

Опыт применения укрепленных грунтов в строительстве лесовозных автомобильных дорог

В.А. Тимофеев^{1a}, А.В. Скрыпников^{1b}, Е.Г. Бавыкина^{1c}, А.С. Карпов^{1d},
А.С. Безрук^{1e}, П.О. Романов^{1f}, А.Ю. Жук^{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 выполнен анализ состояния изученности вопросов качества укрепленных грунтов на основе изучения опыта применения укрепленных грунтов при строительстве лесовозных автомобильных дорог и критериев оценки качества укрепленных грунтов, сравнения исследований по данному вопросу по другим дорожно-строительным материалам (асфальтобетон, бетон, щебень и т. п.), выделения общих закономерностей, присущих указанным материалам в области их качества, рассмотрения методических подходов к изучению однородности свойств укрепленных грунтов. Дается объяснение сложности технологии производства укрепленных грунтов в сравнении с технологией применения каменных материалов. Особое внимание уделено вопросу необходимых условий производства качественно укрепленных грунтов, напрямую связанному с вопросами качества при строительстве лесовозных автомобильных дорог. Повышение качества дорожных конструкций зависит от повышения качества применяемых дорожно-строительных материалов. На качество материалов влияет большое количество факторов на всех стадиях получения материала и его работы в конструкции. Качество сырья, материалов, полуфабрикатов чаще всего оценивают по однородности физико-механических характеристик. Развернуто представлены определяющие факторы, влияющие на однородность прочностных показателей различных материалов. Результаты исследований асфальтобетонных смесей показали, что различные физико-механические показатели подвержены вариации в разной степени; наибольшей вариацией обладают следующие физические показатели: набухание H и водонасыщение W , а также предел прочности на сжатие при температуре 500 °С. Можно предположить, что природа показателя влияет на его изменчивость. Рассмотрены с позиции однородности требования, предъявляемые к качеству укрепленных грунтов. Количество факторов, оказывающих влияние на однородность прочностных показателей различных материалов, очень велико и насчитывает 50...60 таких факторов; при этом показано, что среди этого множества есть наиболее важные, оказывающие существенное влияние (определяющие факторы). Представлены основные принципы, положенные в основу классификации неоднородностей.

Ключевые слова: укрепленные грунты; однородность; цементогрунт; качество укрепленных грунтов; прочностные показатели; классификации неоднородностей.

Experience in the use of reinforced soils 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}

¹Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Avenue 19, Voronezh, Russia

²Bratsk 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 analyzes the state of knowledge of the quality of reinforced soils on the basis of: studying the experience of using reinforced soils in the construction of logging roads, studying the criteria for assessing the quality of reinforced soils, comparing studies on this issue with other road-building materials (asphalt concrete, concrete, crushed stone, etc.), highlighting the general patterns inherent in these materials in areas of their quality, consideration of methodological approaches to the study of the uniformity of the properties of reinforced soils. An explanation is given of the complexity of the technology of production of reinforced soils in comparison with the technology of using stone materials. Special attention is paid to the issue of the necessary conditions for the production of high-quality reinforced soils directly related to quality issues in the construction of logging roads. Improving the quality of road structures depends on improving the quality of road construction materials used. The quality of materials is influenced by a large number of factors at all

stages of obtaining the material and its work in the design. The quality of raw materials, semi-finished products is most often evaluated by the uniformity of physical and mechanical characteristics. The determining factors affecting the uniformity of strength indicators of various materials are presented in detail. The results of studies of asphalt concrete mixtures showed that various physical and mechanical parameters are subject to variation to varying degrees; the following physical parameters have the greatest variation - swelling H and water saturation W , as well as compressive strength at a temperature of 500C. It can be assumed that the nature of the indicator affects its variability. The requirements for the quality of reinforced soils are considered from the standpoint of uniformity. The number of factors influencing the uniformity of strength indicators of various materials is very large, there are 50...60 such factors; it is shown that among this set there are the most important ones that have a significant impact (determining factors). The basic principles underlying the classification of inhomogeneities are presented.

Keywords: reinforced soils; uniformity; cement grout; quality of reinforced soils; strength indicators; classification of heterogeneities.

Введение. Укрепленный грунт (УГ) — это сложный композиционный материал, получивший признание в дорожном строительстве наряду с каменными материалами. Многочисленные исследования, выполненные в нашей стране и обобщенные в работах [1–7], показали эффективность применения УГ, особенно для районов, не имеющих своих каменных материалов [8; 9].

Исследования УГ продолжаются в различных направлениях и касаются расширения номенклатуры УГ (сейчас насчитывается около 300 наименований) и совершенствования свойств уже известных УГ. Появилось новое направление: применение высокопрочных УГ индустриальными способами.

Несмотря на широкое распространение УГ, вопросы качества этих материалов и конструкций из них остаются недостаточно исследованными.

Цементогрунт в строительстве лесовозных автомобильных дорог. Наиболее широкое распространение из УГ получил цементогрунт, в строящихся и проектируемых лесовозных автомобильных дорогах он практически всегда находит себе место. Наиболее часто применяют цементогрунт в нижних слоях оснований. Большинство участков лесовозных автомобильных дорог юга Западной Сибири строятся с применением цементогрунта.

Километры дорог с применением цементогрунта построены в Омской области. Отечественными учеными продолжаются исследования свойств цементогрунта, направленные на повышение технологичности, долговечности, качества, на более широкое его применение в народном хозяйстве, на распространение этого материала в суровых климатических районах лесозаготовок [10–13]. Рекомендовано применение различных поверхностно-активных веществ (ПАВ) для решения указанных задач, причем ПАВ чаще всего являются отходами производства. Исследовано достаточно подробно влияние технологических факторов на физико-механические показатели цементогрунтов, выделены главные факторы, показаны пути и методы совершенствования технологических процессов при укреплении грунтов.

Следует отметить, что применение УГ в северных районах столкнулось с трудностями организационного и технологического характера, такими как краткость строительного сезона, невозможность проезда по участку в период ухода за укрепленным грунтом из-за сильной заболоченности вокруг, кроме того, в северных районах, по данным метеорологии, значительное количество осадков преимущественно выпадает в летний строительный сезон, что делает эти районы зоной «рискованного» применения УГ. Все указанные труд-

ности создают определенный психологический климат у производителей, предпочитающих каменные, привозные материалы.

Использование высокопрочных укрепленных грунтов. С целью устранения указанных трудностей применения УГ предложено использовать высокопрочные укрепленные грунты индустриальными способами. В результате этих предложений появились новые материалы: высокопрочные цементогрунты и полимерогрунты, нефтегрунты предварительной заготовки на основе сырой маловязкой нефти. Построено множество опытных участков, материалы успешно работают в конструкциях лесовозных автомобильных дорог, выполняется ежегодное обследование участков. Многие материалы успешно опробованы в производственных условиях. Например, высокопрочный цементогрунт применен для укрепления откосов подтопляемых насыпей в различных районах лесозаготовок. Опытное-производственное строительство показало хорошую работоспособность цементогрунта в конструкциях укрепления откосов для разных районов.

Так на лесовозной автомобильной дороге в Новгородской области в 2021 г. применено укрепление откосов подтопляемой насыпи высокопрочным цементогрунтом: материал использован для изготовления плиток и как монолитное покрытие, укладываемое на месте в конструкции. Балочки изготавливались на притрасовом полигоне из цементогрунта с повышенным до 25 % содержанием цемента. Ячейки клеток обрешетки заполнялись обычным цементогрунтом, приготовленным на месте укладки в бетономешалке. В настоящее время участки находятся в хорошем состоянии, разрушений нет.

Развитие лесозаготовительных регионов требует существенного увеличения объемов дорожного строительства. Выполнение таких объемов работ при отсутствии местных каменных материалов невозможно без еще более широкого применения УГ различного вида во всевозможных дорожных конструкциях.

Таким образом, УГ необходимы и широко применяются в условиях Новгородской, Кировской областей и других лесозаготовительных регионов, предложен целый ряд новых материалов, позволяющих принципиально по-другому решать организационные и технологические вопросы применения УГ в указанных условиях.

Необходимые условия производства качественного УГ. Известно, что технология производства УГ сложнее, чем технология применения каменных материалов, поэтому она требует несравненно более высокой культуры производства, чем известная ранее. В первую очередь, сложность заключается в том, что

применяется то или иное вяжущее, во-вторых, химические процессы, происходящие при формировании структуры материала, требуют создания специальных условий, в-третьих, особенности строительства лесовозных автомобильных дорог имеют организационные и технологические препятствия.

Указанные сложности и отклонения от технологии производства работ приводят к тому, что конструкции из УГ не получают тех прочностных свойств, которые предусмотрены в проектах; конструкции в целом по своим показателям неоднородны, а значит, недолговечны. Это подтверждается исследованиями технологических процессов и их влиянием на конечный результат [1; 6].

В той или иной мере вопросами качества при строительстве лесовозных автомобильных дорог занимаются все исследователи и производственники, касаясь этого вопроса при изучении конкретного объекта либо в проектировании, либо в строительстве и эксплуатации, при этом всегда рассматривается одно из свойств качества продукции: надежность, однородность, прочность, технологичность, ровность, минимальная стоимость и др.

В работах В.К. Курьянова, Р.С. Сапелкина, В.Г. Козлова [16-19] и в ряде других работ [20] отмечается, что изучение вопросов качества и надежности конструкции возможно лишь с позиций системного подхода и одной из важнейших подсистем является подсистема дорожно-строительных материалов. Попытка построить систему, выделить все элементы ее подсистем, ее анализ и оптимизация довольно сложны по различным причинам: во-первых, из-за взаимного влияния подсистем и элементов разного уровня друг на друга, во-вторых, из-за вероятностного характера множества входов и выходов данной системы и, наконец, как признают сами авторы, из-за невозможности качественно и количественно учесть множество названных факторов.

Однородность физико-механических характеристик в оценке качества дорожно-строительных материалов. Повышение качества дорожных конструкций зависит от повышения качества применяемых дорожно-строительных материалов. На качество материалов влияет большое количество факторов на всех стадиях получения материала и его работы в конструкции.

Качество сырья, материалов, полуфабрикатов чаще всего оценивают по однородности физико-механических характеристик, измеряемой коэффициентом вариации C_V или коэффициентом однородности K_0 :

$$C_V = \frac{S}{\bar{X}}, \quad (1.1)$$

$$K_0 = 1 - tC_V, \quad (1.2)$$

где S — среднееквадратическое отклонение; t — коэффициент достоверности; \bar{X} — среднее значение.

Понятие однородности (неоднородности) — одно из наиболее общих свойств композиционных материалов и конструкций из них, которое объективно существует и значительно влияет на оценку качества лесовозных автомобильных дорог. Под однородностью свойств УГ следует понимать неизменность характеристик материала в пространстве и во времени. Ограничение по времени не всегда присутствует при определении од-

нородных и неоднородных объектов (систем). Естественно, понятие неизменности характеристик следует понимать в вероятностном смысле. Анализ работ позволяет оценить различные методы оценки однородности бетона и сделать вывод о том, что лучше всего для оценки однородности бетона использовать коэффициент вариации. Коэффициент — безразмерная величина, и это является его достоинством, так как появляется возможность сопоставлять между собой разные по прочности материалы и конструкции. С ростом математического ожидания какой-либо характеристики растет и среднееквадратическое отклонение, т. е. коэффициент вариации относительно мало зависит от средних значений подавляющего большинства измеряемых характеристик. На этот факт указывают многочисленные фактические данные по изменчивости свойств грунтов, исследования бетонов и УГ.

Улучшение однородности показателей материала ведет или к снижению расходов вяжущего, так как уменьшает риск снижения расчетного параметра ниже минимально возможного, одновременно уменьшая предел нормативного показателя, или к повышению долговечности и надежности. Этот вопрос приобретает большую актуальность в связи с появлением высокопрочных УГ с повышенными содержаниями вяжущих.

Анализируя методы оценки качества слоев из цементогрунта, С.Ю. Рокас указывает на различные показатели, по которым оценивается однородность: коэффициент качества приготовления смеси, показатель потери прочности, однородность по прогибу цементогрунтового слоя, показатели методов меченых частиц. В основе большинства из них лежит методика сравнения лабораторных данных с производственными, не учитывающая структурные особенности УГ. С.Ю. Рокас указывает на предпочтительность определения однородности по S , C_V , K_0 .

Таким образом, можно сделать вывод, что однородность показателей УГ целесообразнее определять по коэффициентам вариации опытных данных, обладающих достаточной устойчивостью с точки зрения их получения.

Вопросов однородности показателей дорожно-строительных материалов касаются многие исследователи в различных областях дорожного строительства и строительства лесовозных автомобильных дорог в частности, в целом — в механике грунтов, исследовании бетонных и железобетонных конструкций, асфальтобетона, цементогрунта и других конструктивных слоев и однородности их показателей.

Результаты обработки материалов по оценке изменчивости свойств грунтов, показывают, что C_V показателей изменяется в довольно широких пределах от 0,03 до 0,5, за исключением плотности, где пределы C_V составляют 0,02...0,07. Можно предположить, что невысокая изменчивость последнего обусловлена тем, что плотность определяется степенью упаковки и довольно устойчива статически, уплотняющее воздействие делает маловероятным образование арочных пустот и т. п., в нем принимает участие огромное количество частиц, которые в общем случае можно считать шарами, например, каждый занимает «свое» место в системе с большой вероятностью. В механике грунтов показано,

что любое инженерное мероприятие по улучшению деформативных и прочностных свойств грунтов ведет к повышению однородности и повышает надежность всей системы.

Статистический подход к проектированию оснований сооружений позволяет по-иному взглянуть на конструкции дорожных одежд; так на основании результатов расчетов многослойной дорожной одежд показано, что наибольшее влияние на равнопрочность оказывает однородность нижних слоев, особенно земляного полотна. Обоснованно увеличение числа проходов катков при увеличении слоев земляного полотна в 2,5 раза по сравнению с рекомендациями СНиП, что позволяет уменьшить C_V модуля упругости земляного полотна на 40 %. Указанные результаты позволяют поставить вопрос об изучении влияния слоев дорожных одежд из УГ на прочность и работоспособность всей дорожной конструкции, так как в большинстве случаев эти слои расположены в нижней части дорожной одежды.

К настоящему времени проделана значительная работа по изучению однородности бетонов, по совершенствованию качества бетонных и железобетонных конструкций как в промышленно-гражданском, так и в дорожном строительстве. Экспериментальные данные, полученные на основе обобщения результатов контроля качества изделий, свидетельствуют, что максимальные отклонения от заданных параметров имеет прочность материала как одна из важнейших характеристик, например, максимальный разброс для марки бетона составляет ± 50 %. По данным различных авторов [21; 22], C_V колеблется в пределах 0,07...0,30, в некоторых случаях превышая указанные пределы, что в первую очередь объясняется несовершенством технологических процессов на данных предприятиях. Среднее значение C_V находится в пределах 0,10...0,15 [23].

В дорожном строительстве при проверке на важность учета изменчивости характеристик бетона отмечается, что надежность результата испытаний по трем образцам недостаточно высока. В работах [24; 25] приведены данные по фактической изменчивости прочности бетона, колебания которой составляют от 0,06 до 0,23 незначительный разброс (0,05) наблюдается там, где работы ведутся с особой тщательностью, и достигает 0,23 там, где работы выполняются с нарушением технологических правил производства работ. Отмечается, что эти колебания характерны для некоторого периода, например, месяца в работе одной установки, что говорит о нестабильности его работы. Определим, что основными причинами этого являются нечетко налаженный лабораторный контроль и перерывы работы завода в течение смены. Более вероятной причиной таких колебаний следует считать организационные причины, т. е. наличие перерывов в работе, особенно для установок непрерывного действия.

Указано, что для однородности бетона существенно влияние температуры твердения, колебания которой приводят к изменчивости свойств от 0,13 до 0,20. Известно, что основные характеристики бетона зависят от условий, возникающих в период его твердения, очень важный для формирования структуры бетона. Так, при обследовании построенных цементобетонных покрытий лесовозных автомобильных дорог Новгородской

области получены данные об изменчивости свойств бетона от 0,19 до 0,24, т. е. не встречается изменчивость по 0,10...0,15, как это имеет место в центральных районах страны, что указывает на влияние экстремальных условий региона. Для УГ на основе цементов следует учитывать в дальнейшем влияние как региональных условий, так и условий, созданных для набора прочности.

Наиболее изученным в смысле однородности является асфальтобетон. В этой области С.Ю. Рокасом и другими учеными проделана значительная работа на всех этапах технического контроля при строительстве асфальтобетонных покрытий. В настоящее время различают три вида контроля: входной, текущий и приемочный. Проблема качества лесовозных автомобильных дорог становится все более актуальной в связи с ускорением темпов и индустриализацией строительства дорог, обосновывает применение статистических методов контроля качества как наиболее адекватно отражающих и фиксирующих существо случайных процессов и характеристик, имеющих место при строительстве лесовозных автомобильных дорог.

Прочностные показатели в оценке качества укрепленных грунтов. С.Ю. Рокас предлагает нормировать основные показатели асфальтобетона, исходя из фактически достигнутого уровня качества изготовления и укладки асфальтобетонной смеси. Нормирование таких показателей связано с проблемой установления предела, до которого можно уменьшать разброс данных. В настоящее время таким пределом можно считать изменчивость показателей материалов в лабораторных условиях.

Результаты исследований асфальтобетонных смесей демонстрировали, что различные физико-механические показатели подвержены вариации в разной степени; наибольшей вариацией обладают следующие физические показатели — набухание N и водонасыщение W , а также предел прочности на сжатие при температуре 500 °С. Можно предположить, что природа показателя влияет на его изменчивость.

В меньшей степени изучена однородность физико-механических показателей укрепленных грунтов. Многие исследователи отмечают невысокую однородность УГ, поэтому интересно рассмотреть общие требования, предъявляемые к УГ, с точки зрения изменчивости их основных свойств.

Рассмотрим с позиции однородности требования, предъявляемые к качеству укрепленных грунтов. Основными показателями, по которым оценивается качество готового материала, являются прочностные показатели. Так при подборе составов смесей в лабораторных условиях расхождения в оценке прочности между отдельными показателями испытаний не должны превышать 15 %. Подсчитаем C_V по разности между максимальными и минимальными значениями показателей, предполагая, что прочностные характеристики распределены по нормальному закону. На это указывают многочисленные исследования по изучению распределений случайных величин. На основе изучения представительных выборок по цементобетону и цементогрунту сделан вывод о том, что распределение R_{pi} и

$R_{сж}$ подчиняется нормальному усеченному закону, ограниченному слева $2S$, — значений, выходящих за эту границу, либо нет, либо их так мало, что ими можно практически пренебречь. Учитывая сказанное и не делая существенной ошибки, в последующем будем оперировать только 5%-ным риском или доверительной вероятностью $P = 95 \%$.

В соответствии с методикой, для лабораторных условий получим коэффициент вариации, примерно, 0,08.

Мы получаем достаточно жесткие условия по коэффициенту вариации при подборе составов смесей. Практически очень трудно получить такую статистическую характеристику. Так В.С. Цветковым получены C_V прочностных показателей цементогрунтов в лабораторных условиях в среднем 0,17. По данным работы А.В. Линцера, C_V прочностных характеристик цементогрунтов составляют от 0,10 до 0,20.

Качество смесей, приготовленных в производственных условиях, оценивается по отклонениям средних значений испытаний образцов от установленных нормами показателей. Отклонения средних значений результатов испытания образцов, приготовленных из производственных смесей, от требуемых показателей прочности допускаются:

- при приготовлении смесей в установках — не более $\pm 8 \%$;
- при приготовлении смесей однопроходной грунтосмесительной машиной — не более $\pm 15 \%$;
- при приготовлении смесей дорожной фрезой — не более $\pm 25 \%$.

Приготовление смеси в установке является более совершенным технологическим способом, чем любой другой, — значит, риск получить минимальную прочность в этом случае меньше, поэтому возможно допускать отклонения среднего от нормативных значений больше, чем это указано для других способов.

Фактические данные по однородности прочностных характеристик УГ немногочисленны.

В работах отечественных исследователей приведены коэффициенты вариации прочности цементогрунта в производственных условиях, в среднем составляющие 0,31. Также приводятся данные по однородности показателей цементогрунтов при массовом обследовании качества смесей, приготовленных различными способами. Независимо от способа производства работ, $C_V = 0,280...0,415$. Аналогичные данные приведены, где показано, что по прочностным показателям цементогрунты очень неоднородны, имеют $C_V = 0,33...0,40$. По данным В.А. Семенова, C_V для цементогрунтов колеблется в пределах 0,30...0,78. По другим данным, C_V прочности цементогрунтов составляет 0,30...0,49.

Таким образом, фактические данные по однородности прочностных показателей цементогрунтов неоднозначны. Причиной этому может быть целый комплекс факторов, таких как различие в условиях применения УГ, в условиях лабораторных и производственных испытаний, в исходных материалах, структурных связях применяемых материалов и др.

Анализ данных по испытанию прочности УГ показывает, что можно установить объективно сложившееся в настоящее время соотношение между показателем

однородности прочности (C_V) УГ в лаборатории и на производстве как 1:2, т. е. $C_V^{lab}: C_V^{пр} = 1:2$.

Определяющие факторы, влияющие на однородность прочностных показателей различных материалов. Количество факторов, оказывающих влияние на однородность прочностных показателей различных материалов, очень велико, насчитывают 50...60 таких факторов; при этом показано, что среди этого множество есть наиболее важные, оказывающие существенное влияние (определяющие факторы).

На данном этапе изучения все факторы можно разделить на две группы, первая группа — факторы, определяющие неоднородность в принципе. К таким факторам относятся практически неконтролируемые и неуправляемые (форма частиц компонентов, их поверхностная активность, характер поверхности и др.). Вторая группа — факторы, связанные с проектированием, изготовлением и эксплуатацией материалов.

Особое значение для изучения структуры УГ имеют факторы второй группы. Обобщая исследования разных авторов [26], изучавших различные материалы, можно управляющие факторы второй группы разделить по следующим признакам:

- обусловленные изменчивостью состава материала;
- обусловленные изменчивостью технологических операций;
- обусловленные методами контроля.

Известны попытки оценить влияние той или иной группы на общую однородность. Так Л.И. Левин для бетонов оценивает доли дисперсии следующим образом: вызываемая материалами составляет 33 %, вызываемая нарушениями в методах контроля прочности — 40 %, при этом он оценивает использование плохих форм в 20 %, остальная доля приходится на технологию приготовления.

Выделяя основные принципы укрепления грунтов, В.М. Безрук показывает, что количественные и качественные показатели укрепленных грунтов определяются особенностями постоянно и временно действующих факторов. К постоянно действующим факторам отнесены те, которые определяют характер, направленность и интенсивность протекания процессов химических и физико-химических — как в микрообъемах вяжущих, так и на контактах с поверхностью минеральных частиц. К временно действующим (технологическим) отнесены те, которые определяют характер во всем объеме обрабатываемого материала. Как указывает В.М. Безрук, именно учет этих факторов, причем в совокупности, позволяет обеспечить высокое качество укрепленных грунтов.

В.М. Безрук отмечает также огромную роль целенаправленного регулирования всех процессов, определяющих формирование структуры и свойств материалов. Им выделены, кроме известных кристаллизационных, конденсационных и коагуляционных, структуры смешанного типа, сочетающие в себе положительные качества различных (двух) связующих компонентов.

Изучение неоднородности показателей осложняется при проявлении структур, разных по степени заполненности минерального скелета вяжущими; у новых материалов индустриального применения появляются и свои структурные особенности.

В работах [27; 28] также подчеркивается важность направленного структурообразования при укреплении грунтов.

Технологические факторы заметно влияют на однородность дорожно-строительных материалов и конструкций из них [30; 31], но следует заметить, что при укреплении грунтов такие данные противоречивы, как уже указывалось выше. Можно предположить, что, наряду с технологическими, решающее влияние на однородность УГ оказывают их структура и такие свойства, как гранулометрический состав, наличие мелкодисперсной фазы, минералогический состав, свойства вяжущего и, наконец, свойства образующих макроструктуры и микроструктуры УГ. Такие свойства исследовались в основном по их влиянию на прочностные характеристики УГ.

Поскольку неконтролируемые факторы, а также большинство технологических факторов всегда подвержены статистическим вариациям, то и физико-механические свойства подвержены изменчивости при переходе от образца к образцу. Изучение этой связи эмпирическими методами весьма затруднительно, так как это множество из отмеченных факторов взаимно влияет друг на друга. Представляется, что можно рассмотреть влияние этих факторов на структуру УГ теоретически на моделях, а затем от структурных особенностей перейти к свойствам УГ и конструктивным элементам. Свойства материалов чувствительны к структурным изменениям, поэтому глубокое понимание структурных особенностей УГ открывает пути к совершенствованию технологии изготовления дорожных конструкций из УГ.

Изучение неоднородности показателей УГ непосредственно связано с общей теорией композиционных материалов, с их прочностью и долговечностью.

Все строительные материалы, в том числе и УГ, принадлежат к группе искусственных строительных конгломератов (ИСК), являющейся частью более общей системы композиционных материалов. На основе общей теории формирования их структуры, свойств и методов исследования приведены классификация ИСК. Основные принципы, положенные в основу новой классификации, применимы и к УГ. Оптимальные структуры УГ, поисками и исследованием которых занимаются дорожники, имеют такой комплекс структурно-механических и технологических закономерностей, который делает их подобными конгломератам.

Применяемые и внедряемые в условиях Новгородской и Кировской областей УГ разнообразны по своим характеристикам, во-первых, из-за применения вяжущих разной природы, во-вторых, из-за получения принципиально отличных друг от друга структур и структурно-механических свойств материалов и, в-третьих, из-за места УГ в дорожных конструкциях.

Многообразие УГ, значительное число факторов и также невозможность найти математической закон расположения компонентов материала затрудняют изучение однородности свойств УГ.

Подходы к изучению неоднородности показателей УГ. К изучению неоднородности показателей УГ можно подходить с различных позиций.

Первая позиция, использующая кибернетические принципы, в основе которых лежит идея «черного ящика», когда исследованию подвергаются данные на входе и выходе системы, без количественного анализа процессов, проходящих в «черном ящике», в структуре самого материала. Именно такой подход чаще всего применяется при исследовании однородности УГ и других дорожно-строительных материалов. Вариация показателей УГ и конструкций из них является следствием случайных, локальных возмущений, напряжений и случайного распределения неоднородностей в материале, т. е. природы самого ИСК, поэтому использовать кибернетический подход при изучении неоднородностей довольно трудно. Множество комбинаций при реализации входных параметров «черного ящика» практически могут дать и дают одинаковые случайные значения показателей на выходе. Это, с одной стороны, затрудняет изучение материалов, равнопрочностных их показателей, с другой стороны, появляется возможность за счет этого множества комбинаций факторов на входе управлять выходными параметрами, компенсируя влияние каких-либо «вредных» факторов «полезными». Зарубежные ученые также применяют кибернетический подход к изучению показателей неоднородности различных дорожно-строительных материалов, в том числе и УГ.

Таким образом, УГ рассматривается как однородное изотропное тело, хотя обладает вполне определенной структурой. Недоучет структурных особенностей не позволяет получать согласованные результаты.

Вторая позиция, так называемый структурный подход, предлагает изучение макро- и микроструктур исследуемых материалов, элементов структуры, степени соединения и объединения элементов структуры, дисперсности элементов и их влияния на прочность и однородность.

Под структурой в общей теории ИСК понимают пространственное расположение кристаллов, кристаллических обломков и агрегатов, аморфных частиц разной формы и степени дисперсности с их возможными связями и порядком сцепления между собой. Различают микроструктуру, которой обладает вяжущая часть (клей), мезоструктуру, под которой понимают клей в совокупности с мелкодисперсными частицами, и макроструктуру, под которой понимают пространственное расположение крупного заполнителя, прочно зафиксированного с помощью клея.

В зависимости от природы вяжущего, структура ИСК видоизменяется как в процессе формирования, так и в процессе эксплуатации под воздействием множества факторов. Ведущую роль в структурообразовании имеют технологический процесс и его наиболее важные периоды — подготовительные операции, перемешивание, уплотнение, обработка отформованных изделий.

По технологическому признаку структуры ИСК разделяют на оптимальные и неоптимальные. Неоптимальные структуры характеризуются разбросом показателей структурно-механических, физических и других технических свойств. Таким образом, неоднородность показателей отражает отклонения в оптимальной структуре исследуемого материала. Неоднородность

показателей — важнейшее свойство ИСК — является следствием неоднородностей структуры материалов.

Принцип классификация неоднородностей. М.В. Рац показал, что основной принцип, который должен быть положен в основу классификации неоднородностей, — это масштаб их проявления. М.В. Рац ввел понятие «элемент неоднородности», под которым понимается наибольший объем горной породы, рассматриваемый на данном уровне как внутренне однородный в интересующем нас отношении и отличающийся в этом отношении от смежных с ним объемов.

М.В. Рац делает вывод о том, что необходимо классифицировать неоднородности по отношению размеров элементов неоднородности к размерам области воздействия в каждой конкретной задаче. Приводится следующая классификация:

1. Неоднородность высшего порядка (ультранеоднородность), выступающая в форме свойств эквивалентной однородной среды, например, дефекты кристаллической решетки при испытании образцов на прочность.

2. Эффективная неоднородность (ЭН) (микронеоднородность), обуславливающая разброс значений результатов испытаний, например, микротрещины при испытании на прочность.

3. Неоднородность низшего порядка (макронеоднородность), размер элементов которой больше размеров области воздействия или примерно равен ему.

Учитывая изложенное, можно сделать вывод, что неоднородность высшего порядка не препятствует рассмотрению горной породы как однородной среды, ЭН осложняет это рассмотрение, вводя в него элементы случайности и оставляя возможность лишь статистического анализа.

Следует заметить, что при исследовании неоднородности горных пород основное внимание уделяется неоднородности низшего порядка, которая заставляет учитывать структуры больших массивов при решении практических задач геологии и инженерной геологии.

При изучении неоднородности УГ и других строительных материалов в силу решаемых здесь других задач, а именно обеспечения прочности, морозостойкости и других свойств, особое значение приобретает ЭН, обуславливающая статистическую природу всех показателей материалов, а также неоднородность низшего порядка, которую можно связать с несовершенствами технологического процесса на современном этапе и назвать технологической неоднородностью.

Исследованию связи «структура – свойства» дорожно-строительных материалов посвящено значительное число научных работ [1; 11; 13; 27; 29-31]. Указанные работы направлены на получение оптимальных по прочности и, реже, по другим свойствам структур всех видов ИСК.

Количественные критерии, характеризующие структуру материала. Наиболее близкими к изучаемой в данной работе связи «структура – неоднородность» прочности являются работы М.В. Бунина, И.М. Грушко, в которых рассматриваются связи типа «неоднородность структуры – прочность». Неоднородность структуры оценивается по крупности заполнителя. Для бетонов найдена оптимальная крупность заполнителя,

дающая максимальную прочность. М.В. Бунин вводит понятие «материальный цикл», т. е. минимальный объем материала, который связан со структурной ячейкой материала и отражает в себе все основные особенности его структуры. Объем цикла определяется размерами структурных элементов, в качестве которых могут выступать частицы крупного заполнителя, песка, поры материала. Понятие «материальный цикл», предложенное М.В. Буниным, аналогично понятию «элемент неоднородности», введенному М.В. Рацем. В связи с чем можно сделать вывод о том, что неоднородность в структуре материала имеет большое значение для практики, — она связана с разбросом величин напряжений и показателей прочности, однако разработка этого вопроса находится в начальной стадии поиска.

Предложены три группы количественных критериев, характеризующих структуру материала:

- критерии, показывающие взаиморасположение структурных элементов, крупность и форму зерен;
- критерии, устанавливающие количественное соотношение структурных элементов (состав материала);
- критерии, определяющие характер связей между структурными элементами.

Представляется, что для более глубокого изучения связи «структура – неоднородность» прочности необходимы критерии, оценивающие неоднородность структуры количественно, при этом все четыре группы критериев возможно изучать на структурных моделях УГ по аналогии подхода.

Структурные особенности укрепленных грунтов изучались А.В. Линцером. В составе укрепленного грунта выделены две подсистемы первого уровня, «минеральный скелет» и «клей», состоящие из подсистем второго уровня, соответственно, «минеральный скелет» разделен на грубо- и мелкозернистые частицы, а «клей» — на дисперсные частицы (твердые фазы) и вяжущий материал (жидкая фаза). На основе аппаратов теории укладок и покрытий и физико-химической механики дисперсных структур выбраны управляющие параметры и проведена оптимизация подсистем и всей системы.

Описанный подход и оптимизация системы «УГ» и подходы, указанные в работах [15; 28; 29] авторов, практически нельзя использовать для изучения неоднородностей показателей, так как основные их положения базируются на детерминированных оценках как по плотности упаковки, так и по относительной вязкости (соотношение твердой и жидкой фаз в подсистеме «клей») и по другим вопросам.

Особенности структуры УГ и все основные показатели во многом определяются типом цементации, т. е. способом объединения минерального скелета клеем.

Если принять за основу теорию разрушения бетона (разрушение может происходить по трем сечениям — с раскалыванием зерен заполнителя, по поверхности контакта зерен и вяжущего, по микроструктуре вяжущего), то для УГ разного состава наиболее вероятными для разрушения являются сечения на контакте вяжущего и заполнителя, а также через микроструктуру вяжущего (цементного камня).

На контакте с заполнением цементных вяжущие более однородные, прочные и плотные, чем вообще внут-

ри микроструктуры вяжущего, поэтому достижение более тонких прослоек вяжущего в структуре материала может дать более однородные показатели. Поэтому при изучении неоднородности УГ необходимо в дальнейшем обратить внимание на контакты структуры, своевременное и качественное уплотнение материалов.

Предложенные структурные схемы материалообразования и порядок их разработки. Указанные структурные схемы довольно сложны и не учитывают случайность процесса материалообразования. УГ имеет существенное отличие от бетонов — отсутствие крупного заполнителя, поэтому для оценки неоднородности требуется иной подход. Моделирование случайных процессов образования структур УГ представляется весьма перспективным в исследовании связей «структура – свойства укрепленных грунтов».

Заключение. Анализ литературных данных позволяет заключить следующее:

- УГ объективно необходимы в регионе для эффективного решения задач строительства лесовозных автомобильных дорог;
- изучение однородности свойств УГ является одним из актуальных направлений научных исследований в дорожном строительстве, позволяющим повысить качество УГ и дорожных конструкций из УГ;
- структурные особенности УГ, применяемых в условиях Новгородской и Кировской областей, с позиции однородности их свойств практически не исследо-

ваны и могут быть изучены на основе структурного моделирования;

- нормативные документы на УГ недостаточно учитывают изменчивость (неоднородность) свойств материалов, получаемых в лабораторных и производственных условиях, отсутствуют требования к однородности УГ;

- качество УГ по однородности не отвечает современным требованиям.

Учитывая вышеперечисленное, можно сформулировать *цель настоящей работы* — исследование и разработка способов повышения однородности прочности укрепленных грунтов лесовозных автомобильных дорог.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать влияние физико-механических показателей структуры грунтов на однородность прочности с обоснованием структурного показателя оценки однородности укрепленных грунтов;
- совершенствовать количественную оценку однородности структуры укрепленных грунтов и ее связь с неоднородностью прочности;
- экспериментально исследовать основные факторы, влияющие на неоднородность прочности укрепленных грунтов;
- обосновать пути повышения однородности укрепленных грунтов, их технико-экономическую оценку, а также разработать рекомендации по повышению однородности укрепленных грунтов в производственных условиях.

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Леви Р.В., Комины Дж., Хамфесон К. Применение метода конечных элементов в задачах тепло- и массопереноса в пористых телах // Инженерно-физический журнал. 1975. № 3. С. 483-488.
4. 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.
5. 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.
6. Сиденко В.М. Расчёт и регулирование водно-теплого режима дорожных одежд и земляного полотна. М.: Авто-трансиздат, 1962. 116 с.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
 15. 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.
 16. Математические методы в инженерии. Численные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных / сост. Г.Н. Журов. СПб.: СПГУ, 2016. 62 с.
 17. 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.
 18. 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.
 19. 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.
 20. 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.
 21. Нерсеова З.А. Морозное пучение грунтов и способы защиты сооружений от его воздействия. М.: Транспорт, 1967. 187 с.
 22. 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.
 23. 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.
 24. 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.
 25. Боровлев А.О. Математическое моделирование трассы лесовозных автомобильных дорог // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2021. № 4 (382). С. 150-161.
 26. 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).
 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 Matematical Systema № 164, Springer-Verlag, NewYork, 1979.

References

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Sidenko V.M. Calculation and regulation of the water-thermal regime of road clothes and roadbed. М.: Avtotransizdat, 1962. 116 p.
7. 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.
8. 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.
9. 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 agrarnoj 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.
10. 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.
 11. 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. molodyh specialistov. M.: PNIIS, 2007. P. 24-27.
 12. 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.
 13. 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.
 14. Nikitin V.V. Mathematical model of a network of logging highways based on optimal parameters // Teoriya i praktika innovatsionnyh tekhnologij v APK: materialy nac. nauch.-prakticheskoy konf. (19-21 apr. 2022 g.). Voronezh, 2022. P. 120-134
 15. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Afonichev D.N. Impact of cars on the road // Nauka i obrazovanie v sovremennyh 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.
 16. Mathematical methods in engineering. Numerical methods for solving partial differential equations / sost. G.N. ZHurov. SPb.: SPGU, 2016. 62 p.
 17. 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.
 18. 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.
 19. 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.
 20. 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.
 21. Neresova Z.A. Frost heaving of soils and methods of protecting structures from its effects. M.: Transport, 1967. 187 p.
 22. CHirkov E.V., SHCHerbakov E.D., Tihomirov P.V., Nikitin V.V. Designing logging highways // Innovatsionnye 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.
 23. 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.
 24. 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.
 25. 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.
 26. 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).
 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 agrarnoj 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 // Innovatsionnye 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.