

УДК 630*383.4

Е. И. Бавбель, А. И. Науменко

Белорусский государственный технологический университет

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕСНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

В настоящее время при строительстве лесных автомобильных дорог и дорог общего пользования в Республике Беларусь используются конструкции дорожных одежд из укрепленных материалов, позволяющие повысить сроки службы и обеспечить высокие транспортно-эксплуатационные показатели дорог. Общеизвестным является тот факт, что ритмично и эффективно работают те предприятия лесного комплекса, которые имеют хорошо развитую сеть дорог, дающую возможность проводить транспортные операции в течение всего года. Перспективы увеличения лесосырьевых запасов и объемов заготовок древесины выдвигают необходимость существенно увеличить объемы строительства лесотранспортных путей, которые позволят предприятиям лесного комплекса обеспечить устойчивую работу. Нарращивание объемов дорожного строительства в лесу требует новых подходов к технологиям строительства дороги, а также к применяемым дорожным материалам.

В связи с этим в статье приведена методика оптимизации дорожных конструкций лесных автомобильных дорог, которая позволяет учитывать большое число факторов, анализировать и сравнивать различные варианты принимаемых технических решений.

Ключевые слова: конструкция, дорожная одежда, модуль упругости, георешетка, цементогрунт, прочность, надежность.

J. I. Bavbel, A. I. Naumenko

Belorussian State Technological University

OPTIMIZATION METHOD FOR ROAD CONSTRUCTION FOREST ROADS

Currently in the construction of forest roads and public roads in the Republic of Belarus are used in the design of road clothes of reinforced materials, allowing to increase the service and provide a high transport performance indicators. It is a recognized fact that smoothly and effectively working the enterprises of the forest complex that have a good developed network of roads, allowing to carry out transport operations throughout the year. The prospects for increasing forest stocks and rate of timber harvesting has made it necessary to significantly increase the volume of construction timber transport routes, which will allow enterprises of the forest complex to ensure stable operation. To increase the volume of road construction in the forest requires new approaches to technologies of construction of roads, and used road materials.

In this regard, the article presents a method of optimization of road structures of forest roads, which allows you to take into account a large number of factors, analyze and compare different options for technical solutions.

Key words: design, pavement, elastic modulus, geocell, cementaron, durability, reliability.

Введение. В настоящее время при строительстве автомобильных дорог общего пользования в Республики Беларусь используются конструкции дорожных одежд из укрепленных материалов, что позволяет повысить сроки службы и обеспечить высокие транспортно-эксплуатационные показатели дорог [1–3].

Общеизвестным является тот факт, что ритмично и эффективно работают те предприятия лесного комплекса, которые имеют хорошо развитую сеть дорог, дающих возможность проводить транспортные операции в течение всего года. Однако почти повсеместно дорожная сеть развита недостаточно и не в полной мере удовлетворяет требованиям лесного комплекса страны.

В связи с этим особенно актуальной является проблема использования в дорожном строительстве местных грунтов в качестве дорожно-строительных материалов. Для получения достаточно высоких физико-механических и эксплуатационных свойств материалов из таких грунтов всегда требуется повышенный расход вяжущего, высокая стоимость которого сдерживает область применения данных грунтов. Поэтому постоянно ведется поиск эффективных способов, позволяющих снизить расход вяжущего, обеспечивающего необходимые показатели укрепленных материалов.

В связи с этим расширение областей строительства лесных дорог в сложных почвенно-грунтовых условиях обуславливает необходи-

мость разработки методики оптимизации дорожных конструкций лесных автомобильных дорог, направленной на обеспечение устойчивости основания дорожной конструкции; исключение недопустимых осадков основания конструкции после сооружения дорожной одежды; обеспечение динамической устойчивости конструкции под воздействием транспортной нагрузки.

Основная часть. Методика проектирования заключается в регулировании толщин и методов укрепления слоев земляного полотна, основания и покрытия дорожной одежды с соблюдением ограничений по требуемому модулю упругости, технологичности, минимальному возвышению, морозостойчивости. При этом учитывают особенности, связанные с выбором разновидности георешетки, назначением толщин слоев дорожной одежды и подбором состава смеси из местных грунтов, укрепленных композиционным вяжущим, для заполнения ячеек.

Назначение конструктивных решений дорожных одежд с применением конструктивного слоя на основе арматурного каркаса «георешетка – цементогрунт» [3–8] выполняют в соответствии с ТКП 500 «Лесные автомобильные дороги. Нормы проектирования и правила устройства» и ТКП 45-3.03-112 «Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования». При этом указанные конструктивные композитные слои рассматриваются как сплошные квазиоднородные слои, имеющие повышенные прочностные характеристики при изгибе (за счет прочности и деформативности полос георешетки) и сопротивляемость сдвигу (за счет работы цементогрунта в замкнутой ячейке). В связи с этим расчет такого слоя на растяжение при изгибе и сдвиг не производится, а в качестве его расчетной характеристики при расчете конструкции дорожной одежды используется только модуль упругости.

Расчет армированных нежестких дорожных одежд выполняют по ТКП 45-3.03-112 и ТКП 500 в следующей последовательности:

1) рассчитывается неармированная дорожная одежда;

2) производится ориентировочная оценка снижения толщины несущих слоев основания для дорожных одежд из арматурного каркаса «георешетка – цементогрунт» [9–11]:

– для капитальных усовершенствованных типов покрытий – 15–20%;

– облегченных типов – 30–40%;

– переходных и низших – 40–50%;

3) при заданных пониженных толщинах дорожных одежд определяются значения расчетного модуля упругости композитного слоя (арматурного каркаса «георешетка – цементогрунт»);

4) находятся расчетные значения коэффициентов прочности армированной конструкции;

5) производится сравнение расчетных значений коэффициентов прочности армированной конструкции с требуемыми значениями коэффициентов прочности (по ТКП 500-2013 и ТКП 45-3.03-112).

Конструкция принимается, если удовлетворяются условия по прочности по всем рассчитываемым критериям;

б) в случае, если условие по прочности не соблюдается по какому-либо критерию, производится повторный расчет конструкции, начиная с п. 3 и с измененными исходными данными (увеличение толщины слоев дорожной одежды, улучшение характеристик материалов слоев и т. п.).

Повторный расчет также выполняется, если по решающему критерию расчета получаемые значения коэффициента прочности армированной дорожной одежды превышают требуемые значения более чем на 5% – в этом случае выполняется перерасчет с уменьшением толщин слоев.

В общем виде данная математическая модель выглядит следующим образом:

целевая функция

$$C_{\text{ДК}} = f \left(\begin{matrix} h_{\text{ПОК}}, h_{\text{ОСН}}, h_{\text{АК}}, C_{\text{ПОК}}, C_{\text{ОСН}}, \\ C_{\text{АК}}, C_{\text{ГМ}}, B, c \end{matrix} \right) \rightarrow \min,$$

где $C_{\text{ДК}}$ – общие затраты на устройство дорожной конструкции, млн руб.; $h_{\text{ПОК}}$ – расчетная толщина покрытия дорожной конструкции, м; $h_{\text{ОСН}}$ – расчетная толщина основания дорожной конструкции, м; $h_{\text{АК}}$ – расчетная толщина арматурного каркаса дорожной конструкции, м; $C_{\text{ПОК}}$ – стоимость покрытия дорожной конструкции, руб.; $C_{\text{ОСН}}$ – стоимость основания дорожной конструкции, руб.; $C_{\text{АК}}$ – стоимость арматурного каркаса дорожной конструкции, млн. руб.; $C_{\text{ГМ}}$ – стоимость арматурного каркаса дорожной конструкции, руб.; B – ширина проезжей части, м; c – ширина обочины, м.

При следующих ограничениях:

– обеспечение требуемой прочности и надежности по величине упругого прогиба:

$$E_{\text{общ}}(h_{\text{ПОК}}, E_{\text{ПОК}}, h_{\text{ОСН}}, E_{\text{ОСН}}, E_{\text{ГР}}) \geq E_{\text{min}} \cdot K_{\text{ПР}}^{\text{ТР}}$$

$$E_{\text{общ}}^{\text{АК}}(h_{\text{ПОК}}, E_{\text{ПОК}}, h_{\text{АК}}, E_{\text{АК}}, h_{\text{ОСН}}, E_{\text{ОСН}}, E_{\text{ГР}}) \geq E_{\text{min}}^{\text{АК}} \cdot K_{\text{ПР}}^{\text{ТР}},$$

где $E_{\text{общ}}$, $E_{\text{общ}}^{\text{АК}}$ – общий модуль упругости соответственно неармированной и армированной дорожных конструкций, МПа; $E_{\text{ПОК}}$ – модуль упругости покрытия дорожной конструкции, МПа; $E_{\text{ОСН}}$ – модуль упругости основания дорожной конструкции, МПа; $E_{\text{АК}}$ – модуль упругости арматурного каркаса дорожной конструкции, МПа; $E_{\text{ГР}}$ – модуль упругости земляно-

го полотна, МПа; E_{\min} , E_{\min}^{AK} – минимальный требуемый модуль упругости соответственно неармированной и армированной дорожных конструкций, МПа; $K_{ГР}^{TP}$ – требуемый коэффициент прочности дорожной конструкции по критерию упругого прогиба;

– обеспечение минимальной толщины конструктивных слоев, м:

$$h_{\text{ПОК}}, h_{\text{ОСН}} \geq 0,05;$$

$$h_{\text{АК}} \geq 0,10;$$

$$C_{\text{ПОК}}, C_{\text{ОСН}}, C_{\text{АК}}, C_{\text{ГМ}}, B, c \geq 0.$$

Управляемыми параметрами являются $h_{\text{ПОК}}$, $h_{\text{ОСН}}$, $h_{\text{АК}}$, $C_{\text{ПОК}}$, $C_{\text{АК}}$, $C_{\text{ГМ}}$, B , c .

В результате получаемый эффект зависит от состава цементогрунта [13–15], марки георешетки (ее деформативных свойств), толщин слоев дорожной одежды, механических свойств материалов дорожных одежд и грунтов рабочего слоя зем-

ляного полотна. Численно эффект выражается в снижении толщин дорожной одежды или увеличении срока службы в соответствии с расчетами.

Заключение. Таким образом, разработанная методика базируется на методах математического программирования и позволяет определять рациональные параметры дорожных конструкций с учетом проектной нагрузки на дорогу, природно-производственных условий, стоимости дорожно-строительных материалов и применения георешеток ячеистой конструкции.

Учет большого числа факторов позволяет при использовании данной методики анализировать и сравнивать различные варианты принимаемых технических решений, связанных с обоснованием дорожной конструкции, применением местных грунтов, укрепленных новыми составами композиционных малоцементных вяжущих и арматурного каркаса «георешетка – цементогрунт».

Литература

1. Васильев Ю. М., Агафонцев В. П., Исаев В. С. Дорожные одежды с основаниями из укрепленных материалов. М.: Транспорт, 1989. 191 с.
2. Насковец М. Т., Севрук С. А. Применение современного измерительного оборудования при проведении лабораторных исследований работы дорожных конструкций // Автомобильные дороги и мосты. 2007. № 1. С. 72–75.
3. Лыщик П. А., Бавбель Е. И. Проблема развития транспортной инфраструктуры лесопользователей // Труды БГТУ. 2011. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 62–64.
4. Лесные автомобильные дороги. Нормы и правила устройства: ТКП 500-2013 (33090). Минск: М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 2013. 91 с.
5. Обоснование структуры и состава дорожной цементогрунтовой смеси на основе математической модели / П. А. Лыщик [и др.] // Труды БГТУ. 2015. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 39–43.
6. Лыщик П. А., Науменко А. И. Новые композиционные материалы для укрепления дорожных грунтов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика / ФГБОУ ВПО ВГЛГА, Воронеж, РФ. 2014. Т. 2. № 3–3 (8–3). С. 200–202.
7. Лыщик П. А., Бавбель Е. И., Науменко А. И. Состав минерального вяжущего для укрепления дорожных грунтов // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 33–36.
8. Лыщик П. А., Науменко А. И. Механизмы структурообразования дорожных грунтов, укрепленных минеральными вяжущими // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 42–44.
9. Дорожная конструкция из арматурного каркаса «георешетка – цементогрунт», МПК С 01 С 7/32, 7/36 / П. А. Лыщик, Е. И. Бавбель, С. В. Красковский, А. И. Науменко; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. № u 20150100; заявл. 19.03.2015.
10. Композиционный цемент: патент Респ. Беларусь, МПК С 04 В 7/04, С 04 В 28/5204, С 04 В 18/12, С 04 В 718/16, С 04 В 7/52 / П. А. Лыщик, С. В. Плышевский, А. И. Науменко; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. № а 20121705; заявл. 06.12.12; опубл. 30.05.2015 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2015. № 4. С. 82.
11. Бавбель Е. И., Игнатенко В. В., Науменко А. И. Конструирование и методика расчета дорожных одежд из укрепленных грунтов // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 58–60.
12. Лыщик П. А., Науменко А. И., Синяк С. А. Конструкции лесных автомобильных дорог на основе арматурного каркаса «георешетка – цементогрунт» // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 79–82.
13. Oburger E., Jager A., Pasch A., Dellantonio A., Stampfer K., Wenzel W. W. Environmental impact assessment of wood ash utilization in forest road construction and maintenance – A field study // Science of The Total Environment. 2016. P. 711–721.
14. Bohrn G., Stampfer K. Untreated Wood Ash as a Structural Stabilizing Material in Forest Roads // Croatian Journal of Forest Engineering. 2014. P. 81–89.
15. Kanzian C., Kuhmaier M., Zazgornik J., Stampfer K. Design of forest energy supply networks using multi-objective optimization // Biomass bioengineering. 2013. P. 294–302.

References

1. Vasil'yev Ju. M., Agafontsev V. P., Isaev V. S. *Dorozhnyye odezhdy s osnovaniyami iz ukreplennykh materialov* [Road clothes with the bases from the strengthened materials]. Moscow, Transport Publ., 1989. 191 p.
2. Naskovets M. T., Sevruck S. A. Application of the modern measuring equipment at carrying out of laboratory researches of work of road designs. *Avtomobil'nyye dorogi i mosty* [Highways and bridges], 2007, no. 1, pp. 72–75 (In Russian).
3. Lyshchik P. A., Bavbel J. I. The problem of development of transport infrastructure of forest users. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 62–64 (In Russian).
4. ТКР 500-2016 (33090). Wood highways. Norms and device rules. Minsk, Ministry of Forestry Republic of Belarus, 2016. 91 p. (In Russian).
5. Lyshchik P. A., Ignatenko V. V., Bavbel J. I., Naumenko A. I. Rationale the structure and composition of road cementogenesis mixtures based on mathematical models. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 39–43 (In Russian).
6. Lyshchik P. A., Naumenko A. I. New composite materials for strengthening for road soils. *Aktual'nyye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific researches of the XXI century: theory and practice], 2014, vol. 2, no. 3–3 (8–3), pp. 200–202 (In Russian).
7. Lyshchik P. A., Bavbel J. I., Naumenko A. I. The composition of mineral binder for strengthening road soils. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 33–36 (In Russian).
8. Lyshchik P. A., Naumenko A. I. Mechanisms of structure formation of road soil, fortified astringent mineral. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 42–44 (In Russian).
9. Lyshchik P. A., Bavbel J. I., Kraskovskiy S. V., Naumenko A. I. *Dorozhnaya konstruktsiya iz armaturnogo karkasa «georeshetka – tsementogrunт»* [Road design from reinforcing cage “geogrid-tsementogrunт”]. Patent BY, no. 20150100, 2015.
10. Lyshchik P. A., Plyshevskiy S. V., Naumenko A. I. *Kompozitsionnyy tsement* [Composite cement]. Patent BY, no. 20121705, 2015.
11. Bavbel J. I., Ignatenko V. V., Naumenko A. I. The design and method of calculation of pavement of reinforced soil. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 58–60 (In Russian).
12. Lyshchik P. A., Naumenko A. I., Syniak S. A. Construction forest highways based on the reinforcement cage “Geocell–cementero”. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 79–82 (In Russian).
13. Oburger E., Jager A., Pasch A., Dellantonio A., Stampfer K., Wenzel W. W. Environmental impact assessment of wood ash utilization in forest road construction and maintenance – A field study. *Science of The Total Environment*. 2016, pp. 711–721.
14. Bohrn G., Stampfer K. Untreated Wood Ash as a Structural Stabilizing Material in Forest Roads. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2014, pp. 81–89.
15. Kanzian C., Kuhmaier M., Zazgornik J., Stampfer K. Design of forest energy supply networks using multi-objective optimization. *Biomass bioengineering*. 2013, pp. 294–302.

Информация об авторах

Бавбель Евгения Ивановна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: bavbel-ji@belstu.by

Науменко Андрей Иванович – кандидат технических наук, ассистент, ассистент кафедры инженерной графики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: ig@belstu.by

Information about the authors

Bavbel Jane Ivanovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery, Forest Roads and Timber Production Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bavbel-ji@belstu.by

Naumenko Andrey Ivanovich – PhD (Engineering), Assistant lecturer, the Department of Engineering Drawing. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ig@belstu.by

Поступила 28.02.2018