging highways in the transport network of a timber enterprise // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2019. № 2 (368). P. 95-101.
 29. Kozlov V.G. Methods of mathematical modeling of highways and their theoretical foundations // Innovacionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya APK: materialy mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. molodyh uchenyh i specialistov (14-16 noyab. 2018 g.). Voronezh, 2018. P. 347-355.
 30. Enhancing forest machine efficiency [Electronic resource]: review // Australia Forestand Wood. 2010. 48 p.
 31. Hwang S.L., Masud A. Multiple Objective Decision Making - Methods and Applications: A State of the Art Survey: Lecture Notes in Economics and Matematical Systema № 164, Springer-Verlag, NewYork, 1979.