

УДК 630\*383.4

**П. А. Лыщик, В. В. Игнатенко, Е. И. Бавбель, А. И. Науменко**  
Белорусский государственный технологический университет

### **ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА ДОРОЖНОЙ ЦЕМЕНТОГРУНТОВОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

К настоящему времени накоплен большой опыт по применению как органических, так и неорганических вяжущих материалов для укрепления грунтов, используемых в дорожных конструкциях. Практика показала, что цементогрунтовые покрытия можно использовать на лесных автомобильных дорогах при условии защиты их слоем износа от непосредственного воздействия колес автопоезда. Однако технология укрепления грунта цементом до сих пор не получила широкого применения при строительстве лесных дорог.

Решающее значение для широкого применения в практику дорожного строительства композиционных смесей на основе цемента имеют следующие факторы: существенное снижение потребности в цементе при укреплении местных грунтов, высокие прочностные и деформативные свойства цементогрунта, соответствующие тяжелым условиям эксплуатации лесных дорог. Решение данных задач возможно при обосновании структуры и состава дорожной цементогрунтовой смеси на основе математической модели.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены аналитические и графические зависимости физико-механических свойств местных грунтов, укрепленных композиционным вяжущим.

Установлены рациональные технологические режимы и даны рекомендации по организации строительства лесных автомобильных дорог с использованием цементогрунтовых смесей.

**Ключевые слова:** цементогрунтовая смесь, рецептурно-технологические условия, параметры структуры, эксплуатационные свойства.

**P. A. Lyshchik, V. V. Ignatenko, Ye. I. Bavbel', A. I. Naumenko**  
Belarusian State Technological University

### **SUBSTANTIATION OF THE STRUCTURE AND COMPOSITION OF ROAD SOIL-CEMENT MIXTURE ON THE BASIS OF MATHEMATICAL MODEL**

Today, we have considerable experience in the application of both organic and non-organic binding materials for strengthening of soils used in road constructions. Practice has shown that soil-cement coating can be used on forest roads, while protecting their wear layer from direct exposure to the wheels of the trailer. However, the technology of soil strengthening by cement is still not widely used in construction of forest roads.

The following factors are crucial for widespread use in the practice of road construction of compositional mixtures based on cement: substantial reduction in the demand for cement in the strengthening of local soils, high strength and deformability properties of soil-cement corresponding to severe operating conditions of forest roads. The solution of these tasks is possible with the rationale the structure and composition of road soil-cement mixture on the basis of mathematical models.

As a result of experimental research, analytical and graphical dependence of physical and mechanical properties of the strengthening local soil compositional binder were received.

Rational technological regimes are determined and recommendations for the organization of construction of forest roads using soil-cement mixture are given.

**Key words:** soil-cement mixture, recipe and process conditions, parameters, structures, operational properties.

**Введение.** Применение укрепленных грунтов для строительства лесных автомобильных дорог является одним из перспективных направлений решения проблемы дорожного строительства [1, 4].

Местный грунт, укрепленный различными вяжущими реагентами, приобретает водоустойчивость, механическую прочность и может быть использован как полноценный заменитель традиционных каменных дорожно-строительных материалов в лесных районах, где испытывается их острый недостаток.

Разработка практических рекомендаций по укреплению грунтов связана с большим объемом лабораторных исследований для установления оптимальных дозировок вяжущих реагентов, выбора технологических режимов и т. п. Эта работа также связана с изготовлением огромного количества образцов, их испытанием, обработкой и анализом полученных данных.

В этих условиях наиболее приемлемым является применение многофакторного метода планирования эксперимента, при котором все факторы изменяются одновременно. В результате

проведения эксперимента по определенному плану получают описание изучаемого процесса в виде уравнения (математической модели), которое дает исследователю широкую и достаточно надежную информацию.

При этом значительно сокращается необходимое количество проводимых опытов, достоверность полученных результатов увеличивается, сроки исследований сокращаются.

**Основная часть.** Климатические, грунтово-гидрологические и другие условия оказывают существенное влияние на эксплуатационное состояние укрепленных местных грунтов в составе дорожной конструкции.

Анализ работ показал, что во многих случаях влияние на срок службы дорожной конструкции факторов различного характера (конструктивного, технологического, эксплуатационного) по величине сопоставимо друг с другом.

Исходное состояние определяется составом и соотношением компонентов композиционного вяжущего и грунта, последовательностью совмещения компонентов, способом и технологией укрепления [2, 3].

Текущее состояние, которое, как правило, фиксируется, формируется от исходного, изменяющегося под воздействием внешних условий, и зависит как от исходного состояния, так и внешних условий.

Математическое моделирование цементогрунта (ЦГ) можно рассматривать на двух уровнях реальных процессов структурообразования ЦГ [3]. Такое разделение позволяет проводить эффективное математическое моделирование и хорошо отражает объективные закономерности структурообразования и формирования свойств цементогрунта (рис. 1).

Микроуровень формируем из сочетания математических методов описания структур связующего вещества и дисперсных наполнителей. Свойства микроструктуры ЦГ определяются явлениями, протекающими в контакте жидкой и твердой фаз, т. е. зависят от количества наполнителя, его дисперсности и физико-химической активности поверхности [2, 3].

Макроуровень образуем из сочетания математических методов описания структур связующих и наполнителей средних и крупных фракций. Свойства ЦГ определяются свойствами связующих и наполнителей и их количественным соотношением.

Подобная задача не может быть решена без учета множества критериев окружающей среды, эксплуатационных характеристик материалов, показателей структуры и свойств, учета рецептуры и технологии, т. е. цементогрунт необходимо рассматривать системно [2, 3], как сложную техническую систему, испытывающую на себе комплекс воздейст-

вий и имеющую целый ряд управляемых параметров. Такой подход требует обобщения научных основ математического моделирования и многокритериального синтеза цементогрунта (ЦГ), а также разработки математического аппарата анализа и синтеза ЦГ, программных комплексов и создания на их основе новых составов дорожной цементогрунтовой смеси со строго заданными структурой и свойствами [2, 3].

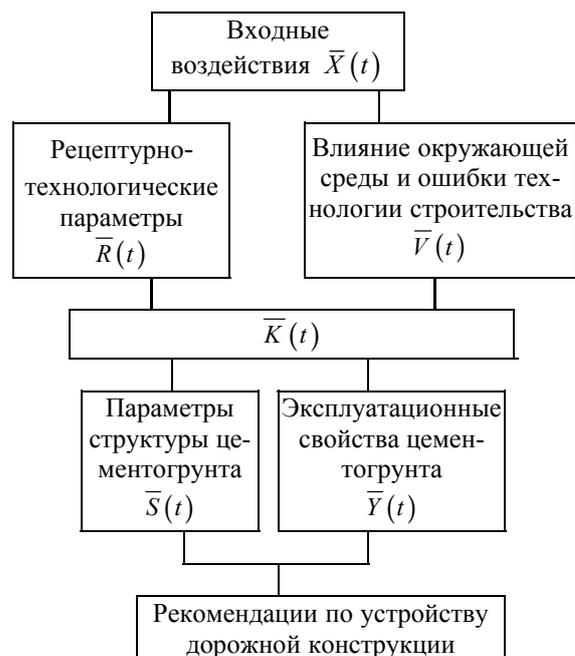


Рис. 1. Математическая схема образования цементогрунта

В общем случае на объект влияет окружающая среда и ошибки технологии строительства:

$$\bar{V}(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t)]^T,$$

часть из которых

$$\bar{V}_1(t) = [v_{1_1}(t), v_{1_2}(t), \dots, v_{1_{n_1}}(t)]^T$$

контролируемые воздействия и могут быть измерены, а часть

$$\bar{V}_2(t) = [v_{2_1}(t), v_{2_2}(t), \dots, v_{2_{n_2}}(t)]^T$$

неконтролируемые воздействия – не поддаются измерению или их влияние не существенно.

Необходимо определить взаимосвязь выходных координат ЦГ (эксплуатационные свойства)

$$\bar{Y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_p(t)]^T,$$

а также рецептурно-технологические условия ЦГ, т. е. управляющие воздействия

$$\bar{R}(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_k(t)]^T,$$

с учетом возмущений  $\bar{V}(t)$ , поступающих со стороны окружающей среды и ошибок технологии строительства.

В результате объект можно представить в виде системы, определяемой множеством входных воздействий:

$$\bar{X}(t) = \{\bar{R}(t), \bar{V}(t)\} = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T,$$

среди которых есть контролируемые  $\bar{X}'$  и неконтролируемые  $\bar{X}''$ , и множеством характеристик и ограничений  $\bar{M}$ , действующих в системе и накладываемых на  $\bar{X}'$  и  $\bar{X}''$ :

$$A = \{\bar{X}', \bar{X}'', \bar{M}\}.$$

Математическая модель данной системы устанавливает отображение  $F$  заданных множеств на множество выходных координат цемента

$$\bar{Y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_p(t)]^T;$$

$$F := [\bar{X}', \bar{X}'', \bar{M}] \rightarrow \bar{Y},$$

т. е.

$$\bar{Y} = F\{\bar{X}', \bar{X}'', \bar{M}\}.$$

Для разработки рекомендаций по применению различных составов цементогрунтовой смеси в дорожной конструкции необходимо выявить существующие входные (возмущающие, управляющие) воздействия, переменные состояния и выходные координаты [2, 3, 4], а также связи между ними. Управляемые переменные – это совокупность характеризующих поведение выходных величин  $\bar{Y}(t)$ , текущими

значениями которых требуется управлять для получения состава дорожной цементогрунтовой смеси со строго заданными структурой и свойствами. В модели управляемые координаты задают вектором управляемых переменных

$$\bar{Y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_p(t)]^T$$

и представляют собой эксплуатационные свойства цементогрунта: прочность на сжатие, плотность, морозостойкость и т. д.

Результаты исследований по определению предела прочности при сжатии водонасыщенных образцов в возрасте 28 сут приведены на рис. 2 и 3.

Из рис. 2 следует, что при укреплении песка средней крупности композиционным вяжущим предел прочности при сжатии водонасыщенных образцов ниже, чем у контрольных образцов, приготовленных на основе портландцемента марки ПЦ 500-Д0, на 22–62%.

Отсутствие эффекта при укреплении песка средней крупности можно объяснить малым содержанием в данном грунте глинистых частиц.

При укреплении композиционным вяжущим супеси легкой (рис. 3) наблюдается тенденция увеличения предела прочности при сжатии. При этом показатели прочности при внесении 10% композиционного вяжущего отличаются от контрольных образцов на 0,8%.

Таким образом, при укреплении суглинка легкого пылеватого разработанной композицией (рис. 4) в количестве 8% от массы грунта существенно увеличивает прочность при сжатии образцов до 35%. Данное увеличение прочности цементогрунта способствует повышению морозостойкости материала. Позволяет сократить расход портландцемента в зависимости от гранулометрического состава грунта на 25–40%, по сравнению с укреплением грунта одним портландцементом.

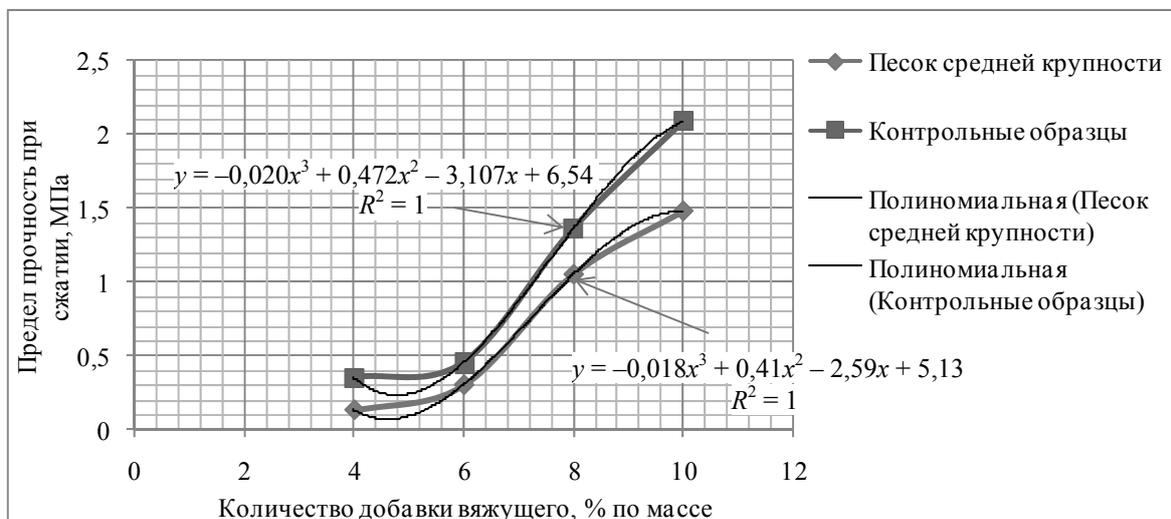


Рис. 2. Изменение предела прочности при сжатии водонасыщенных образцов для песка средней крупности в зависимости от дозировки композиционного вяжущего

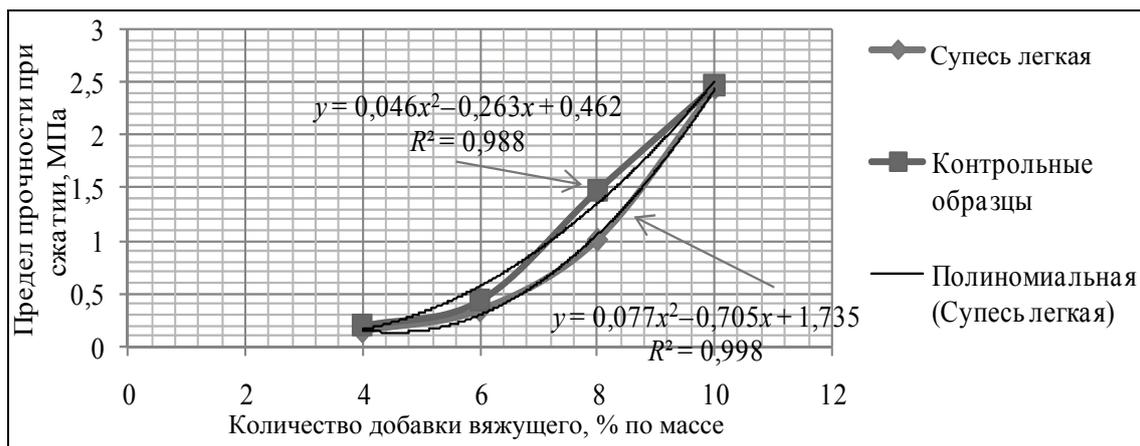


Рис. 3. Изменение предела прочности при сжатии водонасыщенных образцов для супеси легкой в зависимости от дозировки композиционного вяжущего

Введение добавки золы-уноса в количестве большем, чем 30% от массы портландцемента, снижает предел прочности при сжатии, что негативно сказывается на общей прочности цементогрунта. Анализ полученных зависимостей также указывает на повышение эффективности укрепления грунта в зависимости от содержания глинистых частиц в грунте.

**Заключение.** В настоящее время все более широкое развитие получают комплексные методы укрепления грунтов, при которых одновременно используют несколько вяжущих реагентов, а также вводят отходы промышленных производств.

Полученные данные по прочности на сжатие показывают, что все изученные образцы композиционных цементов с содержанием микронаполнителя до 50% могут быть рекомендованы для укрепления грунтов, так как согласно ГОСТ 23558–94 марка по прочности на сжатие вяжущих материалов для укрепления грунтов должна быть, как уже было сказано ранее, не ниже М60.

Проведенные исследования показали, что указанные отходы могут быть использованы

для получения смешанных цементов и рекомендованы для дорожного строительства.

Разработанная математическая модель структурообразования цементогрунта позволяет осуществлять прогноз эксплуатационных свойств будущей дорожной конструкции и имеет следующие преимущества:

- возможность выбора местных грунтов, наиболее пригодных для укрепления;
- более точное дозирование и равномерное распределение композиционного вяжущего в цементогрунте;
- возможность некоторого уменьшения дозировки вяжущих и других компонентов за счет применения отходов промышленных производств с обеспечением требуемого модуля упругости и прочности дорожной конструкции;
- снятие экологического налога с предприятий за счет использования их отходов при получении композиционного цемента;
- получение потенциального экономического эффекта до 92,72 млн. руб./км при строительстве лесных автомобильных дорог из местных грунтов, укрепленных композиционным вяжущим.

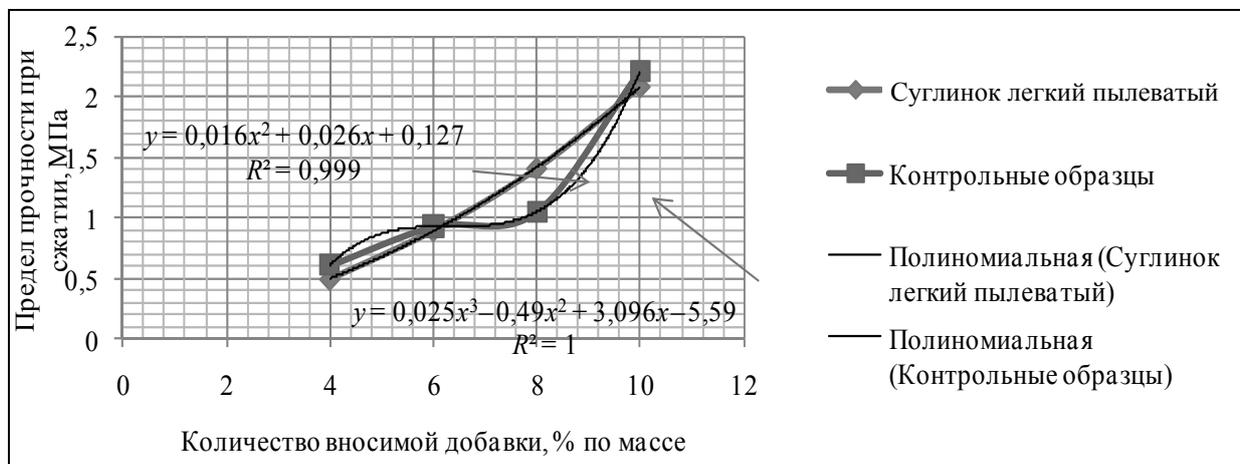


Рис. 4. Изменение предела прочности при сжатии водонасыщенных образцов для суглинка легкого пылеватого в зависимости от дозировки композиционного вяжущего

### Литература

1. Васильев Ю. М., Агафонов В. П., Исаев В. С. Дорожные одежды с основаниями из укрепленных материалов. М.: Транспорт, 1989. 191 с.
2. Лыщик П. А., Бавбель Е. И., Науменко А. И. Состав минерального вяжущего для укрепления дорожных грунтов // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 33–36.
3. Лыщик П. А., Науменко А. И. Механизмы структурообразования дорожных грунтов, укрепленных минеральными вяжущими // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 42–44.
4. Лыщик П. А., Науменко А. И. Новые композиционные материалы для укрепления дорожных грунтов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, ФГБОУ ВПО ВГЛТА, Воронеж, РФ. 2014. Т. 2. № 3–3 (8–3). С. 200–202.

### References

1. Vasil'ev Ju. M., Agafontsev V. P., Isaev V. S. *Dorozhnye odezhdy s osnovanijami iz ukreplennykh materialov* [Road clothes with the bases from the strengthened materials]. Moscow, Transport Publ., 1989. 191 p.
2. Lyshchik P. A., Bavbel' E. I., Naumenko A. I. Structure mineral knitting for strengthening of road soils. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 33–36 (in Russian).
3. Lyshchik P. A., Naumenko A. I. Mechanisms of structurization of the road soils strengthened by the mineral knitting. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 42–44 (in Russian).
4. Lyshchik P. A., Naumenko A. I. [New composite materials for strengthening of road soils]. *Aktual'nye napravlenija nauchnykh issledovanij XXI veka: teorija i praktika* [Actual Directions of Scientific Researches of the XXI-st Century: the Theory and Practice], Voronezh, RF, 2014, vol. 2, no. 3–3 (8–3), pp. 200–202 (in Russian).

### Информация об авторах

**Лыщик Петр Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры лесных дорог и организации вывозки древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь).

**Игнатенко Василий Васильевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь).

**Бавбель Евгения Ивановна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных дорог и организации вывозки древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: jane18@mail.ru

**Науменко Андрей Иванович** – магистр технических наук, аспирант кафедры лесных дорог и организации вывозки древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Andrei\_Naymenko\_bsty@mail.ru

### Information about the authors

**Lyshchik Petr Alekseevich** – Ph. D. Engineering, assistant professor, professor, Department of Forest Roads and Timber Transportation. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus).

**Ignatenko Vasiliy Vasil'evich** – Ph. D. Engineering, assistant professor, assistant professor, Department of Higher Mathematics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus).

**Bavbel' Yevgeniya Ivanovna** – Ph. D. Engineering, assistant professor, assistant professor, Department of Forest Roads and Timber Transportation. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: jane18@mail.ru

**Naumenko Andrey Ivanovich** – master of Engineering, graduate student, Department of Forest Roads and Timber Transportation. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Andrei\_Naymenko\_bsty@mail.ru

Поступила 20.02.2015