

АЛГОРИТМ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН НА ПОКРЫТИИ ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ, УСТРАИВАЕМЫХ НА СКЛОНЕ, В ОСНОВАНИИ КОТОРЫХ ЗАЛЕГАЕТ ГЛИНИСТЫЙ ГРУНТ

доктор технических наук, профессор **С. И. Сушков**¹

А. С. Сергеев²

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
г. Пермь, Российская Федерация

В статье сформулирован алгоритм образования трещин на покрытии лесовозных автомобильных дорог, устраиваемых на склоне, в основании которых залегает глинистый грунт. Рассмотрены возможные причины влагопереноса с физической точки зрения, движение грунтовой влаги в зону охлаждения, условия формирования трещин. Сформулирован принцип миграции влаги в промерзающих грунтах следующего образом: миграция воды в промерзающих влажных грунтах есть процесс переноса влаги, постоянно возникающий при всяком нарушении равновесного состояния фаз грунта и измерениях внешних воздействий при наличии градиентов температуры, влажности, давления, поверхностной энергии минеральных частиц, подвижности молекул в водных пленках. Соотношение между скоростью миграции и скоростью охлаждения определяет количество и мощность ледяных прослоек в грунтах, промерзающих с подтоком воды извне. Чем больше задерживается температура льдообразования на данном уровне, тем более мощные ледяные прослойки возникают здесь, так как для роста кристаллов льда успевает подтягиваться достаточное количество воды. Миграция воды в мерзлых грунтах, возможная лишь вследствие наличия в них незамерзшей воды, удерживаемой адсорбционными силами поверхности минеральных частиц грунта и льда, подчиняется тем же законам движения пленочной воды, которые установлены для грунтов, имеющих положительную температуру, но имеет и свои особенности ввиду дополнительного действия кристаллизационных сил льда; однако в этом случае процесс миграции пленочной воды будет весьма медленным. Перенос энергии и вещества в многокомпонентных средах в общем случае описывается с использованием аппарата термодинамики необратимых процессов. При создании в дисперсной среде градиента температуры возникает основной эффект – поток тепла, а также перекрестные эффекты, в том числе и поток массы. Результаты экспериментов и численные расчеты, произведенные в предположении о прекращении течения воды ко льду позволили авторам утверждать, что причиной морозного разрушения пористых тел и морозного пучения грунтов является расклинивающее давление, развиваемое тонкими незамерзающими прослойками воды и их термостратификационное течение.

Ключевые слова: глинистый грунт, промерзание, оттаивание, трещина, алгоритм, склон, миграция воды, влагоперенос, льдообразование.

THE ALGORITHM OF FORMATION OF CRACKS ON THE LOGGING ROADS SURFACE ARRANGED ON THE SLOPE, OVERLAIN BY CLAYEY SOIL AT THE BASE

DSc in Engineering, Professor **S. I. Sushkov**¹

A. S. Sergeev²

1 – Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation

2 – Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Perm National Research Polytechnic University», Perm, Russian Federation

Abstract

In the article the algorithm of formation of cracks on the surface of forest roads arranged on the slope, overlain by clayey soil at the base is defined. The possible causes of the moisture transfer from the physical point of view, the movement of

soil moisture in the cooling zone, the conditions of formation of cracks are considered. The principle of migration of moisture in freezing soils is formulated as follows: the migration of water into the freezing wet soils is the process of transfer of moisture, constantly arising from any violation of the equilibrium state of the phases of soil and the measurements of the external influences in the presence of temperature gradients, humidity, pressure, surface energy of mineral particles, mobility of the molecules in the water film. The ratio between the rate of migration and rate of cooling determines the number and power of ice layers in soils, freezing with the inflow of water from outside. The more delayed the temperature of ice formation at this level, the more powerful the ice layer arise here, as enough water have time to catch up with for the growth of ice crystals. Water migration in frozen soils is possible only due to the unfrozen water held by adsorption forces by the surface of the mineral particles of soil and ice, it is subjected to the same laws of motion of film water, which are established for soils having a positive temperature, but has its own characteristics due to the additional action of crystallization forces of ice; however, in this case the migration process of water film will be very slow. Transfer of energy and substances in multicomponent environments in the general case is described using the apparatus of the thermodynamics of irreversible processes. When creating temperature gradient in the dispersion medium the main effect occurs – the heat flow and cross effects, including mass flow. The results of the experiments and the numerical calculations made with the assumption that the termination of the water flow to the ice enabled the authors to assert that the frozen fracture of the porous bodies and of frost heaving of soil is the disjoining pressure of thin layers of unfrozen water and their pyro-crystallization flow.

Keywords: clayey soil, freezing, thawing, crack, algorithm, slope, migration of water, moisture transfer, ice formation.

В 1950-1952 годах многими учеными была сформулирована общая зависимость, определяющая процесс миграции воды в промерзающих грунтах. При оценке движущихся сил миграции особое значение придавалось температурным градиентам, обуславливающим неравновесное состояние фаз грунта, что остается верным и в настоящее время. По итогам экспериментальных результатов, полученных за последние годы, формулировка принципа перемещения влаги в промерзающих грунтах в настоящее время учеными несколько расширена, однако описываемая этим принципом общая закономерность сохраняется.

Формулируется принцип миграции влаги в промерзающих грунтах следующим образом: миграция воды в промерзающих влажных грунтах есть процесс переноса влаги, постоянно возникающий при всяком нарушении равновесного состояния фаз грунта и измерениях внешних воздействий при наличии градиентов температуры, влажности, давления, поверхностной энергии минеральных частиц, подвижности молекул в водных пленках. Эта общая формулировка закономерности, определяющей миграцию влаги в промерзающих грунтах, дает физическое объяснение различным механизмам миграции влаги и включает в себя все основные концепции в определении обобщенных сил миграции. Так, только при нарушении равновесного состояния фаз грунта может начаться процесс мигра-

ции влаги, так как для совершенно однородных грунтов в изотермических условиях при отсутствии внешних воздействий миграция влаги в грунтах не будет иметь места.

Все установленные специальными опытами и полевыми наблюдениями факторы, влияющие на процесс миграции влаги в промерзающих грунтах, вполне удовлетворительно объясняются сформулированным принципом миграции. Так, например, перераспределение влажности в промерзающих грунтах, в свете принципа миграции, получает свое ясное физическое объяснение, так как при промерзании все время нарушается равновесное состояние фаз. Постоянно наблюдаемая миграция воды в дисперсных грунтах к фронту промерзания (или к поверхностям охлаждения и промерзания), согласно только что сформулированному принципу, также становится совершенно понятной, так как для мест с более низкой температурой грунта будут меньше упругость пара, больше адсорбционные силы скелета грунта и кристаллизационные силы льда, меньше подвижность молекул воды в пленках, т.е. будут существовать градиенты различных молекулярных сил по направлению к источнику холода, которые и обуславливают миграцию жидкой фазы воды в этом направлении.

Совершенно ясным становится факт избыточного льдовыделения, только в гидрофильных увлаж-

ненных грунтах при их промерзании, поскольку они имеют адсорбированные пленки воды.

Соотношение между скоростью миграции и скоростью охлаждения определяет количество и мощность ледяных прослоек в грунтах, промерзающих с подтоком воды извне. Чем больше задерживается температура льдообразования на данном уровне, тем более мощные ледяные прослойки возникают здесь, так как для роста кристаллов льда успевает подтягиваться достаточное количество воды.

Наконец, миграция воды в мерзлых грунтах, возможная лишь вследствие наличия в них незамерзшей воды, удерживаемой адсорбционными силами поверхности минеральных частиц грунта и льда, подчиняется тем же законам движения пленочной воды, которые установлены для грунтов, имеющих положительную температуру, но имеет и свои особенности ввиду дополнительного действия кристаллизационных сил льда; однако в этом случае процесс миграции пленочной воды будет весьма медленным.

С феноменологической точки зрения направленность влагопереноса при промерзании, казалось бы, очевидна. Как известно, перенос энергии и вещества в многокомпонентных средах в общем случае описывается с использованием аппарата термодинамики необратимых процессов. При создании в дисперсной среде градиента температуры возникает основной эффект – поток тепла, а также перекрестные эффекты, в том числе и поток массы. В указанном направлении развит целый ряд работ агрофизиков и физико-химиков. Остановимся на новейших разработках ученых в этой области, где излагается теория термодинамического течения.

В этих работах выводится уравнение скорости термодинамического потока в виде:

$$q_s = \alpha_{11} \left[-(p_i - p_0) - p_s L \frac{(T_0 - T_i)}{T_0} \right] \quad (1)$$

где α_{11} - кинетический коэффициент переноса, зависящий от гидродинамического сопротивления незамерзающих коммуникаций,

T_i и p_i – температура и гидростатическое давление в i -м слое грунта, К, Па,

p_0 – давление в объемной (переохлажденной) воде, с которой незамерзающая жидкая про-

слойка могла бы находиться в состоянии равновесия, Па,

T_0 – температура плавления, К,

p_s – плотность льда, кг/м³

L – теплота фазового перехода, К.

Показано, что единственно возможная толщина незамерзающей прослойки существует при комбинации T_i и $p_i = \Pi_i + p_0$, где Π_i – расклинивающее давление. При нарушении этого условия стационарное состояние системы нарушается и объем льда будет изменяться. Результаты экспериментов и численные расчеты по формуле (1), произведенные в предположении о прекращении течения воды ко льду позволили авторам утверждать, что причиной морозного разрушения пористых тел и морозного пучения грунтов является расклинивающее давление, развиваемое тонкими незамерзающими прослойками воды и их термодинамическое течение. Добавим, что действием расклинивающего давления авторы объясняют и многие другие факты (движение под действием градиента температуры вмерзших в лед твердых частиц, а также пузырьков воздуха, отталкивание или захват частиц движущимся фронтом кристаллизации и т. п.). Отметим, что авторы принимают как данность наличие в мерзлой зоне незамерзающих коммуникаций, гидродинамическое сопротивление которых отражает коэффициент α_{11} . Однако микроскопические и акустоэмиссионные исследования показывают, что незамерзающие коммуникации, представленные ансамблями пор и микротрещин, интенсивно развиваются в охлаждаемом и промерзшем грунте. В связи с этим, коэффициент α_{11} будет фактически непрогнозируемо меняться. Отсюда следует и изменения перекрестных коэффициентов $\alpha_{21} = \alpha_{12}$. Таким образом, кинетические коэффициенты переноса будут являться функциями многих термодинамических сил. С учетом этих обстоятельств, а также существования граничных фаз вблизи поверхности частиц и структурированности воды необходимо констатировать, что феноменологические уравнения необратимого переноса будут нелинейными.

Последнее означает, что реальное использование аппарата термодинамики необратимых процессов в расчетах влагопереноса при промерзании

пока неосуществимо. Имеющиеся отдельные попытки в этом направлении носят, в основном, качественный характер.

С учетом вышесказанного, при количественной разработке явлений влагопереноса приходится рассматривать движущие силы миграции, которые не устанавливаются из термодинамических соображений. Подобный подход лежит в основе наиболее значительных работ в области грунтоведения.

В качестве реальных движущих сил или потенциалов переноса влаги к фронту охлаждения могут выступать парциальное давление пара, влагосодержание, расклинивающее давление и т. п. Принято считать, что такое широко используемое в грунтоведении понятие, как пленочный ток, возникает под действием расклинивающего давления. В связи с этим, интенсивность пленочного переноса под влиянием расклинивающего давления пропорциональна градиенту толщины пленки и градиенту влажности. Это означает, что при отсутствии градиента влажности и зон стока массы влагоперенос не должен иметь места.

Рассмотрим возможные причины влагопереноса с физической точки зрения. Очевидно, движение грунтовой влаги в зону охлаждения возможно при наличии хотя бы одной из причин:

- 1) существования механизмов проталкивания влаги в промежуточных сечениях;
- 2) наличия источников разрежения (вакуума) в мерзлой или промерзающих зонах.

Отметим, что всасывание воды в трещины, образующиеся в мерзлой зоне, в конце XIX в. считалось основной причиной морозного пучения грунтов (теория В. И. Штукенберга). В двадцатом столетии было предложено несколько теорий миграции влаги при промерзании, однако влияние на влагоперенос процессов трещинообразования в явном виде учитывалось только С.И. Гапеевым. Вместе с тем, специалисты по исследованию формирования криогенных текстур неоднократно отмечали, что развитие трещин в промерзающем грунте способствует миграции в них влаги. А.М. Пчелинцев дал специальное название льду, формирующемуся в трещинах, – трещинный лед.

Рассмотрим общую физическую картину охлаждения и промерзания грунта и условия форми-

рования трещин. При понижении температуры воздуха еще в области положительных значений до +5 °С система из твердых частиц, воды и воздуха испытывает температурное сжатие. В этом температурном диапазоне сжатие подвергаются все три перечисленных компонента, однако ввиду значительной разницы температурных коэффициентов объема воды и минерального скелета при охлаждении будет происходить опережающее сжатие воды. Это вызывает появление растягивающих напряжений в скелете грунта, что в случае достаточно слабых структурных связей ведет к перестройке порового пространства. При прочных структурных связях перестройка скелета практически не имеет места, а поровая влага, сжимаясь, вследствие развития в ней напряжений растяжения, испытывает местные разрывы сплошности.

При понижении температуры от +5 до 0 °С минеральный скелет грунта продолжает сжиматься, а поровая и пленочная вода претерпевает объемное расширение. Встречный характер этих процессов, а также уже упомянутая разница в величинах температурных коэффициентов объема способствует образованию микротрещин еще на стадии охлаждения грунта. На диаграммах эмиссии эти процессы характеризуются низкоамплитудным акустическим излучением, отмечаемым большей частью в высокочастотном диапазоне 0,2-0,5 МГц.

При установлении отрицательных температур, в верхних горизонтах грунтового массива начинается переход в лед в части свободной воды и резко ускоряется формирование полей объемно-градиентных напряжений, возникающих еще при охлаждении. Несмотря на интенсивный сток энергии кристаллизации в окружающее пространство, в микрообъемах грунта V_i накапливается энергия $\bar{E}_i = p_i \cdot V_i$, где p_i – среднее нормальное напряжение в микрообъеме.

Объемно-градиентные напряжения в промерзающем грунте растут по абсолютной величине по мере перехода грунта из пластичного состояния в твердомерзлое, что ведет к росту энергии деформации \bar{E}_i . Энергия, накапливаемая в массиве стремиться разрядиться. При этом существуют две возможности: пластического деформирования и образования трещин. Для каждого вещества имеются

свои области температур, при которых реализуется тот или иной вид деформаций. Для большинства материалов при пониженных температурах наблюдается хрупкое разрушение.

Применительно к грунтам хрупкое разрушение характерно для промерзающих супесей и легких суглинков, обладающих малым сцеплением.

В глинах доля энергии деформации, расходуемая на процессы образования трещин мала по сравнению с пластическим деформированием.

Резкое падение, как в самой трещине, так и в окружающем ее грунте вызывает движение в эту область влаги – как незамерзшей свободной, так и связанной, в результате быстрого замерзания части которой создается основа для роста ледяной линзы (шпира). Объемные деформации, развивающиеся в трещине ввиду перехода части воды в лед, ведут к дальнейшему росту трещины, а, следовательно, новому скачку отрицательных давлений и усилению потока влаги. Частота развития трещин и зоны их влияния на влагу зависят от целого ряда обстоятельств и в пределе расстояния между трещинами могут достигать нескольких миллиметров. При близком расположении трещин друг от друга возникает конкуренция локальных давлений всасывания, равнодействующая которых определяет направление миграции влаги.

Отметим, что росту трещин в промерзающем и мерзлом слоях способствует то обстоятельство, что нормальные напряжения в грунте существенно изменяются как по величине, так и по знаку. Процессы температурного сжатия, всегда имеющие место при промерзании грунтов, сопровождаются развитием растягивающих напряжений. Именно в этих зонах в первую очередь образуются трещины. Кроме того, как отмечал Э.Д. Ершов трещины в грунте могут развиваться в зонах, где нормальные напряжения меняют знаки.

Существует неясность в отношении самих величин давлений всасывания и их зависимости от температуры, напряжений в скелете и т.п. По мере заполнения трещин влагой и их замерзания, вследствие происходящих при этом объемных изменений, давления в трещинах меняют знак, т.е. из отрицательных становятся положительными и оказывают ощутимое влияние на скелет. Однако этого не

происходит при неполном заполнении трещин водой. Таким образом, неочевидна связь между деформационной и миграционной частями механической стороны задачи промерзания и пучения.

Необходимо добавить, что условия разрыва сплошности материала обычно не учитывают его реальной структуры. Вместе с тем, являющиеся зародышами трещин дефекты структуры фактически представляют собой природные концентраторы напряжений. Как известно из решения Г. Кирша, напряжения на контуре малого кругового отверстия (поры) в три раза превышают напряжения в удельных точках. В вершинах же малого эллиптического отверстия (решение Колосова – Инглиса) напряжения могут повышаться во много раз [4].

Таким образом, наличие мелких пор, почти не снижающих площадь поперечного сечения и, вообще говоря, не опасных в отношении общей прочности тела, тем не менее является основой для зарождения и роста трещин.

Образование трещин всегда имеет место и в промерзающем массиве грунта. Причинами этого являются неравномерное распределение влаги в грунтах пестрота других свойств (теплопроводности, расширяемости при замерзании и т. п.), что приводит к развитию вакуума в отдельных областях. Кроме того, образование трещин может быть вызвано природной гетерогенностью грунта, когда кристаллы льда, образующиеся в крупных порах оказывают давление на окружающую среду в отдельных точках контакта. И наконец, при действии местной нагрузки на грунт, на интенсивность процессов трещинообразования будет сильно влиять неравномерность полей напряжений в основании фундамента.

Таким образом, в любых влажных связных грунтах в ходе охлаждения и примерзания формируется сеть трещин. В виду малой газопроницаемости мерзлых пылевато-глинистых грунтов, давления в трещинах, будучи меньше атмосферного, не выравнивается (как это имеет место в песчаных грунтах) и является устойчивой причиной движения воды в мерзлую зону.

При промерзании водонасыщенного глинистого грунта происходит его пучение (увеличение в объеме). Грунт, расположенный в точке A на по-

верхности, переместится вверх параллельно склону в точку *B* на величину, равную максимальной величине пучения, (рис. 1).

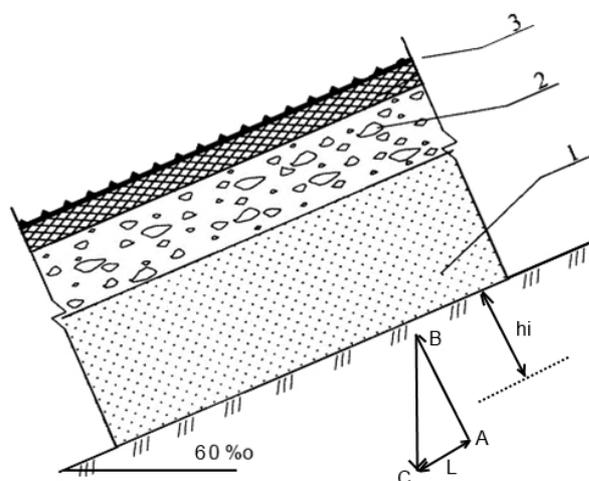


Рис. 1. Схема линейных перемещений дорожной конструкции по склону: 1 – песчаный слой; 2 – щебеночный слой; 3 – асфальтобетонные слои

При оттаивании, достигая границы раздела фаз, некоторой глубины h_1 (равной глубине расположения частицы) из точки *B* под действием сил тяжести происходит опускание дневной поверхности вертикально вниз в точку *C* (рис. 1). Величина смещения из точки *A* в точку *C* зависит от пучения, которое протекает по нормали к поверхности склона, и осадки, которое под действием силы тяжести развивается по вертикали. Происходит смещение конструкции дорожной одежды на величину *L* из точки *A* в точку *C* вниз по склону, что приводит к образованию трещин в конструкции дорожной одежды автомобильной дороги (рис. 2).

Повторяемость этой системы «промораживание-оттаивание-смещение» приведет к увеличению раскрытия трещины в конструкции дорожной одежды. Под действием динамической нагрузки от транспортных средств происходит ускорение процесса образования поперечной трещины в конструкции дорожных одежд и основании из глинистого грунта на склоне.

На основании вышеизложенного и экспериментальных исследований [12, 13] авторами был разработан алгоритм образования поперечных трещин на склоне лесовозных автомобильных дорог,

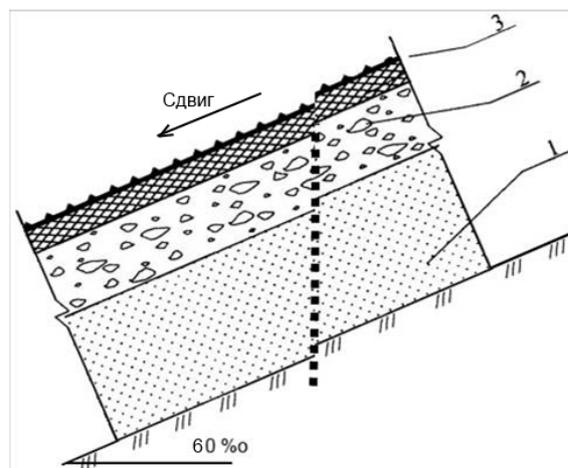


Рис. 2. Схема смещения дорожной конструкции по склону: 1 – песчаный слой; 2 – щебеночный слой; 3 – асфальтобетонные слои

устанавливаемых на глинистом основании, (рис. 3).

Итоги анализа сложного процесса функционирования лесовозных дорог, вызванного непрерывно меняющимися от пикета к пикету дорожными условиями, обусловленными множеством параметров и типов автомобилей, многообразием погодных-климатических условий, ставит перед лесопромышленниками стратегические задачи:

- разработка и совершенствование нормативных документов для повышения надежности, сроков службы автодорог за счет использования и внедрения современных дорожно-строительных материалов и новых расчетных схем, учитывающих глубину, теплопроводность, влагоперенос рабочей зоны глинистого грунта;
- повышение транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных дорог в процессе круглогодичного жизненного цикла применением новых материалов в конструкции основания дорожных одежд;
- водно-тепловой режим земляного полотна лесовозных автомобильных дорог Урала и Сибири, устанавливаемых на склоне, в основании которого залегает глинистый грунт, сильно отличается от нормативного переувлажнениями в течение осеннего-зимнего-весеннего периодов года, что требует введения дополнительных экспериментальных коэффициентов в имеющиеся формулы нормативной литературы.



Рис. 3. Последовательность процессов образования трещин на автомобильных дорогах, устраиваемых на склонах, сопровождающихся охлаждением и промерзанием глинистых грунтов

Библиографический список

1. Бурмистрова, О. Н. Определение оптимальных скоростей движения лесовозных автопоездов из условия минимизации расхода топлива [Текст] / О. Н. Бурмистрова, С. А. Король // Вестник Московского государственного университета леса. Лесной вестник. – 2013. – № 1 (93). – С. 25-28.
2. Говорущенко, Н. Я. Экономия топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте [Текст] / Н. Я. Говорущенко. – М. : Транспорт, 1990. – 135 с.
3. Курьянов, В. К. Автомобильные дороги [Текст] : учеб. пособие / В. К. Курьянов, Д. Н. Афоничев. – Воронеж, 2007. – 284 с.
4. Сушков, А. С. Методические основы параметров процессов модели управления системой «дорожные условия – транспортные потоки» [Текст] / А. С. Сушков // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар, 2012. – № 10(84). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/05.pdf>.
5. Определение параметров, характеризующих движение лесовозных автопоездов по участку магистрали общего пользования [Текст] / В. Н. Макеев, С. И. Сушков, А. И. Фурменко, М. С. Солопанов //

Лесотехнический журнал. – 2013. – № 3 (11). – С. 70-75.

6. Hare, W. A mixed-integer linear programming model to optimize the vertical alignment considering blocks and side-slopes in road construction [Text] / W. Hare, Y. Lucet, F. Rahman // European journal of operational research. – 2015. – Vol. 241. – Issue 3. – Pp. 631-641.
7. Santos, J. A life cycle assessment model for pavement management: methodology and computational framework [Text] / J. Santos, A. Ferreira, G. Flintsch // International journal of pavement engineering. – 2015. – Vol. 16. – Issue 3. – pp. 268-286.
8. Liyanage, C. Measuring Success of PPP Transport Projects: A Cross-Case Analysis of Toll Roads [Text] / C. Liyanage, F. Villalba-Romero // Transport reviews. – 2015. – Vol. 35. – Issue 2. – Special Issue: SI. – pp. 140-161.
9. Setinc, M. Optimization of a highway project planning using a modified genetic algorithm [Text] / M. Setinc, M. Gradisar, L. Tomat // Optimization. – 2015. – Vol. 64. – Issue 3. – pp. 687-707.
10. Burdett, R. Block models for improved earthwork allocation planning in linear infrastructure construction [Text] / R. Burdett, E. Kozan, R. Kenley // Engineering optimization. – 2015. – Vol. 47. – Issue 3. – pp. 347-369.
11. Janssen, T. Design and construction in existing contexts: Replacement of the first High Bridge Levensau [Text] / T. Janssen // Janssen Thomas stahlbau. – 2015. – Vol. 84. – Issue 3. – pp. 182-194.
12. Юшков, Б. С. Движение конструкции дорожной одежды автомобильных дорог по склону и образование трещин [Текст] / Б. С. Юшков, А. С. Сергеев // Естественные и технические науки: сб. – М., 2015. – № 8. – 112 с.
13. Юшков, Б. С. Три экспериментальных лабораторных исследований, связанных с образованием поперечных трещин на склонах автомобильных дорог [Текст] / Б. С. Юшков, А. С. Сергеев // Научно-технический Вестник Поволжья: сб. – Казань, 2015. – № 4. – 163 с.

References

1. Burmistrova O.H., Korol S. A. *Opredelenie optimal'nyh skorostej dvizhenija lesovoznyh avtopoezdov iz usloviya minimizacii rashoda topliva* [Determination of optimal speeds logging trucks from the condition of minimizing fuel consumption] *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa Lesnoj vestnik*. [Bulletin of the Moscow State Forest University Forest Gazette]. 2013, no. 1 (93), pp. 25-28. (In Russian).
2. Govorushchenko N.Y. *Jekonomija topliva i snizhenie toksichnosti na avtomobil'nom transporte* [Fuel economy and reduced toxicity in road transport] Moscow, 1990, 135 p. (In Russian).
3. Kuryanov V.K., Afonichev D.N. *Avtomobil'nye dorogi* [Highways] 2007, 284 p. (In Russian).
4. Sushkov A.S. *Metodicheskie osnovy parametrov processov modeli upravlenija sistemoy «dorozhnye uslovija - transportnye potoki»* [Methodical bases of process parameters control model system "road conditions - traffic flows] *Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU)* [Multidisciplinary network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University (Science magazine KubGAU)]. Krasnodar, 2012, no. 10 (84), Available at: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/05.pdf> (In Russian).
5. Makeev V.N., Sushkov S.I., Furmenko A.I., Soloponov M.S. *Opredelenie parametrov, harakterizujushchih dvizhenie lesovoznyh avtopoezdov po uchastku magistrali obshhego pol'zovanija* [Determination of the parameters characterizing the movement of timber trains on the section of the highway public] . *Lesotekhnicheskii zhurnal*, 2013, no. 3 (11), pp. 70-75. (In Russian).
6. Hare, Warren; Lucet, Yves; Rahman, Faisal A mixed-integer linear programming model to optimize the vertical alignment considering blocks and side-slopes in road construction. European journal of operational research, 2015, Vol. 241, Issue 3, pp. 631-641.
7. Santos, Joao; Ferreira, Adelino; Flintsch, Gerardo A life cycle assessment model for pavement management: methodology and computational framework. International journal of pavement engineering, 2015, Vol. 16, Issue 3, pp. 268-286.
8. Liyanage, Champika; Villalba-Romero, Felix Measuring Success of PPP Transport Projects: A Cross-Case Analysis of Toll Roads. Transport reviews, 2015, Vol. 35, Issue 2, Special Issue: SI, pp. 140-161.

9. Setinc, Marko; Gradisar, Mirko; Tomat, Luka Optimization of a highway project planning using a modified genetic algorithm. Optimization, 2015, Vol. 64, Issue 3, pp. 687-707.

10. Burdett R.; Kozan E.; Kenley R. Block models for improved earthwork allocation planning in linear infrastructure construction. Engineering optimization, 2015, Vol. 47, Issue 3, pp. 347-369.

11. Janssen, Thomas Design and construction in existing contexts: Replacement of the first High Bridge Levensau. Janssen Thomasstahlbau, 2015, Vol. 84, Issue 3, pp. 182-194.

12. Yushkov B.S., Sergeev A.S. *Dvizhenie konstrukcii dorozhnoj odezhdy avtomobil'nyh dorog po sklonu i obrazovaniye treshhin* [The movement of the pavement structure of road along the slope, and the formation of cracks] *Sbornik Estestvennye i tehnicheckie nauki* [Collection of Natural and Technical Sciences]. Moscow, 2015, no. 8, pp. 112. (In Russian).

13. Yushkov B.S., Sergeev A.S. *Tri jeksperimental'nyh laboratornyh issledovanij svyazannyh s obrazovaniem pope-rechnykh treshhin na sklonah avtomobil'nyh dorog* [Three laboratory experimental studies associated with the formation of transverse cracks on the slopes of roads] *Sbornik Nauchno-tehnicheckij Vestnik Povolzh'ja* [Collection of Scientific and Technical Bulletin of the Volga] Kazan, 2015, no. 4, pp. 163. (In Russian).

Сведения об авторах

Сушков Сергей Иванович – заведующий кафедрой промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», доктор технических наук, профессор, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: S.I.Sushkov@mail.ru.

Сергеев Андрей Сергеевич – аспирант кафедры автомобильных дорог и мостов ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Российская Федерация; e-mail: Zzverdvd@mail.ru.

Information about authors

Sushkov Sergey Ivanovich – Head of the Department of Industrial Transport, Civil Engineering and Geodesy, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», DSc in Engineering, Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: SISushkov@mail.ru.

Sergeev Andrey Sergeevich – post-graduate student of department of roads and bridges, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Perm National Research Polytechnic University», Perm, Russian Federation; e-mail: Zzverdvd@mail.ru.

DOI: 12737/25203

УДК 624.131.137

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ДВУХ КОНСТРУКЦИЙ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕОРЕШЕТОК, УСТРАИВАЕМЫХ НА СКЛОНАХ ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ, В ОСНОВАНИИ КОТОРЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫЙ ГЛИНИСТЫЙ ГРУНТ

доктор технических наук, профессор **С. И. Сушков**¹

А. С. Сергеев²

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
г. Пермь, Российская Федерация

В статье изложены практические экспериментальные исследования двух конструкций дорожных одежд, в которых применялись геосинтетические решетки «Славрос ГР» и в виде сот. Подробно описаны и графически показаны используемые материалы и оборудование для проведения экспериментального исследования. Проведен патентный