

Классификация структурных неоднородностей укрепленных грунтов лесовозных автомобильных дорог

В.А. Тимофеев^{1a}, А.В. Скрыпников^{1b}, Ю.Ю. Володина^{1c}, А.С. Карпов^{1d},
А.С. Безрук^{1e}, П.О. Романов^{1f}, А.Ю. Жук^{2g}

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

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

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

^e as_bezruk@mail.ru, ^f romanov_pavel_91@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/0000-0003-2768-1937>,

^d <https://orcid.org/0009-0009-3934-5640>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-4963-5707>, ^f <https://orcid.org/0000-0003-1382-3041>,

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

Статья поступила 11.05.2023, принята 06.09.2023

В статье рассмотрены различные структурные неоднородности свойств укрепленных грунтов и их влияние на однородность дорожной конструкции. Для рассмотрения неоднородности свойств укрепленных грунтов необходим единый системный подход, основанный на разделении системы укрепленных грунтов на составляющие элементы и учете вероятностной природы процесса формирования структур укрепленных грунтов. Физические и механические процессы более всего влияют на технологическую неоднородность структуры материала, а несовершенные или некачественные технологические процессы ведут к нарушениям в структуре материала. Решающее значение в получении однородных по всем показателям укрепленных грунтов имеют неоднородности технологические, вызванные плохим размельчением грунта, неравномерным перемешиванием, неточным дозированием вяжущих, неравномерным уплотнением и недоуплотнением, нарушениями в процессе подготовки компонентов и в процессе ухода за готовой продукцией. Эти факторы приводят к появлению дефектов структуры, следствием которых является неоднородность прочности укрепленного грунта и всей дорожной конструкции. Отсутствие технологических дефектов не позволит получить однородную структуру и равнопрочный материал; наличие неоднородностей меньшего масштаба дает неравнопрочный материал с неоднородной структурой, что проявляется при испытаниях лабораторных образцов. Все это затрудняет исследование неоднородностей разного порядка, так как практически нельзя получить материал без каких-либо дефектов. Для структурных и технологических неоднородностей необходимо построение теоретических моделей, так как именно они, в основном, определяют свойства укрепленных грунтов. Построение таких моделей осуществляется с использованием методов имитационного моделирования. Для получения двухфазной дисперсной системы, какой является любой укрепленный грунт, строится теоретическая модель формирования его структуры, получаемая на основе метода статистических испытаний.

Ключевые слова: укрепленные грунты; структурные неоднородности; теоретические структурные модели; дорожная конструкция; лесовозные автомобильные дороги.

Classification of structural heterogeneities of reinforced soils of logging roads

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

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

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

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

^e as_bezruk@mail.ru, ^f romanov_pavel_91@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/0000-0003-2768-1937>,

^d <https://orcid.org/0009-0009-3934-5640>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-4963-5707>, ^f <https://orcid.org/0000-0003-1382-3041>,

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

Received 11.05.2023, accepted 06.09.2023

The article discusses various structural heterogeneities in the properties of reinforced soils and their influence on the uniformity of the road structure. To consider the heterogeneity of the properties of reinforced soils, a unified systematic approach is needed, based on the division of the system of reinforced soils into constituent elements and taking into account the probabilistic nature of the process of formation of structures of reinforced soils. Physical and mechanical processes affect the technological heterogeneity of the material structure most of all, and imperfect or low-quality technological processes lead to violations in the material structure. Of decisive importance in obtaining uniform fortified soils in all respects are technological inhomogeneities caused by poor soil crushing, uneven mixing, inaccurate dosing of binders, uneven compaction and undercompaction, violations in the preparation of components and in the

process of caring for finished products. These factors lead to the appearance of structural defects, the consequence of which is the heterogeneity of the strength of the reinforced soil and the entire road structure. The absence of technological defects will not allow obtaining a homogeneous structure and equal strength material; the presence of inhomogeneities of a smaller scale gives a non-equal strength material with an inhomogeneous structure, which manifests itself when testing laboratory samples. All this complicates the study of heterogeneities of various orders, since it is practically impossible to obtain a material without any defects. For structural and technological heterogeneities, it is necessary to build theoretical models, since they mainly determine the properties of reinforced soils. The construction of such models is carried out using simulation methods. To obtain a two-phase dispersed system, which is any reinforced soil, a theoretical model of the formation of its structure is built, obtained on the basis of the method of statistical tests.

Keywords: reinforced soils, structural inhomogeneities, theoretical structural models, road structure, logging roads.

Введение. Несмотря на разнообразие видов укрепленных грунтов (УГ), возможен единый системный подход к рассмотрению неоднородности их свойств и влияния последних на однородность дорожных конструкций [1; 8; 11; 25].

Такой единый подход может быть предложен на основе разделения системы УГ на составляющие элементы и учета вероятностной природы процесса формирования структур УГ. Управление этими вероятностными процессами происходит на разных этапах создания конструкций из УГ. На этапе подбора состава УГ, выбора места в конструкции автомобильной дороги должно закладываться все необходимое для получения однородного конструктивного элемента. Наиболее ответственным этапом является технологический, когда необходимо четкое выдерживание всех проектных и организационно-технологических условий. В процессе эксплуатации конструкций из УГ однородность показателей будет меняться под воздействием подвижных нагрузок, климатических условий и физико-химических процессов в структуре самого УГ [7; 10; 18; 24].

Рабочая гипотеза для исследования связи «структура – однородность» прочности УГ может быть сформулирована следующим образом: прочность и однородность прочности УГ определяются количеством вяжущего (клея) в структуре материала и его распределением под воздействием множества факторов УГ [3; 4; 9; 20; 21].

Управление вероятностными процессами формирования структур УГ происходит под влиянием целого ряда факторов, определяемых следующими процессами: химическими — в микроструктуре клея, физико-химическими — на контактах клея и минерального скелета, а также в микроструктуре клея, физическими и механическими — в макроструктуре всего материала [19].

Структуры укрепленных грунтов можно изучать, рассматривая элементарные объемы материала в разном масштабе. Попробуем классифицировать возможные неоднородности УГ. Как известно, основным признаком, который должен быть положен в основу классификации неоднородностей, — это масштаб их проявления [2; 6; 23]. Представим, что в элементарных объемах разного масштаба имеются неоднородности, какие-либо дефекты из-за отсутствия клея, которые можно считать структурными элементами.

Все виды дефектов в структуре УГ можно разделить на две группы, технологические и структурные (рецептурные). Размеры технологических дефектов сопоставимы с размерами конструктивных элементов из УГ, размеры структурных дефектов сопоставимы с размерами частиц укрепляемого грунта. Кроме указанных двух групп дефектов, связанных с отсутствием клея, це-

лесообразно выделить группу дефектов, которые образуются внутри микроструктуры самого клея (микropоры, непрореагировавшие частицы вяжущего, разрушения в микроструктуре и др.) и которые по природе своей также являются структурными дефектами, потому что в таких местах клей как таковой отсутствует, и это аналогично его нехватке по составу.

С позиции, основанной на такой классификации, становится возможным предсказать поведение показателей УГ. Указанные процессы находятся в тесной взаимосвязи, но, тем не менее, можно связать каждый из процессов с появлением конкретного вида неоднородности.

Физические и механические процессы более всего влияют на технологическую неоднородность структуры материала, несовершенные или некачественные технологические процессы ведут к нарушениям в структуре материала: неравномерно распределяется вяжущее в минеральной части или неравномерно уплотняется смесь, или нарушаются процессы взаимодействия вяжущего с минеральной частью из-за излишней влажности укрепляемого грунта, что затрудняет равномерное распределение вяжущего, агрегирует частицы вяжущего (цемента) в крупные образования, увеличивая количество дефектов структуры, размеры которых самые большие из всех видов дефектов. На образование таких дефектов оказывает существенное влияние и качество исходных материалов.

Физико-химические процессы особое значение имеют при взаимодействии минерального скелета и клея. Протекающие при этом процессы в большинстве случаев могут быть управляемыми либо изменением среды, либо активацией вяжущего и частиц минеральной части. Обращает на себя внимание введение ПАВ, при этом представляется, что добавки ПАВ должны нарушить случайность процесса заполнения, но это нарушение будет иметь положительный эффект, так как способствует более равномерному распределению клея, уменьшая тем самым число дефектов структуры материала и повышая однородность показателей. Аналогичных закономерностей следует ожидать при укреплении грунтов вяжущими, которые способны активно взаимодействовать с частицами минерального скелета, например, сырые маловязкие нефти, или при укреплении грунтов вяжущими, для которых созданы условия активного взаимодействия с минеральной частью модификацией поверхности грунтов или другими мероприятиями. При этом активное взаимодействие клея с минеральной частью ведет к образованию более тонких, прочных и однородных клеевых прослоек. При этом даже самая полная завершенность физико-химических процессов при взаимодействии минерального скелета и

клея не избавляет от отсутствия дефектов, которые возможны при нехватке самого клея.

Химические и деструктивные процессы имеют значение для формирования микроструктур клея и его структурных неоднородностей. Представляется, что сама микроструктура клея неоднородна, но масштаб проявления неоднородностей не препятствует рассмотрению структуры материалов как однородных в этом смысле. Тем не менее, те или иные нарушения технологических и других процессов могут оказывать определенное влияние (в смысле однородности показателей) на формирование микроструктуры. Так различные режимы ухода за УГ ведут к некоторым качественным и количественным изменениям в микроструктуре клея. Качество самого вяжущего, ухудшение которого наступает, как известно, при длительных сроках хранения, также должно приводить к количественным и качественным изменениям в микроструктуре клея, увеличивая количество дефектов в структуре, сопоставимых по размерам со структурными дефектами из-за нехватки клея.

Кроме того, под воздействием эксплуатационных факторов, таких как знакопеременное нагружение, воздействие влаги, мороза, солнца, в структуре УГ возможны различные изменения положительного и отрицательного направления. Следует предполагать, что чаще будут появляться отрицательные эффекты (деструктивные), связанные с разрушениями в микроструктуре клея. Основными структурными неоднородностями в данном случае будут дефекты микроструктуры клея.

Следует отметить, что решающее значение в получении однородных по всем показателям УГ имеют неоднородности технологические, вызванные плохим размельчением грунта, неравномерным перемешиванием, неточным дозированием вяжущих, неравномерным уплотнением и недоуплотнением, нарушениями в процессе подготовки компонентов и в процессе ухода за готовой продукцией. Все эти факторы, каждый в отдельности или все в совокупности, приводят к появлению технологических неоднородностей (дефектов структуры), следствием которых является неоднородность прочности укрепленного грунта и всей дорожной конструкции. Отсутствие технологических дефектов не позволит, все-таки, получить однородную структуру и равнопрочный материал; наличие неоднородностей более высокого порядка (меньшего масштаба) дает не равнопрочный материал с неоднородной структурой, что проявляется при испытаниях лабораторных образцов. Вышеуказанное затрудняет исследование неоднородностей разного порядка, так как практически нельзя получить материал без каких-либо дефектов. Реально разделение исследований по данному вопросу на три вида: теоретическое (на структурных моделях), лабораторное, где возможно избежать грубых (технологических) дефектов структуры либо моделировать такие дефекты, и производственное исследование, где всегда будут иметь место дефекты структуры всех порядков.

Построение теоретических моделей необходимо для неоднородностей технологических и структурных, так как именно они, в основном, определяют свойства укрепленных грунтов.

Укрепленные грунты на разных видах вяжущих, с разными их дозировками имеют определенные структурные особенности, которые отличают материалы друг от друга по разным показателям: по характеру процессов химических и физико-химических, — отсюда кристаллизационные, коагуляционные и конденсационные структуры, по характеру цементации, зависящие от количества вяжущего, отсюда контактные, поровые и базальные типы структур. Представляется, что все многообразные типы структур можно исследовать на теоретических структурных моделях.

Идеализируем структуру укрепленного грунта: любой из них можно представить, как двухфазную систему. Представим частицы минерального скелета шарами одинакового диаметра, упакуем их с наиболее вероятным количеством контактов, на каждом из n контактов представим однородное вяжущее, связывающее шары. Многократные испытания таких моделей в общем случае дадут равнозначные показатели. Перейдем к реальным материалам. Однородность вяжущих будет отличаться на разных контактах из-за неодинаковых толщин прослоек, из-за разной степени прошедших химических и физико-химических процессов в вяжущих. С другой стороны, практически невозможно добиться такого положения, чтобы каждый из n контактов получал равную порцию вяжущего на каждый контакт. Так как тип цементации определяется количеством клея, поэтому увеличение его дозировки должно повышать вероятность попадания частиц клея на все n контактов, тем самым создавая условия получения равнопрочных показателей.

Для получения двухфазной дисперсной системы, какой является любой укрепленный грунт, предлагается теоретическая модель формирования структуры УГ, получаемая на основе метода статистических испытаний (Монте-Карло).

Используя методы теории исследования операций, выделим целевую функцию — получение количественной оценки структуры УГ. При моделировании введены следующие ограничения: случайный (статистический) характер формирования структуры; моделирование на плоскости; равномерное распределение частиц минерального скелета по площади; представление частиц кругами одинакового диаметра; условно принятая инертность клея по отношению к скелету в начальной стадии формирования структуры. Основными структурными элементами моделей являются собственно УГ и дефекты структуры, а количественной оценкой неоднородности — число смен однородности, т. е. число переходов (границ) между структурными элементами в материале при его рассечении.

Теоретическая модель строится следующим образом: выбирается площадка с размерами, на порядок превышающими средний размер ожидаемого дефекта. Представляется, что размеры площадки не играют существенной роли для оценки однородности в случае, если каждый вид дефекта окружен достаточным количеством структурных элементов без дефектов. Поэтому для выявления роли технологических и структурных дефектов достаточно площадок, размеры которых на порядок превышают размеры дефектов. Так, для структурных дефектов необходима площадка, на которой помещается 10 на 10 частиц

грунта, для технологических дефектов размеры сопоставимы с размерами испытуемых образцов — 4x4 или 5x5 см. Если же размеры площадок для моделирования будут равны предполагаемым размерам исследуемых дефектов, то роль других структурных элементов невозможно будет выявить.

На площадке представляется любая «картинка» равномерного распределения заполнителя. Можно этот процесс заполнения выполнять случайным образом, упаковывая шары двух или трех диаметров каким-либо из алгоритмов математического моделирования конгломераторных структур, а затем образующиеся поры заполняют клеем по методу статистических испытаний (Монте-Карло). Количество реализаций заполнения возможно в широком диапазоне; в данном исследовании принято от 0 до 500. В дальнейшем одной реализации заполнения сопоставляется определенное количество «клея». Распределения «клея» в порах «минерального скелета» случайно в случае инертности клея по отношению к заполнителю и зависит от количества «клея». В случае невыполнения условия инертности, при наличии активных физико-химических процессов, протекающих между двумя подсистемами, случайность процессов должна нарушаться, причем следует ожидать более равномерное распределение клея, более тонких прослоек вяжущих, которые в контактной зоне являются более однородными, прочными, плотными, чем вообще внутри микроструктуры твердеющего вяжущего вещества. В некоторых случаях, если условия инертности не соблюдаются, можно ожидать нарушения случайности процесса заполнения в худшую сторону.

В зависимости от содержания, вяжущего реализуется тот или иной тип цементации: контактный, поровый, базальный либо их сочетание. Когда количество клея мало (до 10...13 % от массы грунта), преобладает контактный тип цементации. Поэтому имеется множество вероятных способов реализации напряженного состояния материала под нагрузкой и, вследствие этого, неоднородность физико-механических показателей. В структурах этого типа должно быть больше дефектов, неоднородностей, связанных с отсутствием клея в определенных местах площади или объема материала. Повышенное содержание клея предлагает меньшее количество дефектов структуры и, вследствие этого, высокую однородность показателей.

Заключение. Построение теоретических структурных моделей (ТСМ) осуществлено с использованием методов имитационного моделирования [5; 12; 13; 16; 17; 21]. В качестве «картинки» равномерного распределения минерального скелета принято распределение кругов одинакового диаметра по плоской поверхности с четырьмя контактами у каждого круга. Розыгрыш, имитирующий заполнение частицами клея пор между минеральным скелетом, осуществлен в узлы между четырьмя частицами. Представляется, что указанное допущение несущественно влияет на конечную картину теоретического распределения вяжущего (клея) и в более общем случае построения модели, с кругами разных диаметров, случайно распределенных по определенной площадке.

Разработан алгоритм, реализующий метод статистических испытаний, получено более 2 тыс. теоретических моделей. Характерная картина теоретического распределения клея представлена на рис. 1.

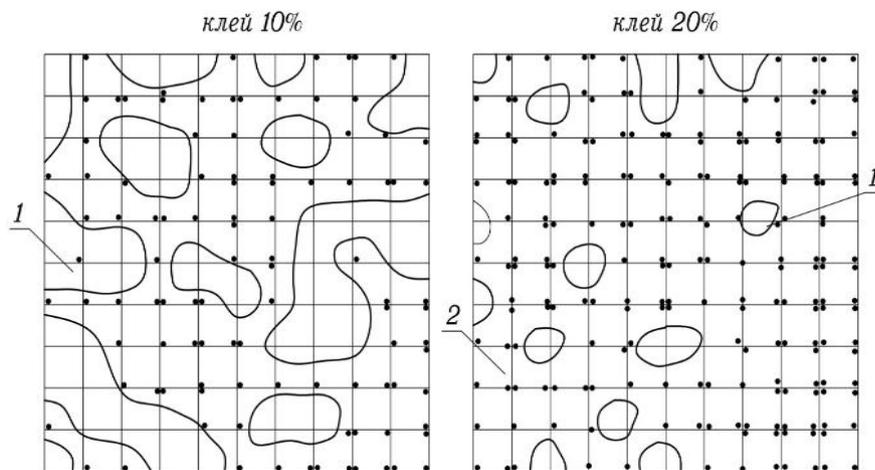


Рис. 1. Характерные картинки теоретических структур моделей: 1 — дефект структуры; 2 — минеральный скелет + клей

Аналогично осуществлено моделирование структур с грубыми дефектами, образующимися в технологическом цикле. Из анализа технологических способов известно, что более совершенные дают более однородную структуру УГ.

Представим модель структуры укрепленного грунта с технологическими дефектами, подобно показанным выше моделям структуры со структурными неоднородностями.

Построение указанной модели осуществлено на основе метода статистических испытаний. Розыгрыш имитирует попадание дефекта на поверхность разлома (среза). Реализация метода осуществлена на компьютере, получены теоретические структуры укрепленного грунта с технологическими дефектами. Количество дефектов на площади 5x5 см по имеющейся априорной информации моделировалось от 0 до 20. Картина распределения дефектов представлена на рис. 2.

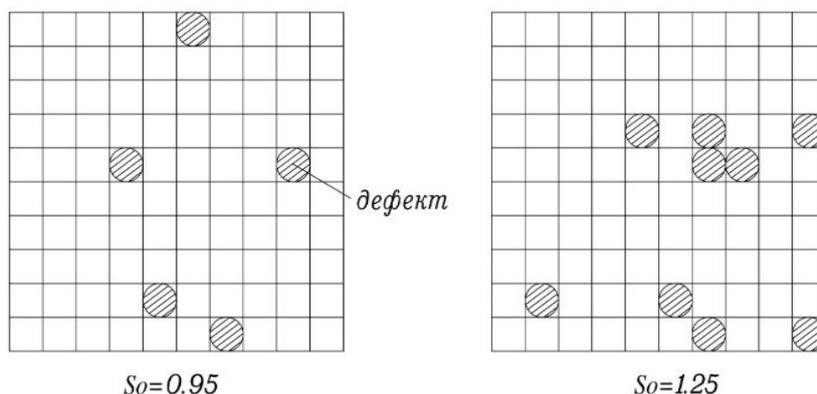


Рис. 2. Теоретическое распределение технологических дефектов структуры укрепленного грунта

Масштаб проявления технологических дефектов можно определить на основе требований размельчения глинистых грунтов, которыми ограничивается наличие в грунте частиц размерами более 5 мм меньше 25 % от массы, в том числе размерами более 10 мм — меньше 10 %. Таким образом, размеры технологических дефектов в структуре можно принять равными 1...10 мм.

Узлы теоретической модели, оказавшиеся свободными от клея, названы дефектами структуры. Чтобы количественно оценить теоретические структурные модели укрепленных грунтов 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 случае направления линий горизонтальны и вертикальны, совпадают с узлами картинки). Среднее количество таких смен на единицу длины, посчитанное для каждого случая реализации модели, является некоторым критерием оценки получаемой модели. На рис. 3 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.

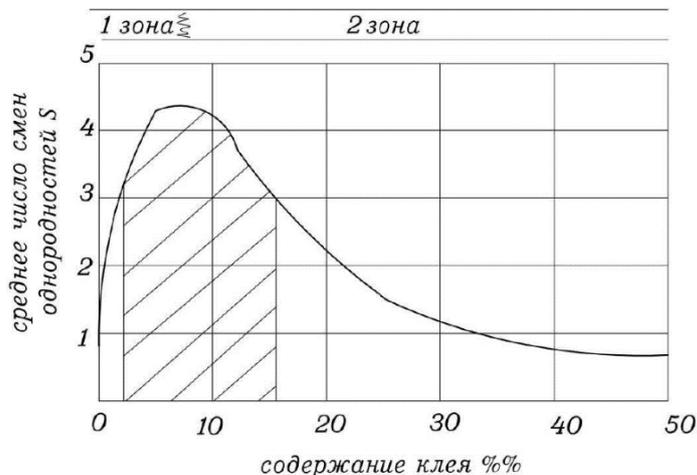


Рис. 3. Изменение числа смен однородности в зависимости от содержания клея

Рассмотрим с точки зрения рабочей гипотезы полученные результаты изменения числа смен однородностей в зависимости от количества клея. Грунт (песок) без клея представляет собой однородный материал, свойства которого определяются, в основном, углом внутреннего трения ϕ . 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 2 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 среднеэффектив-

ный диаметр частиц растет, и, хотя растет прочность материала, однородность его ухудшается из-за увеличения разброса размеров частиц, что и отражается фактически (рис. 3) через увеличение показателя S_0 . Это происходит до тех пор, пока агрегаты не склеиваются между собой все увеличивающимися порциями клея и не образуется сплошной каркас с дефектами внутри этого каркаса. При таких дозировках клея вероятнее всего попадание его в пустые зоны и насыщение порового пространства. Это ведет к повышению однородности структуры, что подтверждается и изменением числа S_0 (рис. 3). Ориентировочно, количество клея, после которого начинается устойчивое повышение однородности структуры, составляет 6–8 %.

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

Таким образом, можно установить два интервала изменения структурных неоднородностей укрепленных

грунтов: 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 количества дефектов показано на рис. 4.

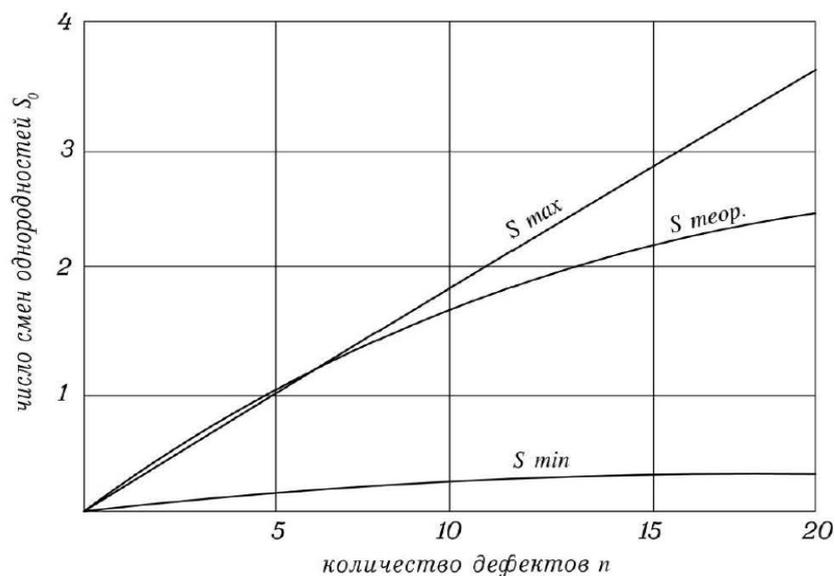


Рис. 4. Изменение числа S_0 в зависимости от количества дефектов структуры

Большому количеству дефектов соответствует большая неоднородность структуры. Ориентировочно выделены зоны для существующих способов изготовления укрепленных грунтов.

Таким образом, представляется 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.

Литература

1. Тихомиров П.В. Определение геометрических элементов лесовозных автомобильных дорог по средствам современных it-технологий // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы нац. науч.-практической конф. (19-21 апр. 2022 г.). Воронеж, 2022. С. 134-157.
2. Никитин В.В. Проектирование схем транспортного освоения лесных массивов с применением информационно-интеллектуальных систем // Автоматизация. Современные технологии. 2022. Т. 76. № 3. С. 130-134.
3. Prokopets V.S. Influence of the strength of the road structure on the resistance to movement // Теория и практика инновационных технологий в АПК: материалы нац. науч.-практической конф. (19-21 апр. 2022 г.). Воронеж, 2022. С. 168-186.
4. Стародубцева Т.Н. Сопротивление движению как качественный показатель состояния лесовозных автомобильных дорог // Строительные и дорожные машины. 2022. № 2. С. 35-40.
5. 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.
6. Чирков Е.В. Методические рекомендации по автоматизированному проектированию трассы лесовозной автомобильной дороги с применением методов оптимизации // Автоматизация. Современные технологии. 2021. Т. 75. № 2. С. 60-65.
7. Мацнев М.В. Количественная оценка влияния климатических факторов на создание сезонных заделов и темпы специализированных дорожно-строительных потоков // Строительные и дорожные машины. 2021. № 5. С. 18-24.
8. Боровлев А.О., Высоцкая И.А. Повышение эффективности лесовозных автомобильных дорог // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 4. С. 9-13.
9. Skrypnikov A.V., Denisov V.V., Agaeva N.Yu. Agro-industrial complex as a logistics object // Системный анализ и моделирование процессов управления качеством в инновационном развитии агропромышленного комплекса: материалы V Междунар. науч.-практической конф. (21 мая 2021 г.). Воронеж, 2021. С. 27-32.
10. Kozlov V.G. Influence of natural and technogenic factors on the complexity of construction of timber highways // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. «International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production», 2021. P. 012137.
11. Skrypnikov A.V. Feasibility study of geometrical parameters of wood transportation roads including prediction of optimum terms of construction and retrofitting sequence // Civil Engineering and Architecture. 2021. V. 9. № 6. P. 2077-2083.
12. Nikitin V.V. 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. Zelikov V.A. Application of the system engineering method when researching the carat pedestrian // Proceedings of the International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (aviaent 2019), 2019. P. 390-394.
 14. Бурмистров Д.В. Исследование вероятностных связей и зависимостей, определяющих оптимальные методы организации и планирования ритмичного строительства лесовозных автомобильных дорог // Лесной вестник. 2019. Т. 23. № 1. С. 70-76.
 15. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Belyaev A.N., Chernyshova E.V. Theoretical foundations of the method of designing a clothoid track with approximation of succession of points // Perspectives on the Use of New Information and Communication Technology (ICT) in the Modern Economy. Cham, 2019. P. 654-667.
 16. Logoida V.S. Development of the method for individual forecasting of technical state of logging machines // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. V. 8. № 5. P. 2178-2183.
 17. Козлов В.Г. Теоретические основы и методы математического моделирования лесовозных автомобильных дорог // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2018. № 6 (366). С. 117-127.
 18. Гулевский В.А. Экспериментальная оценка сцепных качеств и ровности покрытий при различных состояниях автомобильных дорог и погодных условиях // Вестн. Воронежского гос. аграрного ун-та. 2018. № 1 (56). С. 112-118.
 19. Смирнов М.Ю. Использование укрепленных грунтов, местных материалов и отходов промышленности для строительства дорожных одежд лесных дорог: моногр. Йошкар-Ола, 2017. 168 с.
 20. Сивков Е.Н. Условия движения по лесовозным дорогам // Изучение лесосырьевой базы Республики Коми: научно-методический аспект: сб. материалов науч.-практической конф. (29-30 нояб. 2016 г.). Сыктывкар, 2017. С. 19-23.
 21. Skrypnikov A.V. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12. № 2. P. 511-515.
 22. Enhancing forest machine efficiency: review // Australia. Forestand Wood. 2010. 48 p.
 23. Hwang C.L., Masud A. Multiple Objective Decision Making - Methods and Applications: A State of the Art Survey Lecture Notes in Economics and Matematical Systema No, 164, Springer-Verlag, New York, 1979.
 24. Скрыпников А.В., Скворцова Т.В., Козлов В.Г., Эль И.Т. Программа прогнозирования влажности грунтов земляного полотна лесовозных дорог: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016618333, 26.07.2016; заявка № 2016612708 от 28.03.2016.
 25. Смирнов М.Ю., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Дорохин С.В., Скворцова Т.В., Журавлев И.Н. Повышение эффективности функционирования автомобильных дорог лесного комплекса: моногр. Йошкар-Ола, 2016. 251 с.
 26. tekhnologij v APK: materialy nac. nauch.-prakticheskoy konf. (19-21 apr. 2022 g.). Voronezh, 2022. P. 168-186.
 27. Starodubceva T.N. Resistance to movement as a qualitative indicator of the condition of logging roads // Construction and Road Building Mashinery. 2022. № 2. P. 35-40.
 28. Nikitin V.V. Mathematical model of a network of logging roads based on optimal parameters // Teoriya i praktika innovacionnyh tekhnologij v APK: materialy nac. nauch.-prakticheskoy konf. (19-21 apr. 2022 g.). Voronezh, 2022. P. 120-134.
 29. Chirkov E.V. Methodological recommendations for automated design of the logging road route using optimization methods // Modern High Technologies. 2021. V. 75. № 2. P. 60-65.
 30. Macnev M.V. Quantitative assessment of the influence of climatic factors on the creation of seasonal reserves and the pace of specialized road construction flows // Construction and Road Building Mashinery. 2021. № 5. P. 18-24.
 31. Borovlev A.O., Vysockaya I.A. Improving the efficiency of logging roads // Modern High Technologies. 2021. № 4. P. 9-13.
 32. Skrypnikov A.V., Denisenko V.V., Agaeva N.Yu. Agro-industrial complex as a logistics object // Sistemnyj analiz i modelirovanie processov upravleniya kachestvom v innovacionnom razvitii agropromyshlennogo kompleksa: materialy V Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (21 maya 2021 g.). Voronezh, 2021. P. 27-32.
 33. Kozlov V.G. Influence of natural and technogenic factors on the complexity of construction of timber highways // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Ser. «International Conference on Engineering Studies and Cooperation in Global Agricultural Production», 2021. P. 012137.
 34. Skrypnikov A.V. Feasibility study of geometrical parameters of wood transportation roads including prediction of optimum terms of construction and retrofitting sequence // Civil Engineering and Architecture. 2021. V. 9. № 6. P. 2077-2083.
 35. Nikitin V.V. 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.
 36. Zelikov V.A. Application of the system engineering method when researching the carat pedestrian // Proceedings of the International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (aviaent 2019), 2019. P. 390-394.
 37. Burmistrov D.V. Study of probabilistic relationships and dependencies that determine the optimal methods for organizing and planning the rhythmic construction of logging roads // Forestry Bulletin. 2019. V. 23. № 1. P. 70-76.
 38. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Belyaev A.N., Chernyshova E.V. Theoretical foundations of the method of designing a clothoid track with approximation of succession of points // Perspectives on the Use of New Information and Communication Technology (ICT) in the Modern Economy. Cham, 2019. P. 654-667.
 39. Logoida V.S. Development of the method for individual forecasting of technical state of logging machines // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. V. 8. № 5. P. 2178-2183.
 40. Kozlov V.G. Theoretical foundations and methods of mathematical modeling of logging roads // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2018. № 6 (366). P. 117-127.
 41. Gulevskij V.A. Experimental assessment of grip qualities and evenness of coatings under various conditions of roads and weather conditions // Vestnik VSAU. 2018. № 1 (56). P. 112-118.
 42. Smirnov M.YU. Use of reinforced soils, local materials and industrial waste for the construction of road pavement for forest roads: monogr. Joshkar-Ola, 2017. 168 p.
 43. Sivkov E.N. Driving conditions on logging roads // Izuchenie lesosyr'evoy bazy Respubliki Komi: nauchno-metodicheskij

References

1. Tihomirov P.V. Determination of the geometric elements of logging roads using modern it-technologies // Teoriya i praktika innovacionnyh tekhnologij v APK: materialy nac. nauch.-prakticheskoy konf. (19-21 apr. 2022 g.). Voronezh, 2022. P. 134-157.
2. Nikitin V.V. Designing schemes for the transport development of forests using information and intelligent systems // Automation and modern technology. 2022. V. 76. № 3. P. 130-134.
3. Prokopets V.S. Influence of the strength of the road structure on the resistance to movement // Teoriya i praktika innovacionnyh

- aspekt: sb. materialov nauch.-prakticheskoy konf. (29-30 noyab. 2016 g.). Syktyvkar, 2017. P. 19-23.
21. Skrypnikov A.V. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12. № 2. P. 511-515.
 22. Enhancing forest machine efficiency: review // Australia. Forestand Wood. 2010. 48 p.
 23. 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 No, 164, Springer-Verlag. New York, 1979.
 24. Skrypnikov A.V., Skvorcova T.V., Kozlov V.G., El' I.T. Program for predicting the moisture content of subgrade soils of logging roads: svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM RU 2016618333, 26.07.2016; zayavka № 2016612708 ot 28.03.2016.
 25. Smirnov M.YU., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Dorohin S.V., Skvorcova T.V., ZHuravlev I.N. Improving the efficiency of the functioning of forest roads: monogr. Joshkar-Ola, 2016. 251 p.