УДК 625.7/.8 DOI: 10.18324/2077-5415-2026-3-113-120

Сокращение расходов при устройстве дренирующих и морозозащитных слоёв дорожной одежды магистральных лесовозных дорог

Д.П. Курдюков[1a], А.Ю. Мануковский[1b], О.Н. Бурмистрова[2c], А.В. Андронов[3d], Т.В. Каратаева[4e], В.А. Иванов[5f]

[1] ФГБОУ ВО Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Россия
[2] ФГБОУ ВО Ухтинский государственный технический университет, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская,13, Россия
[3] ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, пер. Институтский, 5, Литер У, Санкт-Петербург, Россия
[4] ФГБОУ ВО Филиал Воронежского технического университета в городе Борисоглебск, ул. Свободы, 191, г. Борисоглебск, Воронежская обл., Россия
[5] ФГБОУ ВО Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия
[a] d.kurdukov@yandex.ru, [b] mayu1964@mail.ru, [c] oburmistrova@ugtu.net, [d] andronovalexandr@gmail.com, [e] almateri@yandex.ru, [f] ivanovva55@mail.ru.
[a] https://orcid.org/0009-0004-5725-2281, [b] https://orcid.org/0000-0003-4289-6581, [c] https://orcid.org/0000-0003-2616-7557, [d] https://orcid.org/0000-0002-1035-9231, [e] https://orcid.org/0009-0007-4701-9111, [f] https://orcid.org/0000-0001-9139-0697.
Статья поступила 25.05.2026, принята 11.09.2026.

Оптимизация подходов к проектированию конструкций дорожных одежд и земляного полотна магистральных лесовозных дорог, в частности за счёт сокращения толщины дренирующих и морозозащитных слоёв, позволяет комплексно решить ряд актуальных в настоящее время задач. К числу таких задач относится, прежде всего, сокращение объёмов добычи инертных материалов (песка, щебня и др.), используемых для устройства конструктивных слоёв, что непосредственным образом влияет на уменьшение площади разрабатываемых карьеров и снижение нагрузки на природную среду в районах лесозаготовки. Далее – это сокращение транспортных расходов, связанных с доставкой указанных материалов к месту строительства, что особенно существенно для удалённых и труднодоступных территорий, характерных для лесосырьевых баз. Кроме того, снижение объёмов перевозок влечёт за собой уменьшение затрат на компенсацию вреда, причиняемого тяжеловесными транспортными средствами (с максимальной разрешённой массой свыше 12 тонн), которые участвуют в строительном процессе и эксплуатируют автомобильные дороги общего пользования. Следует также отметить, что сокращение высоты насыпей способствует уменьшению ширины полосы отвода, занимаемой магистральной лесовозной дорогой, что позволяет более рационально использовать лесные земли и сокращать площадь изъятия участков под строительство. Решение обозначенных задач направлено на уменьшение продолжительности строительно-монтажных работ и снижение общей стоимости возведения конструктивных слоёв магистральных лесовозных дорог. Это, в свою очередь, способствует повышению эффективности функционирования предприятий лесозаготовительного комплекса, поскольку строительство лесовозных дорог является одной из наиболее затратных статей в общей структуре расходов на освоение лесных массивов. Ускорение строительства, достигаемое за счёт внедрения предлагаемых конструктивных решений, позволяет быстрее вводить в эксплуатацию новые лесосырьевые базы, сокращая логистические издержки и повышая рентабельность лесозаготовительного производства. Предлагаемые в работе алгоритмы расчёта позволяют обоснованно определять минимально необходимые толщины конструктивных слоёв дорожных одежд и земляного полотна магистральных лесовозных дорог, учитывая комплекс факторов: динамический характер нагружения, грунтово-гидрологические условия, климатические особенности района строительства и эксплуатационные требования. Представленные методики дают возможность оценивать эффективность работы проектных решений для конкретных условий, что обеспечивает переход от эмпирического подхода к научно обоснованному проектированию и способствует повышению надёжности и долговечности лесовозных дорог при одновременном снижении капитальных затрат.

Ключевые слова: земляное полотно; лесные дороги; геоматы; профилированная геомембрана.

Reduction of expenses in the construction of drainage and frost-proof layers of the road surface of main logging roads

D.P. Kurdyukov[1a], A.Yu. Manukovsky[1b], O.N. Burmistrova[2c], A.V. Andronov[3d], T.V. Karataeva[4e], V.A. Ivanov[5f]

[1] Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia
[2] Ukhta State Technical University; 13, Pervomayskaya St., Republic of Komi, Ukhta, Russia

[3] St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Lane, St. Petersburg, Russia
[4] Borisoglebsk Branch of Voronezh State Technical University; 191, Svobody St.., Borisoglebsk, Russia
[5] Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia
[a] d.kurdukov@yandex.ru, [b] mayu1964@mail.ru, [c] oburmistrova@ugtu.net, [d] andronovalexandr@gmail.com,
[e] almateri@yandex.ru, [f] ivanovva55@mail.ru.
[a] https://orcid.org/0009-0004-5725-2281, [b] https://orcid.org/0000-0003-4289-6581,
[c] https://orcid.org/0000-0003-2616-7557, [d] https://orcid.org/0000-0002-1035-9231,
[e] https://orcid.org/0009-0007-4701-9111, [f] https://orcid.org/0000-0001-9139-0697.
Received 25.05.2026, accepted 11.09.2026.

Optimization of approaches to the design of pavement structures and subgrade of main logging roads, in particular by reducing the thickness of drainage and frost-protection layers, enables a comprehensive solution to a number of currently pressing problems. These problems include, first and foremost, reducing the volumes of extraction of inert materials (sand, crushed stone, etc.) used for the construction of structural layers, which directly affects the reduction of the area of quarries being developed and lowers the burden on the natural environment in logging areas. Next is the reduction of transportation costs associated with delivering these materials to the construction site, which is especially significant for the remote and hard-to-reach territories characteristic of timber resource bases. In addition, the reduction in haulage volumes entails a decrease in the costs of compensating for damage caused by heavy vehicles (with a maximum permitted mass exceeding 12 tons) that participate in the construction process and use public roads. It should also be noted that reducing the height of embankments helps to decrease the width of the right-of-way occupied by a main haul road, which allows for more rational use of forest lands and reduces the area of land withdrawn for construction. The solution of these problems is aimed at reducing the duration of construction and installation work and lowering the overall cost of constructing the structural layers of main haul roads. This, in turn, helps to improve the operational efficiency of logging industry enterprises, since the construction of haul roads is one of the most costly items in the overall structure of expenses for developing forest areas. The acceleration of construction achieved through the introduction of the proposed structural solutions makes it possible to bring new timber resource bases into operation more quickly, reducing logistics costs and increasing the profitability of logging production. The calculation algorithms proposed in the work make it possible to determine in a well-founded manner the minimum required thicknesses of the structural layers of pavement structures and roadbed of main haul roads, taking into account a set of factors: the dynamic nature of loading, soil and hydrological conditions, the climatic characteristics of the construction and operation area, and performance requirements. The presented methodologies allows one to assess the effectiveness of design solutions for specific conditions, which ensures a transition from an empirical approach to scientifically substantiated design and contributes to improving the reliability and durability of haul roads while simultaneously reducing capital costs.

Keywords: subgrade; logging roads; geomats; and profiled geomembrane.

Введение. В условиях перехода от плановой экономики к рыночной модели хозяйствования, произошедшего в Российской Федерации, предприятия лесопромышленного комплекса вынуждены самостоятельно планировать производственную деятельность на всех стадиях технологического цикла. В связи с этим развитие промышленной дорожной инфраструктуры для обеспечения внутрихозяйственной деятельности приобретает особое значение как фактор, определяющий экономическую эффективность лесозаготовительного производства. Наличие развитой сети лесных (лесохозяйственных и лесовозных) дорог является необходимым условием устойчивого функционирования лесопромышленных предприятий, обеспечивающим доступ к лесосырьевым базам и своевременный вывоз древесины [17].

Согласно данным на конец отчётного периода, протяжённость постоянно эксплуатируемых лесных дорог в Российской Федерации достигла 97,8 тыс. км, что в 10,5 раза превышает протяжённость Транссибирской железнодорожной магистрали, соединяющей Москву и Владивосток. Анализ региональной структуры показывает, что наибольшая протяжённость лесных дорог сформирована в Приморском крае (23,4 тыс. км), Кировской области (свыше 16 тыс. км) и Республике Алтай (10,6 тыс. км). Следует отметить, что в районах интенсивной лесозаготовки дорожная сеть развита достаточно равномерно, тогда как в зонах перспективного освоения лесных массивов наблюдается её дефицит. В отчётном году наиболее активное строительство лесовозных дорог осуществлялось на территории Сибири (порядка 4 тыс. км), Северо-Западного федерального округа (3,4 тыс. км) и Дальнего Востока (2,4 тыс. км). Среди регионов-лидеров по объёмам нового строительства выделяются Иркутская область (почти 2 тыс. км), а также Красноярский край и Архангельская область, в каждом из которых построено по 1,9 тыс. км дорог. Приведённые данные свидетельствуют о сохраняющейся потребности в расширении дорожной инфраструктуры для обеспечения эффективного освоения лесосырьевых ресурсов [16].

Материалы и методы. Сохранение целостности земляного полотна и обеспечение круглогодичной эксплуатации лесных автомобильных дорог достигается соблюдением требований табл. В. 13 приложения В СП 34.13330.2021. Согласно указанному документу, для насыпей, расположенных на участках местности 2-го и 3-го типов по условиям увлажнения, величина возвышения поверхности покрытия над расчётным уровнем грунтовых и поверхностных вод должна составлять от 1,5 до 3,0 м. Обеспечение требуемого возвышения при производстве строительно-монтажных работ сопряжено со значительным увеличением материалоёмкости конструкции и ростом стоимости строительства.

В настоящее время для защиты дренажного и морозозащитного слоёв применяются многослойные геокомпозитные материалы (рис. 1), которые исключают их замокание, предотвращают процессы взаимопроникновения смежных слоёв и оглеение элементов дорожной одежды при суффозии. Однако использование

таких материалов ограничено недостаточной прочностью соединения между дренажным ядром (георешеткой) и плоской геомембраной, величина которой не превышает 500 Н, что обусловлено малой площадью их контакта.

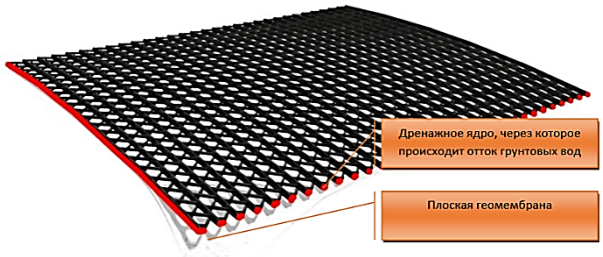

Рис. 1. Многослойный геокомпозитный материал

С целью снижения материалоёмкости, ускорения строительства и уменьшения затрат на строительно-монтажные работы, а также расширения спектра решаемых технических задач, рассмотрена возможность применения специализированной дренажной профилированной геомембраны (рис. 2 и 3) [1, 3].

Профилированная геомембрана совмещает в себе функции, присущие традиционному многослойному геокомпозиту, а именно дренирование в плоскости конструктивных слоёв дорожной одежды и земляного полотна, а также их гидроизоляцию от воздействия грунтовых вод. При этом применение данного материала исключает необходимость выполнения технологических операций по соединению дренажного ядра (георешетки) с плоской геомембраной, что упрощает производственный процесс и устраняет ограничения, связанные с прочностью сцепления компонентов.

Благодаря профилированной структуре материал приобретает повышенную жёсткость, которая формирует объёмную конфигурацию, обеспечивающую восприятие значительных статических и динамических нагрузок без потери эксплуатационных свойств. Кроме того, высокая жёсткость позволяет сохранять проектную толщину материала под воздействием внешних нагрузок, благодаря чему дополнительно к основной гидроизолирующей функции реализуется дренажная способность, обеспечивающая отвод воды от защищаемого конструктивного слоя. Таким образом, геокомпозит эффективно отводит как поверхностную атмосферную, так и грунтовую воду от земляного полотна в сторону откосной части насыпи.

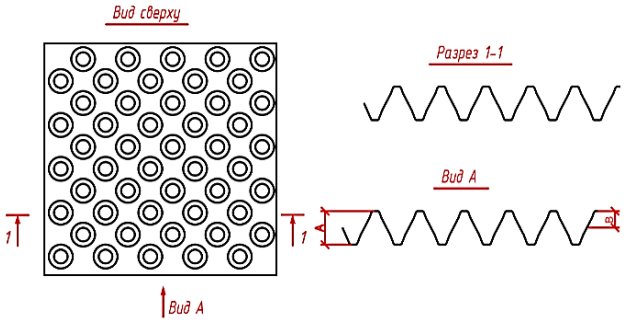

Рис. 2. Дренажная профилированная геомембрана. Тип 1 «Конусы»

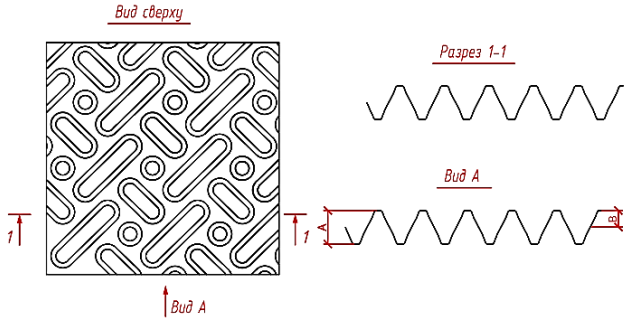

Рис. 3. Дренажная профилированная геомембрана. Тип 2 «Конусы и овалы»

Оценка применимости профилированной (макротекстурированной) геомембраны выполнялась в три этапа. Поскольку предлагаемое решение направлено на воспроизведение скелета твёрдой пористой среды с формированием в горизонтальной плоскости упорядоченных дренажных каналов для регулирования водно-теплового режима, его работоспособность и эффективность оценивались на основе теории фильтрации, описывающей течение и просачивание жидкостей сквозь пористые среды. При этом пространственная структура, дренажные пути и насыщающая их жидкость (грунтовые воды) рассматривались как сплошная среда.

Среди характеристик исследуемой среды выделены две группы факторов: первая – жёсткость и способность профилированной геомембраны сохранять собственную структуру при воздействии нагрузок от подвижного состава лесовозных автопоездов; вторая – параметры течения (давление, плотность, скорость), определяемые осреднением по некоторой области, размеры которой должны быть значительно меньше характерных размеров пористого пласта, но достаточно велики по сравнению с размерами пор и частиц. Согласно исследованиям М.Т. Насковец и М.Н. Дини, посвящённым весовым параметрам нагрузок, передаваемых на лесные дороги при перевозке лесных грузов, максимальное расчётное значение нагрузки на ось лесовозных автопоездов составляет 13 т (рис. 4, 5), что соответствует реальным условиям эксплуатации современных лесовозов, для которых указанный показатель обычно варьируется от 10 до 15 т в зависимости от типа подвижного состава и его грузоподъёмности [19].



Рис. 4. Лесовозный автопоезд

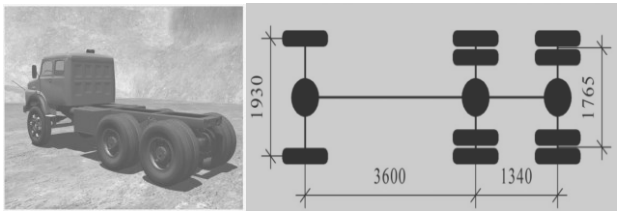

Рис. 5. Схема движителя автопоезда

При оценке силового воздействия подвижного состава на конструктивные элементы дорожной одежды определяющее значение приобретает не только абсолютная осевая нагрузка, но и удельное давление, передаваемое колёсами на поверхность покрытия. Величина данного давления находится в прямой зависимости от площади контакта шины с дорожным покрытием, которая, в свою очередь, определяется типом и размером шины, давлением воздуха в ней, степенью износа протектора, а также действующей вертикальной нагрузкой. Для лесовозных автопоездов характерно применение двухскатных колёс на задней оси, что обеспечивает увеличение суммарной площади контакта с покрытием и, следовательно, способствует снижению удельного давления на нижележащие слои дорожной одежды при сохранении той же осевой массы [18, 20].

Так, при расчётной осевой нагрузке, равной 13 т, и размерах отпечатка одного колеса 22 см в ширину и 30 см в длину, суммарная площадь контакта четырёх колёс (по два ската с каждой стороны оси) составит 2640 см², или 0,264 м².

$$A_{зад} = 4 \text{ колеса на одну ось} \times 22 \text{ см} \times 30 \text{ см} = 2640 \text{ см}^2 = 0{,}264 \text{ м}^2 \quad (1)$$

Тогда среднее давление на поверхность дорожной одежды от задней оси составит:

$$P_{зад} = 13\,000 \text{ кг} / 2640 \text{ см}^2 \approx 4{,}9 \text{ кгс/см}^2 \ (\text{или} \approx 0{,}49 \text{ МПа}) \quad (2)$$

Полученное значение удельного давления (≈0,49 МПа) является достаточно высоким для дорожных одежд лесовозных дорог. Для сравнения, нормативные требования к расчётным нагрузкам для дорог общего пользования IV категории (СП 34.13330.2021) предусматривают нагрузку на ось не более 10 т, что при аналогичных параметрах контакта даёт давление порядка 0,37 МПа. Таким образом, лесовозные дороги при одинаковых условиях эксплуатации подвергаются на 30–35 % более интенсивному механическому воздействию, что необходимо учитывать при конструировании дорожной одежды [21].

Между тем при расчётах следует принимать во внимание и динамический характер нагрузки. Движение лесовозов с грузом сопровождается вертикальными колебаниями, вызванными неровностями покрытия, что приводит к кратковременному увеличению фактического давления относительно расчётного, вызванный неровностями покрытия, особенно колейностью. С увеличением глубины колеи или скорости движения растут вертикальные ускорения автомобиля, что приводит к возрастанию фактического давления на покрытие.

Исследованием определена следующая эмпирическая зависимость коэффициента динамичности от глубины колеи и скорости движения:

$$к_д = 1 + C \cdot \frac{h_k}{h_0} \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^2, \quad (3)$$

где $к_д$ – коэффициент динамичности; C – эмпирический коэффициент, учитывающий тип подвески, состояние дорожной одежды и особенности подвижного состава (для лесовозных автопоездов рекомендуется принимать (C = 0,03–0,06), в среднем (C = 0,05)); h_k – глубина колеи (или высота неровности), см; h_0 – базовый параметр глубины неровности, шаг измерения 1 см; V – скорость движения, шаг измерения 1 м/с; V_0 – базовая скорость, шаг измерения 1 м/с .

Физический смысл определённой зависимости заключается в том, что вертикальные ускорения и, соответственно, динамические нагрузки возрастают пропорционально глубине неровности (линейно) и квадрату скорости движения (поскольку энергия колебаний пропорциональна (V^2)). Это согласуется с общими закономерностями динамики движения транспортных средств [22, 23, 24].

Подставляя характерные значения для лесовозных дорог (глубина колеи 1–3 см, скорость 30–60 км/ч), получаем:

Таблица 1. Результаты зависимости формирования глубины колеи от скорости движения автопоезда

h_k, см	V, км/ч	V, м/с	$k_д$ при (C = 0,05)
1	30	8,3	1 + 0,05·1·(0,83)² ≈ 1,03
1	60	16,7	1 + 0,05·1·(1,67)² ≈ 1,14
3	30	8,3	1 + 0,05·3·(0,83)² ≈ 1,10
3	60	16,7	1 + 0,05·3·(1,67)² ≈ 1,42
3	90	25	1 + 0,05·3·(2,50)² ≈ 1,94

Для неблагоприятного сочетания (глубина колеи 3 см, скорость 60 км/ч) коэффициент динамичности составляет 1,42, а при увеличении скорости до 90 км/ч (встречается на магистральных лесовозных дорогах высокого технического уровня) коэффициент может достигать 1,94, что подтверждает необходимость принятия мер по обеспечению целостности автодорожного конструктива для сохранения сообщения между верхними и нижними складами. Данные мероприятия могут выражаться как в организационных мероприятиях, например, в ограничении скорости движения или запрете вывозки в неблагоприятное время, так и в конструктивных, а именно в постановке задачи применения материалов, выполняющих две и более функции [25].

С учётом этого фактическое динамическое давление на дорожную одежду от задней оси лесовозного автопоезда составит

$$P_{факт} = P_{зад} \cdot к_д. \quad (4)$$

Полученное расчётное значение динамического давления, составляющее порядка 0,70 МПа, следует рассматривать в качестве исходной величины при выполнении прочностных расчётов конструктивных слоёв дорожной одежды и оценке устойчивости земляного

полотна. Использование лишь статической нагрузки без введения динамического коэффициента приводит к существенному занижению фактических напряжений, действующих в конструкции, что в условиях эксплуатации лесовозных автопоездов может стать причиной преждевременного разрушения дорожной одежды. В этой связи применение профилированных геомембран и других геосинтетических прослоек должно обеспечивать работоспособность конструкции именно при указанных динамических нагрузках, поскольку данные материалы одновременно выполняют три ключевые функции: гидроизоляционную, направленную на защиту конструктивных слоёв от переувлажнения за счёт блокирования капиллярного поднятия грунтовых вод и проникновения поверхностной влаги; разделяющую, предотвращающую взаимопроникновение смежных слоёв и исключающую суффозионный вынос частиц грунта; а также армирующую, способствующую перераспределению вертикальных напряжений на большую площадь и снижению интенсивности остаточных деформаций в подстилающем грунте. Указанные функции реализуются благодаря объёмной структуре профилированной геомембраны, которая обеспечивает устойчивость к сжатию и сохранение дренажной способности даже при многократном воздействии динамических нагрузок.

Рассчитанные значения динамических давлений необходимо также учитывать при назначении толщины конструктивных слоёв. В частности, для предотвращения накопления остаточных деформаций в дренирующем слое из песка его модуль упругости должен соответствовать нормативным требованиям для данных условий нагружения, а при использовании геосинтетических прослоек их прочностные и деформативные характеристики должны гарантировать эффективное распределение давления на нижележащие грунты, исключая локальные перенапряжения и образование колеи. Таким образом, выбор материалов и проектирование толщины слоёв должны выполняться на основе сопоставления расчётных напряжений с допустимыми значениями для каждого конкретного материала.

Выполненные расчёты подтверждают необходимость устройства усиленных конструкций дорожных одежд на магистральных лесовозных дорогах, особенно в районах с неблагоприятными грунтово-гидрологическими условиями. Любые инновационные решения, направленные на снижение материалоёмкости, включая применение профилированных геомембран, должны оцениваться по комплексному критерию, учитывающему не только экономическую эффективность, но и способность материала воспринимать высокие удельные динамические нагрузки без потери своих функциональных свойств на протяжении всего жизненного цикла конструкции.

Результаты. Первая стадия исследований заключалась в оценке устойчивости земляного полотна с предлагаемым конструктивным решением, выполненной на основе численного моделирования (рис. 6). В ходе расчётов установлен факт дополнительного армирования грунтового массива за счёт цельной объёмной структуры профилированной геомембраны. Установлено, что коэффициент устойчивости, рассчитанный по методу круглоцилиндрических поверхностей скольжения, достигает минимального значения 2,75, что существенно превышает нормативно требуемую величину 1,30 [3, 5].

Механизм армирования в данном случае реализуется следующим образом. Профилированная геомембрана, обладая развитой пространственной конфигурацией, формирует в теле насыпи армирующую систему, работающую совместно с окружающим грунтом. При действии внешних нагрузок, включая динамические воздействия от лесовозных автопоездов, и собственного веса грунтового массива возникающие касательные напряжения частично воспринимаются геомембраной за счёт сил трения и сцепления, развивающихся по контактной поверхности «геосинтетик – грунт». Это препятствует развитию сдвиговых деформаций, повышая общую сдвиговую прочность конструкции. Дополнительно объёмная структура материала обеспечивает эффект «обоймы», который ограничивает боковые перемещения частиц грунта в зоне контакта и способствует более равномерному перераспределению вертикальных напряжений на нижележащие слои основания. В совокупности это приводит к повышению устойчивости откосов насыпи и подстилающего грунта против потери несущей способности, а также снижению риска локальных пластических деформаций, обусловленных циклическим характером нагружения. Полученное значение коэффициента устойчивости (2,75) свидетельствует о значительном запасе прочности и надёжности предлагаемого решения даже при неблагоприятном водно-тепловом режиме, характерном для лесных автомобильных дорог.

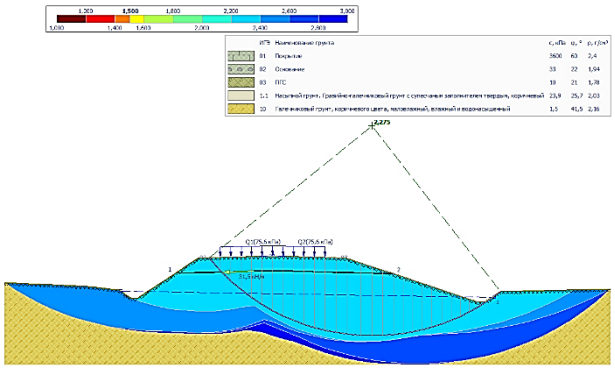

Рис. 6. Моделирование земляного полотна на оценку обеспечения устойчивости

Вторая стадия исследований предусматривала оценку осадки земляного полотна с предлагаемым конструктивным решением на основе метода конечных элементов (рис. 7).

По результатам расчётов выявлено, что применение профилированной геомембраны обеспечивает выравнивание эпюры распределения нагрузки на основание, способствуя тем самым снижению неравномерности осадок. Установлено, что расчётная величина конечной осадки не превышает 15 мм, что удовлетворяет требованиям эксплуатационной пригодности дорожной конструкции. Указанное значение осадки свидетельствует о высокой жёсткости объёмной структуры геомембраны и её способности эффективно перераспределять

транспортную нагрузку на грунтовое основание, исключая концентрацию напряжений и связанные с ней локальные деформации [3, 5].

Таким образом, результаты выполненных численных исследований подтверждают эффективность применения профилированной геомембраны в конструкции земляного полотна магистральных лесовозных дорог, обеспечивая требуемую устойчивость и допустимые деформации даже при интенсивном динамическом нагружении.

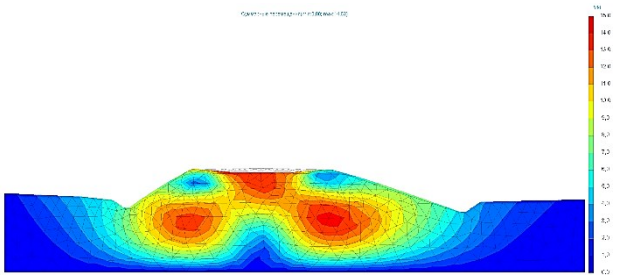

Рис. 7. Моделирование земляного полотна на оценку осадки

На третьем этапе исследований оценивалась дренажная способность предлагаемого конструктивного решения при включении профилированной геомембраны в состав земляного полотна. Расчётная величина дренажной способности (qP) определялась по следующей эмпирической зависимости:

$$q\,P = q\,проп \cdot (П\,повреж \cdot П\,ползч \cdot П\,хим \cdot П\,био \cdot П\,распред) \quad (5)$$

В предлагаемой зависимости учтены все возможные повреждения предлагаемого решения при устройстве в теле земляного полотна, а именно:

П повреж – повреждаемость материала при его монтаже;

П ползч – ползучесть;

П хим – устойчивость к химически агрессивным условиям строительства;

П био – устойчивость к биологически агрессивным условиям строительства;

П распред – отклонения от факта работы предлагаемого решения из-за неоднородности исходных данных;

q проп – пропускная способность предлагаемого решения (зависит от уклона в проектном положении) при гидравлическом градиенте i = 0,318 [–] / [%].

Таким образом, произведение указанных коэффициентов представляет собой интегральный показатель снижения начальной водопропускной способности, что позволяет получить консервативную оценку дренажной эффективности на весь период эксплуатации.

Для описания процесса фильтрации в структуре профилированной геомембраны используется линейный закон Дарси, справедливый для ламинарного режима течения жидкости. В данном случае каналы, образованные объёмными выступами мембраны, формируют упорядоченную дренажную систему, в которой поток грунтовой воды движется параллельно плоскости материала. Такая конфигурация обеспечивает равномерное распределение скоростей фильтрации, минимизацию гидравлических потерь и эффективное удаление воды за пределы земляного полотна в сторону откосной части насыпи. Применение закона Дарси при расчёте дренажной способности геомембраны позволяет установить взаимосвязь между гидравлическим градиентом, коэффициентом фильтрации материала и фактической пропускной способностью, что является основой для проектирования надёжных конструкций дорожной одежды на лесовозных дорогах.

$$Q = Kф \cdot F \cdot \Delta H/\Delta L \quad (6)$$

где Q – расход потока, м³/сут; Кф – коэффициент фильтрации, зависящий от свойств жидкости и фильтрующей среды, м/сут; F – площадь поперечного сечения потока, м²; ΔH – перепад напоров, м; ΔL – длина участка фильтрационного потока, м.

В этой связи следует подчеркнуть, что закон Дарси устанавливает линейную зависимость между гидравлическим градиентом, отражающим изменение напора на единицу длины пути фильтрации, и объёмным расходом жидкости, протекающей через пористую среду. К числу таких пористых сред относятся, в частности, дренирующие слои из инертных материалов (песка, щебня), применяемые в конструкциях дорожных одежд.

Для количественной характеристики фильтрационных свойств подобных материалов используется коэффициент проницаемости, который выражается следующей зависимостью:

$$C = Q \cdot \mu \cdot \Delta l / (\Delta P \cdot F) \quad (7)$$

где Q – объёмный расход жидкости, см³ /с; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, мПа · с; Δl – отрезок пути фильтрации, на котором происходит изменение давления ΔP, см; ΔP – перепад давления, МПа; F – площадь поперечного сечения потока, см².

Поскольку коэффициент проницаемости отражает исключительно свойства пористой структуры материала и не зависит от природы фильтрующейся жидкости, для описания реального процесса фильтрации вводится коэффициент фильтрации, который учитывает также физические характеристики жидкости, прежде всего её вязкость и плотность. Коэффициент фильтрации определяется через коэффициент проницаемости с учётом указанных параметров жидкости, что позволяет наиболее полно оценить дренажную способность профилированной геомембраны или другого геосинтетического материала в конкретных условиях эксплуатации.

$$Kф = a \cdot C \cdot \gamma/(g \cdot \cos A \cdot \mu \cdot 1000), \quad (8)$$

где a – коэффициент размерности; если Кф выражен в сантиметрах в секунду, то a = 1; если в метрах в сутки, то a = 864; μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, мПа · с;γ – удельная масса воды, 1 · 103 кг/м³; g – ускорение свободного падения (м/с²).

cos A – косинус угла наклона фильтрующей поверхности относительно горизонта (учитывает влияние силы тяжести). Если поверхность горизонтальна

(A= 0)), то (cos A = 1). Увеличение угла наклона приводит к ускорению процесса фильтрации.



Рис. 8. Применение предлагаемой профилированной геомембраны. Тип 1 «Конусы»

Обсуждение и заключение. В рамках проведённого исследования, на основании расчётов, учитывающих зависимость величины живого сечения предлагаемого конструктивного решения от совокупности факторов повреждений, снижающих его водопропускную способность, установлен ряд существенных эксплуатационных преимуществ. Прежде всего, отмечено сокращение минимально необходимой высоты насыпи в среднем в 2,4 раза по сравнению с требованиями действующих нормативов, а именно с диапазона 1,5–3,0 м до значений 0,7–1,1 м, что позволяет значительно уменьшить объёмы земляных работ и материалоёмкость дорожной конструкции. Далее зафиксировано сокращение среднего времени запаздывания начала работы водоотводящих устройств – параметра, обозначаемого как «Тзап» (средней продолжительности запаздывания начала работы водоотводящих устройств), – в 375,65 раза (с 6 суток до 23 минут). Столь существенное ускорение активизации процесса дренирования свидетельствует о высокой эффективности предлагаемого решения в части своевременного удаления воды из тела земляного полотна, что критически важно для обеспечения его несущей способности в периоды повышенного увлажнения, включая весеннее снеготаяние и продолжительные осадки. Наконец, организованный характер миграции влаги внутри земляного полотна, обеспечиваемый применением профилированной геомембраны, исключает процессы кольматации и заиливания конструктивных слоёв дорожной одежды и грунтового массива, благодаря чему сохраняется стабильность фильтрационных характеристик системы на протяжении всего периода эксплуатации [2, 6]. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения рассматриваемого материала в конструкциях лесовозных дорог как с технической, так и с экономической точек зрения, обеспечивая надёжное водоотведение и устойчивость земляного полотна при одновременном сокращении затрат на строительство.

Литература

1. Абдуназаров Ж.Н. Расчетный автомобиль для проектирования автомобильных дорог / Ж.Н.Абдуназаров // Вестник МАДИ. 2013. вып. 3 (31). С.77–82
2. Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог способами холодной регенерации (Утверждено распоряжением Росавтодора № ОС-568-р от 27.06.2002 г.).
3. Чудаков Е.А. Теория автомобиля / Е.А. Чудаков. М.: Машгиз, 1950. 343 с.
4. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля и его колебания / Р.В. Ротенберг. М.: Машгиз, 1960. 356 с.
5. Певзнер Я.М. Теория устойчивости автомобиля / Я.М. Певзнер. М.: Машгиз, 1947. 275 с.
6. Лушников Н.А. О взаимодействии колеса автомобиля и дорожного покрытия с колейностью / Н.А. Лушников, П.А. Лушников, Д.И. Ковалев, В.А. Кретов // ДОРОГИ И МОСТЫ. № 45/1. 2021. С. 75–80.
7. Сушков С.И. Применение геосинтетических и геопластиковых материалов в дорожном строительстве [Текст] : тексты лекций / С.И. Сушков, О.Н. Бурмистрова; ВГЛТУ. Воронеж, 2016. 128 с.
8. Тюрин Н.А. Дорожно-строительные материалы и машины [Текст] : доп. УМО по образованию в обл. лесн. дела в качестве учеб. / Н.А. Тюрин, Г.А. Бессараб, В.Н. Язов. М. : Академия, 2009. 304 с.
9. Подольский В.П. Технология и организация строительства автомобильных дорог. Земляное полотно [Текст] : учеб. / В.П. Подольский.
10. White D., & Vennapusa P. (2016). Cost-Effective and Sustainable Road Slope Stabilization and Erosion Control. Transportation Research Board (TRB), National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 850.
11. Eaton R.A., & Beauchamp, J. (2013). Low-Volume Roads Engineering: Best Management Practices Field Guide. United States Department of Agriculture (USDA), Forest Service, National Technology & Development Program.
12. Becker A., & Riedl, T. (2019). Use of Recycled and Secondary Aggregates in Frost-Protection Layers of Forest Roads A Life Cycle Assessment. International Journal of Forest Engineering, 30(3), 199–210.
13. Guthrie W.S., & Hermansson, Å. (2003). Frost Heave and Thaw Weakening in Pavement Foundations. Transportation Research Board (TRB), Circular E-C006.
14. Christopher B.R., & McGuffey V.C. (1997). Pavement Subsurface Drainage Systems. Transportation Research Board (TRB), National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Synthesis of Highway Practice 239.
15. Jones D., & Rolt, J. (2010). Reducing Cost and Environmental Impact of Forest Road Construction Through Improved Drainage Design. Proceedings of the 2010 International Conference on Low-Volume Roads, TRB.
16. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации на период до 2030 г. М.: Рослесхоз России, 2018. 102 с.
17. Алексеев А.С. Лесные автомобильные дороги. М.: Лесная промышленность, 1987. 320 с.
18. Курьянов В.К., Афоничев Д.Н., Скрыпников А.В. Автомобильные дороги. Воронеж, 2007. 284 с.
19. Курдюков Р.П., Мануковский А.Ю., Курдюков Д.П., Шамарин Н.И. Унификация использования машин-механизмов для лесовосстановления при строительстве лесовозных автомобильных дорог. Воронеж, 2024. С. 119–127.
20. Санников С.П., Мармур А.В. Изменение прочности дорожной одежды при сезонном промерзании и оттаивании

конструкции // Архитектура, строительство, транспорт. 2022. № 1 (99). С. 73–79. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-1-73-79.
21. ГОСТ 32729-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Метод измерения упругого прогиба нежестких дорожных одежд для определения прочности. М.: Стандартинформ, 2017. 29 с.
22. Hsu C.-Y., Chen S.-H., Lin J.-D. The In-Situ Temperature Evaluations of Permeable Pavements in Summer // Journal of Marine Science and Technology (Taiwan). 2015. Vol. 23, No. 3. P. 288–292. DOI: 10.6119/JMST-014-0326-3.
23. Hsu C.-Y., Chen S.-H., Lin J.-D. The In-Situ Temperature Evaluations of Permeable Pavements in Summer // Journal of Marine Science and Technology (Taiwan). 2015. Vol. 23, No. 3. P. 288–292. DOI: 10.6119/JMST-014-0326-3.
24. García Á. Self-healing of Open Cracks in Asphalt Mastic // Fuel. 2012. Vol. 93. P. 264–272. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.09.009.
25. Mannan U.A., Ahmad M., Tarefder R.A. Influence of Moisture Conditioning on Healing of Asphalt Binders // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 146. P. 360–369. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.087.

References

1. Abdunazarov Zh.N. Calculation car for designing highways/Zh.N.Abdunazarov // Bulletin of MADI.2013. issue 3 (31). pp. 77–82
2. Methodological recommendations for the restoration of asphalt concrete pavements and foundations of highways by cold regeneration methods (Approved by Order of Rosavtodor No. OS-568-r dated 27.06.2002).
3. Chudakov E.A. Theory of the car / E.A. Chudakov. M.: Mashgiz, 1950. 343 p.
4. Rotenberg R.V. Suspension of the car and its vibrations / R.V. Rotenberg. M.: Mashgiz, 1960. 356 p .
5. Pevsner Ya.M. Theory of stability of the car / Ya.M. Pevzner. M.: Mashgiz, 1947. 275 p.
6. Lushnikov N.A. On the interaction of a car wheel and a road surface with a track / N.A. Lushnikov, P.A. Lushnikov, D.I. Kovalev, V.A. Kretov // ROADS AND BRIDGES. No. 45/1. 2021. C. 75–80.
7. Sushkov S.I. Application of geosynthetic and geoplastic materials in road construction [Text]: lecture texts / S.I. Sushkov, O.N. Burmistrova; VSTU. Voronezh, 2016. 128 p.
8. Tyurin N.A. Road-building materials and machines [Text] : additional. UMO on education in the region. lesn. cases as a study / N.A. Tyurin, G.A. Bessarab, V.N. Yazov. M. : Academy, 2009. 304 p.
9. Podolsky V.P. Technology and organization of construction of highways. Roadbed [Text]: textbook / V.P. Podolsky.
10. White D., & Vennapusa P. (2016). Cost-Effective and Sustainable Road Slope Stabilization and Erosion Control. Transportation Research Board (TRB), National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Report 850.
11. Eaton R.A., & Beauchamp J. (2013). Low-Volume Roads Engineering: Best Management Practices Field Guide. United States Department of Agriculture (USDA), Forest Service, National Technology & Development Program.
12. Becker A., & Riedl T. (2019). Use of Recycled and Secondary Aggregates in Frost-Protection Layers of Forest Roads – A Life Cycle Assessment. International Journal of Forest Engineering, 30(3), 199–210.
13. Christopher B.R., & McGuffey V.C. (1997). Pavement Subsurface Drainage Systems. Transportation Research Board (TRB), National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Synthesis of Highway Practice 239.
14. Christopher B.R., & McGuffey V.C. (1997). Pavement Subsurface Drainage Systems. Transportation Research Board (TRB), National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) Synthesis of Highway Practice 239.
15. Jones D., & Rolt J. (2010). Reducing Cost and Environmental Impact of Forest Road Construction Through Improved Drainage Design. Proceedings of the 2010 International Conference on Low-Volume Roads, TRB
16. Strategy for the Development of the Forest Sector of the Russian Federation for the Period up to 2030. Moscow: Rosleskhoz Rossii, 2018. 102 p.
17. Alekseev A.S. Forest Roads. Moscow: Lesnaya Promyshlennost, 1987. 320 p.
18. Kuryanov V.K., Afonichev D.N., Skrypnikov A.V. Roads. Voronezh, 2007. 284 p.
19. Kurdyukov R.P., Manukovsky A.Yu., Kurdyukov D.P., Shamarin N.I. Unification of the use of mechanical and technical means for reforestation in the construction of logging roads. Voronezh, 2024. pp. 119–127.
20. Sannikov S.P., Marmur A.V. Changing the strength of the pavement during seasonal freezing and thawing of structures // Architecture, construction, transport. 2022. No. 1 (99). pp. 73–79. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-1-73-79.
21. GOST 32729-2014. Public roads. Method for measuring the elastic deflection of non-rigid road pavements to determine their strength. Moscow: Standartinform, 2017. 29 p.
22. Hsu C.-Y., Chen S.-H., Lin J.-D. The In-Situ Temperature Evaluations of Permeable Pavements in Summer // Journal of Marine Science and Technology (Taiwan). 2015. Vol. 23, No. 3. Pp. 288–292. DOI: 10.6119/JMST-014-0326-3.
23. Hsu C.-Y., Chen S.-H., Lin J.-D. The In-Situ Temperature Evaluations of Permeable Pavements in Summer // Journal of Marine Science and Technology (Taiwan). 2015. Vol. 23, No. 3. P. 288–292. DOI: 10.6119/JMST-014-0326-3.
24. García A. Self-healing of open cracks in asphalt mastic // Fuel. 2012. Vol. 93. pp. 264–272. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.09.009.
25. Mannan U.A., Ahmad M., Tarefder R.A. The effect of moisture on the hardening process of asphalt binders // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 146. pp. 360–369. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.087.