

5. Kozlov V.G. The influence of weather and climatic factors on the systems of the driver-car-road-environment complex // Transport. Transport facilities. Ecology. 2019. № 1. P. 30-36.
6. Kotlyarov R.N. Theoretical substantiation of the safety conditions for the movement of logging road trains in automobile flows // Forestry Engineering Journal. 2011. № 2. P. 41-44.
7. Logojda V.S. Methodological features of the alignment design according to the method of reference elements // Fundamental research. 2016. № 12-1. P. 62-68.
8. Lomakin D.V., Mikova E.YU. Assessment of the impact on the speed of the constant parameters of the plan and profile in the various states of the road surface // Forestry Bulletin. 2017. V. 21, № 6. P. 43-49.
9. Ryabova O.V. The impact of the road complex on the environment: state and forecast // Russian Journal of Building Construction and Architecture. Materialy mezhhregional. nauch.-prakt. konf. «Vysokie tekhnologii v ekologii». 2010. № 1. P. 170-174.
10. Ryabova O.V. Design of energy-saving structures of highways // Informacionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya. 2008. № 1 (44). P. 106-113.
11. Sidenko V.M., Batrakov O.T., Leushin A.I. Technology of road construction. Technology of construction of road clothes. Kiev: Vishcha shkola, 1970. CH. 2. 230 p.
12. CHudinov S.A. Improving the efficiency of engineering and geodetic surveys in the design of logging roads // Modernizaciya i nauch. issledovaniya v transportnom komplekse. 2020. V. 1. P. 359-363.
13. Cantarella G.E., Pavone G., Vitetta A. Heuristics for urban road network design: Lane layout and signal settings // European J. of Operational Research. 2006. V. 175 (3). P. 1682-1695.
14. Chen Z., He F., Yin Y., Du Y. Optimal design of autonomous vehicle zones in transportation networks // Transportation Research. Part B: Methodological. 2017. V. 99. P. 44-61.
15. Chernyshova E.V., Mogutnov R.V., Levushkin D.M. Mathematical modeling of damage function when attacking file server // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series. 2018. № 1015 (3).
16. Fedotov A.I., Tikhov-Tinnikov D.A., Ovchinnikova N.I., Lysenko A.V. Simulation of car movement along circular path // Innovations and prospects of development of mining machinery and electrical engineering - Mechanical engineering. Institute of Physics Publishing, 2017. P. 082018.
17. Gulevsky V.A., Logoyda V.S., Menzhulova A.S. Method of individual forecasting of technical state of logging machines // Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. № 327 (4).
18. Logoyda V.S., Tikhomirov P.V., Zelikov V.A., Brovchenko A.D., Razgonyeva V.V. Development of the method for individual forecasting of technical state of logging machines // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. № 8 (5). P. 2178-2183.
19. Dorokhin S.V., Chernyshova E.V. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12, № 2. P. 511-515.
20. Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Timokhova O.M. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. № 25 (3). P. 678-694.

УДК 625.7/.8

DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-192-195

## Использование фосфорных гранулированных шлаков для приготовления вяжущих веществ при строительстве лесовозных автомобильных дорог

И.А. Викулин

Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,  
ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, Россия  
ilona.savchenko.2016@mail.ru

Статья поступила 26.09.2023, принята 20.11.2023

*Одним из эффективных материалов, используемых в композиционных вяжущих, считают тонкомолотый гранулированный шлак. Данный материал достаточно хорошо изучен в виде активной добавки в цементы. Известно, что для производства шлаковых цементов можно применять основные и кислые шлаки, богатые глиноземом. Определена целесообразность применения шлаков в составе комплексных вяжущих и обоснованы рациональные условия активации шлаков с целью получения шлаковых вяжущих. Предложены составы композиционных строительных вяжущих с использованием фосфорных гранулированных шлаков.*

**Ключевые слова:** фосфорные гранулированные шлаки; лесовозные автомобильные дороги; вяжущие вещества.

## Use of phosphorus granulated slags for the preparation of binders in the construction of logging roads

I.A. Vikulin

Air Force Academy named after N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin; 54a, Starykh Bolshevikov St., Voronezh, Russia  
ilona.savchenko.2016@mail.ru

Received 26.09.2023, accepted 20.11.2023

*One of the effective materials used in composite binders is considered to be finely ground granulated slag. This material has been studied quite well as an active additive in cements. It is known that basic and acidic slags rich in alumina can be used for the production of slag cements. The feasibility of using slags as part of complex binders has been determined and rational conditions for activating slags in order to obtain slag binders have been substantiated. Compositions of composite construction binders using phosphorus granulated slags have been proposed.*

**Keywords:** phosphorus granulated slag; logging roads; binders.

**Введение.** Основными минералами фосфорных шлаков являются псевдоволластонит ( $\alpha - CaO * SiO_2$ ). В небольшом количестве часто присутствует метасиликат кальция — волластонит ( $\beta - CaO * SiO_2$ ). При содержании в шлаках 3,5–4,5 %  $Al_2O_3$  и 4,0–4,9 %  $MgO$  основной кристаллической фазой является мелилит переменного состава от почти геленитового ( $2CaO * Al_2O_3 * SiO_2$ ) до почти окермативного ( $2CaO * MgO * 2SiO_2$ ). Кроме того, во всех случаях в шлаках присутствует минерал куспидин ( $3CaO * 2SiO_2$ ).

**Постановка задачи.** Соединения фосфора при малом их количестве, возможно, входят в состав псевдоволластонита. По данным К.В. Гладких, гранулированные фосфорные шлаки сложены метасиликатным стеклом. Основное отличие их от доменных шлаков заключается в повышенном содержании  $P_2O_5$  (до 3 %), наличием  $CaF_2$  (до 3 %) и малым содержанием  $Al_2O_3$  (2–3 %) против 5–16 % в доменных шлаках.

По классификации шлаков и зол как исходных компонентов вяжущих, разработанных А.В. Волженским и Б.Н. Виноградовым, фосфорные гранулированные шлаки относятся к малоактивным, а рекомендуемыми условиями твердения вяжущих на основе этих шлаков являются пропаривание и автоклавная обработка. Так при активизации фосфорных гранулированных шлаков известью (до 15 %) и тепловлажностной обработке (пропаривание) можно получать материал с пределом прочности при сжатии не выше 100–180 кг/см<sup>2</sup>. В условиях нормального твердения (что имеет место при укреплении грунтов) исследуемые шлаки как в чистом виде, так и в присутствии активизаторов твердения (извести и цемента) вяжущие свойства обнаруживают лишь в слабой степени.

Низкая активность фосфорных шлаков, очевидно, объясняется особенностью их химико-минералогического состава. Незначительное содержание в фосфорных шлаках глинозема, кстати говоря, наиболее ценного компонента шлака, повышающего его активность, обуславливает получение шлаков, состоящих, в основном, из малоактивного метасиликатного стекла и метасиликатов кальция. Малая реакционная способность этих силикатов кальция и соответствующих им стекол общеизвестна и обуславливается весьма устойчивым строением их кристаллической решетки. Эта устойчивость будет еще большей в присутствии фосфора и фтора, являющихся хорошими минерализаторами и снижающими реакционную способность шлаков.

Все вышесказанное и обуславливает низкую гидравлическую активность фосфорных шлаков, которые даже в присутствии активизаторов твердения (известь, цемент) при нормальных условиях твердения вяжущие свойства обнаруживают лишь в слабой степени. Поэтому для повышения их активности необходимо искать иные активизаторы, способные увеличить реакционную способность фосфорных шлаков и позволяющие получить вяжущее, способное твердеть в нормальных условиях (что имеет место при укреплении грунтов лесовозных автомобильных дорог).

**Решение задачи.** В качестве таких активизаторов могут быть использованы различные соли и щелочи натрия. При этом использование жидкого стекла вместо растворов едкого натра или соды дает больший эффект как в части прочности, так и долговечности бетонов и конструкций.

Эффективность использования жидкого стекла в качестве активизирующей добавки для доменного шлака доказана многими исследователями. Эта эффективность обуславливается высокой активностью жидкого стекла, в результате чего оно в той или иной степени взаимодействует со всеми минералогическими составляющими доменного шлака.

Процесс твердения доменного шлака под действием жидкого стекла разделяется на несколько стадий (90):

1. Щелочное корродирование стекловидной и кристаллической составляющей шлака под действием водных растворов щелочных силикатов;

2. Образование вторичных соединений вследствие взаимодействия между собой и щелочным силикатом продуктов разложения шлака.

3. Кристаллизация и карбонизация новообразований, количество и характер которых зависит от состава исходных продуктов.

Продукты взаимодействия фосфорных шлаков и жидкого стекла ранее не изучались и поэтому ответить на вопрос, какие продукты образуются при их взаимодействии, будут ли это высокопрочные и стабильные силикаты или какие-либо другие вещества, весьма затруднительно. Отсюда затруднительно ответить и на вопрос о качестве вяжущего, получаемого на основе фосфорных шлаков и жидкого стекла. Хотя предварительное суждение по этому вопросу, по-видимому, можно получить при рассмотрении различных силикатных систем.

Из литературных источников известно, что химический состав и структура гидросиликатов в системе  $CaO-SiO_2-H_2O$  изменяется в широких пределах и зависит от исходных продуктов и условий синтеза, при которых изменяется не только соотношение  $CaO: SiO_2$ , но и количество связанной воды. При температуре 18–30 °С состав гидросиликатов кальция в системе  $CaO-SiO_2-H_2O$  изучался по продуктам гидратации  $3Ca * SiO_2, \beta - 2Ca * SiO_2$ , а также при реакции между золей  $SiO_2 * ag$  и  $Ca(OH)_2$  (132). Следует особо подчеркнуть, что определение состава образовавшихся в этих условиях гидросиликатов кальция весьма затруднительно вследствие аморфной или субмикроструктурной структуры новообразований. По мнению Э. Флинта и У. Уэлса, состав гидросиликатов кальция (отношение  $CaO: SiO_2$  в осадках) при взаимодействии золя кремнекислоты и гидроокиси кальция зависит от равновесной концентрации  $CaO$ . Ряд других исследователей (Тейлор, Калаусек) считают, что в этих условиях образуются два гидросиликата кальция:  $CSH(B)C$  переменным соотношением  $CaO: SiO_2$  от 1,0 до 1,5 и  $C_2SH_2$  с соотношением  $CaO: SiO_2$  от 1,90 до 1,94. Эти же гидросиликаты образуются и при гидратации  $\beta - C_2S$ .

Из приведенных выше гидросиликатов кальция особый интерес представляет  $CSH(B)$  со слоистыми минералами набухающих глин, проявляющееся в способности  $CSH(B)$  обратимо отдавать определенное количество воды, заключенной между слоями кристаллической решетки. Изучая свойства паст гидросиликатов кальция с основностью 0,8–1,5 (молярное  $CaO: SiO_2$ ) И.О. Лукьянова и П.А. Ребиндер пришли к выводу, что их дисперсные структуры не являются вполне жесткими, а обратимы в условиях поперечной влажности и поэтому не могут быть отнесены к вполне водостойкими. Это и сближает их с конденсационными структурами, образующимися при высыхании глин. С другой стороны, эти структуры не способны к самопроизвольному диспергированию в воде, свойственному структуре натриевого бентонита, и в этом отношении сохраняют свойства кристаллизационных структур. Контакты в таких структурах являются непосредственными высокопрочными и жесткими фазовыми контактами при низкой и приобретают ограниченную пластичность при высокой относительной влажности.

По своей структуре волокнистые гидросиликаты близки к пластинчатому тобермориту. По данным Калаусека и Роя, различие между ними состоит в том, что в  $CSH(B)$  пластинки тоберморита закручены в трубки, так же, как в антигорите и хризолите.

Электронные микроэлектрографии, полученные Л. Грудемо, подтверждают это. В настоящее время считается, что тоберморит является хорошо закристаллизованным  $CSH(B)$ .

$CSH(B)$  обладает высокой прочностью на сжатие по сравнению с другими гидросиликатами. Однако он не устойчив к действию влажного углекислого газа, под воздействием которого он разлагается.

Имеющиеся в литературе сведения о четвертых соединениях в системе  $Na_2O-CaO-SiO_2-H_2O$  указывают на многообразие натриево-кальциевых силикатов. Так ряд отечественных ученых, исследовав некоторые части этой системы при 25°, показали, что при содержании в растворе 0,2 г/л  $Na_2O$  гель, находящейся в равновесии с твердой  $Ca(OH)_2$ , имел состав 0,003  $Na_2O * 1,94 CaO * SiO_2 * 3,2 H_2O$ . Увеличение концентрации  $Na_2O$  до 20 г/л приводило к изменению состава

новообразований до  $0,25 \text{ Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2,8 \text{ H}_2\text{O}$ , а при дальнейшем увеличении  $\text{Na}_2\text{O}$  до 101 г/л состав новообразований оставался без изменений.

П.А. Ребиндером при изучении равновесия и свойств коллоидных фаз в четвертой системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  была установлена последовательность образования рентгеноаморфных и субмикрористаллических натриево-кальциевых гидросиликатов и зависимость их состава от модуля равновесного раствора силиката натрия.

На принципиальную возможность образования соединений в виде  $x \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot y \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot z \cdot \text{H}_2\text{O}$  указывают и другие авторы, которые отмечают, что в условиях опыта такие соединения не образуют каких-либо кристаллов и находятся в гелеобразном состоянии. В.М. Москвин и Г.С. Рояк, изучавшие продукты взаимодействия опала с гидратом окиси натрия и известью при  $20^\circ\text{C}$ , не подтвердили существующего мнения об образовании четырехкомпонентного соединения. По мнению авторов, в данных условиях образуются низкоосновные гидросиликаты кальция серии  $\text{CSH}(\text{B})$  и гидросиликаты натрия переменного состава.

При взаимодействии псевдovolластонита ( $\alpha - \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) с раствором щелочного силиката псевдovolластонит, по всей вероятности, постепенно разрушается. Так Э. Тило и другими было показано, что псевдovolластонит нестабилен в щелочной среде. Крепкая 20%-ная щелочь при  $180^\circ$  разрушает его в течение 8 ч, количественно превращая псевдovolластонит в натриево-кальциевый гидросиликат состава  $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . Щелочь меньшей концентрации (8%-ный раствор  $\text{NaOH}$ ) действует аналогичным образом, хотя при этом происходит неполное разложение псевдovolластонита.

Таким образом, по мнению большинства исследователей, основным продуктом образования в системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  являются натриево-кальциевые гидросиликаты.

В системе  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  известны три группы четвертых соединений: гидрогеленит, гидрогранаты, калициевые цеолиты. Для нас наибольший интерес представляет гидрогеленит с точки зрения возможного его образования при взаимодействии шлаков с жидким стеклом при компактных температурах. Гидрогеленит ( $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) впервые был получен Стретлингом (136) при взаимодействии обожженного каолина с насыщенным раствором извести при температуре  $20-30^\circ$ . Позднее Штраус получил его путем длительной гидратации стекловидного геленита при этих же температурах. Он уже установил, что гидрогеленит устойчив в средах, содержащих малое количество извести в жидкой фазе. При повышенных концентрациях извести гидрогеленит переходит в гидрогранат. Это явление, а именно ненасыщенность жидкой фазы известью, несомненно, будет иметь место при затворении фосфорных шлаков жидким стеклом, так как растворимость извести в присутствии  $\text{NaOH}$  крайне незначительна. Поэтому образование гидрогеленита в системе «фосфорный шлак – жидкое стекло» вполне возможно. Образование гидрогеленита становится еще более реальным в случае использования фосфорного шлака, активизированного жидким стеклом для укрепления грунтов, когда твердение вяжущего будет происходить при невысоких температурах. Так как установлено, что гидрогеленит образуется при температуре не выше  $50^\circ\text{C}$ . Выше этой температуры происходит образование гидрогранатов, причем этот процесс резко ускоряется с повышением температуры.

Таким образом, при взаимодействии фосфорных шлаков с жидким стеклом возможно образование гидрогеленита, хотя в формировании структуры вяжущего эти новообразования, вероятно, будут носить подчиненный характер ввиду малого содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в фосфорных шлаках.

Изучением четвертых соединений в системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  занимались многие исследователи. Эти исследователи отмечают разноречивость в составе получающихся продуктов. Так, Искольдский и Дружинина утверждают, что образуются лишь механические смеси окислов  $\text{Na}_2\text{O}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$  непостоянного состава. Другие считают, что конечным продуктом взаимодействия этих окислов в жидкой фазе являются алюмонатриевые гидросиликаты. Последняя

точка зрения нашла наиболее широкое признание. Относительно же природы алюмонатриевых гидросиликатов имеются разноречивые высказывания. Так, В.Н. Вернадский, М.С. Лилеев, В.А. Майзель и др. относят эти соединения к пермютидам. Другие исследователи, синтезировавшие алюмонатриевые гидросиликаты при  $95-200^\circ$  путем взаимодействия натриевоалюминатных растворов с кремнезолом, пришли к выводу, что они являются цеолитами. По-видимому, при температуре  $20-30^\circ$  действительно образуются пермютидовые соединения, которые при продолжительной кристаллизации и повышенной температуре преобразуются в цеолиты.

Таким образом, при взаимодействии окислов в присутствии воды в нормальных условиях (что имеет место при укреплении грунтов) наиболее вероятно образование алюмонатриевых гидросиликатов пермютидового типа.

Продукты реакции в системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  изучались М.А. Матвеевым и Г.М. Пужановым. Эти авторы изучали пятнерную систему по продуктам взаимодействия геленита и меленита (наиболее распространенные фазы доменного шлака, а также встречающиеся в фосфорных шлаках) с раствором натриевого силиката (жидким стеклом) и щелочью ( $\text{NaOH}$ ). Исследования проводились с помощью петро-, термо- и рентгенографического методов анализа образцов, твердеющих в тепловлажностных условиях при температуре  $90^\circ\text{C}$  в течение 100 ч, а также суспензии ( $20^\circ\text{C}$ ). В результате было установлено, что основными новообразованиями в данном случае являются гидрогеленит, низкоосновные гидросиликаты кальция  $\text{CSH}(\text{B})$  состава —  $(0,8-1,5)\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (0,5-2,0)\text{H}_2\text{O}$ , гиrolит и щелочной гидросиликат.

П. Дига проводил исследования явления твердения гранулированных доменных шлаков под действием активаторов  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и  $\text{NaOH}$  с помощью рентгенографического метода. При этом отмечалось, что процесс твердения гранулированного шлака сопровождается преобразованием стекловидной решетки в кристаллическую. Это преобразование, хотя и прогрессирующее, остается, тем не менее, очень частичным и недостаточным для точного определения образовавшихся составов, каков бы ни был активатор. Однако представляется, что выделяются кристаллические компоненты, соответствующие мелелиту и трехкальциевому силикату.

Все это не согласуется с ранее проведенными исследованиями, где авторы указывают, что при взаимодействии доменного шлака с жидким стеклом при нормальной температуре ( $20^\circ\text{C}$ ) образуется щелочной гель кремниевой кислоты. И только после продолжительной гидратации при температуре  $100^\circ\text{C}$  удается наблюдать появление кристаллических фаз, которые отнесены к анальциму ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) и шабазиту ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{SiO}_2 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ), хотя точная идентификация последнего, как указывают сами авторы, требует дополнительных исследований.

**Выводы.** Анализ литературных данных позволяет сделать следующие выводы.

1. При укреплении грунтов вяжущими необходимо учитывать состав и свойства грунтов, их способность к химическому и физико-химическому взаимодействию с вяжущими, а также состав и свойства вводимых в грунты вяжущих и те процессы химического и физико-химического порядка, которые протекают между грунтом и вяжущим, а также в самих вяжущих.

2. Метод укрепления грунтов шлаками начинает входить в практику дорожного строительства. В настоящее время, в основном, используются различные металлургические шлаки как в чистом виде, так и активизированные различными добавками, вид и количество которых определяется, главным образом, химико-минералогическим составом используемых шлаков.

3. Фосфорный гранулированный шлак для укрепления грунтов (с целью устройства конструктивных слоев дорожных одежд) следует использовать совместно с активизирующими добавками.

4. Наиболее подходящими активизирующими добавками для фосфорного гранулированного шлака, очевидно, следует считать различные соли и щелочи натрия, которые обладают

большей активизирующей способностью по сравнению с соединениями щелочноземельных металлов. При этом предпочтительно использовать жидкое стекло вместо растворов едкого натра или соды, так как жидкое стекло дает большой эффект как в части прочности, так и долговечности различных конструкций.

5. При изучении возможности использования вяжущего на основе фосфорных гранулированных шлаков и жидкого

стекла для укрепления грунтов необходимо в первую очередь знание свойств самих вяжущих и процессов, в них происходящих, с выявлением состава новообразований, обуславливающих формирование структуры вяжущего, так как в составе укрепленного грунта именно вяжущие являются основным и ведущим фактором, обуславливающим коренное качественное изменение природных свойств грунта.

#### Литература

1. Бурмистров Д.В. Методика определения влияния природных факторов на стоимость строительства земляного полотна лесовозных дорог // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 2 (30). С. 179-184.
2. Гусев Ю.В. Проектирование структуры информационного обеспечения лесовозного автомобильного транспорта // Изв. С.-Петербур. лесотехн. акад. 2016. № 217. С. 131-141.
3. Зеликова Ю.А. Комплексные экспериментальные исследования изменения параметров и характеристик дорожных условий, транспортных потоков и режимов движения под влиянием климата и погоды // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8, № 2 (30). С. 156-168.
4. Камусин А.А. Исследования по использованию укрепленных грунтов, местных материалов и отходов промышленности для строительства дорожных одежд лесовозных дорог. Saint-Louis, Missouri, USA: Science and Innovation Center Publishing House, 2017. 184 p.
5. Козлов В.Г. Влияние погодно-климатических факторов на системы изменения параметров и характеристик дорожных условий, транспортных сооружений. Экология. 2019. № 1. С. 30-36.
6. Котляров Р.Н. Теоретическое обоснование условий безопасности движения лесовозных автопоездов в автомобильных потоках // Лесотехнический журнал. 2011. № 2. С. 41-44.
7. Логойда В.С. Методологическое обоснование особенностей проектирования трассы по методу опорных элементов // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-1. С. 62-68.
8. Ломакин Д.В., Микова Е.Ю. Оценка влияния на скорость движения постоянных параметров плана и профиля при различных состояниях поверхности дороги // Лесной вестник. 2017. Т. 21, № 6. С. 43-49.
9. Рябова О.В. Воздействие автодорожного комплекса на окружающую среду: состояние и прогноз // Науч. вестн. Воронежского ГАСУ. Материалы межрегионал. науч.-практ. конф. «Высокие технологии в экологии». 2010. № 1. С. 170-174.
10. Рябова О.В. Проектирование энергосберегающих конструкций автомобильных дорог // Информационные технологии моделирования и управления. 2008. № 1 (44). С. 106-113.
11. Сиденко В.М., Батраков О.Т., Леушин А.И. Технология строительства автомобильных дорог. Технология строительства дорожных одежд. Киев: Вища школа, 1970. Ч. 2. 230 с.
12. Чудинов С.А. Повышение эффективности инженерно-геодезических изысканий при проектировании лесовозных дорог // Модернизация и науч. исследования в транспортном комплексе. 2020. Т. 1. С. 359-363.
13. Cantarella G.E., Pavone G., Vitetta A. Heuristics for urban road network design: Lane layout and signal settings // European J. of Operational Research. 2006. V. 175 (3). P. 1682-1695.
14. Chen Z., He F., Yin Y., Du Y. Optimal design of autonomous vehicle zones in transportation networks // Transportation Research. Part B: Methodological. 2017. V. 99. P. 44-61.
15. Chernyshova E.V., Mogutnov R.V., Levushkin D.M. Mathematical modeling of damage function when attacking file server // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series. 2018. № 1015 (3).
16. Fedotov A.I., Tikhov-Tinnikov D.A., Ovchinnikova N.I., Lysenko A.V. Simulation of car movement along circular path // Innovations and prospects of development of mining machinery and electrical engineering - Mechanical engineering. Institute of Physics Publishing, 2017. P. 082018.
17. Gulevsky V.A., Logoyda V.S., Menzhulova A.S. Method of individual forecasting of technical state of logging machines // Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. № 327 (4).
18. Logoyda V.S., Tikhomirov P.V., Zelikov V.A., Brovchenko A.D., Razgonyeva V.V. Development of the method for individual forecasting of technical state of logging machines // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. № 8 (5). P. 2178-2183.
19. Dorokhin S.V., Chernyshova E.V. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12, № 2. P. 511-515.
20. Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Timokhova O.M. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. № 25 (3). P. 678-694.

#### References

1. Burmistrov D.V. Technique for determining the influence of natural factors on the cost of construction for the roadbed of logging roads // Sistemny. Metody. Tekhnologii. 2016. № 2 (30). P. 179-184.
2. Gusev YU.V. Designing the structure of information support of the road transport hauling // Izvestia SPbLTA. 2016. № 217. P. 131-141.
3. Zelikova YU.A. Comprehensive experimental research of changing parameters and characteristics of road conditions, transport flows and motion modes under influence of climate and weather // Forestry Engineering Journal. 2018. V. 8, № 2 (30). P. 156-168.
4. Kamusin A.A. Research on the use of reinforced soils, local materials and industrial waste for the construction of road coverings of logging roads. Saint-Louis, Missouri, USA: Science and Innovation Center Publishing House, 2017. 184 p.
5. Kozlov V.G. The influence of weather and climatic factors on the systems of the driver-car-road-environment complex // Transport. Transport facilities. Ecology. 2019. № 1. P. 30-36.
6. Kotlyarov R.N. Theoretical substantiation of the safety conditions for the movement of logging road trains in automobile flows // Forestry Engineering Journal. 2011. № 2. P. 41-44.
7. Logojda V.S. Methodological features of the alignment design according to the method of reference elements // Fundamental research. 2016. № 12-1. P. 62-68.
8. Lomakin D.V., Mikova E.YU. Assessment of the impact on the speed of the constant parameters of the plan and profile in the various states of the road surface // Forestry Bulletin. 2017. V. 21, № 6. P. 43-49.
9. Ryabova O.V. The impact of the road complex on the environment: state and forecast // Russian Journal of Building Construction and Architecture. Materialy mezhhregional. nauch.-prakt. konf. «Vysokie tekhnologii v ekologii». 2010. № 1. P. 170-174.
10. Ryabova O.V. Design of energy-saving structures of highways // Informacionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya. 2008. № 1 (44). P. 106-113.
11. Sidenko V.M., Batrakov O.T., Leushin A.I. Technology of road construction. Technology of construction of road clothes. Kiev: Vishcha shkola, 1970. CH. 2. 230 p.
12. CHudinov S.A. Improving the efficiency of engineering and geodetic surveys in the design of logging roads // Modernizaciya i nauch. issledovaniya v transportnom komplekse. 2020. V. 1. P. 359-363.
13. Cantarella G.E., Pavone G., Vitetta A. Heuristics for urban road network design: Lane layout and signal settings // European J. of Operational Research. 2006. V. 175 (3). P. 1682-1695.
14. Chen Z., He F., Yin Y., Du Y. Optimal design of autonomous vehicle zones in transportation networks // Transportation Research. Part B: Methodological. 2017. V. 99. P. 44-61.
15. Chernyshova E.V., Mogutnov R.V., Levushkin D.M. Mathematical modeling of damage function when attacking file server // Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series. 2018. № 1015 (3).
16. Fedotov A.I., Tikhov-Tinnikov D.A., Ovchinnikova N.I., Lysenko A.V. Simulation of car movement along circular path // Innovations and prospects of development of mining machinery and electrical engineering - Mechanical engineering. Institute of Physics Publishing, 2017. P. 082018.
17. Gulevsky V.A., Logoyda V.S., Menzhulova A.S. Method of individual forecasting of technical state of logging machines // Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. № 327 (4).
18. Logoyda V.S., Tikhomirov P.V., Zelikov V.A., Brovchenko A.D., Razgonyeva V.V. Development of the method for individual forecasting of technical state of logging machines // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. № 8 (5). P. 2178-2183.
19. Dorokhin S.V., Chernyshova E.V. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12, № 2. P. 511-515.
20. Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Timokhova O.M. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. № 25 (3). P. 678-694.